

# **A fénypolarizáció szerepe egyes rovarfajok viselkedésében és a vikingek navigációjában**

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

**Farkas Alexandra**

Témavezetők:

Dr. habil. Horváth Gábor, az MTA doktora, egyetemi tanár

Dr. habil. Kriska György, tudományos főmunkatárs, egyetemi docens



Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar  
Környezettudományi Doktori Iskola (vezető: Dr. Jánosi Imre)

Környezetbiológia Program (vezető: Dr. Ács Éva)

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Biológiai Fizika Tanszék,  
Környezetoptika Laboratórium, Budapest

Magyar Tudományos Akadémia, Ökológiai Kutatóközpont  
Duna-kutató Intézet, Budapest

2018

# Tartalomjegyzék

<b>Bevezetés.....</b>	<b>3</b>
<b>1. fejezet: A fénypolarizáció szerepe egyes rovarfajok viselkedésében.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Irodalmi áttekintés .....</b>	<b>4</b>
1.1.1. A fény polarizációja és annak mérése .....	4
1.1.2. Az égboltn fény polarizációja.....	6
1.1.3. A vízfelszín polarizációja .....	7
1.1.4. A fénypolarizáció érzékelése az állatvilágban.....	9
1.1.5. Poláros fényszennyezés és polarizációs ökológiai csapdák .....	12
<b>1.2. Kedvezőtlen élőhelyek elkerülése a kérészek polarotaktikus viselkedése révén....</b>	<b>15</b>
1.2.1. Bevezetés .....	15
1.2.2. Célkitűzések .....	17
1.2.3. Anyag és módszer.....	17
1.2.4. Eredmények .....	24
1.2.5. Elemzés.....	29
<b>1.3. A szürkületi ég részleges holdfáziskor rendellenes polarizációja és annak tájékozódásban betöltött lehetséges szerepe .....</b>	<b>33</b>
1.3.1. Célkitűzések .....	33
1.3.2. Anyag és módszer.....	33
1.3.3. Eredmények .....	35
1.3.4. Elemzés.....	46
<b>1.4. A napsütötte és holdvilágos ég erdőtűzfüst idején mutatott rendellenes polarizációja és annak tájékozódásban betöltött lehetséges szerepe .....</b>	<b>51</b>
1.4.1. Célkitűzések .....	51
1.4.2. Anyag és módszer.....	53
1.4.3. Eredmények .....	54
1.4.4. Elemzés.....	57
<b>2. fejezet: A fénypolarizáció szerepe a vikingek navigációjában.....</b>	<b>61</b>
<b>2.1. Irodalmi áttekintés .....</b>	<b>61</b>
2.1.1. A vikingek felfedező hajóútvonalai .....	61
2.1.2. A viking kor klimatikus viszonyai .....	62

2.1.3. A vikingek partközeli navigációja.....	63
2.1.4. A vikingek nyílt tengeri tájékozódásának lehetséges segédeszközei .....	64
2.1.5. A vikingek nyílt tengeri tájékozódása napiránytűvel .....	64
2.1.6. A vikingek nyílt tengeri tájékozódása napkővel: az égbolt-polarizációs viking navigáció hipotézise és lépései .....	66
2.1.7. A vikingek nyílt tengeri tájékozódása napkővel: az égbolt-polarizációs viking navigáció légköroptikai feltételei és terepi vizsgálata.....	69
<b>2.2. Az égbolt-polarizációs viking navigáció 2. lépésének planetárium vizs gálata .....</b>	<b>72</b>
2.2.1. Célkitűzések .....	72
2.2.2. Anyag és módszer.....	73
2.2.3. Eredmények.....	81
2.2.4. Elemzés.....	87
<b>2.3. Az égbolt-polarizációs viking navigáció szürkületkor használható eszköze: az alkonyfény-iránytű .....</b>	<b>92</b>
2.3.1. Bevezetés .....	92
2.3.2. Célkitűzések .....	96
2.3.3. Anyag és módszer.....	96
2.3.4. Eredmények.....	100
2.3.5. Elemzés.....	102
<b>Irodalomjegyzék .....</b>	<b>104</b>
<b>Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>121</b>
<b>Összefoglalás .....</b>	<b>122</b>
<b>Summary .....</b>	<b>123</b>

# Bevezetés

A Földünket érő eredendően polarizálatlan napfény polarizációs tulajdonságai a különféle optikai közegekben való szóródás, illetve az eltérő közegek határain történő törés és visszaverődés következtében jelentősen módosulhatnak. Bár az így kialakuló optikai környezetből jövő fény polarizációs tulajdonságai az emberi szem számára gyakorlatilag érzékelhetetlenek, az azokban rejlő többletinformációt számos ízeltlábú, fejlábú és gerinces faj polarizációérzékeny látórendszere például tájékozódásához fel is használja (HORVÁTH & VARJÚ 2004; HORVÁTH *et al.* 2016). E tények ihlették azt az 1967 óta világszerte sokak által elfogadott, ám kísérletileg máig nem bizonyított navigációs hipotézist is, mely szerint az égboltfény polarizációjának vizsgálatát lehetővé tevő napköveket (azaz kalcit-, kordierit- vagy turmalinkristályokat) használva az északi vizek rettegett viking hajósai is kiválóan tájékozódhattak a nyílt vizeken felhős időben is (RAMSKOU 1967).

Doktori értekezésemben először a vizuális környezetünk néhány polarizációs tulajdonságát vizsgálom, majd az így kapott eredmények értelmezésével egyes polarizációérzékeny rovarfajok bizonyos viselkedéseinek magyarázatát adom. Mértém továbbá az égboltfény polarizációján alapuló hipotetikus viking navigációs módszer 2. lépésének pontosságát, valamint részt vettem egy feltételezett új viking navigációs műszer, az alkonyfény-iránytű terepi használhatóságának vizsgálatában is. Mindezek segítenek jobban megérteni egyes rovarfajok fénypolarizáció által vezérelt viselkedését, továbbá előmozdítják a vikingek hipotetikus égbolt-polarizációs navigációjával kapcsolatos, évtizedek óta tisztázatlan kérdések megválaszolását is.

# 1. fejezet

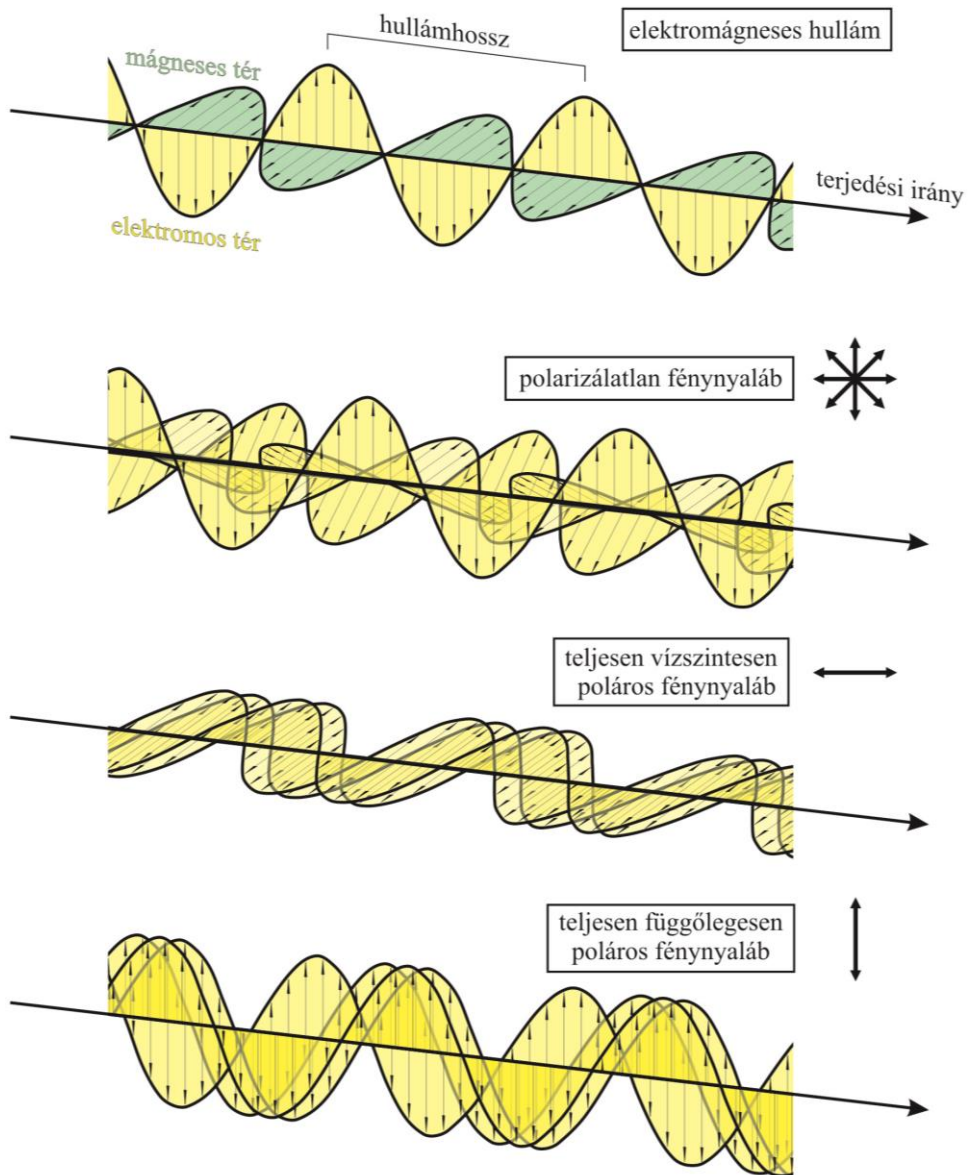
## A fénypolarizáció szerepe egyes rovarfajok viselkedésében

### 1.1. Irodalmi áttekintés

#### 1.1.1. A fény polarizációja és annak mérése

A fény elektromágneses hullám, melyben az  $E$  elektromos és  $M$  mágneses térerősségvektorok egymásra és a terjedési irányra is merőlegesen szinuszosan rezegnek azonos fázisban (HORVÁTH & VARJÚ 2004; HORVÁTH *et al.* 2016). A fény színe a  $\lambda$  hullámhosszal kapcsolatos ( $\lambda$  csökkenése az érzékelt színek a vöröstől a kék felé való eltolódását eredményezi), míg az intenzitása az elektromos térerősség maximumának (amplitúdójának) négyzetével arányos (1.1. ábra). Ha egy adott hullámhosszúságú fényben az elektromágneses rezgés egyetlen irányban történik, akkor teljesen lineárisan poláros fényről beszélünk, a rezgés irányát pedig polarizációiránynak nevezzük. Ekkor a lineáris polarizációfok  $d = 100$  %. Ilyen teljesen lineárisan poláros fény tükröződik például a vízfelületről az úgynevezett Brewster-szögben, mikor a visszavert és a vízben tovahaladó megtört fénysugár egymásra merőleges (a felületre merőleges iránytól mérve  $\theta_{\text{Brewster}} = \arctan n$ , ahol  $n$  a víz törésmutatója). Ha például azonos amplitúdójú és hullámhosszúságú, de sok eltérő rezgésű, teljesen lineárisan poláros fényt keverünk össze, akkor polarizálatlan fényhez jutunk ( $d = 0$  %). Ilyen a Nap fénye, melyben a rezgés minden lehetséges iránya előfordul. Ugyancsak polarizálatlan fény jön az égbolt polarizációsan semleges, neutrális pontjaiból, valamint a vastag felhőkből, továbbá az olyan világos és érdes (matt) felületek is közel polarizálatlan ( $d \approx 0$  %) fényt vernek vissza, mint a porhó vagy a fehér homok. A polarizálatlan és a teljesen lineárisan poláros fény keveréke részlegesen lineárisan poláros fényt eredményez ( $0 \% < d < 100$  %), melyben minden irányú rezgés előfordul, de a teljesen poláros fény rezgésükja kitüntetett, mert ebben az irányban maximális az intenzitás. E kitüntetett irányt nevezzük

polarizációirányának, a  $d$  lineáris polarizációfok pedig azt adja meg, hogy az összintenzitás hányad részét képezi a teljesen poláros fényé. A természetben leggyakrabban részlegesen lineárisan poláros fény fordul elő a fényvisszaverődésnek vagy fényszóródásnak köszönhetően. Ilyen például a szórt égboltfény és szinte minden (nem-fémes) tárgy ilyen fényt ver vissza (HORVÁTH & VARJÚ 2004; HORVÁTH *et al.* 2016).



1.1. ábra. Elektromágneses hullám polarizációja (EGRI 2017).

A fénypolarizációval kapcsolatos biofizikai és környezetoptikai vizsgálatok olyan műszerek kifejlesztését eredményezték, amelyek lehetővé tették a különböző élőhelyek polarizációs sajátosságainak részletes tanulmányozását. A korábban használt pontforrású polariméterek pontosan mérték ugyan a fény  $I$  intenzitását,  $d$  polarizációfokát és  $\alpha$  polarizációs szögét, nagy hátrányuk volt ugyanakkor, hogy használatukkal a látótér csupán néhány fokal

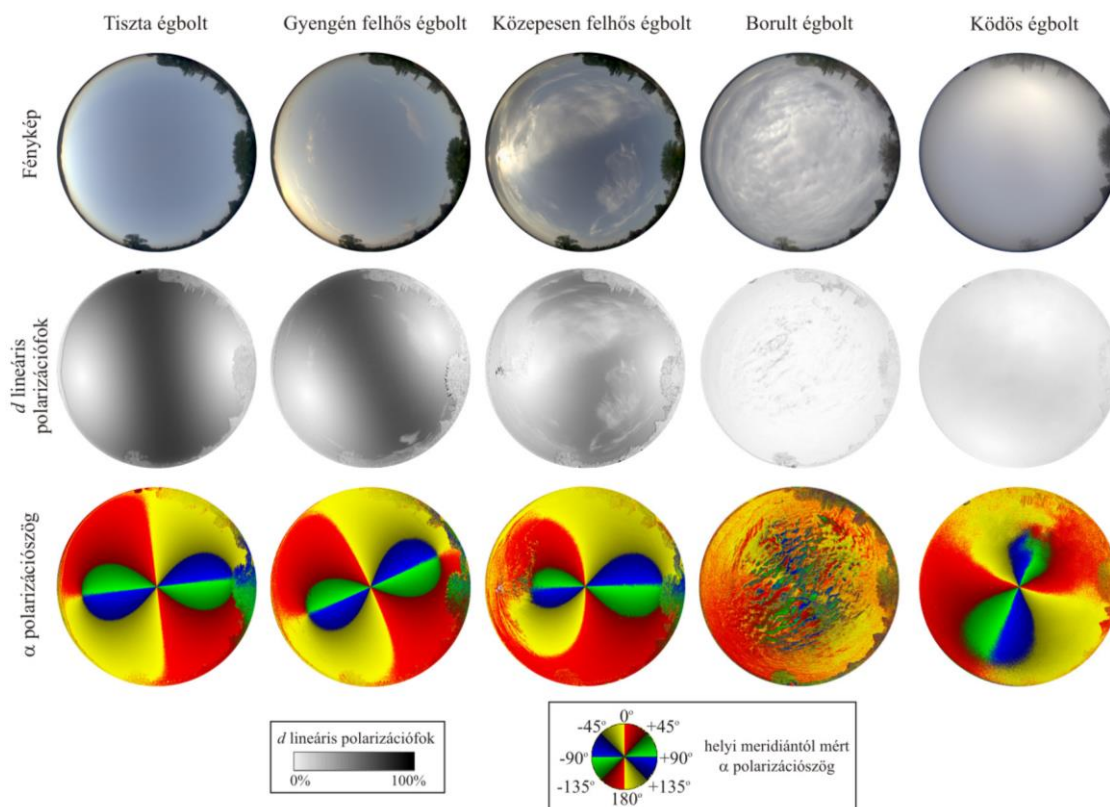
szögtartománya volt vizsgálható (COLLETT 1994). Az egész égbolt ezzel való letapogatása órákat vett volna igénybe, mialatt maga a mérendő polarizációs mintázat a Föld forgása miatt nagymértékben módosulna. Az utóbbi évtizedek fejlesztéseinek köszönhetően ma már képalkotó módon és nagy szögtartományon belül is mérhető az égboltna polarizációja (PROSCH *et al.* 1983; HORVÁTH & ZEIL 1996; VOSS & LIU 1997; BARTA *et al.* 2015).

### 1.1.2. Az égboltna polarizációja

Az égboltna polarizációs mintázata tiszta (GÁL *et al.* 2001a), részben felhős (POMOZI *et al.* 2001a), borult (HEGEDÜS *et al.* 2007a) és ködös időben (1.2. ábra; HEGEDÜS *et al.* 2007b), erdőtűzfüst (HEGEDÜS *et al.* 2007c) és vulkáni hamu jelenléte miatt fakó (COULSON 1983), illetve telihold által megvilágított égbolt esetén is jellegzetes (GÁL *et al.* 2001b). Az egyszeres szóráson alapuló Rayleigh-modell viszonylag jól leírja a tiszta ég polarizációs mintázatának főbb jellemzőit (HORVÁTH & VARJÚ 2004): (i) A  $d$  lineáris polarizációfok a Nap és az antinap környezetében igen alacsony, illetve nulla, az ég többi részén pedig ennél nagyobb. Értéke a Naptól távolodva fokozatosan nő, majd a Naptól  $90^\circ$ -ra éri el maximumát, ahonnan az antinap felé haladva ismét fokozatosan csökken. (ii) Az égboltna  $\alpha$  polarizációs szöge megközelítőleg merőleges a megfigyelő, a Nap és a megfigyelt pont által meghatározott szórási síkra, és jellegzetes tükörszimmetriát mutat, aminek szimmetriatengelye a szoláris és antiszoláris meridián. E tengely számos polarizációérzékeny állat térbeli tájékozódásának viszonyítási irányaként szolgál, mikor azok más vizuális vagy érzéki (például mágneses) jelek híján vannak (HORVÁTH & VARJÚ 2004). Biológiai szempontból tehát az egyik legfontosabb paraméter az ég azon hányada, amit a polarizációérzékeny látórendszerű állatok tájékozódásukkor még érzékelni képesek (LABHART & MEYER 1999; POMOZI *et al.* 2001a).

A mért és az elméleti égbolt-polarizációs mintázatok között a legnagyobb különbséget a  $d = 0\%$  polarizációfokkal jellemezhető neutrális (polarizálatlan) pontok jelentik (GÁL *et al.* 2001a; HORVÁTH & VARJÚ 2004). Az Arago-, Babinet- és Brewster-pontok az 1809-es, 1840-es és 1842-es évben történt felfedezésük óta számos földi polarimetriai mérés tárgyát képezték, mivel égi helyük érzékeny indikátora a légköri aeroszol típusának és mennyiségének (NEUBERGER 1950). A 4. neutrális pont helyét szimmetriai megfontolások és a napfény légköri szóródását tartalmazó modellek is előre jelezték (ROZENBERG 1966; BRÉON *et al.* 1997), ám annak létezését hőlégballonról végzett képalkotó polarimetriai vizsgálatokkal HORVÁTH *et al.* (2002) bizonyította elsőként.

A tiszta égboltra jellemző  $d$  polarizációfok felhők, köd és füst jelenléte miatt erősen lecsökken (GÁL *et al.* 2001a; HEGEDÜS *et al.* 2007a,c), míg a tiszta ég  $\alpha$  polarizációs szögének mintázata robosztus, vagyis a felhők alatt (a felhő típusától, vastagságától és magasságától, valamint a Nap láthatóságától függően) alig változik (KÖNNEN 1985; COULSON 1988; POMOZI *et al.* 2001a). Emellett teljes napfogyatkozás totalitásakor térben és időben olyan bonyolultan változnak a megvilágítási viszonyok, hogy az égbolt polarizációs mintázata ilyenkor drasztikusan megváltozik (POMOZI *et al.* 2001b; HORVÁTH *et al.* 2003; SIPŐCZ *et al.* 2008).



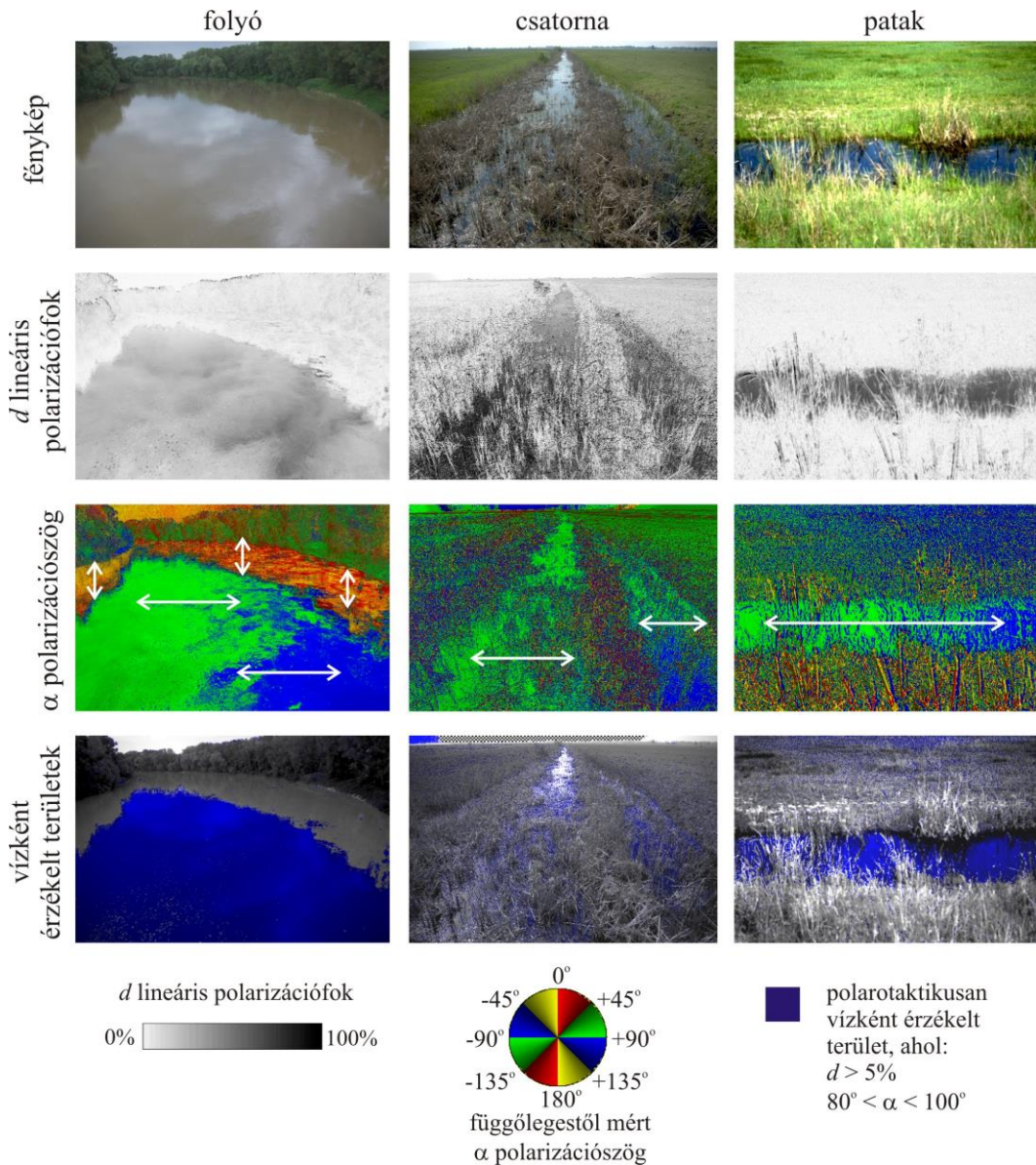
1.2. ábra. Tiszta, felhős, borult és ködös égboltok halszemoptikás fényképei és fénypolarizációs mintázatai (HORVÁTH *et al.* 2016).

### 1.1.3. A vízfelszín tükröződési polarizációja

Egy természetes, hullámmentes vízfelszín felől érkező fény polarizációs tulajdonságait (1.3. ábra) a felszínről közvetlenül visszaverődő, vízszintesen poláros fény és a vízfelszín alól visszaszóródó, a felszíni fénytörés következtében függőlegesen polárossá váló fény intenzitásának aránya, valamint a megfigyelőnek a Naphoz és a vízfelszínhez viszonyított látóiránya szabja meg (HORVÁTH 1995; 2014; GÁL *et al.* 2001c; HORVÁTH & VARJÚ 2004; HORVÁTH *et al.* 2016). Hullámzó vízfelület esetén a kialakuló polarizációs mintázat a hullámmozgásnak megfelelően pontról pontra változik, hiszen a vízfelszín minden egyes



pontjához tartozó elemi felületről más és más szögben érkezik a fény a megfigyelőhöz. Polarizációs szempontból kitüntetett szerepe van a Brewster-szögnek (értéke a víz–levegő határátmenet esetén  $53,5^\circ$  a függőlegetől mérve), amelynél a megtört és a visszavert fénysugár egymással derékszöget zár be, ezáltal az onnan visszavert fény polarizációfoka  $d = 100\%$ , ha a vízfelszín alól nem jön fény (HORVÁTH & VARJÚ 2004).



1.3. ábra. Különböző vízfelületek fényképei és tükröződési polarizációs mintázatai, valamint a polarotaktikus vízirovarok által vizuálisan vízként érzékelt területek. A fehér kettősfejű nyilak a vízről visszaverődő fény polarizációirányát mutatják (HORVÁTH *et al.* 2016).

A sekély, tiszta vízű, illetve a tejszerűen zavaros, szikes vizek, valamint a mély, sötét vizek polarizációs mintázatai jelentősen eltérnek egymástól (BERNÁTH *et al.* 2002). Az előbbieknél a fenékről, illetve a lebegő részokról visszaszóródó, majd a felszínen megtörő függőleges

polarizációjú fény a felszínről visszaverődő, vízszintesen poláros fényhez hozzáadódva csökkenti annak  $d$  polarizációfokát. Sötét, mély vizeknél a vízben történő elnyelődés miatt a vízből jövő, függőlegesen poláros komponens intenzitása minden szintartományban annyira lecsökkenhet, hogy a polarizációirány hullámhossztól függetlenül mindig vízszintes lesz a felszínről tükröződő, vízszintesen poláros napfény vagy égboltfény dominanciája miatt. Ez alól csak a vízfelszín parti növényzet árnyékában lévő tartományai kivételek, ahol a vízszintesen poláros visszavert közvetlen napfény vagy a tükrözött szórt égboltfény erőssége lecsökken, így ezen árnyékos helyek kevésbé lesznek polárosak, és a polarizációirány gyakran függőleges is lehet.

Szembeötlő különbségek vannak az árnyékos és napos vízfelületek polarizációs jellemzői között is, mely eltérések sötét és világos vizek esetében mások (BERNÁTH *et al.* 2002). Az árnyékos foltok  $d$  polarizációfoka jóval alacsonyabb, mint a naposaké, illetve a világos vizeknél az árnyék polarizációiránya a spektrum látható tartományában mindig függőleges, míg a sötét vizeknél vízszintes. Ennek oka, hogy az árnyékos részekben lecsökken a vízfelszínről visszatükröződő, vízszintesen poláros fény intenzitása, miáltal megnő a víz alól visszaszórt, függőlegesen poláros fény hatása. Így a sekély, átlátszó vizeknél a fenékről visszaszórt és a felszínen megtörő, függőlegesen poláros fény dominánsná válik, ami függőleges polarizációt eredményez. Sötét vizeknél a vízből történő fényvisszaszórás az elnyelődés miatt minimális, ezért megmarad a felszínről tükröződő, vízszintesen poláros fény dominanciája, de jóval alacsonyabb  $d$  polarizációfokkal.

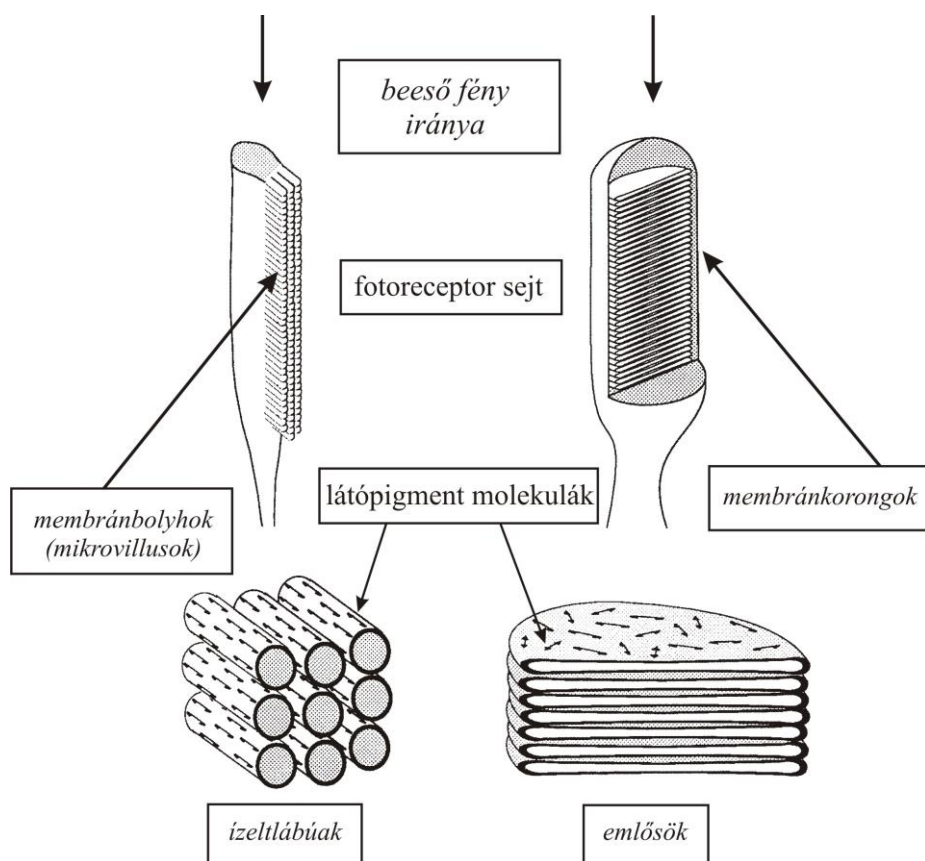
A vízfelszín alól az égbolt polarizációs mintázata a felszíni Snellius-ablakon át érzékelhető, de a fény levegő–víz határfelületnél bekövetkező törése és törési polarizációja miatt e mintázat módosul. A Snellius-ablakon kívül a víz áteresztési polarizációs mintázata tapasztalható, a beeső fény és a víztömeg kölcsönhatása (elnyelés és szórás) eredményeként. Mindkét polarizációs mintázat nagymértékben függ a napállástól (HORVÁTH & VARJÚ 1995; HORVÁTH *et al.* 2016).

#### **1.1.4. A fénypolarizáció érzékelése az állatvilágban**

Számos ízeltlábú, fejlábú és gerinces faj látórendszere alkalmas a fénypolarizáció érzékelésére (WEHNER 1976; WATERMAN 1981; KRISKA 2000; HORVÁTH & VARJÚ 2004). A polarizációlátás alkalmas az égboltfény polarizációs mintázatán alapuló térbeli tájékozódásra (BARTA & HORVÁTH 2004; POMOZI *et al.* 2001a), és a megfelelő élőhelyek felkutatására is (SCHWIND 1985, 1991; BERNÁTH *et al.* 2002; CSABAI *et al.* 2006). Az égboltfény polarizációs

mintázatán alapul például a házi méh (*Apis mellifera*), a kerti poszméh (*Bombus hortorum*), a mezei tücsök (*Gryllus campestris*), a sivatagi hangya (*Cataglyphis bicolor*) és a ganajtúró bogár (*Scarabaeus zambesianus*) tájékozódása is (VON FRISCH 1949; MEYER-ROCHOW 1981; HERZMANN & LABHART 1989; WEHNER 1997; HORVÁTH & WEHNER 1999; DACKE *et al.* 2003). A rovarok a poláros égboltfényt az anatómiailag és fiziológiailag specializálódott ommatídiumaikkal érzékelik (LABHART & MEYER 1999; HORVÁTH & VARJÚ 2004), melyek az összetett szem hátoldali régiójában egy keskeny sávban helyezkednek el, ahol kétféle monokromatikus, polarizációérzékeny és egymásra merőleges mikrobolyhokkal rendelkező fotoreceptorok vannak (1.4. ábra).

Tiszta ég alatt az égbolt-polarizáció érzékelésére nincs optimális hullámhossz, mivel a tiszta ég  $d$  polarizációfoka minden hullámhosszon nagyobb a legtöbb rovar  $d^*$  polarizációérzékelési küszöbénél, így az égbolt polarizációs tájékozódásra alkalmas hányada az ultraibolya (UV) és a látható tartományban egyaránt megfelelően nagy. Részlegesen felhős ég és lombzat alatt ugyanakkor a  $d$  polarizációfok UV-ben a legnagyobb, mert az UV-szegény polarizálatlan felhőfény és lombfény e spektrális tartományban csökkenti legkevésbé a felhő és lombzat alatti légrétegben szóródott fény  $d$  polarizációfokát (BARTA & HORVÁTH 2004). A rovarok fotoreceptorai a felülről jövő fény polarizációját az UV-tartományban érzékelik a házi légy (*Musca domestica*), házi méh (*Apis mellifera*), sivatagi hangya (*Cataglyphis bicolor*), ganajtúró bogár (*Scarabaeus zambesianus*) és egy kövi pók (*Drassodes cupreus*) esetén, kékben a mezei tücsök (*Gryllus campestris*), az egyiptomi vándorsáska (*Schistocerca gregaria*,) és Madeira-csótány (*Leucophaea maderae*) esetén, míg zöldben a májusi cserebogár (*Melolontha melolontha*) és egy lisztbogár (*Parastizopus armaticeps*) esetén (LABHART 1980; HERZMANN & LABHART 1989; PHILIPSBORN & LABHART 1990; LABHART *et al.* 1992; EGGERS & GEWECKE 1993; WEHNER 1997; HORVÁTH & WEHNER 1999; LOESEL & HOMBERG 2001; DACKE *et al.* 1999, 2003).



1.4. ábra. Balra fent: Az ízeltlábúak fotoreceptorának vázlatos felépítése. Balra lent: Néhány mikroboholy kinagyított részlete. A kettős nyilakkal jelölt látópigment-(rodopszin-) molekulák a receptorsejtek mikrobolyhainak hossztengetyével közel párhuzamosan állnak. E rendezett szerkezet felelős a fotoreceptorok polarizációérzékenységéért. Jobbra fent: Az emlősök pálcika fotoreceptorának kültagja vázlatosan. A pálcikákban a rodopszin-molekulák a membránkorongok felszínén rendezetlenül helyezkednek el, ezért a receptorsejt nem érzékeny a fénypolarizációra (HORVÁTH *et al.* 2016).

A vízfelületekről visszaverődő, valamint az azokon megtörő és áthatoló újraperarizált égbolttfény kiemelten fontos szerepet játszik a vízen, vízben vagy víz közelében élő rovarok térbeli tájékozódásában és élőhely-felkutatásában (SCHWIND 1991, SCHWIND & HORVÁTH 1993; GÁL *et al.* 2001c; BERNÁTH *et al.* 2004; CSABAI *et al.* 2006; MOLNÁR *et al.* 2011; HORVÁTH & CSABAI 2014). Egy tengeri rák (*Palaemonetes vulgaris*) tájékozódása például az égbolttfény polarizációs mintázatának Snellius-ablakon át történő észlelhetőségén alapszik (GODDARD & FORWARD 1991; HORVÁTH & VARJÚ 1995). A szitakötők (Odonata), kérészek (Ephemeroptera), álkérészek (Plecoptera), tegzesek (Trichoptera), kétszárnyúak (Diptera), bogarak (Coleoptera) és poloskák (Heteroptera) rendjébe tartozó, 300-nál is több vízirovarfaj esetében sikerült bizonyítani a polarotaktikus vízdetektálási stratégiát, aminek során a rovarok a víztestet a felszínéről tükröződő vízszintesen poláros fény alapján ismerik fel (WILDERMUTH

1998; KRISKA *et al.* 1998, 2007, 2009; KRISKA & ANDRIKOVICS 2000; BERNÁTH *et al.* 2002; HORVÁTH *et al.* 2008; EGRI *et al.* 2012a; SZÁZ & HERCZEG 2013; HORVÁTH & CSABAI 2014). E vízirovarok víznek tekintenek minden olyan felületet, amelyről visszaverődő fény  $d$  lineáris polarizációfoka magasabb a  $d^*$  érzékenységi küszöbükénél ( $d > d^*$ ), valamint  $\alpha$  polarizációs szöge egy  $\Delta\alpha^*$  küszöbszögnél kisebbel tér el a vízszintestől ( $|90^\circ - \alpha| < \Delta\alpha^*$ ) a spektrum azon tartományában, melyben a fény polarizációt érzékelik (HORVÁTH *et al.* 2016). E stratégia evolúciós sikerét nemcsak az eredményezi, hogy a természetben a vízfelületeken kívül kevés tárgy ver vissza erősen és vízszintesen poláros fényt (HORVÁTH 1995; GÁL *et al.* 2001c), hanem az is, hogy a fény intenzitására és színére érzékeny, de a fény polarizációra vak látórendszerrel szemben a fény polarizációra érzékeny szem nem téveszti meg a vizet utánzó délibáb sem (HORVÁTH *et al.* 1997; GÁL *et al.* 1997). CSABAI *et al.* (2006) szerint a vízirovarok napszakos vándorlását is a vízfelületek polarizációs sajátosságainak napszakos változása befolyásolja a levegőhőmérséklet mellett. A polarotaxisnak emellett szerepe lehet a nedves, bomló anyagokban (friss trágyában, növényi korhadékban) élő rovarok élőhely-felismerésében is (SCHWIND 1991; KRISKA 2000).

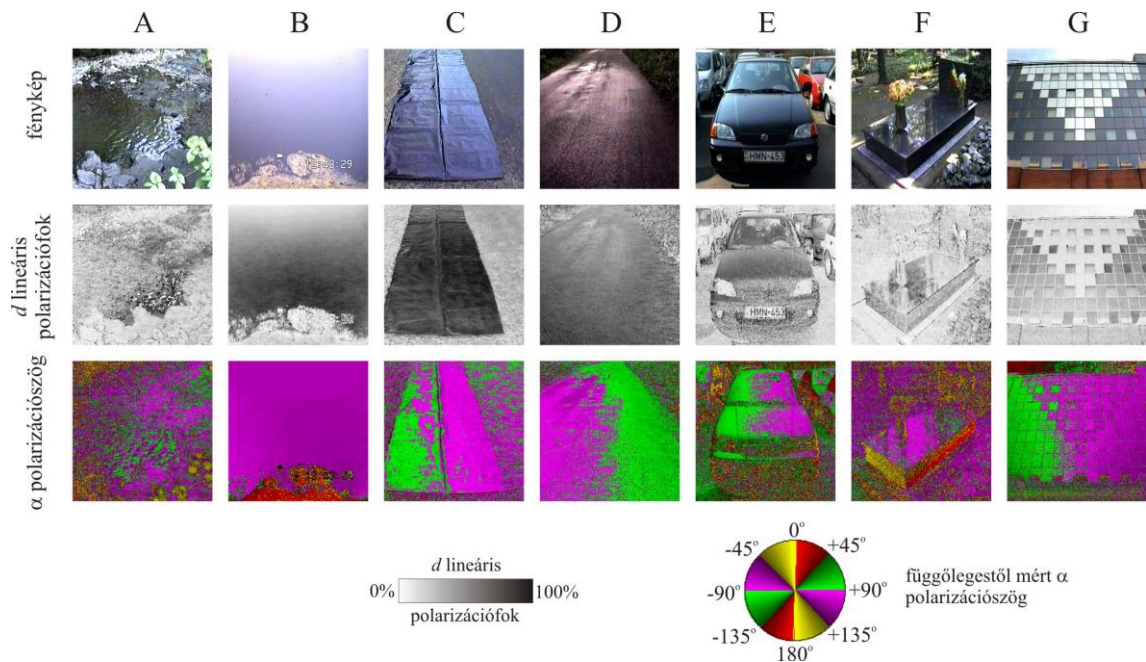
### 1.1.5. Poláros fényszennyezés és polarizációs ökológiai csapdák

A mesterséges éjszakai fények bizonyított és lehetséges ökológiai következményeiről korábban már számos tanulmány készült (LONGCORE & RICH 2004; RICH & LONGCORE 2006; BOLDOGH *et al.* 2007; GASTON *et al.* 2013; DAVIES *et al.* 2014; PAWSON & BADER 2014). A hagyományos ökológiai fényszennyezést okozó mesterséges fényforrások elsődleges hatása, hogy a sötét környezethez képest nagyobb intenzitásukkal számtalan faj egyedeit vonzzák (pozitív fototaxis) vagy taszítják (negatív fototaxis) (JÉKELY 2009; HORVÁTH *et al.* 2016).

A közelmúltban vált ismertté, hogy a sötét és fényes mesterséges felületek (például nyílt felszínű olajtárolók, aszfaltutak, fekete mezőgazdasági műanyagfóliák, üvegtáblák, piros és fekete autókarosszériák, napelemek, fekete márvány sírkövek) a polarotaktikus vízirovarok poláros ökológiai csapdájaként működnek (1.5. ábra), miáltal a poláros fényszennyezés legfőbb forrásainak számítanak (PILCHER & SEXTON 1993; HORVÁTH & ZEIL 1996; KRISKA *et al.* 1998, 2006, 2008; BERNÁTH & HORVÁTH 1999; KRISKA & ANDRIKOVICS 2000; BERNÁTH *et al.* 2001a,b; WILDERMUTH & HORVÁTH 2005; HORVÁTH *et al.* 2007, 2009, 2016; MALIK *et al.* 2008; BODA *et al.* 2014). HORVÁTH *et al.* (2016) alapján a mesterséges felületek azon részei tekinthetők poláros fényszennyezőnek, amelyekről visszaverődő fény  $d$  polarizációfoka nagyobb, mint az adott vízirovar polarizáció-érzékelésének  $d^*$  küszöbértéke ( $d > d^*$ ), és  $\alpha$



polarizációs szöge egy  $\Delta\alpha^*$  küszöbszögnél kisebbel tér el a vízszintestől ( $|90^\circ - \alpha| < \Delta\alpha^*$ ). A vízirovarok a fényes fekete mesterséges felületek e feltételeknek megfelelő részeit tévesen „szupervízként” azonosítják, majd ezekre szállva le is petézhetnek. A peték a száraz felületen rövid időn belül kiszáradnak és elpusztulnak, az utódgeneráció ki nem fejlődése pedig gyengíti az adott rovarpopuláció túlélési esélyeit. A jelenség kapcsán ugyanakkor maguk a poláros fényszennyező felületek is károsodhatnak, például a petékből hőhatásra keletkező savak okozta korrózió következtében (STEVANI *et al.* 2000a,b).

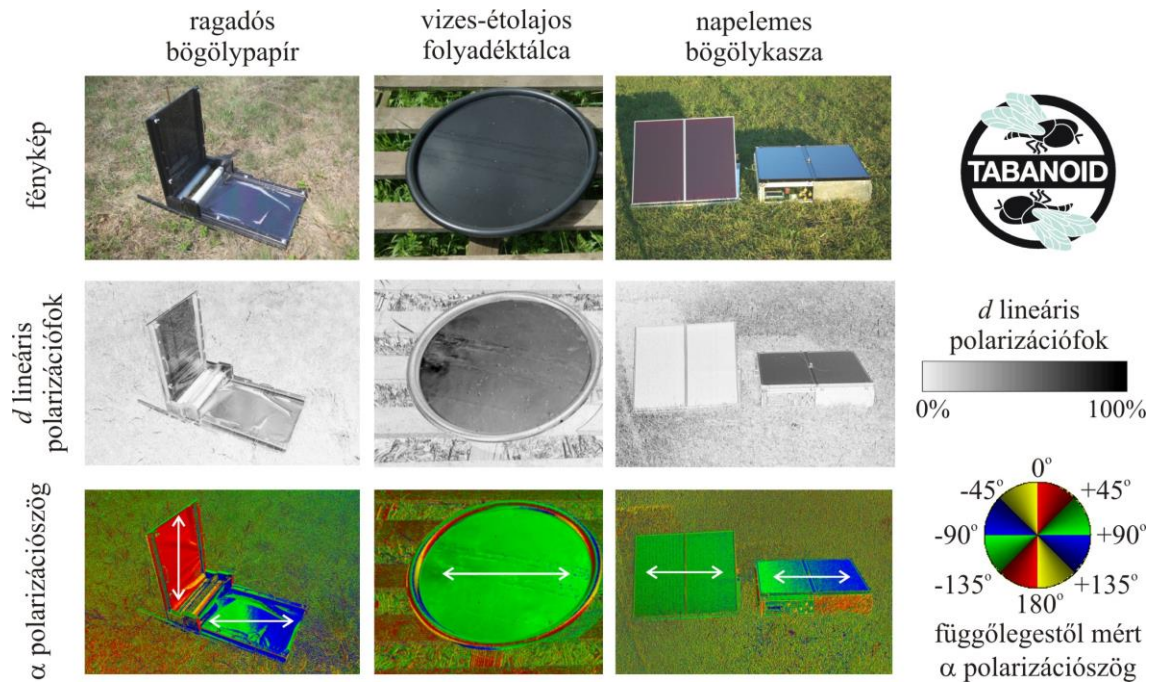


1.5. ábra. Vízfelszín (A) és poláros fényszennyezést okozó mesterséges tükröző felületek (B–G) fénypolarizációs mintázatai. (B) kőolajtó, (C) aszfaltútra terített fekete műanyag fólia, (D) száraz aszfaltút, (E) fekete autó, (F) fényes fekete sírkő, (G) üvegépület függőleges fala (HORVÁTH *et al.* 2016).

A poláros fényszennyezés ellen teendő lépések hasonlóan időszerűek és sürgetően szükségesek, mint az éjszaka aktív állatok védelmében a mesterséges éjszakai megvilágítások megfelelő időben és módon történő működése érdekében tett lépések (TUXBURY & SALMON 2005; RICH & LONGCORE 2006). A poláros fényszennyezés ellenszere lehet a megfelelő sűrűségű fehér rácsok és csíkok alkalmazása (HORVÁTH *et al.* 2010; EGRI *et al.* 2012b), illetve a sötét és fényes felületek világosakra és érdes vagy matt felületűekre való cseréje, mert ezek csak gyengén és nem mindig vízszintesen poláros fényt vernek vissza, miáltal nem mindig vonzóak a polarotaktikus vízirovarok számára (BLAHÓ *et al.* 2014; SZÁZ *et al.* 2016a).

A számos betegséget terjesztő, vérszívó bögölyök pozitív polarotaxisának (HORVÁTH *et al.* 2008) és a poláros fényszennyezés jelenségének részletes megismerése új típusú

rovarcsapdák kifejlesztésére is lehetőséget adott. A ragadós bögölypapír, a vizes-étolajos folyadéktálca és a napelemes bögölykasza (1.6. ábra) használatával mechanikai vagy kémiai módszerrel pusztíthatók el a hím és nőstény bögölyök, miután lineárisan poláros fény segítségével az adott helyre csalogattuk őket (BLAHÓ *et al.* 2012; EGRI *et al.* 2013a,b). E polarizációs csapdák használatával alacsonyabb szintre csökkenthetők a bögölyök vérszívása miatt felmerülő egészségügyi és gazdasági károk és kockázatok (SZÁZ & HERCZEG 2013).



1.6. ábra. A TabaNoid® polarizációs bögölycsapdák prototípusairól készült fényképek és fénypolarizációs mintázatok. A fehér kettős fejű nyilak a csapdák felszínéről visszaverődő fény polarizációirányát mutatják (HORVÁTH *et al.* 2016).

## 1.2. Kedvezőtlen élőhelyek elkerülése a kérészek polarotaktikus viselkedése révén<sup>1</sup>

### 1.2.1. Bevezetés

A dunavirág (*Ephoron virgo* [OLIVIER 1791]) és a *Caenis robusta* [Eaton 1884] kérészfajokat különböző családokba (Polymitarcyidae, Caenidae) soroljuk, és míg az *E. virgo* lárvák kizárólag folyókban (KAZANCI 2013), a *C. robusta* lárvák lassú folyású patakokban és állóvizekben is kifejlődnek (LANGFORD & BRAY 1969; BRADBEER & SAVAGE 1980). A két faj rajzási viselkedése hasonló képet mutat abban a tekintetben, hogy mindkettőjük rajzása sötétedéskor kezdődik (BRADBEER & SAVAGE 1980; SZÁZ *et al.* 2015) és rajzáshelyük a vízfelszínhez kötődik (BRODSKIY 1973).

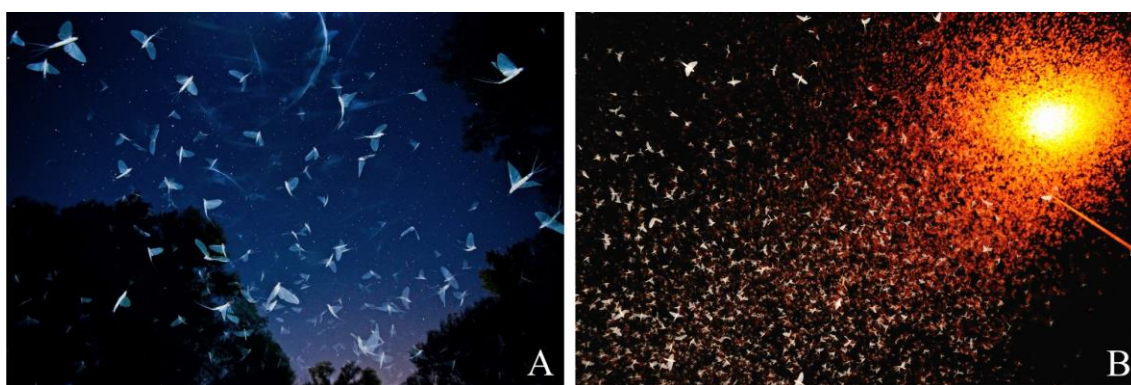
A rajzás nyitányaként az *E. virgo* lárvabőről előbújó hím szubimágók a partra repülnek, ahol párzóképes imágókká vedlenek és visszarepülnek a folyófelszín fölé (IBANEZ *et al.* 1991). A hímek a rajzás során egyenes vonalban repülnek közvetlenül a vízfelszín felett 2,5–5 cm magasságban, és ha egy nősténnyel találkoznak, akkor párzanak velük. A hímek vízfelszínt pásztázó kereső repülése kompenzálja a más fajokra jellemző konkrét rajzáshely hiányát, ahol a hímek vizuális alapon könnyen megtalálhatják a nőstényeket (BRODSKIY 1973). A nőstények a rajzás kezdetén a hímekhez hasonlóan repülnek a vízfelszín felett, majd párzás után egyre magasabbra emelkedve megkezdik a folyó középvonala felett a folyásiránnyal szemben haladó néhány kilométeres kompenzációs repülésüket (1.7A ábra), aminek végén a vízfelszínre ereszkedve rakják le petecsomóikat (KAZANCI 2013). A fentiekben leírt rajzási viselkedés jellemző a szintén folyólakó, ám sötétedés előtt rajzó tiszavirág (*Palingenia longicauda* [OLIVIER 1791]) kérészfajra is (KRISKA *et al.* 2007). A Caenidae családba sorolt kérészfajok rajzása szintén mindig a vízfelszín felett megy végbe, ahol több ezer hímről és nőstényről álló csoportok alakulnak ki, melyekben a hímek egyedszáma 4-6-szor több, mint a nőstényeké (BRODSKIY 1973).

---

<sup>1</sup> FARKAS A., SZÁZ D., EGRI Á., BARTA A., MÉSZÁROS Á., HEGEDÜS R., HORVÁTH G., KRISKA Gy. (2016): Mayflies are least attracted to vertical polarization: A polarotactic reaction helping to avoid unsuitable habitats. *Physiology and Behavior*, 163, 219–227. (D1, IF: 2,976)



A kérészek számos fajánál bizonyított a polarotaktikus vízdetekció, aminek során a rovarok a vízfelszínről tükröződő vízszintesen poláros fény alapján ismerik fel a víztestet (KRISKA *et al.* 1998, 2007, 2009). A kérészfajok egy része rajzáskor egy kilométernél messzebbre is eltávolodhat a víztől (BRODSKIY 1973), náluk a pozitív polarotaxis segítheti a nőstények visszatérését a vízhez, ahol lerakhatják petecsomóikat. MÁLNÁS *et al.* (2011) és SZÁZ *et al.* (2015) szerint az *E. virgo* és *P. longicauda* rajzáskor nem hagyja el a vízfelszínt, esetükben tehát a pozitív polarotaxisnak abban van szerepe, hogy rajzáskor e rovarok végig a vízfelszín felett maradjanak. Az *E. virgo* és *P. longicauda* esetében az is jellegzetes, ahogy a partvonalhoz közelítve már a part elérése előtt hirtelen visszafordulva újra a folyó középvonala felé repülnek, így rajzáskor mindvégig a parttól távol tartózkodnak.



1.7. ábra. (A) Nőstény dunavirágok (*Ephoron virgo*) kompenzációs repülése a Rába felett Rábahídvégnél. (B) Nőstény dunavirágok tömeges megjelenése a tahitótfalui híd egyik lámpájánál (Potyó Imre felvételei).

MÁLNÁS *et al.* (2011) azt is megfigyelte, hogy a *P. longicauda* nőstények vízfolyással szembeni kompenzációs repülését megállítják a Tiszán átívelő hidak: a hídhöz érve a nőstények feltorlódnak és körkörös mozgásba kezdenek. Ugyanezt a hatást SZÁZ és munkatárai (2015) is leírták az *E. virgo* Duna feletti rajzása esetében, ahol a feltorlódott kérészek a világító hídlámpákhoz is odavonzódnak pozitív fototaxisuk révén (1.7B ábra). MÁLNÁS *et al.* (2011) a híd előtti feltorlódás jelenségét azzal magyarázta, hogy a hídról és a híd képét tükröző vízfelszínről kisebb polarizációfokú, gyakran függőlegesen poláros fény verődik vissza, miáltal megszakad a folyó folytonos, erősen és vízszintesen poláros optikai jele, ami a kérészek repülését irányítja. Ahogyan az az 1.3. ábra bal oszlopában is látható, a kisebb polarizációfokú, függőlegesen poláros fényt visszaverő vízfelszín a part mentén is megjelenik a vízparti növényzet képének tükröződése miatt, ami hozzájárulhat ahhoz, hogy a vízfelszín felett repülő kérészek e sávot elkerülve a folyó felszín parttól távolabbi részein maradnak.

### 1.2.2. Célkitűzések

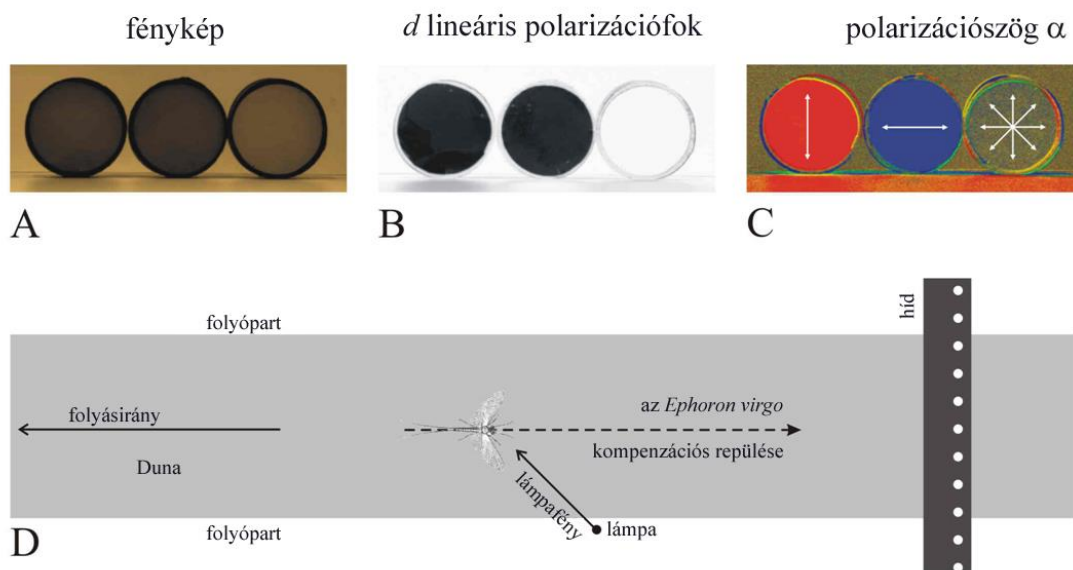
MÁLNÁS *et al.* (2011) az alacsony polarizáció fokú függőlegesen poláros fénynek nem tulajdonított közvetlen szerepet a kérészrepülés irányításában, az ilyen fényt tükröző vízfelszín elkerülését az erősen és vízszintesen poláros fény hiányával magyarázta. Felmerült azonban a kérdés, hogy a függőlegesen poláros fény gyakorol-e valamilyen közvetlen hatást a kérészek rajzási viselkedésére? A kérdés megválaszolására képalkotó polarimetriai méréseket kívántunk végezni és választásos terepkísérletekben kívántuk vizsgálni az *E. virgo* és a *C. robusta* kérészfajok viselkedését, eltérő polarizációjú fényt kibocsátó lámpák hatására.

### 1.2.3. Anyag és módszer

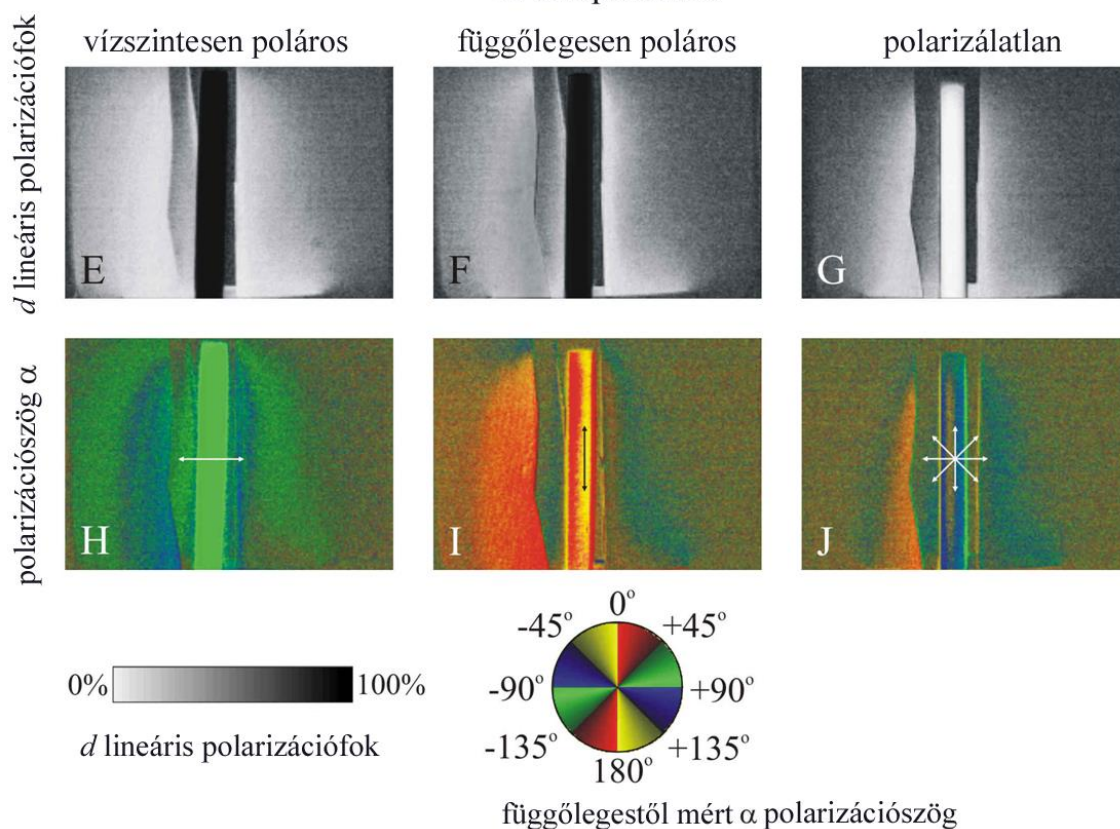
#### 1. terepkísérlet (1–4. nap)

Az 1. terepkísérletben az *E. virgo* tömegrajzását Tahitótfalunál a híd alatti folyószakaszon figyeltük meg 2013. augusztus 15. és szeptember 2. között minden este 21:00-tól 23:00-ig. A terepkísérleteket augusztus 23-án, 24-én, 27-én és 28-án végeztük, melyek során függőlegesen poláros, polarizálatlan és vízszintesen poláros fényű, de azonos intenzitású és spektrális tulajdonságú lámpák kérészekre gyakorolt hatását vizsgáltuk (1.8A–D ábrák). Ehhez egy fotóállványhoz rögzített, nagy fényerejű LED-es kézilámpát (UltraFire C8 Cree XM-L T6 LED) helyeztünk el a folyóparton, 110 m-re a hídtól, majd fényét a folyó közepén a folyásiránnyal szemben haladó, kompenzációs repülést folytató kérésztömegre irányítottuk (1.8D ábra). Először egy lineáris polárszűrőt (XP42-18 ITOS, Mainz, Germany) helyeztünk közvetlenül a fényforrás elé függőleges fényáteresztéssel, miáltal a lámpa függőlegesen poláros fényforrásként ( $d = 100\%$ ) működött. Ezután az egyik szűrőelőtétben a lineáris polárszűrő lámpa felőli felületéhez egy depolarizátorként működő pauszpapírt tettünk, a másik szűrőelőtétben pedig megcseréltük a polárszűrő és a pauszpapír sorrendjét, így közvetlenül a fényforrás elé került a polárszűrő, amit a depolarizáló pauszpapír követett. Ennek eredményeként olyan fényforráshoz jutottunk, ami az első szakaszban alkalmazott fényforrással megegyező fényintenzitású, ugyanakkor polarizálatlan ( $d = 0\%$ ) fényt bocsátott ki. A harmadik szakaszban a fényforrás elé helyezett polárszűrő fényáteresztési iránya vízszintes volt, miáltal a lámpa vízszintesen poláros fényforrásként ( $d = 100\%$ ) működött.

## 1. terepkísérlet



## 2. terepkísérlet



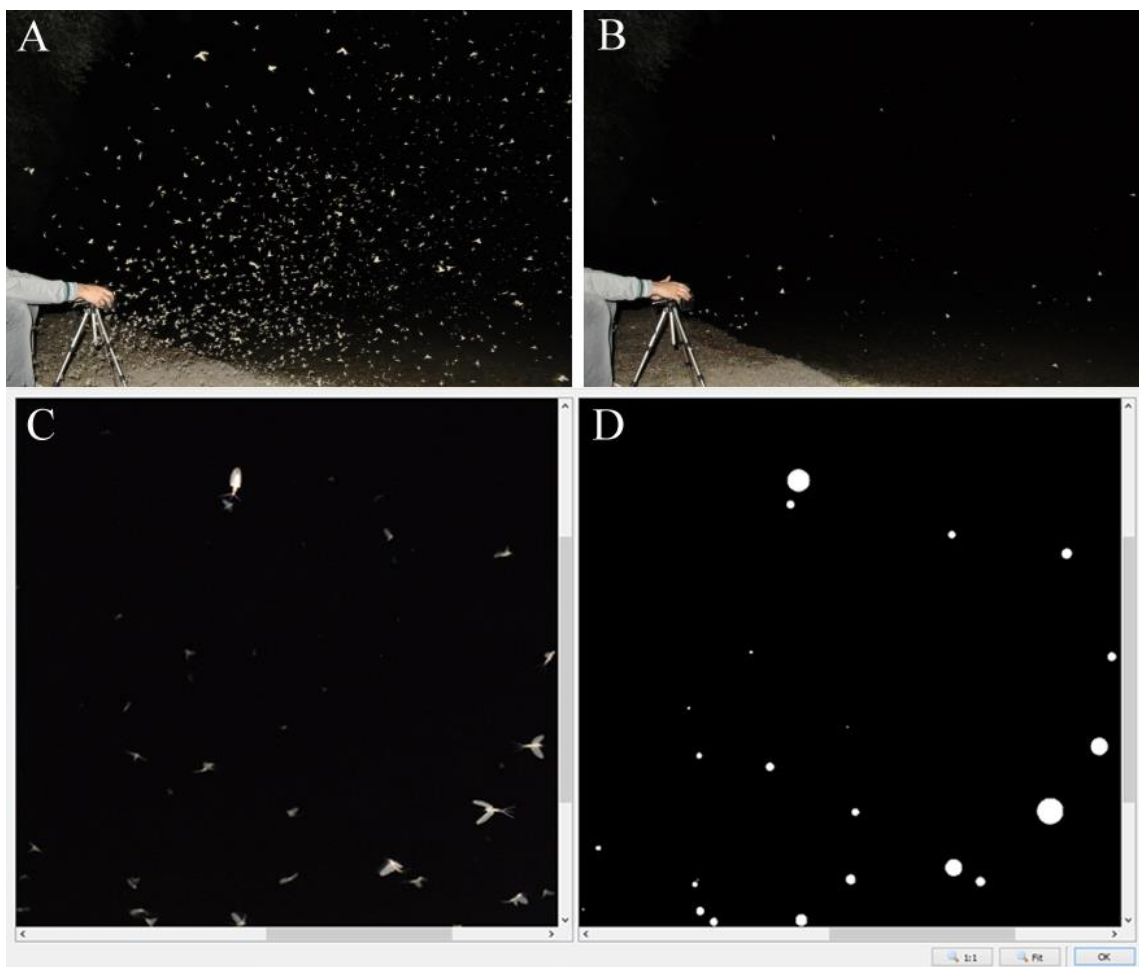
1.8. ábra. Az 1. (A–C) és 2. (E–J) terepkísérletben használt fényforrások fényképe, valamint a spektrum kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért  $d$  lineáris polarizációfokának és az óramutató járása szerint a függőlegestől mért  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatai. A fehér kettős fejú nyilak a helyi polarizációirányt mutatják. (D) Az 1. terepkísérlet vázolata.

Az 1. terepkísérletben használt fényforrások polarizációs tulajdonságait képkalkotó polarimetriával mértük (*I.8A–C ábrák*), melynek módszerét HORVÁTH *et al.* (2016) is részletezte. A NIKON D-3200 digitális képkalkotó polariméter 18-200 mm-es gyújtótávolságú objektívje előtt kapott helyet egy lineáris polárszűrő (Polaroid HNP'B), amely három áteresztési irányban rögzíthető:  $\varphi_1 = 60,8^\circ$ ,  $\varphi_2 = 119,7^\circ$  és  $\varphi_3 = 178,6^\circ$ . A fényképezőgépet a mérés során háromlábú állványra helyeztük, fókuszát a mérendő felületre állítottuk, az expozíciós időt pedig állandó ISO 200 érzékenység mellett a fényviszonyoknak megfelelően választottuk ki. A felvételeket 12 megapixeles RAW (.NEF) formátumban készítettük el. Egy méréskor egy adott fényforrásról három felvételt készítettünk egymás után a lineáris polárszűrő fenti három különböző  $\varphi$  áteresztési szöge mellett. Ha a felvett kép adott pontjáról jövő fény részlegesen lineárisan poláros, akkor a fény  $I$  intenzitása szinusz-négyzetesen változik a forgó polárszűrő  $\varphi$  irányától függően. Egy erre a célra írt számítógépes programmal az adott képponthez tartozó három fényintenzitás-értékre illesztett függvény paramétereiből kiszámítható a vizsgált pontból jövő fény  $d = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$  lineáris polarizációfoka, ahol  $I_{\max}$  és  $I_{\min}$  az elforgatott polárszűrőn áthaladó fény intenzitásának maximuma és minimuma a kép adott pontjában, és  $\alpha$  polarizációs szöge, vagyis az  $I_{\max}$  fényintenzitás iránya. Az elkészített polarizációs felvételek kiértékelésével meghatároztuk és hamisszínes kódolással megjelenítettük az adott fényforrás  $I$  fényintenzitásának,  $d$  polarizációfokának és a helyi meridiántól mért  $\alpha$  polarizációs szögének térbeli eloszlását a spektrum vörös, zöld és kék tartományában. A  $d$  és  $\alpha$  értékeit  $\Delta d = \pm 1\%$  és  $\Delta \alpha = \pm 1^\circ$  pontossággal mértük. A  $d$  értékeit a szürke különböző árnyalataival (fehér:  $d = 0\%$ , fekete:  $d = 100\%$ ),  $\alpha$  értékeit pedig eltérő színekkel kódoltuk (vörös:  $0^\circ \leq \alpha < 45^\circ$ , zöld:  $45^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ , kék:  $90^\circ \leq \alpha < 135^\circ$ , sárga:  $135^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ).

Az 1. kísérletben során mindhárom polárszűrőállásnál 7-7 fotót készítettünk a lámpa fénycsóvjáról, hogy e képek kiértékelésével megbecsülhessük a lámpafénybe vonzott kérészek egyedszámát (*I.9A–B ábrák*). Minden fénykép elkészítése után lekapcsoltuk a lámpát 5 másodpercre, majd az újbóli bekapcsolás után 5 másodperccel (miután a folyó közepén haladó kompenzációs rajból kiváló kérészek elérték a lámpa környezetét) készítettük el a következő fotót, ami után újra kikapcsoltuk a lámpát. A lámpa lekapcsolásakor a kérészek azonnal elrepültek a lámpa közeléből, és a kompenzációs rajhoz csatlakozva folytatták útjukat a folyásiránnyal szemben. Így elérhetővé vált, hogy a lámpa újbóli felkapcsolásakor mindig más kérészegyedek viselkedését vizsgáljuk, elkerülve a pszeudoreplikációt. A terepvizsgálatokat összesen négy rajzásnapon végeztük. A kísérletsorozatot a kompenzációs

raj kialakulásától annak megszűnéséig folytattuk. A leghosszabb időintervallum 20:15-től 21:20-ig tartott. A teljes rajzási periódusra vonatkoztatva megállapítható volt, hogy a kompenzációs repülés egyre korábban kezdődött és egyre rövidebbé vált. Az utolsó rajzási napokon a kompenzációs repülés 19:30-kor kezdődött és 20 óra után néhány perccel ért véget.

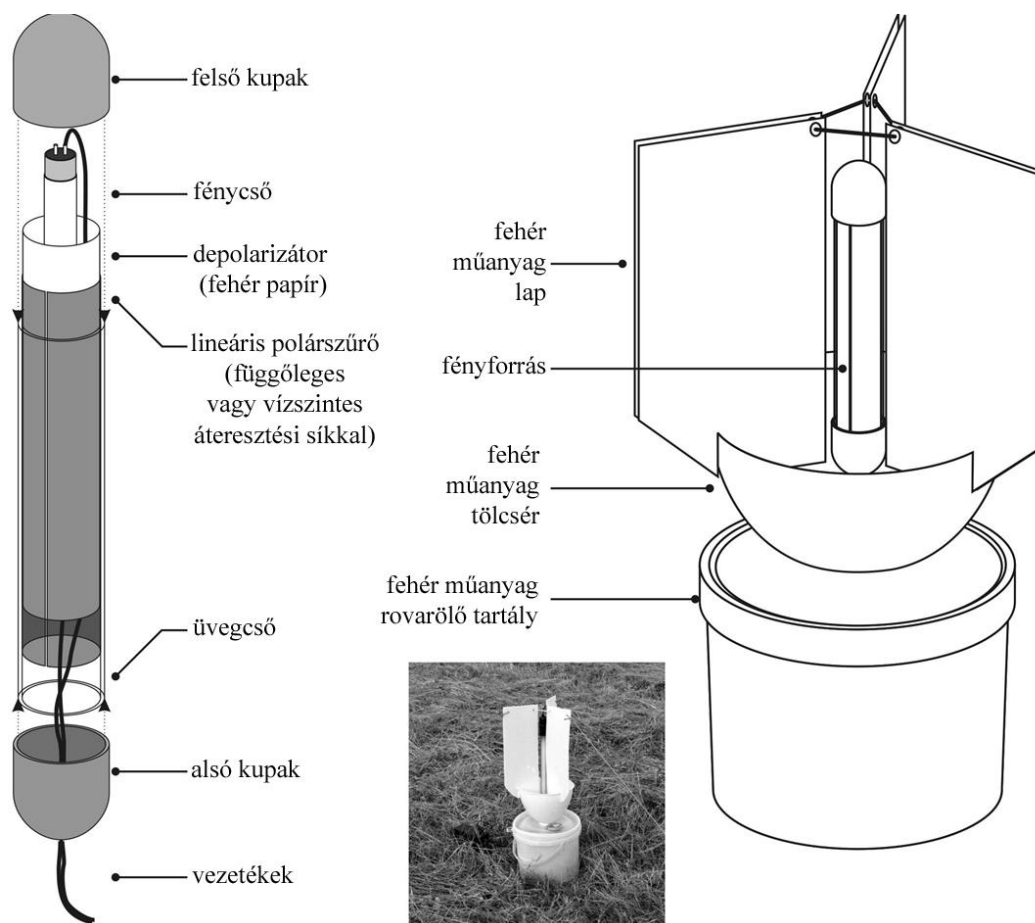
Az 1. kísérlet alatt készült 966 fotó kiértékelése erre a célra fejlesztett számítógépes programmal történt (AlgoNet, <http://www.estrato.hu/alconet>, SZÁZ *et al.* 2015). A kiértékelés során a szoftver felismerte az *E. virgo* egyedeivel azonosítható, egymástól elkülönülő fehér foltokat, majd megadta ezek számát (1.9C–D ábrák). Azon tereptárgyakat, melyek hasonló színűek voltak és a program tévesen kérészekként ismerhette volna fel azokat, kimaszkoltuk, így seholy nem kerültek bele a számlálásba.



1.9. ábra. (A) Vízszintesen poláros fényhez és (B) polarizálatlan fényhez vonzódott *E. virgo* kérészek. (C) Az elkészült képek kiértékelésekor az e célra fejlesztett program felismerte az *E. virgo* egyedeit jelentő, egymástól elkülönülő fehér foltokat, majd megadta e foltok számát (D).

## 2. terepkísérlet (5. nap)

A 2. terepkísérletben a *C. robusta* fénycsapdás vizsgálatát az Ócsai Tájvédelmi Körzet területén végeztük 2014. július 22-én 19:00 órától 23:00 óráig abból a célból, hogy adatokat nyerjünk e faj különböző polarizációjú fényforrásokhoz való vonzódásáról. A hajdan kiterjedt lápterület egyik utolsó maradványfoltjának egész területére jellemző a mozaikosság, a nyílt vizek, nádasok, rétek, erdők és sztyepprétek váltakozása (KERESZTESSY *et al.* 2013). A kísérletben három egyforma felépítésű, azonos fényintenzitású és spektrális tulajdonságú, vízszintesen poláros, függőlegesen poláros, valamint polarizálatlan fényt kibocsátó fénycsapdákat alkalmaztunk (1.10. ábra). A csapdák polarizációs jellemzőit képalkotó polarimetriával mértük (1.8E–J ábrák).

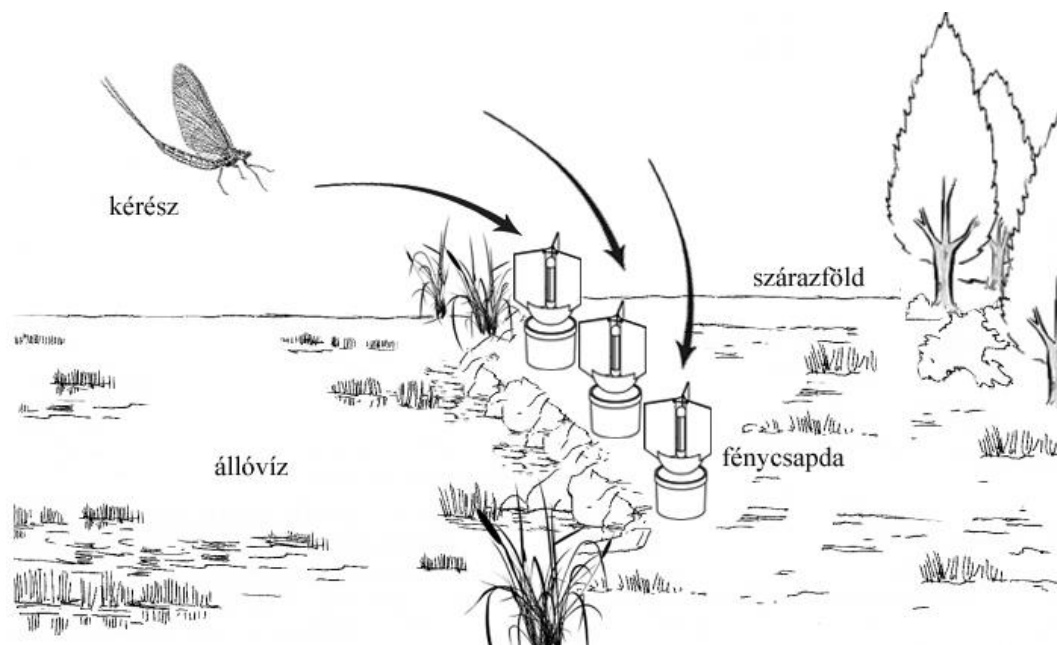


1.10. ábra. A 2. terepkísérletben alkalmazott fénycsapda felépítése.

A három fénycsapdát a vizes élőhely partjától 10 m-re, egymástól 2 m-re telepítettük a partvonallal párhuzamosan (1.11. ábra). A csapdák helyzetét a vizsgált időszakban félóránként véletlenszerűen megcseréltük, hogy kiküszöböljük a helyspecifikus hatásokat. A vízfelszín irányából mindhárom csapda jól látható volt, mert a csapdákkal szembeni



partvonalon korábban kiirtották a vízparti növényzetet, hogy a közelben elhelyezkedő madárlesről jó kilátás nyíljon a vizes élőhelyre. A csapdához vonzódott kérészeket három fehér függőleges műanyag lap terelte a gyűjtőüveg fölé, ahol a párolgó kloroform hatására elpusztuló kérészek az edény aljára hullottak. A rovarok azonosítását és leszámlálását később laboratóriumban végeztük el.



1.11. ábra. A 2. terepkísérletben alkalmazott fénycsapdák elhelyezése.

### 3. terepkísérlet (6–7. nap)

A 3. terepkísérletben Rábahídvégen vizsgáltuk az *E. virgo* rajzását 2015. augusztus 4. és 6. között mindennap 20:30 és 21:30 között. Az itteni közúti híd mellett bonyolítottuk le azon terepkísérleteket, melyek azonos fény spektrumú, de különböző polarizációjú és intenzitású fényforrások vonzó hatását vizsgálták az *E. virgo* esetében. E kísérletekben egy fotóállványhoz rögzített nagy fényerejű LED-es kézilámpát (UltraFire C8 Cree XM-L T6 LED) helyeztünk el a folyóparton, 30 m-re a hídtól és fényét a folyó közepén a folyásiránnyal szemben haladó, kompenzációs repülést folytató kérésztömegre irányítottuk a Tahitótfalunál korábban már alkalmazott módszer szerint. A 3. kísérlet 1. részében lineáris polárszűrőt (XP42-18 ITOS, Mainz, Germany) helyeztünk közvetlenül a fényforrás elé függőlegesen áteresztéssel, miáltal a lámpa függőlegesen poláros fényforrásként ( $d = 100\%$ ) működött. Ekkor az  $I_{rel} = 100\%$  relatív fényintenzitás maximális volt. A 3. kísérlet 2. részében egy semleges szürke szűrő alkalmazásával a fényforrás  $I_{rel} = 68\%$  relatív fényintenzitású,

polarizálatlan ( $d = 0 \%$ ) fényt bocsátott ki. A 3. kísérlet 3. részében a fényforrás lineáris polárszűrő és semleges szürke szűrők alkalmazásával  $I_{rel} = 29 \%$  relatív fényintenzitású, vízszintesen poláros ( $d = 100 \%$ ) fényt bocsátott ki. A lámpafény polarizációs sajátságainak mérése képalkotó polarimetriával történt. A 3. kísérlet mindhárom részében minden egyes szűrőbeállításnál 10-10 fotót készítettünk a lámpa fénycsóvájáról, hogy e képek kiértékelésével megbecsülhessük a lámpafénybe vonzott kérészek egyedszámát. A fényképezési eljárás és az elkészült összesen 360 fotó kiértékelésének menete megegyezett az 1. kísérletnél leírtakkal.

#### 4. terepkísérlet (8. nap)

A 4. terepkísérletben a *C. robusta* különböző polarizációjú és intenzitású fényforrásokhoz való vonzódását vizsgáltuk fénycsapdákkal 2015. augusztus 10-én 19:00-tól 23:00-ig az Ócsai Tájvédelmi Körzet területén (a 2. kísérlet helyszínén). A kísérletben alkalmazott három egyforma felépítésű fénycsapda közül az egyik fényforrása függőlegesen poláros ( $d = 100 \%$ ),  $I_{rel} = 100 \%$  relatív intenzitású fényt, a másik polarizálatlan ( $d = 0 \%$ ),  $I_{rel} = 50\%$  relatív intenzitású fényt, a harmadik pedig vízszintesen poláros ( $d = 100 \%$ ),  $I_{rel} = 22\%$  relatív intenzitású fényt bocsátott ki. A kérészek befogása és azonosítása a 2. kísérletnél leírtak szerint történt.

#### Az 1–4. terepkísérletek módszertana közti eltérés okai

Az 1. és 3. kísérletek, illetve a 2. és 4. kísérletek során eltérő módszert alkalmaztunk a kérészek reakcióinak vizsgálatára, aminek okai a következők: (i) Az 1. és 3. kísérletekben elegendő volt kizárólag fényképeken rögzíteni a különböző polarizációjú lámpákhoz vonzó *E. virgo* egyedeket, mivel éjszakai, Duna feletti tömegrajzásukkal egy időben más fajok nem rajzoltak, tehát a fényképeken, a lámpák előterében megjelenő fehér foltok kizárólag egyedekkel voltak azonosíthatók. A vonzott fajokat elpusztító fénycsapdákat az *E. virgo* védettsége miatt sem alkalmazhattuk. (ii) A 2. és 4. kísérletek helyszínén a vizsgált *C. robusta* kérészek rajzásával egy időben más vízirovarok (például árvaszúnyogok (Chironomidae), törpeszúnyogok (Ceratopogonidae)) is rajzoltak. Ekkor tehát a fénycsóvák fényképezése nem jöhetett szóba, hiszen a fényképeken megjelenő fehér foltok több faj egyedeit is jelenthették volna, amelyeket a kiértékelés során nem lehetett volna teljes bizonyossággal elkülöníteni. Ráadásul a 2. és 4. kísérletek tóparti helyszínén a folyásiránnyal ellentétes kompenzációs repülés hiánya egy fénycsóva-fényképezéses módszernél nagyban növelte volna a



pszeudoreplikáció valószínűségét. Mivel Magyarországon a *C. robusta* nem védett, ezért a fénycsapdás módszer bizonyult ideálisnak e faj vizsgálatára.

#### *Statisztikai kiértékelés*

A terepkísérletek adatainak összehasonlítását R-ben végeztük  $\chi^2$ -teszttel. A páronkénti összehasonlítások esetében Bonferroni-korrekción is alkalmaztunk (ZAR 2010).

### **1.2.4. Eredmények**

#### *A kísérletekben alkalmazott fényforrások polarizációs tulajdonságai*

Az 1.8A–C ábra mutatja az 1. kísérletben használt lineárisan polarizáló és depolarizáló szűrők polarizációs jellegzetességeit a spektrum kék (450 nm) tartományában. Az 1.8E–J ábrák a 2. terepkísérletben használt vízszintesen poláros ( $d = 97.4 \pm 2.6 \%$ ,  $\alpha = 92.3^\circ \pm 0.6^\circ$ ), függőlegesen poláros ( $d = 98.0 \pm 2.0 \%$ ,  $\alpha = 0.1^\circ \pm 1.9^\circ$ ) és gyakorlatilag polarizálatlan ( $d = 7.7 \pm 7.6 \%$ ,  $\alpha = 71.3^\circ \pm 34.7^\circ$ ) fényt kibocsátó három különböző fénycsapda lineáris  $d$  polarizációfok (1.8E–G. ábrák), és  $\alpha$  polarizációs szög (1.8H–J. ábrák) képalkotó polariméterrel kimért mintázatát mutatja a spektrum kék (450 nm) tartományában. Habár a fénycsapda fényének a fehér, függőleges műanyag terelőlapokról való visszaverődése kissé megváltoztatta a fényforrás polarizációs jellemzőit, a műanyag lapokról visszavert fény és a kibocsátott fény  $\alpha$  polarizációs szöge azonos volt.

#### *A terepkísérletekben vizsgált kérészek reakciói*

Az 1–4. kísérletek során több mint 146 000 *E. virgo* és 3741 *C. robusta* egyed reakcióját vizsgáltuk (1.1. táblázat, 1.12. ábra). Az 1. és 3. kísérletben számos nőstény *E. virgo* szakította meg a folyó sodrásával szemben haladó kompenzációs repülését és a különböző polarizációjú fényt kibocsátó lámpákhoz vonzódott. A lámpa lekapcsolásakor az odavonzott kérészraj egyedei elrepültek és azonnal csatlakoztak a folyó felett repülő kompenzációs rajhoz. Az 1. kísérlet 1–4. rajzási napján készített 966 fotón hozzávetőlegesen 108 ezer dunavirágot azonosítottunk a képfeldolgozó szoftverrel. Rajzási naptól függően, (i) a vízszintesen poláros fény 5,6–11,9-szer több kérészt vonzott, mint a függőlegesen poláros, (ii) a polarizálatlan fény 1,3–2,7-szer több kérészt vonzott, mint a függőlegesen poláros, és (iii) a vízszintesen poláros fény 4,0–5,6-szor volt vonzóbb, mint a polarizálatlan. Az összes lámpa által vonzott kérészt figyelembe véve, (i) a vízszintesen poláros fény 7,9-szer volt vonzóbb,

mint a függőlegesen poláros, (ii) a polarizálatlan fény 1,8-szer több *E. virgo*-t vonzott, mint a függőlegesen poláros, és (iii) a vízszintesen poláros fény 4,3-szer volt vonzóbb, mint a polarizálatlan. Ezek a különbségek statisztikailag szignifikánsak (1.2. táblázat).

A 2. kísérletben 3452 *C. robusta* kérészt azonosítottunk. Az eredmények alapján megállapítható, hogy (i) a vízszintesen poláros fény 17,9-szer vonzóbb a *C. robusta* számára, mint a függőlegesen poláros, (ii) a polarizálatlan fény 6,7-szer több *C. robusta* kérészt vonzott, mint a függőlegesen poláros, és (iii) a vízszintesen poláros fény 2,7-szer vonzóbb volt, mint a polarizálatlan fény. Ezek a különbségek statisztikailag szignifikánsak.

Az 1. és 2. kísérlet eredményei alapján megállapítottuk, hogy (i) a polarizálatlan fény pozitív fototaxist vált ki az *E. virgo* és *C. robusta* imágókból, (ii) a vízszintesen poláros fény pozitív polarotaxist vált ki belőlük, és (iii) és a függőlegesen poláros fény mindkét faj esetében a legkevésbé vonzó, ha a fényforrások intenzitása azonos.

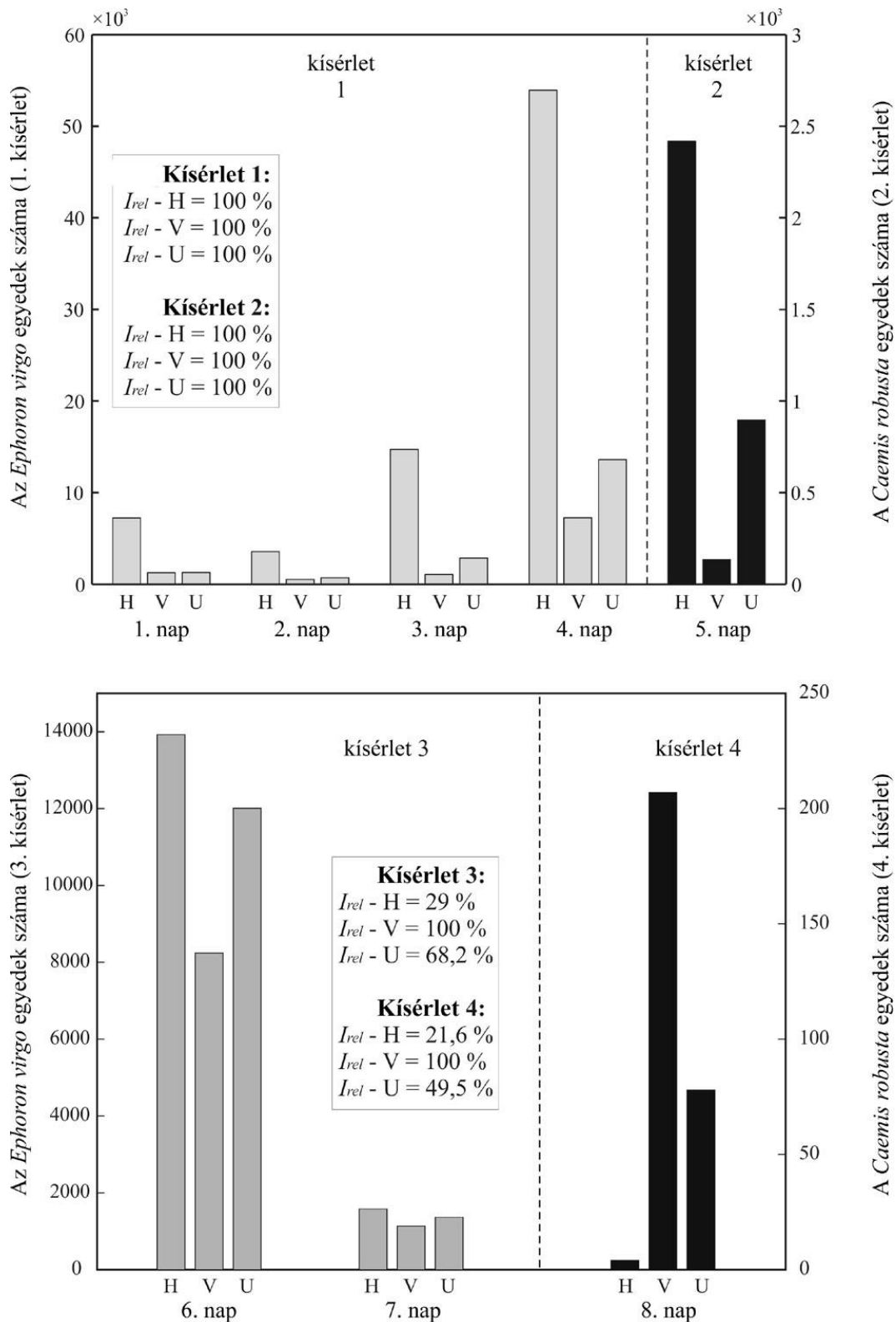
A 3. kísérletben 360 fotó készült, amelyeken közel 38 000 *E. virgo* egyed azonosítottunk a képkéértékelő szoftverrel. Rajzásnaptól függően, (i) a vízszintesen poláros fény 1,4–1,7-szer több kérészt vonzott, mint a függőlegesen poláros, (ii) a polarizálatlan fény 1,2–1,5-szer volt vonzóbb a függőlegesen polárosnál, és (iii) a vízszintesen poláros fény 1,2-szer volt vonzóbb, mint a polarizálatlan, mely különbségek statisztikailag szignifikánsak. A vonzott kérészek összegyedszámát alapul véve megállapítható, hogy (i) a vízszintesen poláros fény 1,7-szer vonzóbb volt, mint a függőlegesen poláros, (ii) a polarizálatlan fény 1,4-szer több dunavirágot vonzott, mint a függőlegesen poláros, és (iii) a vízszintesen poláros fény 1,2-szer vonzóbb volt, mint a függőlegesen poláros. A 3. kísérlet alapján megállapítható, hogy a függőlegesen poláros fény volt a legkevésbé vonzó a dunavirágok számára, habár az intenzitása e fényforrásnak volt a legnagyobb.

A 4. kísérletben 289 *C. robusta* kérészt azonosítottunk. Az eredményeink azt mutatják, hogy (i) a függőlegesen poláros fény 51,8-szer volt vonzóbb a *C. robusta* számára, mint a vízszintesen poláros, (ii) a függőlegesen poláros fény 2,7-szer több kérészt vonzott, mint a polarizálatlan, és (iii) a polarizálatlan fény 19,5-szer vonzóbb volt, mint a vízszintesen poláros, mely különbségek statisztikailag szignifikánsak. A 4. kísérlet eredményei alapján levonható a következtetés, miszerint a függőlegesen poláros fény sokkal vonzóbb a *C. robusta* számára, ha e fény intenzitása a három fényforrás közül a legnagyobb.

1.1. táblázat. A különböző polarizációs sajátságú és intenzitású fényt kibocsátó fényforrások és fénycsapdák által vonzott és csapdába ejtett *E. virgo* és *C. robusta* kérészek egyedszáma az 1–5. terepkísérletekben.  $I_{rel}$ : relatív fényintenzitás.

<i>Kibocsátott fény</i>	<i>E. virgo</i> egyedszám (1. terepkísérlet)					<i>C. robusta</i> egyedszám (2. terepkísérlet)
	1. nap	2. nap	3. nap	4. nap	1–4. napok	5. nap
<i>vízszintesen poláros,</i> $I_{rel} = 100 \%$	7242	3560	12 725	53 923	79 450	2419
<i>függőlegesen poláros,</i> $I_{rel} = 100 \%$	1276	525	1 065	7 249	10 115	135
<i>polarizálatlan,</i> $I_{rel} = 100 \%$	1282	700	2 857	13 608	18 447	898

<i>Kibocsátott fény</i>	<i>E. virgo</i> egyedszám (3. terepkísérlet)			<i>Kibocsátott fény</i>	<i>C. robusta</i> egyedszám (4. terepkísérlet)
	6. nap	7. nap	6–7. nap		8. nap
<i>vízszintesen poláros,</i> $I_{rel} = 29 \%$	13 925	1578	15 503	<i>vízszintesen poláros,</i> $I_{rel} = 22 \%$	4
<i>polarizálatlan,</i> $I_{rel} = 68 \%$	12 010	1363	13 373	<i>polarizálatlan,</i> $I_{rel} = 50 \%$	78
<i>függőlegesen poláros,</i> $I_{rel} = 100 \%$	8 239	1132	9 371	<i>függőlegesen poláros,</i> $I_{rel} = 100 \%$	207



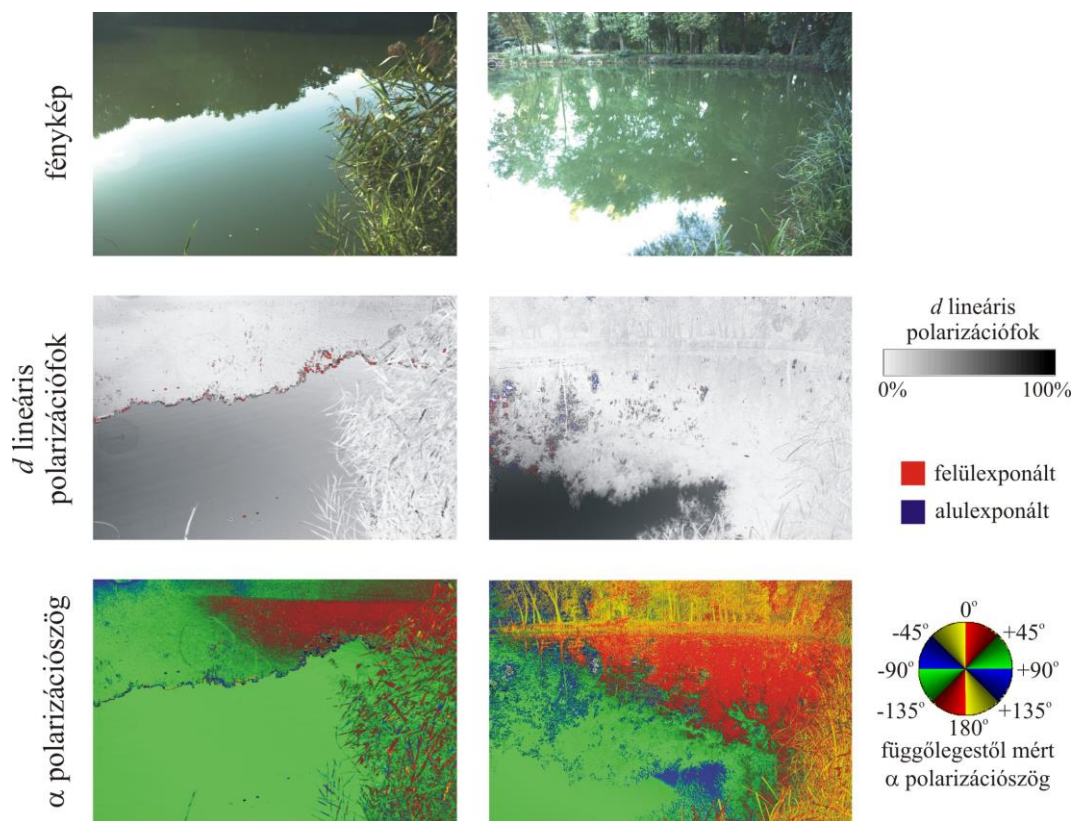
1.12. ábra. A különböző polarizációs sajátosságú és intenzitású fényt kibocsátó fényforrások és fénycsapdák által vonzott és csapdába ejtett *E. virgo* és *C. robusta* kérészek egyedszáma az 1–5. terepkísérletekben.  $I_{rel}$ : relatív fényintenzitás, H: vízszintesen poláros fény, V: függőlegesen poláros fény, U: polarizálatlan fény.

1.2. táblázat. A függőlegesen poláros (V), vízszintesen poláros (H) és polarizálatlan (U) fényt kibocsátó fényforrások és fénycsapdák által vonzott *E. virgo* és *C. robusta* egyedek számának statisztikai összevetése ( $\chi^2$  teszt) az 1–4. terepkísérletek esetében.

<i>E. virgo</i>	<b>1. kísérlet 1. nap</b>	V versus U	$\chi^2 = 0,0141$ , df = 1, p = 0.9056	nem szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 4167,245$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 4178,581$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
	<b>1. kísérlet 2. nap</b>	V versus U	$\chi^2 = 25$ , df = 1, p < 0.000001	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 1920,094$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 2254,89$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
	<b>1. kísérlet 3. nap</b>	V versus U	$\chi^2 = 818,7823$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 8011,001$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 11817,33$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
	<b>1. kísérlet 4. nap</b>	V versus U	$\chi^2 = 1938,768$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 24067,45$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 35612,08$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
<b>1. kísérlet 1-4. napok</b>	V versus U	$\chi^2 = 2430,58$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns	
	H versus U	$\chi^2 = 38013,08$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns	
	H versus V	$\chi^2 = 53674,34$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns	
<i>C. robusta</i>	<b>2. kísérlet 5. nap</b>	V versus U	$\chi^2 = 563,5712$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 697,4498$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 2042,543$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
<i>E. virgo</i>	<b>3. kísérlet 6. nap</b>	V versus U	$\chi^2 = 354,02$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 70,72$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 741,55$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
	<b>3. kísérlet 7. nap</b>	V versus U	$\chi^2 = 10,62$ , df = 1, p = 0.0011	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 7,80$ , df = 1, p = 0.0052	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 36,95$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
<i>C. robusta</i>	<b>4. kísérlet 8. nap</b>	V versus U	$\chi^2 = 30,32$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus U	$\chi^2 = 41,93$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns
		H versus V	$\chi^2 = 126,18$ , df = 1, p << 0.000001	szignifikáns

### 1.2.5. Elemzés

Az eredmények alapján kimutattuk, hogy a két vizsgált kérészfaj kevésbé vonzódik a függőlegesen poláros fényhez, mint a polarizálatlanhoz. A különbség a vízszintesen poláros és a függőlegesen poláros fény között még kifejezettebb: az előbbi sokkal vonzóbb, mint az utóbbi. E viselkedés jelentősége abban áll, hogy a kérészek vízfelszíni repülésükkor visszafordulnak azon felszínrészekről, amelyek függőlegesen vagy nem vízszintesen poláros fényt tükröznek, így jelezve a kérészek rajzása és petézése szempontjából alkalmatlan partrészeket (1.3. és 1.13. ábrák). Egy különleges következménye e viselkedésnek a kompenzációs repülésben részt vevő kérészek visszafordulása a hidaknál (SZÁZ *et al.* 2015), ahol a híd vízre vetülő árnyékánál és tükörképénél gyakran függőlegesen poláros fény tükröződik. E jellegzetes viselkedés MÁLNÁS *et al.* (2011) szerint a *P. longicauda* esetében populációs szintű előnytelen változásokat is okozhat.



1.13. ábra. Egy víztest széli régiójának fényképe, valamint a spektrum kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért  $d$  lineáris polarizációfokának és az óramutató járása szerint a függőlegestől mért  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatai. A fehér kettős fejű nyilak a helyi polarizációirányt mutatják. A vízparti növényzet tükörképénél nem vízszintesen poláros fény tükröződik.

Természetes körülmények között az *E. virgo* és a *C. robusta* kérészek a vízfelszín felett rajzanak, ugyanakkor a vízhez közeli mesterséges fényforrások fényszennyezésükkel magukhoz vonzhatják és csapdába ejthetik e rovarokat pozitív fototaxisuk révén (LONGCORE & RICH 2004). A két faj esetében pozitív fototaxisukat kihasználva tudtuk véghezvinni terepkísérleteinket, amelyek során különböző polarizációjú fényforrásokkal vonzottuk a kérészeket. Az *E. virgo* és a *C. robusta* fajok esetében a függőlegesen poláros fény minimális vonzásának oka és egyben jelentősége abban rejlik, hogy a vízparti növényzet árnyéka és tükörképe a vízfelszín szélén gyengén ( $d < 25\%$ ) és nem vízszintesen poláros. A fent említett jelenség oka a következő: a vízfelszín polarizációs mintázatát két fénykomponens határozza meg: (i) a vízfelszínről tükröződő, és (ii) a vízfelszín alól érkező fény. Az első összetevő többnyire vízszintesen poláros a napfény és az égboltnál levegő-víz határon bekövetkező tükröződési polarizációja miatt (HORVÁTH 1995), míg a második mindig függőlegesen poláros a víz alól érkező fény víz-levegő határon történő fénytörési polarizáció miatt (HORVÁTH & VARJÚ 1995). Ha az első vagy a második összetevő dominál, akkor a víztestről visszatérő fény eredő polarizációja vízszintes vagy függőleges. Ha mindkét összetevő hasonló intenzitású, akkor a  $d$  polarizációfok alacsony. Az optikai szempontból nyílt vízfelszínről a napfény és az égboltnál szabadon tükröződhet, és a vízfelszín polarizációjának iránya általában vízszintes. A vízparti növényzet tükröződésénél a fény forrása a növényzetről visszavert, a közvetlen napfényénél és égboltnál kisebb intenzitású fény. Eképpen a második (a víztestből kilépő) fénykomponens általában elnyomja az első (vízfelszínről tükröződő) összetevőt, különösen a világosabb víztestek esetében, amelyek vízben lebegő részecskéiről több fény szóródik vissza. Végül soron ennek eredményeként a növényzet tükörképe függőlegesen poláros. Hasonló a helyzet a vízfelszín árnyékos részén is, ahol nincs a közvetlen napfénynek hozzájárulása a polarizációhoz. A tükröződés és árnyékolás hatása gyakran együttesen jelenik meg, mert a vízparti növényzet árnyékot vet a saját vízparti tükörképére.

A fotók kiértékelésével nem lehetett megállapítani a kérészegyek nemét, de mivel a kompenzációs repülésben csak nőstények vesznek részt (SZÁZ *et al.* 2015), ezért leszögezhető, hogy az *E. virgo* fajjal folytatott kísérleteinkben nőstények vettek részt. Másrészt viszont a *C. robusta* hím és nőstény egyedei egyaránt gyűjthetők fénycsapdával (BRODSKIY 1973; TURCSÁNYI *et al.* 2009), ezért feltételezhető, hogy a kapott eredmények e faj mindkét nemére érvényesek.

A *P. longicauda* fajjal folytatott korábbi terepkísérleteinkben KRISKA *et al.* (2007) vízszintes tesztfelületeket (matt fekete és fehér vászon, fényes fekete és fehér műanyag fólia, alumíniumfólia) terített ki füves területre a Tisza mellett, és tanulmányozták az e felületek felett elengedett egyedek repülését naplementekor. E kérészek visszafordultak a vízszintes poláros, megfelelően magas polarizációfokú fényt tükröző fényes fekete és fehér műanyag fóliák szélénél. E kísérletben a vízszintes poláros műanyag fóliákat gyengén és nem vízszintes poláros napfény által megvilágított gyep övezte. Ezért e mesterségesen kialakított kísérleti helyzetben az optikai ingerek térbeli sorrendje (a műanyag fóliák által tükrözött erősen és vízszintes poláros fényt a gyep által visszavert gyengén és nem vízszintes poláros fény követte) utánozta a természetes viszonyok között a vízfelszínen megjelenő helyzetet (a nyílt vízfelszín által tükrözött erősen és vízszintes poláros fényt a vízfelszín partszélének gyengén és nem vízszintes poláros fénye követte). Mindkét helyzetben a repülő kérészek visszafordultak a vízszintes poláros felületek szélétől a függőlegesen poláros fény rájuk gyakorolt minimális vonzó hatása miatt.

Egy *P. longicauda* fajjal folytatott másik kutatás (MÁLNÁS *et al.* 2011) eredményeként már feltételezhető volt, hogy a folyóparti növényzet gyengén és függőlegesen poláros tükröképe és árnyéka miatt a vízszegélyen kialakuló optikai gát szerepet játszhat abban, hogy a kérészek rajzásuk során, a hím szubimágók vedlését leszámítva, végig a vízfelszín felett maradnak. A vízszintes poláros jel hiányában a kérészek elhagyják az adott felszíni régiót. Fenti kutatásunk az *E. virgo* és a *C. robusta* esetében kimutatta, hogy e kérészek a függőlegesen poláros fényvel szemben a vízszintes poláros és polarizálatlan fényt részesítik előnyben. Feltételezhető, hogy e viselkedés adaptív értéke az, hogy lehetővé teszi a kérészek vízfelszín felett maradását rajzáskor. A vízpartokon gyakran kialakul egy vízszintes sötét iszapos sáv, amely általában vízszintes poláros fényt visszaverve vízfelszínt utánoz a polarotaktikus vízirovarok számára. Ha a vízfelszín szélén nem alakulna ki a vízparti növényzet függőlegesen poláros árnyéka és tükröképe, ami távol tartja a nőstény kérészeket az iszapfelszíntől, akkor azok lerakhatnák petecsomóikat a lárvák kifejlődéséhez alkalmatlan területre.

Habár a terepkísérleteinkben gyakorlatilag teljesen poláros fényvel ( $d \approx 100\%$ ) dolgoztunk, fontos megjegyezni, hogy a  $d$  polarizációfok csak abból a szempontból fontos, hogy ez alacsonyabb vagy magasabb-e, mint az adott faj  $d^*$  polarizáció-érzékenységi küszöbe. Pataklakó kérészfajokkal folytatott korábbi polarizáció-érzékenységi vizsgálatokban a  $d^*$  tartományára KRISKA *et al.* (2009) alapján a következők ismeretesek: *Baetis rhodani*: 32



$\% \leq d^* \leq 55 \%$ , *Ephemera danica*, *Epeorus silvicola*, *Rhithrogena semicolorata*:  $55 \% \leq d^* \leq 92 \%$ . Az *E. virgo* és a *C. robusta* viselkedésének adaptív előnyére utaló fenti magyarázat feltételezi, hogy mindkét faj képes érzékelni a vízfelszín határán kialakuló gyengén ( $d^* < d$ ) és függőlegesen poláros fényt.

A kérészek és álkérészek (Plecoptera) sikeres kolonizációjában fontos szerepet tulajdonítanak a kutatók a kompenzációs repülésnek (SPIETH 1940; TERCEDOR & ORTEGA 1991). A kompenzációs repülés eredményeként a kérésznőtények több kilométert repülnek a folyásiránnyal szemben a folyó középvonalaiban, miközben egyes mellékvízfolyások betorkollását elérve és ezek irányában továbbrepülve újabb élőhelyeket népesíthetnek be. E jelenség magyarázatot adhat az *E. virgo* legújabb kori gyors elterjedésére Európa folyóiban, a korábbi több évtizedes eltűnését követően (IBANEZ *et al.* 1991; SZÁZ *et al.* 2015). E kolonizációban a folyóközeli kérészeknél fontos szerepe lehet a pozitív polarotaxisnak, ami a folyó és mellékfolyó vízszintesen poláros jele alapján vezeti a nőstény kérészeket az alkalmas élőhelyekre. Másrészt, a folyóba torkolló kisebb csatornák és ártéri kisvizek alkalmatlan helyei lehetnek a lárvák kifejlődésének, ezért kifejezetten előnyös lehet, hogy az ezek kisebb mérete miatt a vízfelszínen kialakuló teljes vagy majdnem teljes árnyékoltság és a növényzet tükröződése (1.13. ábra) miatt kialakuló, nem vízszintes polarizáció távol tartja a nőstény kérészeket.

A 3. terepkísérletben az *E. virgo* előnyben részesítette a vízszintesen poláros fényt, amikor ennek intenzitása a fele, illetve harmada volt a polarizálatlan és függőlegesen poláros fényének. E kísérletben az egyedeket pozitív polarotaxis (vonzódás a vízszintes polarizációhoz) vezette, ami felülírta a pozitív fototaxist (vonzódás a nagyobb intenzitású fényhez). Másrészt viszont a 4. terepkísérletben a *C. robusta* előnyben részesítette a függőlegesen poláros fényt, amikor annak intenzitása kétszer, illetve ötször nagyobb volt, mint a polarizálatlan és a vízszintesen poláros fényé. Ekkor a *C. robusta* viselkedésére inkább a fototaxis volt hatással, mint a polarotaxis. Ezért megállapítható, hogy a kritikus fényintenzitás, mellynél a polarotaxis képes kontrollt gyakorolni a fototaxis felett, a két vizsgált kérészfajnál eltérő.

## 1.3. A szürkületi ég részleges holdfáziskor rendellenes polarizációja és annak tájékozódásban betöltött lehetséges szerepe<sup>2</sup>

### 1.3.1. Célkitűzések

Éjszaka, amikor már nincs szórt napfény, az égbolt polarizációs mintázatának kialakításában a holdfény játssza a főszerepet (GÁL *et al.* 2001b). Bár a szürkületi (napnyugta utáni alkonyati és napkelte előtti pirkadati) ég és éjszakai ég polarizációs tulajdonságait szórványosan már tanulmányozták (GEHRELS 1974; CRONIN *et al.* 2006), továbbá összehasonlították a telihold által megvilágított éjszakai és a Nap által megvilágított nappali tiszta égboltok polarizációs jellemzőit (GÁL *et al.* 2001b), a Nap és a Hold által egy időben megvilágított égbolt polarizációs jellemzőinek szürkületkori változását még nem vizsgálták. Ez a speciális átmeneti állapot akkor jelentkezik, amikor naplemente után (vagy napkelte előtt) a Hold már látható az égen és bizonyos mennyiségű szórt napfény is jelen van még, miáltal a szórt napfény és holdfény intenzitása egy darabig közel azonos.

Mérőkampányunk során célul tűztük ki a Nap és a Hold által megvilágított ég szürkületkori polarizációs változásainak feltárását, részleges holdfázis és telihold mellett egyaránt. Szakirodalmi adatok alapján elemezni kívántuk továbbá e polarizáció-átalakulás lehetséges hatásait az éjjel vagy szürkületkor aktív, polarizáció-érzékeny állatok tájékozódására.

### 1.3.2. Vizsgálati módszerek

A Nap és a Hold által megvilágított ég polarizációs mintázatait részleges holdfázis (78 % és 72 %) és telihold (100 %) mellett az Estrato Kutató és Fejlesztő Kft. (ügyvezető: Barta András) által épített 180° látószögű képalkotó polariméterrel mértük, ami a szombathelyi Gothard Obszervatórium egyik épületének tetején található (47° 15.481' É, 16° 36.213' K). E

---

<sup>2</sup> BARTA A., FARKAS A., SZÁZ D., EGRI Á., BARTA P., KOVÁCS J., CSÁK B., JANKOVICS I., SZABÓ G., HORVÁTH G. (2014): Polarization transition between sunlit and moonlit skies with possible implications for animal orientation and Viking navigation: anomalous celestial twilight polarization at partial moon. *Applied Optics*, 53, 23, 5193–5204. (Q1, IF: 1,649)

műszernek 3 kamerája van (Imaging Source DFK41BU02, Németország), amelyek egy-egy halszemoptikával (FE185C046HA-1, Japán) és közvetlenül a kamerák CCD-lapkája elé helyezett lineáris polárszűrővel (Edmund Optics, 43-785, USA) rendelkeznek. A polárszűrők áteresztési iránya  $\varphi_1 = 100,27^\circ$ ,  $\varphi_2 = 45,39^\circ$  és  $\varphi_3 = 142,28^\circ$  szöget zár be a kamerák belső viszonyítási irányával az óramutató járásával megegyező irányban. A kamerák a lineáris polarimetriához szükséges polarizációs felvételeket azonos beállítások mellett készítették. Mivel a kamerák által látott égbolt a kamerák közti távolságokhoz képest igen távol helyezkedik el, ezért a parallaxishiba elhanyagolható mértékű. A kamerák kimenetén megjelenő nyers képeken a vörös, zöld és kék digitális intenzitásértékek a fényintenzitással egyenes arányban állnak. Mindhárom kamerában a halszemoptikák által alkotott, 4,6 mm átmérőjű kör alakú kép vetül a 4,4 mm  $\times$  5 mm méretű CCD érzékelőre, ezért e kép egy-egy vékony körszelete alul és felül lemaradt.

A Nap és Hold azimut- és elevációs szögét a Meeus-féle algoritmussal határoztuk meg, számításba véve a légköri fénytörést is (MEEUS 1998).

Az égbolt  $\alpha$  polarizációs szög-mintázatának minden egyes képpontja a helyi meridiánhoz képesti rezgéssík irányát adja meg az ég adott pontjában. E mintázat antiszimmetrikus a szoláris-antiszoláris meridiánra nézve, azonban a szögértékből  $90^\circ$ -ot kivonva, majd abszolútértéket képezve kaptuk a már szimmetrizált  $\alpha'$ -mintázatot minden képpontra:

$$\alpha' = |\alpha - 90^\circ|. \quad (1.3.1)$$

A szimmetrizált  $\alpha'$ -mintázat tükörszimmetriatengelyének  $\theta$  irányát a képi momentumok segítségével határoztuk meg. Egy kép  $M_{jk}$  momentumait adott spektrális tartományban a következőképpen számítjuk (TEAGUE 1980):

$$M_{jk} = \iint f(x, y) \cdot x^j y^k \cdot dx \cdot dy, \quad (1.3.2)$$

ahol  $f(x, y)$  az intenzitás értéke a kép  $(x, y)$  koordinátájú pontjában adott spektrális tartományban,  $M_{00}$  a kép össz-intenzitása,  $M_{10}/M_{00} = x_c$  és  $M_{01}/M_{00} = y_c$  pedig a kép középpontjának koordinátái. A kép centrális momentumainak definíciója:

$$\mu_{jk} = \iint f(x, y) \cdot (x - x_c)^j \cdot (y - y_c)^k \cdot dx \cdot dy. \quad (1.3.3)$$

A szimmetrizált  $\alpha'$ -mintázat szimmetriatengelyének irányát jellemző szög:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}}\right). \quad (1.3.4)$$

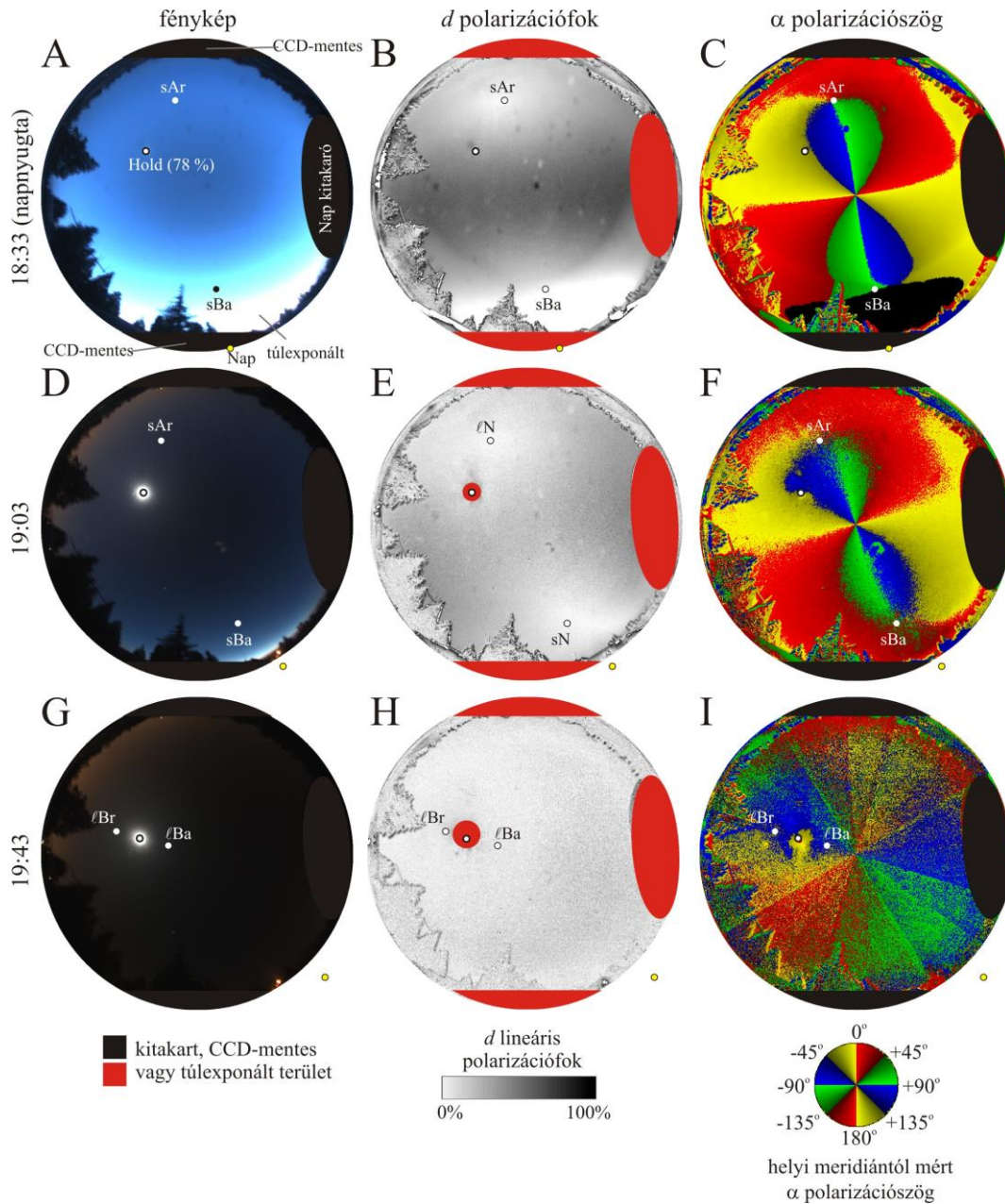
Az égbolt lineáris polarizációfok-mintázatán kiválasztottuk azon régiókat, melyeken a  $d$  polarizációfok kisebb, mint a  $d^* = 10\%$  küszöbérték. E küszöb alkalmas megválasztása esetén minden  $d$ -mintázaton csak két kis polarizációfokú tartomány adódott, amelyek középpontjaiban voltak a polarizálatlan ( $d = 0\%$ ) neutrális pontok. E neutrális pontok helyét az azimut- és zenit szöggel jellemeztük.

A Nap, illetve Hold által megvilágított égbolt közötti polarizáció-átmenet számítógépes modellezésének céljából kiszámítottuk e két égi fényforrás által létrehozott polarizációs mintázatok lineárkombinációját. A Nap és Hold adott állásai mellett a szórt égboltfény intenzitáseloszlását az egyszeres szóráson alapuló Rayleigh-modell alapján határoztuk meg (COULSON 1988), míg a polarizációfok és -szög mintázatait a Berry-modell (BERRY *et al.* 2004) segítségével számítottuk. Adott Nap- és Hold-állás esetén az égbolt minden egyes pontjában meghatároztuk az  $\underline{S} = (I, Q, U)$  Stokes-vektort az  $I$  intenzitás,  $d$  lineáris polarizációfok és  $\alpha$  polarizációs szög mért értékeiből (AZZAM & BASHARA 1989). A Naphoz és Holdhoz tartozó Stokes-vektor-mintázatokot komponensenként összeadtuk egy  $w$  súlyfaktor figyelembevételével, ami azt jelenti, hogy a Hold járuléka a Napénak  $w$ -szerese (például  $w = 1$  esetén a Nap és Hold szórt fénye azonos mértékben járul hozzá az égbolt-polarizációhoz). Végül az eredő Stokes-vektor-mintázatok  $I$ ,  $d$  és  $\alpha$  összetevőit határoztuk meg és színkódolással szemléltettük.

### 1.3.3. Eredmények

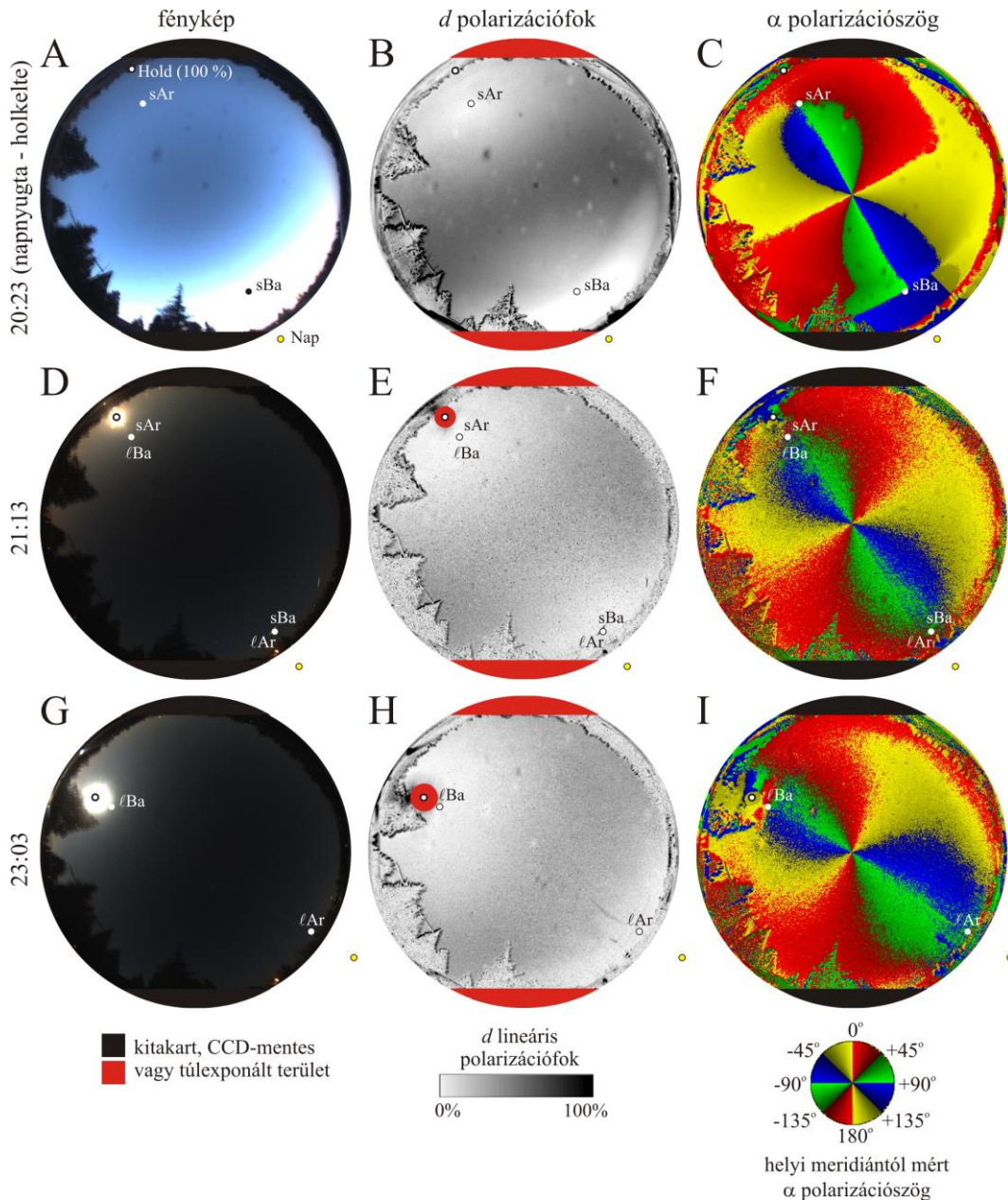
Amíg az égen a szórt napfény dominált (1.14A ábra), addig a szoláris Arago-féle (sAr) és Babinet-féle neutrális pontok (sBa) jelentek meg az égbolt  $d$ -mintázataiban (1.14B ábra), amikor pedig a szórt holdfény volt domináns (1.14G ábra), akkor a lunáris Babinet- (lBa) és Brewster-pontok (lBr) voltak megfigyelhetők (1.14H ábra). Az  $\alpha$ -mintázatokban e neutrális pontok ott helyezkednek el, ahol az  $\alpha$  polarizációs szög hirtelen  $90^\circ$ -ot változik egy meridián mentén (1.14C és I ábrák). E neutrális pontok mindig a szoláris-antiszoláris, illetve a lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkednek el, ha a szórt napfény, illetve holdfény dominál. Ha azonban a szórt napfény és holdfény hasonló intenzitású (1.14D ábra), akkor az sN szoláris

(Naphoz közelebbi) és az  $\ell N$  lunáris (Holdhoz közelebbi) neutrális pontok a szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánon kívül helyezkednek el (1.14E–F ábrák).



1.14. ábra. Tiszta égbolt fényképe, valamint az égboltfény  $d$  polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatai a spektrum kék (450 nm) tartományában 2013. március 22-én naplemente után Szombathelyen, mikor a Hold 78%-os fázisban járt. A fényképeken és a  $d$ -mintázatokon látható foltokat a polariméter műanyag védőburkára hullott esőcseppek okozták. A Nap, a Hold és a neutrális pontok helyét pontok jelzik. sAr: szoláris Arago-pont, sN: szoláris neutrális pont,  $\ell N$ : lunáris neutrális pont, sBa: szoláris Babinet-pont,  $\ell Ba$ : lunáris Babinet-pont,  $\ell Br$ : lunáris Brewster-pont.

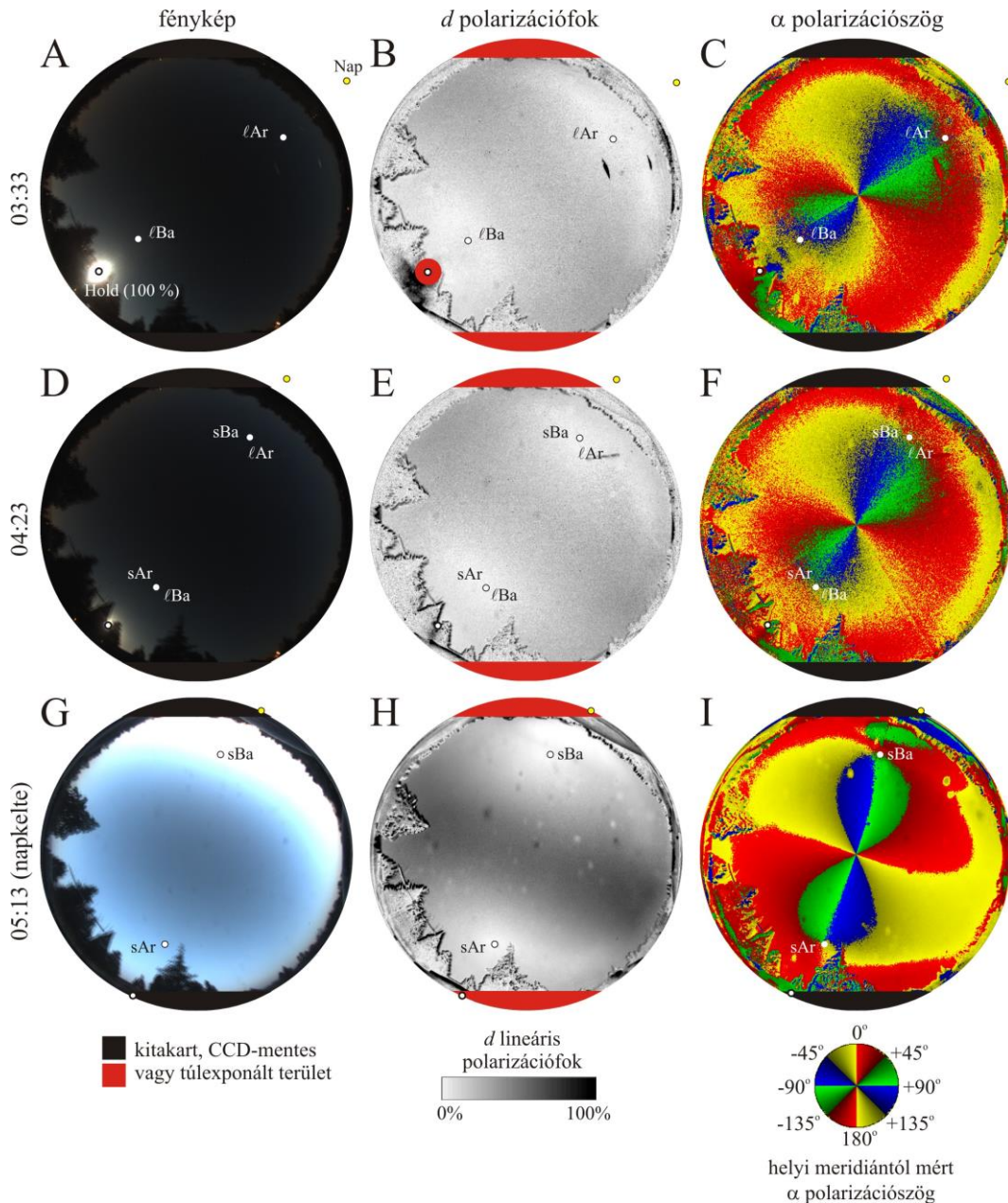
Az 1.15. ábrán jól látható, hogy teliholdkor a szoláris sAr és sBa, valamint a lunáris  $\ell$ Ar és  $\ell$ Ba neutrális pontok rendre a szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkednek el. Az átmeneti helyzetben, mikor a szórt napfény és holdfény közel egyforma erősségű (1.15D ábra), a neutrális pontok elnevezése kettős: a Naphoz közelebbi neutrális pontot egyaránt hívhatjuk szoláris Babinet- vagy lunáris Arago-pontnak, míg a Holdhoz közelebbit nevezhetjük lunáris Babinet- vagy szoláris Arago-pontnak (1.15E–F ábrák) is.



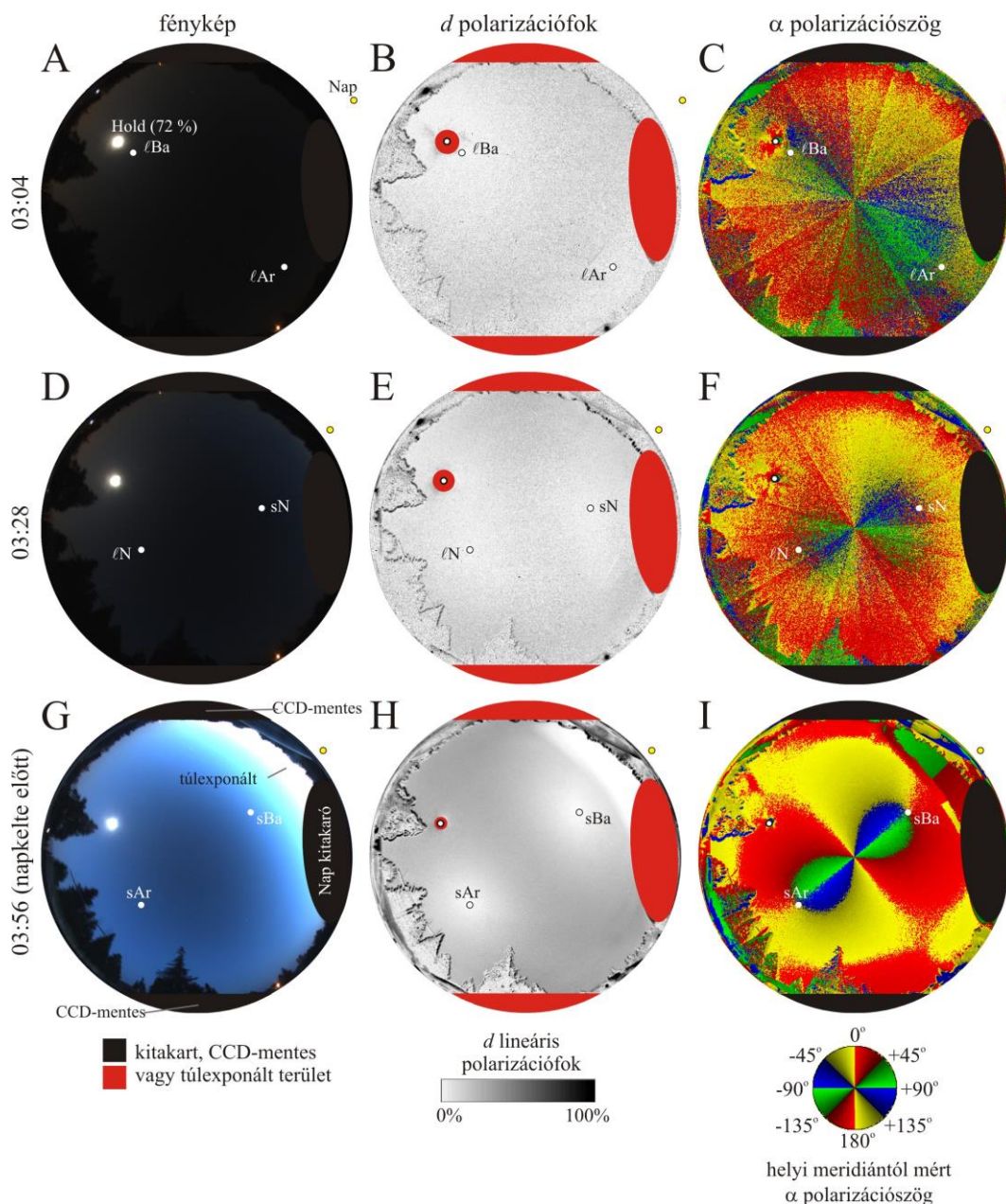
1.15. ábra. Mint az 1.14. ábra, csak 2013. április 25-én naplemente és holdkelte után teliholdkor (100%-os holdfázis mellett). sAr: szoláris Arago-pont, sBa: szoláris Babinet-pont,  $\ell$ Ba: lunáris Babinet-pont,  $\ell$ Ar: lunáris Arago-pont.



Az 1.16. ábrán látható, hogy teliholdas napkelte előtt a napfény és holdfény által megvilágított égbolt polarizációs mintázatai közötti átmenet hasonló a teliholdas napnyugta után bekövetkező átmenethez (1.15. ábra), csupán a változások időrendje fordított. Az 1.17. ábra szerinti részleges (72 %) hold idején az égbolt-polarizáció hasonlóan megy át a napfény általi megvilágításból a holdfény általi megvilágításba, mint napnyugta után (1.14. ábra) részleges holdkor (78 %), csupán a változások időrendje fordított.



1.16. ábra. Mint az 1.14. ábra, csak 2013. április 26-án napkelte előtt, teliholdkor (100%-os holdfázis mellett). sAr: szoláris Arago-pont, sBa: szoláris Babinet-pont, ℓBa: lunáris Babinet-pont, ℓAr: lunáris Arago-pont.



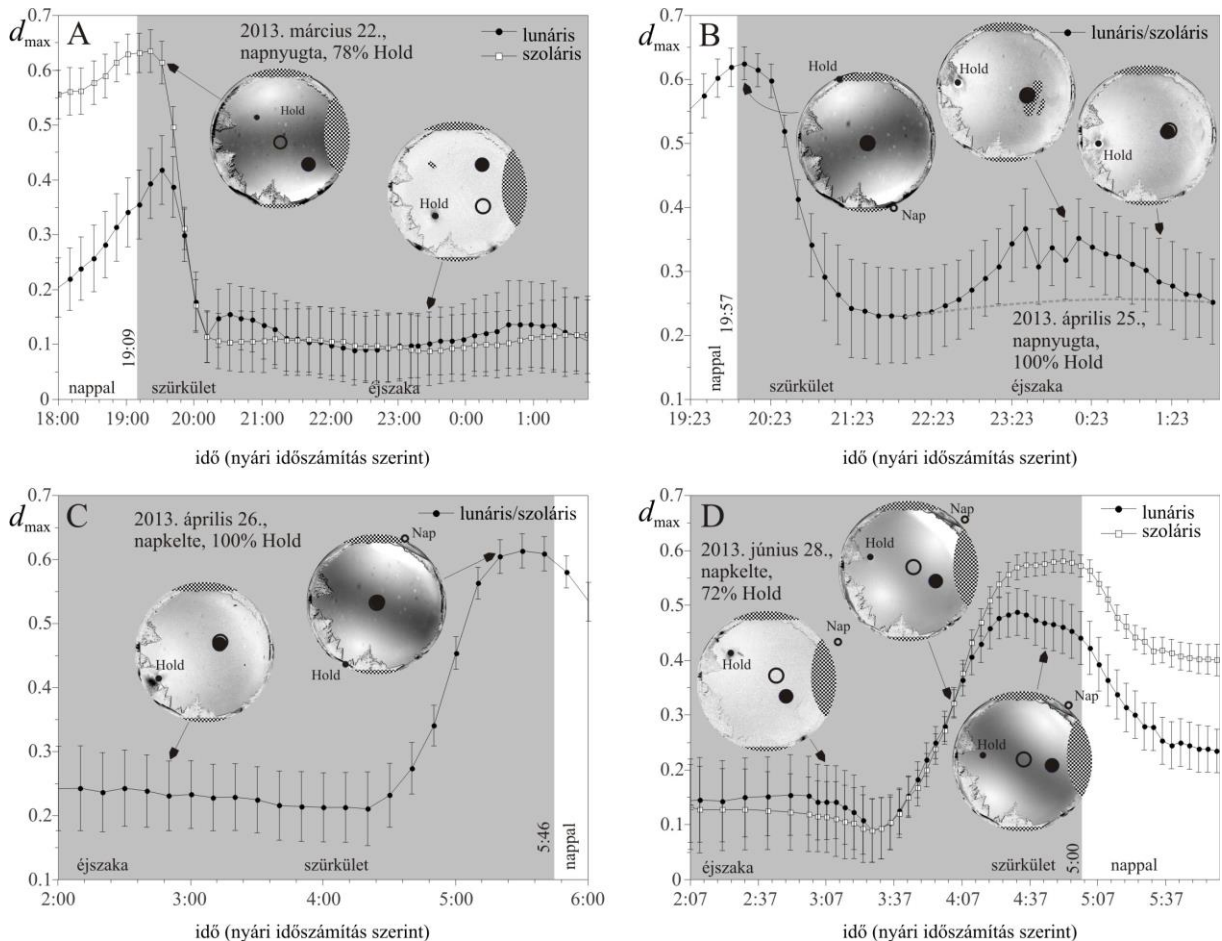
1.17. ábra. Mint az 1.14. ábra, csak 2013. június 28-án napkelte előtt, 72%-os holdfázis mellett. sAr: szoláris Arago-pont, sBa: szoláris Babinet-pont, ℓBa: lunáris Babinet-pont, ℓAr: lunáris Arago-pont, sN: szoláris neutrális pont, ℓN: lunáris neutrális pont.

Az 1.18. ábra az égboltfény  $d_{\max}$  maximális polarizációfokát mutatja a spektrum zöld (550 nm) tartományában az idő függvényében az 1.14–1.17. ábrákon látható négy különböző alkonyati helyzetre. Az 1.18A ábra szerint napnyugta előtt a szórt napfény által létrehozott  $d_{\max}$  jelentősen nagyobb, mint a szórt holdfény keltette maximális polarizációfok, de e két  $d_{\max}$ -érték fokozatosan csökken és összeolvad napnyugta után. Ugyanez a jelenség játszódik le napkeltekor is, csak fordított sorrendben (1.18D ábra): napkelte előtt a szórt nap- és

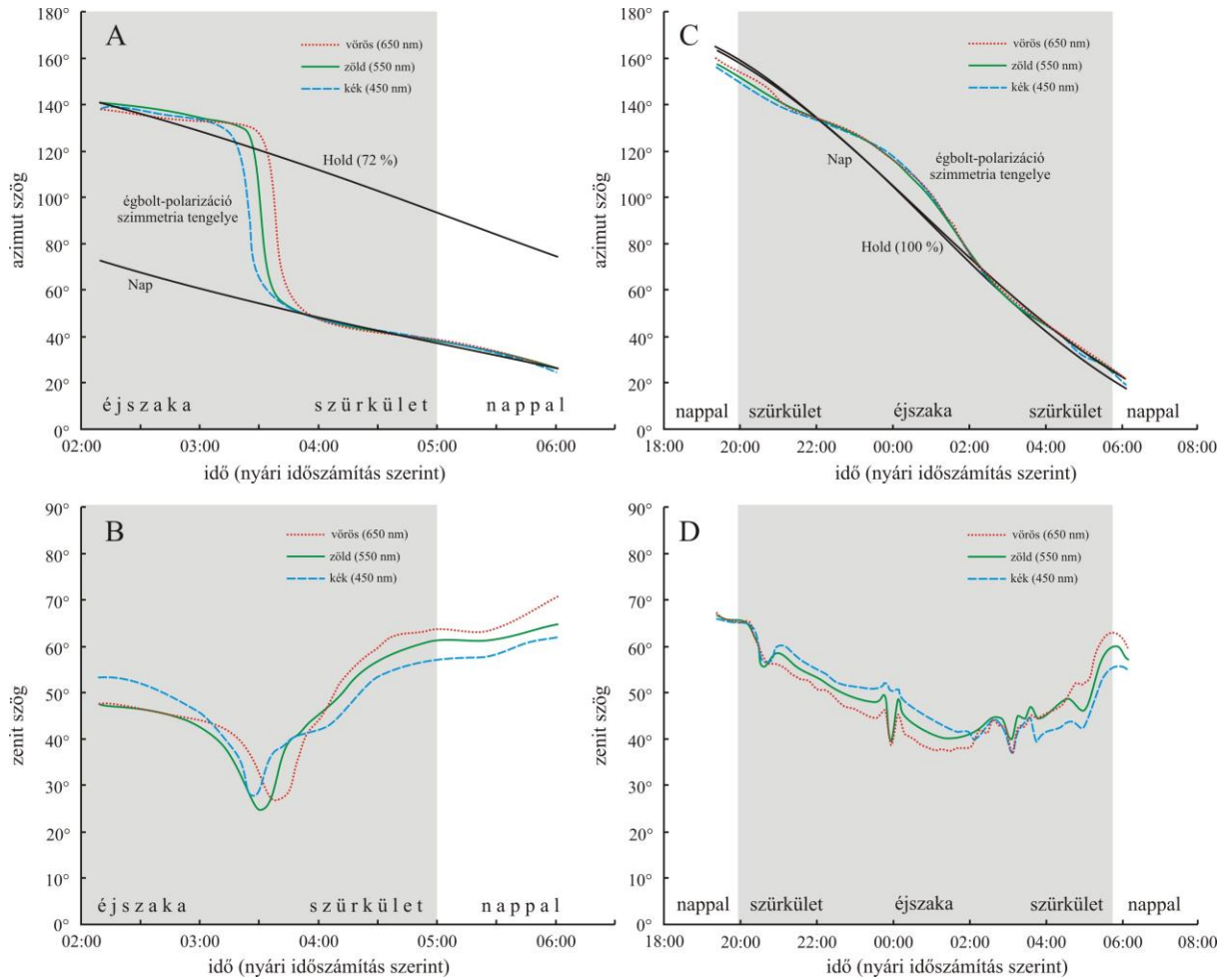


holdfény által keltett  $d_{\max}$ -értékek majdnem azonosak, és napkelte után szétválnak úgy, hogy a Nap nagyobb  $d_{\max}$ -ot hoz létre, mint a Hold.

Teliholdkor a szórt nap- és holdfény által keltett  $d_{\max}$ -értékek az égbolt ugyanazon területén helyezkednek el. Amint az 1.18C ábrán látható,  $d_{\max}$  az idővel kissé csökken egészen napkelteig, aztán napkelte után gyorsan növekszik a maximális 61 %-ig. Az 1.18B ábrán ugyanez látható fordított időbeli sorrendben:  $d_{\max}$  röviddel napnyugta előtt a legnagyobb (63 %), aztán gyorsan csökken. Az 1.18B ábrán  $d_{\max}$  napnyugta után ér el egy újabb, kisebb csúcstérteket. Ez utóbbi azonban egy kausztikának köszönhető műtermék, amit a képkalkító polariméter műanyag védőkupolájáról történő fényvisszaverődés okozott. Az 1.18B ábrán szaggatott vonal jelöli az elméleti várakozást. Mind részleges hold, mind telihold idején  $d_{\max}$  közvetlenül napkelte előtt vagy napnyugta után minimális.



1.18. ábra. Az égboltfény  $d$  polarizációfokának  $d_{\max}$  maximuma és szórása a spektrum zöld (550 nm) tartományában az idő függvényében az 1.14. (A), 1.15. (B), 1.16. (C) és 1.17. (D) ábra négy különböző szituációjára. A  $d$ -értékeket kis, kör alakú égi területeken átlagoltuk a Naptól (üres körök) és a Holdtól (vastag fekete körök)  $90^\circ$ -ra. A beillesztett képek tipikus  $d$ -mintázatokat mutatnak, melyek időpontját nyilak jelzik. A fehér és fekete pontok a Nap és a Hold helyét mutatják. A kitartat égrészeket kockás mintázat jelöli.



1.19. ábra. (A) A Nap és a Hold azimutszöge, valamint az égbolt  $|\alpha-90^\circ|$ -mintázatának szimmetriatengelye (ahol  $\alpha$  az égboltfény polarizációs szöge) az idő függvényében képpalkotó polarimetriával mérve a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában Szombathelyen 2013. június 28-án, 72%-os holdfázis mellett. (B) Az  $\ell$ Ba lunáris Babinet-pont (másnéven sAr szoláris Arago-pont) zenittől mért szögtávolsága az idő függvényében ugyanarra az esetre, mint A. (C, D): Mint A és B, 2013. április 25–26-án teliholdkor, az 1.15., 1.16. és 1.18B–C ábrák szituációjával megegyezően.

Az 1.19A ábrán látható, amint a lunáris  $\ell$ Ar és  $\ell$ Ba, majd a szoláris sN és lunáris  $\ell$ N, később pedig a szoláris sAr és sBa neutrális pontokon átmenő meridiánnal egybeeső szimmetriatengely a lunáris meridiántól a szoláris meridiánig fordult. Amikor az égen a szórt holdfény dominált (1.17A–C ábrák), akkor az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye egybeesett a lunáris-antilunáris meridiánnal. Ha a szórt napfény volt domináns (1.17G–I ábrák), akkor a polarizáció szimmetriatengelye a szoláris-antiszoláris meridiánnal egyezett meg. Mikor pedig a szórt holdfény és napfény hasonló intenzitású volt (1.17D–F ábrák), akkor a szimmetriatengely iránya napkelte előtt a lunáris-antilunáris meridiánból váltott át a szoláris-antiszoláris meridiánba, és fordítva, napnyugta után a szoláris-antiszoláris

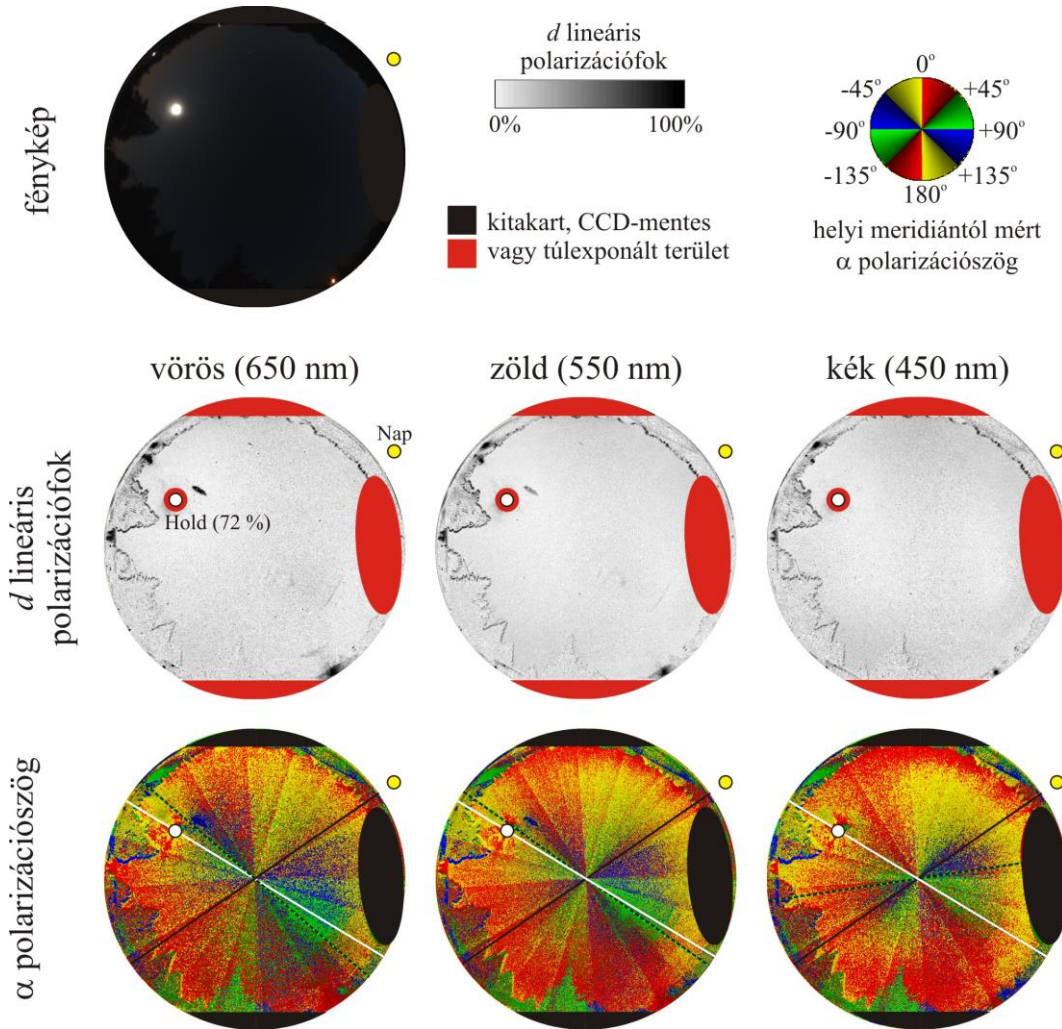
meridiánból váltott át a lunáris-antilunáris meridiánba. E váltást megelőzően a szimmetriatengely kissé lemaradt a lunáris-antilunáris meridiántól: az előbbi azimuttszöge kicsit nagyobb volt, mint az utóbbié az átmeneti időszakban (*1.19A ábra*). A szimmetriatengely lunáris-antilunáris és szoláris-antiszoláris meridián közötti átmenete egy enyhe hullámhosszfüggéssel rendelkezett: az átmenet először a kék, aztán a zöld, végül a vörös spektrális tartományban történt meg.

Az *1.19B ábra* az  $\ell$ Ba lunáris Babinet-pont  $\theta_{Ba}$  zenitszögét mutatja az idő függvényében ugyanazon helyzetre, mint az *1.19A ábrán*. Az  $\ell$ Ba lunáris Babinet-pont mindhárom spektrális tartományban először közeledett a zenithez, majd fokozatosan távolodott attól. A neutrális pontok az  $\alpha$  polarizációs szög mintázatában szereplő zöld-kék nyolcas alakzat csúcsában helyezkednek el. Az *1.19B ábra* szerint e nyolcas alakzat sugárirányú kiterjedése először csökkent, majd növekedett az idővel, amint az *1.17C,F,I ábrákon* is látható. Alkonyatkor és napközben az  $\ell$ Ba neutrális pont  $\theta_{Ba}$  zenitszöge nőtt a hullámhosszal, továbbá a  $\theta_{Ba}$  zenitszög először a kék, majd a zöld, végül a vörös tartományban érte el minimumát. Az *1.19C ábra* szerint teliholdkor az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye gyakorlatilag megegyezik az egybeeső szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánokkal. Éjszaka és késő alkonyatkor e szimmetriatengely kissé eltér az említett meridiánoktól, de ezen eltérés az égboltfény kis intenzitása által okozott zaj miatt is előfordulhat, és az alkonyat végéhez közeledve a szórt napfény erősödésével gyakorlatilag el is tűnik. Az *1.19D ábra* teliholdkor az  $\ell$ Ba lunáris Babinet-pont  $\theta_{Ba}$  zenitszögének hullámhosszfüggése és időbeli változása hasonló ahhoz, amit részleges hold (72 %) idején figyeltünk meg (*1.19B ábra*).

Az *1.20. ábrán* az égbolt-polarizáció szimmetriatengelyének hullámhosszfüggése látható az  $\alpha$  polarizációs szög-mintázaton napkelte előtt, részleges hold (72 %) esetén: A vörös (650 nm) és zöld (550 nm) tartományokban e szimmetriatengely közel van a lunáris-antilunáris meridiánhoz, míg a kékben (450 nm) már a lunáris-antilunáris és a szoláris-antiszoláris meridiánok között helyezkedik el.

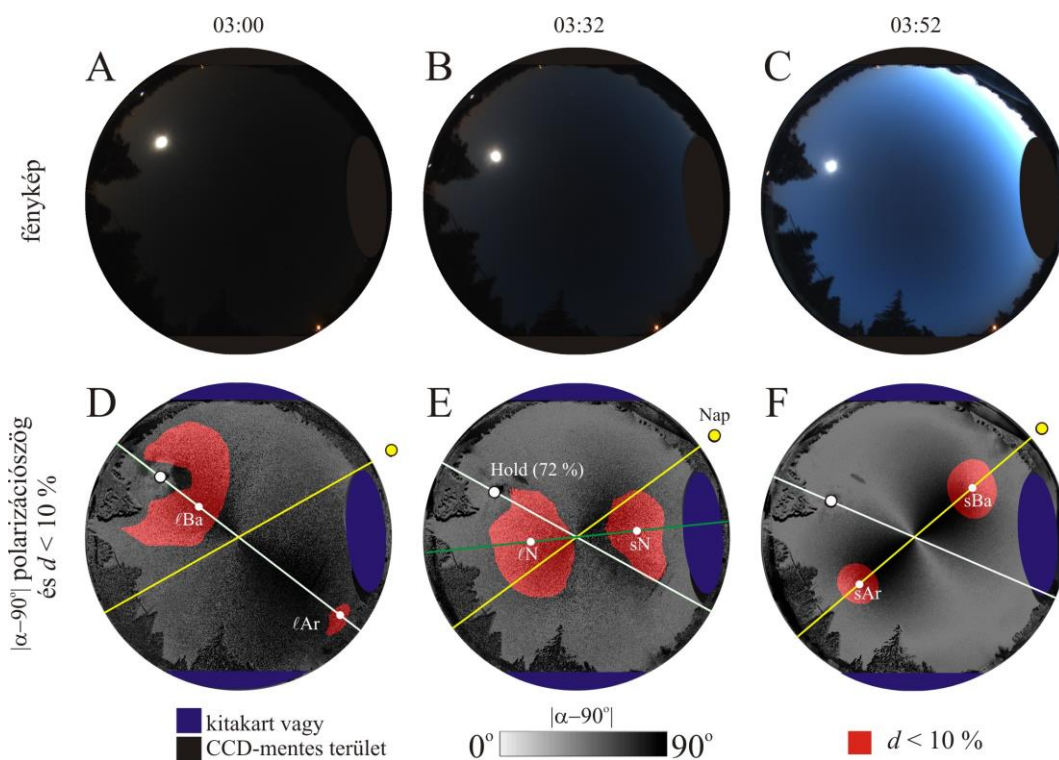
Az *1.21. ábrán* három különböző időpontban azon égboltterületek láthatók, ahol  $d < 10\%$  a kék (450 nm) tartományban részleges hold (72 %) esetén, mely szituáció azonos az *1.17. és 1.28D ábrákkal*. Az *1.21D ábrán* az  $\ell$ Ba lunáris Babinet és az  $\ell$ Ar lunáris Arago-pontok a lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkednek el, az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye pedig egybeesik a lunáris-antilunáris meridiánnal. Az *1.21E ábrán* az sN szoláris neutrális pont és az  $\ell$ N lunáris neutrális pont az égbolt-polarizáció

szimmetriatengelyén van. Az 1.21F ábrán az sBa szoláris Babinet és az sAr szoláris Arago-pont a szoláris-antiszoláris meridián mentén található, és az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye megegyezik a szoláris-antiszoláris meridiánnal.



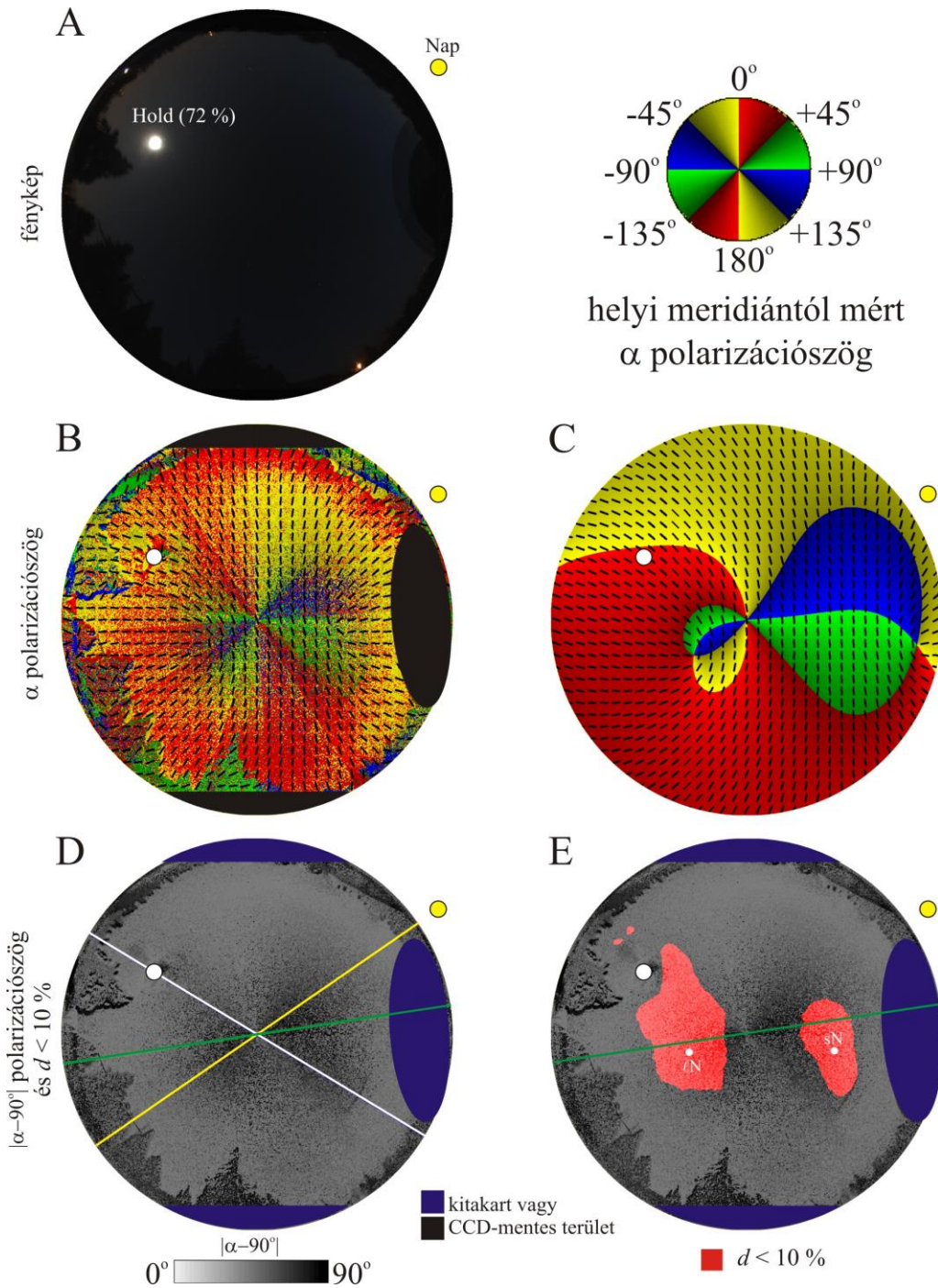
1.20. ábra. Tiszta égbolt fényképe, valamint az égboltfény  $d$  polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének mintázata a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában 2013. június 28-án 03:25-kor napkelte előtt Szombathelyen 72%-os holdfázis mellett. A Nap és a Hold helyét sárga és fehér pontok jelzik. Az  $\alpha$ -mintázaton fekete és fehér folytonos vonalak mutatják a szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánokat, míg a szaggatott vonalak az  $|\alpha-90^\circ|$ -mintázatok szimmetriatengelyét jelölik.





1.21. ábra. (A, B, C) 2013. június 28-án napkelte előtt Szombathelyen 72%-os holdfázis mellett végzett mérések. (D, E, F) Az ég  $|\alpha-90^\circ|$ -mintázatai a spektrum kék (450 nm) tartományában. A piros szín azon égboltterületeket jelöli, ahol az égboltfény  $d$  polarizációfoka kisebb, mint 10%. A sárga és fehér vonalak a szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánokat mutatják. A Nap és Hold helyét sárga és fehér pontok jelzik. sAr: szoláris Arago-pont, sN: szoláris neutrális pont, lN: lunáris neutrális pont, sBa: szoláris Babinet-pont, lBa: lunáris Babinet-pont, lBr: lunáris Brewster-pont, zöld vonal:  $|\alpha-90^\circ|$ -mintázat szimmetriatengelye.

Az 1.22B–C ábrák az égboltfény  $\alpha$  polarizációs szögének a spektrum kék (450 nm) tartományában mért és szimulált mintázatait mutatják részleges hold (72 %) esetén, mely helyzetek az 1.17. és 1.18D ábrákéival egyezők. A szimuláció  $w = 1$  súlyozással történt, azaz mikor a szórt holdfény és napfény égbolt-polarizációhoz való járuléka azonos volt. Bár a mért  $\alpha$ -mintázat zajos, minőségileg hasonló a szimulált  $\alpha$ -mintázathoz. Az 1.22D ábra azt a situációt mutatja, mikor az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye a szoláris-antiszoláris és a lunáris-antilunáris meridián közötti. Az 1.22E ábrán a szoláris sN és lunáris lN neutrális pontok a  $d < 10\%$  polarizációfokú égboltterületeken belül helyezkednek el az égbolt-polarizáció szimmetriatengelye mentén.



1.22. ábra. (A) 2013. június 28-án 03:25-kor, 72 %-os holdfázis mellett Szombathelyen készült égboltkép. (B) Az égboltfény  $\alpha$  polarizációs szögének mintázata a spektrum kék (450 nm) tartományában. A fekete pálcikák az átlagos helyi polarizációirányt mutatják. (C) Szimulált  $\alpha$ -mintázat  $w = 1$  súlyozással, ami azt jelenti, hogy a szórt napfény és holdfény égbolt-polarizációhoz való járuléka azonos. (D) Az ég  $|\alpha-90^\circ|$ -mintázata a spektrum kék (450 nm) tartományában. A sárga és fehér vonalak a szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánokat mutatják, a zöld vonal az  $|\alpha-90^\circ|$ -mintázat szimmetriatengelyét jelöli. (E) Mint D, ahol a piros szín azon égboltterületeket jelöli, ahol a  $d$  polarizációfok kisebb, mint 10 %. sN: szoláris neutrális pont, ℓN: lunáris neutrális pont, sárga pont: Nap, fehér pont: Hold.



### 1.3.4. Elemzés

#### *A szürkületi ég rendellenes polarizációátmenete*

A földfelszínről nézve a tiszta ég egyetlen domináns égi fényforrás (a Nap vagy a Hold) esetén egyidejűleg két polarizálatlan (neutrális) ponttal rendelkezik (GÁL *et al.* 2001b; HORVÁTH *et al.* 2002): Alacsony napmagasság mellett (míg a Nap a horizonttól mérve  $25^{\circ}$ - $30^{\circ}$  alatt jár)  $25^{\circ}$ - $30^{\circ}$ -kal a Nap felett a szoláris Babinet-pont és  $25^{\circ}$ - $30^{\circ}$ -kal az anti-Nap felett a szoláris Arago-pont jelenik meg. Mikor a Nap  $25^{\circ}$ - $30^{\circ}$  felett jár a horizonttól, akkor a Nap feletti szoláris Babinet-pont mellett a Nap alatt  $20^{\circ}$ - $25^{\circ}$ -kal található szoláris Brewster-pont van jelen az égen. 800 méternél nagyobb földfelszín feletti magasságokból a légkör negyedik szoláris neutrális pontja is megfigyelhető  $20^{\circ}$ - $30^{\circ}$ -kal az antinap alatt (HORVÁTH *et al.* 2002). A lunáris neutrális pontok éjszaka figyelhetők meg, ha a Hold a horizont felett tartózkodik (GÁL *et al.* 2001b). A neutrális pontok rendszeresen mindig a szoláris-antiszoláris, lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkednek el, továbbá a Naptól, Holdtól, valamint az antinaptól, antilunáris ponttól való szögtávolságuk a Nap, Hold magasságától, a légköri aeroszol-koncentrációtól és a földfelszíni reflexióktól függ (KÖNNEN 1985; COULSON 1988; HORVÁTH & VARJÚ 2004; HORVÁTH *et al.* 2016).

Részleges holdfázis idején tehát a szürkületi ég szoláris sN és lunáris ℓN neutrális pontjai nem a szoláris-antiszoláris vagy lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkednek el, mikor a szórt holdfény és napfény versenyzik egymással a hold- és napsütötte légkörben, a napkeltét megelőzően vagy közvetlenül napnyugta után. Az említett meridiánokon kívül eső sN és ℓN neutrális pontok szürkületi égen való előfordulása a részleges holdfáziskor a légkörben lezajló összetett, többszörös fényszórási események eredménye, mikor a szórt nap- és holdfény intenzitása közel azonos nagyságrendű.

Azon eredményünk, hogy a szürkületi égről érkező fény polarizációfokának  $d_{\max}$  maximuma csökken az átmeneti periódusban (1.18. ábra), szintén a nap- és holdfény légkörbeli többszörös szóródásával magyarázható: Mikor a hold- és napfény egymással verseng, a két különböző fényforrás (Hold és Nap) egyaránt hozzájárul a légköri fényszóródáshoz, ami növeli a többszörös szórás égbolt-polarizációra gyakorolt hatását. A többszörös szórás csökkenti az égboltfény polarizációfokát (COULSON 1988). A többszörösen szórt fény polarizációiránya nem mindig merőleges a szórás síkjára, amit a domináns égi fényforrás (Nap vagy Hold), az észlelő helye és a megfigyelt égi pont határoz meg. Amikor a polarizációirány párhuzamos a szórási síkkal, akkor negatívan (vagy rendellenesen) polarizált

fényről beszélünk, ha pedig a polarizációirány merőleges a szórási síkra, akkor pozitívan (vagy rendszeren) polarizált fényről van szó (KÖNNEN 1985; COULSON 1988). A többszörös szórás negatívan poláros fényt kelt a túlnyomórészt pozitívan poláros légkörben. A rendszer (Arago, Babinet, Brewster és a negyedik) neutrális pontok ott helyezkednek el, ahol a pozitívan és negatívan poláros fény intenzitása egyenlő, a polarizációs szög pedig  $90^\circ$ -ot ugrik, amikor áthaladunk egy neutrális ponton annak meridiánján keresztül. Így tehát a neutrális pontok léte a többszörös szórás egyik legfontosabb következménye. Szürkületkor, mikor két hozzávetőlegesen azonos intenzitású fényforrás, a Nap és a Hold is jelen van az égen, a polarizációs mintázatok e két forrás kölcsönhatásától függenek, és részleges hold esetén kialakul a szürkületi ég szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánjain kívüli két közbülső sN és ℓN neutrális pontja (*22C, E ábrák*).

Részleges hold mellett a szürkületi égen megjelenő, szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánokon kívüli sN és ℓN neutrális pontokat korábban még senki sem figyelte meg. Ennek egyik oka, hogy egy ilyen megfigyeléshez a teljes égboltot vizsgálni képes képalkotó polariméter szükséges. Ráadásul, ezen átmeneti neutrális pontok csak egy viszonylag rövid ideig (alacsony vagy közepes földrajzi szélességeken mindössze 10–20 percig) figyelhetők meg a részleges hold melletti szürkületkor. Ezért sokkal kisebb valószínűséggel figyelhetők meg ezen átmeneti neutrális pontok a nappal és éjjel egyaránt akár 8–10 órán át is látható rendszer neutrális pontokhoz képest.

Telihold idején az ég két neutrális pontja mindig a szoláris-antiszoláris és lunáris-antilunáris meridiánok mentén van a szürkületi polarizáció-átmenet idején. Ennek oka, hogy teliholdkor a Nap és a Hold szintén a szoláris/lunáris-antiszoláris/antilunáris meridián mentén helyezkedik el, és így a lunáris Arago-pont egybeesik a szoláris Babinet-ponttal, a lunáris Babinet-pont pedig egybeesik a szoláris Arago-ponttal.

#### *A szürkületi polarizációátmenet biológiai vonatkozásai*

A holdfényes szürkületi ég polarizációátmenete hatással lehet a polarizációérzékeny, szürkületkor vagy éjjel aktív állatok térbeli tájékozódására. Különösen igaz lehet ez magasabb földrajzi szélességeken, ahol a Nap és Hold égi útvonala hosszú időn át a horizonthoz közel halad, és így a szürkületi periódus akár órákig, napokig is tarthat.

A *Scarabaeus zambesianus* ganajtúró bogár a galacsingolyóját a központi trágyakupactól egy egyenes mentén görgeti sugár irányban kifelé, hogy minél hamarabb eltávolodhasson a kupactól, ahol sok fajtársa tolong a peték és lárvák fejlődéséhez szükséges,

értékes nyersanyagra vadászva, miközben gyakran egymástól lopják el a már kész galacsint. A galacsin egyenes mentén történő görgetése során a nappal aktív ganajtúrók a Nap irányára alapján tartják a galacsin egyenes pályáját, amikor pedig a Napot felhők takarják, akkor a napsütötte égbolt polarizációs mintázatából következtetik ki a Nap irányát (DACHE *et al.* 2003). Naplemente után, mikor a Hold nem látható, az éjjel aktív ganajtúrók tájékozódása kizárólag a szürkületi égbolt szórt napfény által keltett polarizációs mintázatára épül. Amikor a Hold felkel, a ganajtúrók navigációja a szórt holdfény által létrehozott polarizációs mintázat alapján folytatódik. E poláros szórt holdfény intenzitása fokozatosan csökken, ahogy a holdkorong Nap által megvilágított hányada csökken. Még a holdsarló körüli rendkívül kis intenzitású égbolt-polarizációs mintázat is elegendő az éjszaka aktív ganajtúróknak ahhoz, hogy egyenes mentén görgessék galacsinjukat.

A szürkületben és éjjel aktív *Megalopta genalis* trópusi méh a panamai erdőkben 60–45 perccel napkelte előtt repül ki fészkeből és 15–30 percig kutat táplálék után, mielőtt visszatér oda (WARRANT *et al.* 2004). Napnyugtakor ugyanezen viselkedés időben fordítottan jelentkezik. E méhfaj szemei szélsőségesen kis intenzitású fény melletti látásra szakosodtak, és vélhetően képesek érzékelni az égbolt polarizációját is. Feltételezhető, hogy e méhek az égbolt polarizációja alapján is tudnak tájékozódni a szürkületi/éjjeli táplálékszerző útjaik során. Az éjjel aktív ausztrál *Myrmecia pyriformis* hangya is használja a poláros égboltfényt szürkületi iránytűként (REID *et al.* 2011). Szürkületkor a költöző madaraknak is szüksége lehet az égbolt-polarizációra ahhoz, hogy a sötétben történő repülésükhöz beállítsák belső mágneses iránytűjüket, hiszen a velük végzett tájékozódási kísérletek során eltévedtek, amikor csak depolarizált égi optikai (intenzitás/szín) mintázatokat láthattak (MUHEIM 2011). Tájékozódásuk és navigálásuk során egyes szürkületkor és/vagy éjszaka aktív halak és vízi rákok is használják az égbolt polarizációs mintázatát a sima vízfelszín Snellius-ablakán keresztül érzékelve azt (HORVÁTH & VARJÚ 2004).

A fenti tájékozódási példák a szoláris-antiszoláris vagy lunáris-antilunáris meridián ismeretén alapulnak, ami egybeesik a napsütötte vagy holdvilágos ég polarizációs mintázatának szimmetriatengelyével. Ám ahogy már említettem, közepes ( $47^\circ$ ) földrajzi szélességek mentén részleges hold mellett szürkületkor van egy 10-20 perces átmeneti időszak, amikor (i) az égboltfény  $d_{\max}$  polarizációfoka lecsökken, (ii) a folytonosan változó helyű két neutrális pont nem a szoláris-antiszoláris vagy lunáris-antilunáris meridián mentén helyezkedik el, és (iii) az égbolt polarizációs mintázatából sem a szoláris-antiszoláris, sem a lunáris-antilunáris meridián nem határozható meg. Következésképpen, az égbolt-polarizációra

épülő, fent említett állati tájékozódás lehetetlenné válhat e szürkületi átmeneti időszakban, aminek időtartama jelentősen növekszik magasabb földrajzi szélességeken, mikor a Nap és Hold égi útvonala hosszú időn át a horizonthoz közel halad, és így a szürkületi periódus akár órákig, napokig is tarthat.

Habár a szóban forgó szürkületi átmeneti időszak mindössze 10-20 perc az alacsony és közepes földrajzi szélességek mentén, az égbolt-polarizáció ezalatti anomáliájából eredő tájékozódási zavart nem szabad alábecsülni: Mindezt jól szemlélteti például az a megfigyelés, hogy a táplálékszerző, viráglátogató háziméhek (*Apis mellifera*) jelentős hányada megzavarodott és nem tért vissza a méhkasba egy teljes napfogyatkozás 2 perces totalitása után (BALDAVÁRI 2001; BERNÁTH *et al.* 2001c; SZENTKIRÁLYI & SZALAI 2001). Nemcsak az égboltnak az intenzitásának és színének, hanem  $d$  polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének mintázata is drasztikus változáson esik át teljes napfogyatkozások totalitásakor a jelentősen megváltozott megvilágítási viszonyok miatt (SIPŐCZ *et al.* 2008). Napfogyatkozáskor az égboltnak  $d$  polarizációfoka általában jelentősen csökken, és ha e csökkenés azon  $d^*$  küszöbérték alá esik, ami egy adott faj égbolt-polarizáció alapján történő navigációjához szükséges polarizáció-érzékelés küszöbe, akkor az állat megzavarodhat, eltévedhet. Továbbá, még ha  $d > d^*$  a totalitás alatt, az ekkor megfigyelhető  $\alpha$ -mintázat teljesen eltér a normál égboltnak a totalitás alatt, az ekkor megfigyelhető  $\alpha$ -mintázat teljesen eltér a normál égboltnak a totalitás alatt tapasztalható természetellenes polarizációs mintázata lehet: A virágokhoz való kirepülés előtt a dolgozó háziméhek pontosan annyi táplálékot (mézet) vesznek magukhoz, amennyi a kaptárhoz való elrepülésig és vissza elegendő energiaforrást jelent számukra. E távolságinformáció a hírvivő méh kaptárban lejtett megfelelő táncból következtethető ki. Ha a nektár- és virágporgyűjtő méh eltéved (például az égbolt teljes napfogyatkozás totalitása alatt kialakuló rendellenes polarizációs mintázata következtében, vagy az égbolt-polarizáció szimmetriatengelyének szürkületkori anomális irányulása miatt), akkor "üzemanyaga" azelőtt elfogyhat, mielőtt visszatalál a kaptárhoz. Ekkor az eltévedt méh menthetetlenül elpusztul, mivel "üzemanyag" hiányában nem tud visszarepülni vagy visszamászni a kaptárba.

A legnagyobb probléma, amivel a polarizáció-érzékeny állatok szembesülnek, hogy az égbolt-polarizáció nyújtotta információ, a polarizációs mintázat szimmetriatengelye részleges

hold melletti szürkület idején folyamatosan és a Nap/Hold járásához képest gyorsan elfordul, miáltal kérdéses, hogy miként képesek céljukat elérni, ha közben égi polarizációs iránytűjük mindig másfelé mutat. E szürkületi polarizáció-átmenetes időszak könnyen okozhatja az érintett állatok eltévedését, amit érdemes lenne a jövőben kísérletileg vizsgálni.

## 1.4. A napsütötte és holdvilágos ég erdőtűzfüst idején megfigyelhető rendellenes polarizációja és annak tájékozódásban betöltött lehetséges szerepe<sup>3</sup>

### 1.4.1. Célkitűzések

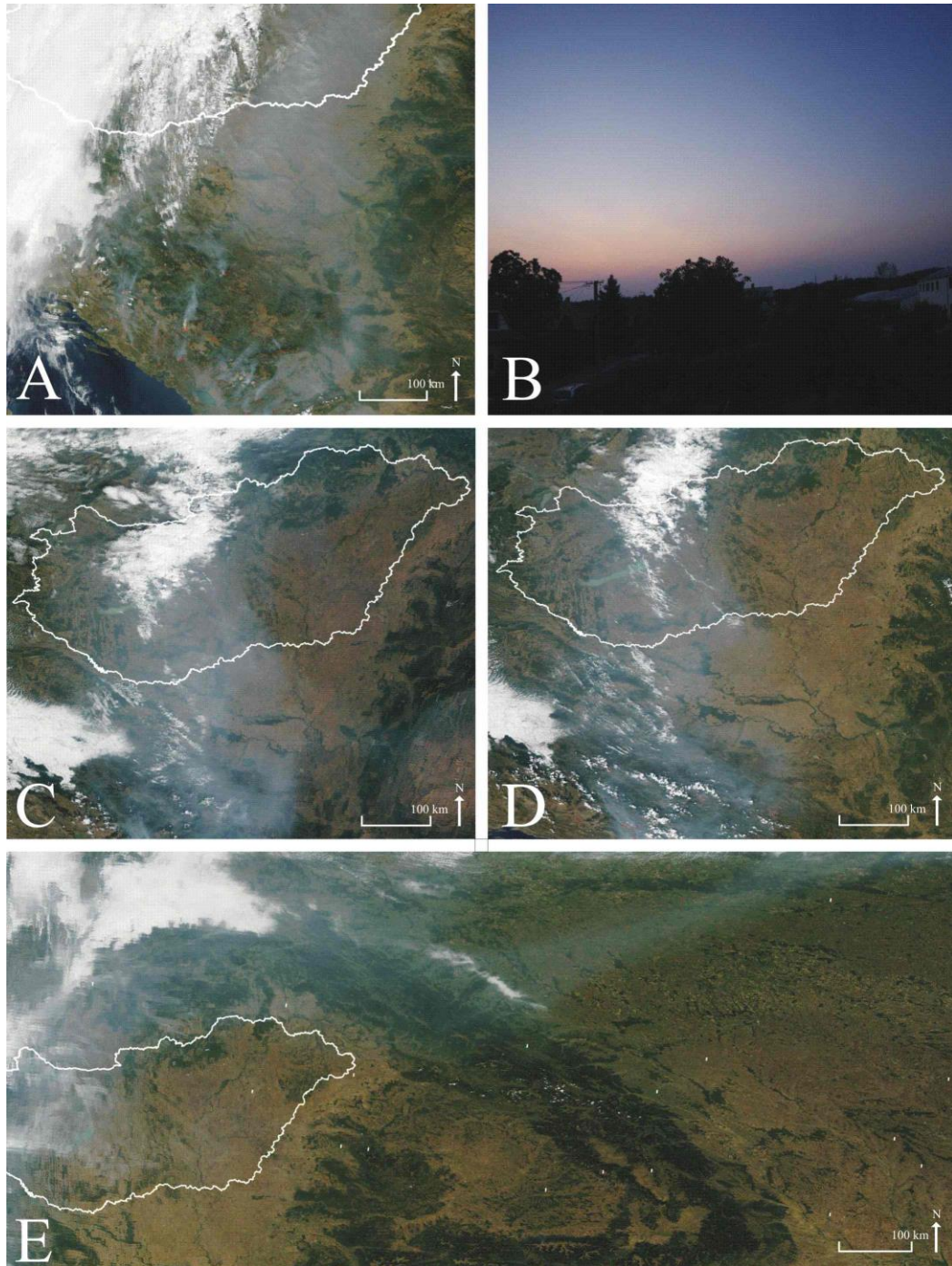
A Nap által megvilágított nappali és a telihold által megvilágított éjszakai tiszta égboltok polarizációs jellemzőit GÁL *et al.* (2001b) hasonlította össze, aki szerint e sajátságok jórészt egyeznek, ha a Nap és Hold horizont feletti szögmagasságai is hozzávetőleg azonosak. Számos kutatás bizonyította azt is, hogy e jellemzők megváltoznak, ha a légkörben füst terjed szét (SEKERA 1957; BELVER 1967; COULSON 1980, 1988; HORVÁTH *et al.* 1998; BOESCHE *et al.* 2006; SHUKUROV & SHUKUROV 2006; HEGEDÜS *et al.* 2007c). A holdvilágos füstös ég képalkotó polarimetriai mintázatait azonban még nem mérték, így a napsütötte és holdvilágos tiszta és füsttel szennyezett egek összehasonlítását sem végezték el.

2012 nyarának végén Albánia, Montenegró, Bosznia-Hercegovina és Horvátország területén több erdőtűz is pusztított a száraz, forró nyárvégi időjárás következtében. Az ekkor uralkodó délies áramlás e tüzek füstjét a Kárpát-medence fölé sodorta, ami műholdképeken is jól követhető volt (1.23. ábra). Mivel ekkortájt a Kárpát-medence térségében felhőmentes és tiszta volt az égbolt, célul tűztük ki e meteorológiai szempontból kiváló lehetőségek közepette a légkör magasabb részében terjengő füst miatt megváltozó fénypolarizáció mérését napsütötte és holdvilágos égbolt alatt. Kutatási céljaink közt szerepelt, hogy a kapott eredményeket összehasonlítsuk a közel azonos  $\theta_N$  nap- és  $\theta_H$  holdeleváció mellett általunk mért tiszta égboltok polarizációs mintázataival. Az így kapott eredmények új adatokat szolgáltatnak a tiszta és füstös napsütötte és holdvilágos égboltok polarizációs tulajdonságai közti eltérésekről, hiszen HEGEDÜS *et al.* (2007c) korábban csak napsütötte égbolt esetén vizsgálta e különbségeket. Az égbolt polarizációs tulajdonságaiban a füst miatt tapasztalható ezen változások hatással lehetnek a polarizáció-érzékeny állatok tájékozódására is.

---

<sup>3</sup> Az eredményeket közli: HORVÁTH G., BARTA A., HEGEDÜS R. (2014): Chapter 18. Polarization of the Sky. In: HORVÁTH G. (ed.) (2014) Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences. Springer: Heidelberg, Berlin, New York. pp. 367–406.





1.23. ábra. (A) Horvátország, Bosznia-Hercegovina, Montenegró és Albánia területén a forró nyárvégi időjárás következtében kipattant erdőtüzek forrásterületei (2012. 09. 01. 09:25 UT). A déli áramlás hatására észak felé sodródó sűrű füstcsóvák Magyarország déli határait is elérték. (B) A sötét füstcsóvák jól megfigyelhetők voltak a horizont közelében a naplemente utáni tiszta, felhőtlen égbolton (Mogyoród, 2012. 09. 02. 19:13 UT). (C–D) Az észak felé sodródó füst Magyarország középső és nyugati területei felett terjedt szét elsősorban (C: 2012. 09. 02. 10:05 UT, D: 2012. 09. 02. 11:50 UT). (E) Egy ~500 km hosszú füstcsóva a Kárpátokon áthaladva Ukrajna területét is elérte (2012. 09. 03. 9:10 UT). Műholdképek forrása: NASA LANCE/ESDIS MODIS Near Real Time Images [<http://earthdata.nasa.gov/data/nrt-data/rapid-response>]

## 1.4.2. Anyag és módszer

Az erdőtűz füstjével szennyezett és tiszta, füstmentes napsütötte és holdvilágos égboltok polarizációs mintázatait 2012. augusztus 28. és 2012. december 1. között egy Nikon-Nikkor ( $F = 2,8$  fényerejű,  $f = 8$  mm fókusztávolságú) halszemoptikával felszerelt  $180^\circ$  látószögű Nikon D3 képalkotó polariméterrel Gödön mértük. A képalkotó polarimetria módszerét több tanulmány részletezte (pl. GÁL *et al.* 2001a; HORVÁTH *et al.* 2016), a Nikon D3 digitális fényképezőgép érzékelőlapjának spektrális érzékenységet pedig CAO *et al.* (2009) közölte. A halszemobjektív két alegysége közötti forgatható szűrőtárcsában kapott helyet egy lineáris polárszűrő (Polaroid HNP'B), amely három áteresztési irányban volt rögzíthető ( $\varphi_1 = 90^\circ$ ,  $\varphi_2 = 135^\circ$ ,  $\varphi_3 = 180^\circ$ ). A fényképezőgépet egy háromlábú állványra helyeztük oly módon, hogy az objektív függőlegesen felfelé, a zenitre nézzen. Hogy az erős közvetlen napfénynek a lencsefelületeken történő zavaró becsillanásait kiküszöböljük, a halszemobjektív elé a Nap pozíciójától függően mozgatható napkitakarót is felszereltünk. Ennek hiányában zavaró foltok jelentek volna meg a felvételeken, melyek meghamisíthatták volna az égbolt polarizációs mintázatát. A halszemobjektív fókusztávolságát minden esetben végtelenre állítottuk, az expozíciós időt pedig állandó ISO 200 érzékenység mellett a fényviszonyoknak megfelelően választottuk meg. Részletes összehasonlító elemzésre olyan égboltképeket választottunk, melyek a Nap és a Hold közel azonos elevációi mellett készültek (1.3. táblázat). Ezek mérési időpontjai a továbbiakban egyezményes koordinált világidőben szerepelnek (UT).

1.3. táblázat. Napsütötte és holdvilágos tiszta és erdőtűzfüstös égboltok képalkotó polarimetriai méréseinek időpontja (UT: egyezményes koordinált világidő) és a méréskor aktuális  $\theta_N$  nap- és  $\theta_H$  holdeleváció.

<i>égbolt</i>		<i>időpont (UT)</i>	$\theta_N$	$\theta_H$
<i>N A P O S</i>	<i>tiszta</i>	2012. augusztus 28. 12:26	46°	
		2012. december 1. 10:35	20,5°	
	<i>füstös</i>	2012. szeptember 2. 11:50	47,5°	
		2012. szeptember 2. 15:23	19,1°	
<i>H O L D A S</i>	<i>tiszta</i>	2012. október 3. 22:33		45,7°
	<i>füstös</i>	2012. szeptember 1. 23:13		44,1°
		2012. szeptember 2. 23:35		47,8°

Az égboltfelvételeket 12 megapixeles RAW (.NEF) formátumban készítettük. Egy mérés során egy adott égboltról három felvételt készítettünk egymás után a lineáris polárszűrő  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  és  $\varphi_3$  áteresztési iránya mellett. Az elkészített polarizációs képek kiértékelésével meghatároztuk és hamisszínes kódolással megjelenítettük az adott égbolt  $I$  fényintenzitásának,  $d$  polarizációfokának és a helyi meridiántól mért  $\alpha$  polarizációs szögének térbeli eloszlását a spektrum vörös, zöld és kék tartományában, mely mintázatok középpontját a zenit, körvonalát pedig a valós horizont adja. Kiszámítottuk a  $d$  polarizációfok teljes égboltra mért átlagát és szórását, valamint a Naptól  $90^\circ$ -ra húzódó  $5^\circ$  széles sávban a  $d_{\max}$  átlagát és szórását. Mivel az égbolt polarizálatlan (neutrális) pontjainak helyei érzékenyek a légköri aeroszol típusára és mennyiségére (NEUBERGER 1950), ezért ezek egymáshoz viszonyított szögtávolságait is mértük. További részletek a képalkotó polarimetriai mérések módszertanáról, pontosságáról és az eredmények kiértékeléséről az 1.2.3. fejezetben olvashatók.

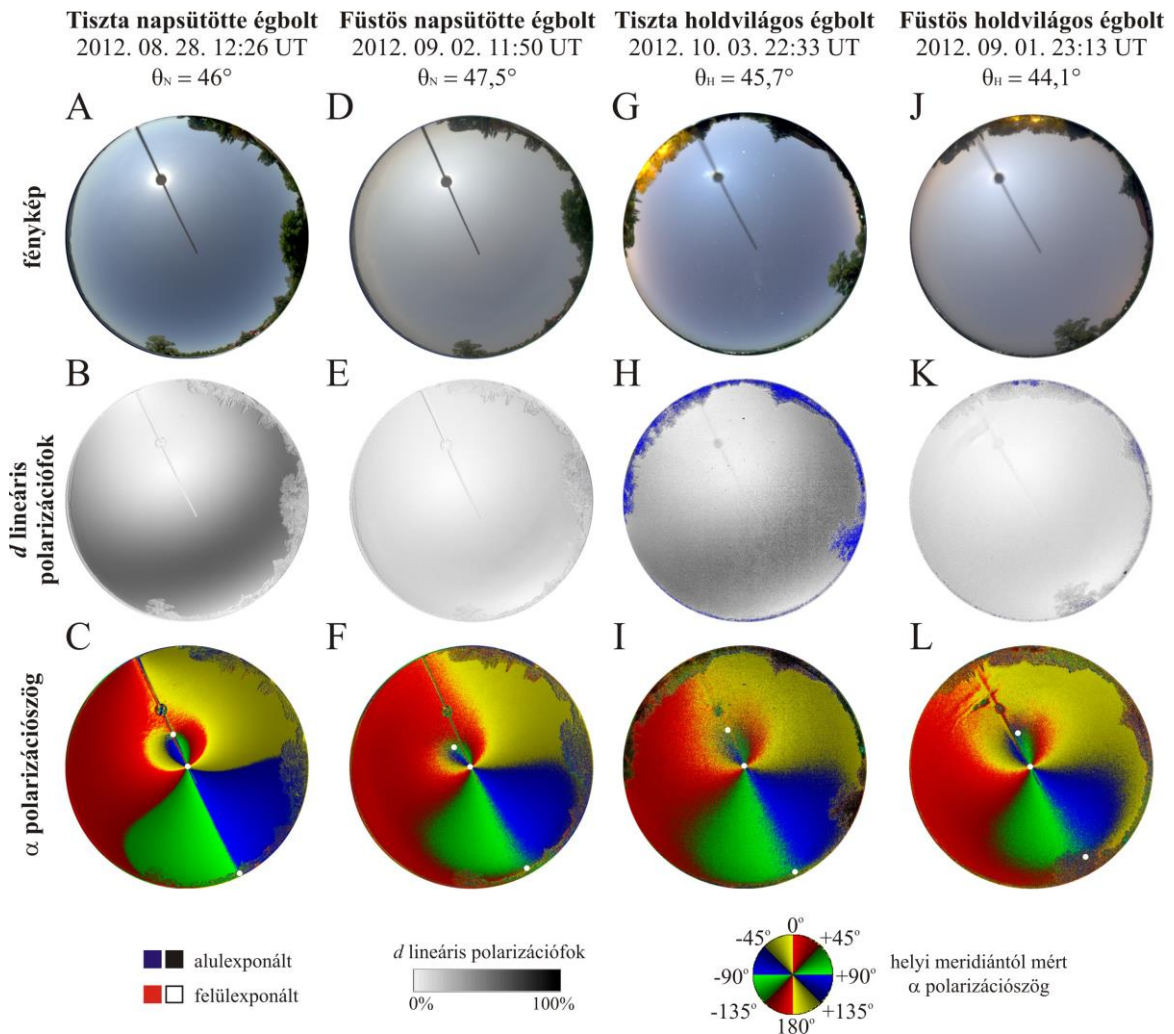
### 1.4.3. Eredmények

Az 1.24. ábra tiszta és füstös napsütötte és holdvilágos egek fényképeit, illetve  $d$  lineáris polarizációfokának és  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatait mutatja a spektrum kék tartományában. 2012. augusztus 28-án 12:26-kor az égbolt tiszta, felhőmentes volt, a Naptól  $90^\circ$  távolságra pedig egy mélykék sávot lehetett megfigyelni, ami aeroszokok hiányára utalt (1.24A ábra). Emiatt ekkor az égbolt  $d$  lineáris polarizációfokának maximumát is a Naptól  $90^\circ$  távolságra lévő  $5^\circ$  széles sávban mértük ( $d_{\max} \approx 57\%$ ), míg  $d$  teljes égboltra vett átlaga  $d_{\text{átlag}} \approx 34\%$  volt (1.4. táblázat; 1.24B ábra). 2012. október 3-án 22:33-kor a holdvilágos égbolt tiszta, felhőmentes volt (1.24G ábra). Ekkor az égbolt  $d$  lineáris polarizációfokának maximuma a vörös, zöld és kék tartományban  $d_{\max\text{-vörös}} = 28,9\%$ ,  $d_{\max\text{-zöld}} = 38,0\%$ ,  $d_{\max\text{-kék}} = 48,5\%$  volt a Holdtól  $90^\circ$ -ra fekvő  $5^\circ$  széles sávban, a holdvilágos tiszta ég lineáris polarizációfokának teljes égboltra vett átlaga pedig  $d_{\text{átlag-vörös}} = 20,4\%$ ,  $d_{\text{átlag-zöld}} = 25,1\%$ ,  $d_{\text{átlag-kék}} = 31,3\%$  volt (1.4. táblázat; 1.24H ábra). E tulajdonságok jól reprezentálják a napsütötte és holdvilágos tiszta égboltok polarizációs sajátosságait (GÁL *et al.* 2001a,b; HORVÁTH & VARJÚ 2004), így az általunk mért adatok jó viszonyítási alapot jelentenek a közel azonos nap- és holdelevációjú füstös égboltok polarizációs mintázatának vizsgálatához.

2012. szeptember 2-án a napsütötte égbolt erdőtűzfüsttel szennyezett volt, melynek következtében a teljes ég fehéresnek, szürkésnek látszott (1.24D ábra). Ekkor az égbolt  $d$  lineáris polarizációfokának maximuma a vörös, zöld és kék tartományban  $d_{\max\text{-vörös}} = 24,6\%$ ,  $d_{\max\text{-zöld}} = 21,4\%$ ,  $d_{\max\text{-kék}} = 19,2\%$  volt a Naptól  $90^\circ$ -ra, a napsütötte tiszta ég



polarizációfokának teljes égboltra vett átlaga pedig  $d_{\text{átlag-vörös}} = 16,4\%$ ,  $d_{\text{átlag-zöld}} = 14,3\%$ ,  $d_{\text{átlag-kék}} = 13,0\%$  volt (1.4. táblázat; 1.24E ábra). Tehát bár a Nap horizont feletti magassága a két esetben megközelítőleg azonos volt ( $\theta_{\text{N-tiszta}} = 46^\circ$ ,  $\theta_{\text{N-füstös}} = 47,5^\circ$ ), az aeroszolok fokozott jelenléte miatti többszörös fényszórás következtében az égbolt színe fakóbb lett és  $d$  értékei is csökkentek. 2012. szeptember 2-án 15:23-kor a füst tartós jelenléte miatt ehhez hasonló tapasztaltunk, ám ekkor az alacsonyabb napmagasság ( $\theta_{\text{N-füstös}} = 19,1^\circ$ ) miatt magasabb  $d_{\text{átlag}}$  és  $d_{\text{max}}$  értékeket mértünk (1.4. táblázat).



1.24. ábra. Napsütötte és holdvilágos égboltokról készült színes felvételek (1. sor), valamint az égboltfény  $d$  lineáris polarizációfokának (2. sor) és  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatai (3. sor)  $180^\circ$  látószögű képalkotó polariméterrel a spektrum kék tartományában mérve tiszta, felhőtlen ég alatt (1. és 3. oszlop) és a légkörben szétterjedt füst jelenlétekor (2. és 4. oszlop).  $\theta_{\text{N}}$ : a Nap horizont feletti szögmagassága,  $\theta_{\text{H}}$ : a Hold horizont feletti szögmagassága.

1.4. táblázat. A  $d$  lineáris polarizációfok teljes égboltra mért átlaga  $\pm$  szórása, valamint a Naptól  $90^\circ$ -ra húzódó  $5^\circ$  széles sávban mért  $d_{\text{max}}$  átlaga  $\pm$  szórása tiszta,

felhőtlen ég alatt és a légkörben szétterjedt füst jelenlétekor, Nap és Hold általi megvilágítás mellett a spektrum vörös, zöld és kék tartományában.  $\theta$ : Nap és Hold horizont feletti szögmagassága.

égbolt	időpont (UT)	$\theta$ (°)	<i>d</i> lineáris polarizációfok (%) (átlag $\pm$ szórás)			
			vörös	zöld	kék	
N A P O S	tisztá	2012. 08. 28. 12:26	46	34,1 $\pm$ 19,7 ( $d_{\max}$ : 56,6 $\pm$ 6,1)	34,4 $\pm$ 20,0 ( $d_{\max}$ : 57,7 $\pm$ 5,5)	34,4 $\pm$ 19,7 ( $d_{\max}$ : 57,3 $\pm$ 5,1)
		2012. 12. 1. 10:35	20,5	41,5 $\pm$ 20,1 ( $d_{\max}$ : 61,9 $\pm$ 3,8)	41,1 $\pm$ 20,1 ( $d_{\max}$ : 61,0 $\pm$ 3,8)	40,6 $\pm$ 19,5 ( $d_{\max}$ : 58,7 $\pm$ 4,1)
	füstös	2012. 09. 2. 11:50	47,5	16,4 $\pm$ 7,6 ( $d_{\max}$ : 24,6 $\pm$ 4,0)	14,3 $\pm$ 6,4 ( $d_{\max}$ : 21,4 $\pm$ 2,3)	13,0 $\pm$ 5,8 ( $d_{\max}$ : 19,2 $\pm$ 2,5)
		2012. 09. 2. 15:23	19,1	26,3 $\pm$ 10,7 ( $d_{\max}$ : 35,3 $\pm$ 3,0)	23,6 $\pm$ 9,6 ( $d_{\max}$ : 32,2 $\pm$ 1,8)	22,2 $\pm$ 9,2 ( $d_{\max}$ : 30,8 $\pm$ 2,0)
H O L D A S	tisztá	2012. 10. 3. 22:33	45,7	20,4 $\pm$ 12,2 ( $d_{\max}$ : 28,9 $\pm$ 15)	25,1 $\pm$ 12,8 ( $d_{\max}$ : 38,0 $\pm$ 7)	31,3 $\pm$ 16,5 ( $d_{\max}$ : 48,5 $\pm$ 11,2)
	füstös	2012. 09. 1. 23:13	44,1	14,4 $\pm$ 6,6 ( $d_{\max}$ : 18,7 $\pm$ 3,4)	13,1 $\pm$ 5,7 ( $d_{\max}$ : 17,1 $\pm$ 1,8)	12,5 $\pm$ 5,7 ( $d_{\max}$ : 16,3 $\pm$ 2,7)
		2012. 09. 2. 23:35	47,8	16,3 $\pm$ 8,4 ( $d_{\max}$ : 19,3 $\pm$ 5,6)	16,7 $\pm$ 8,2 ( $d_{\max}$ : 19,4 $\pm$ 3,5)	17,6 $\pm$ 8,9 ( $d_{\max}$ : 19,4 $\pm$ 4,8)

1.5. táblázat. Az Arago- (AR) és Babinet-féle (BA) neutrális pontok zenittől mért  $\gamma$  szögtávolságai, és egymástól számított  $\delta$  szögtávolságai felhőtlen és füstös ég alatt, Nap és Hold általi megvilágítás mellett a spektrum vörös, zöld és kék tartományában.  $\theta$ : a Nap és a Hold horizont feletti szögmagassága.

égbolt	időpont (UT)	$\theta$ (°)	zenittől mért $\gamma$ szögtávolság (°)						egymástól mért $\delta$ szögtávolság (°)			
			vörös		zöld		kék		vörös	zöld	kék	
			AR	BA	AR	BA	AR	BA				
N A P O S	tisztá	2012. 08. 28. 12:26	46	88,0	28,8	87,6	27,5	87,2	26,0	116,8	115,2	113,9
		2012. 12. 1. 10:35	20,5	75,5	49,3	75,4	49,0	74,3	48,0	124,8	124,5	122,7
	füstös	2012. 09. 2. 11:50	47,5	84,0	22,2	84,8	21,8	85,1	20,4	106,1	106,4	105,0
		2012. 09. 2. 15:23	19,1	75,5	54,1	76,9	53,9	77,4	53,3	129,6	130,8	130,7
H O L D A S	tisztá	2012. 10. 3. 22:33	45,7	86,2	28,5	85,9	27,8	85,4	25,7	114,7	113,7	111,3
	füstös	2012. 09. 1. 23:13	44,1	72,0	35,5	74,9	33,2	78,6	27,0	107,4	107,8	105,4
		2012. 09. 2. 23:35	47,8	78,5	32,9	81,1	27,1	84,0	24,3	111,4	108,2	108,2

2012. szeptember 1-jén 23:13-kor a holdvilágos ég képe is sápadtnak, fakónak látszott a füst légköri jelenléte miatt (1.24J ábra), ennek következtében pedig az általunk mért  $d_{\text{átlag}}$  és  $d_{\text{max}}$  értékek a tiszta holdvilágos éghez képest alacsonyabbnak bizonyultak:  $d_{\text{átlag-vörös}} = 14,4 \%$ ,  $d_{\text{átlag-zöld}} = 13,1 \%$ ,  $d_{\text{átlag-kék}} = 12,5 \%$ ;  $d_{\text{max-vörös}} = 18,7 \%$ ,  $d_{\text{max-zöld}} = 17,1 \%$ ,  $d_{\text{max-kék}} = 16,3 \%$ . Szeptember 2-án 23:35-kor a füst tartós jelenléte miatt hasonlóan alacsony  $d_{\text{átlag}}$  és  $d_{\text{max}}$  értékeket mértünk a holdvilágos füstös égbolt esetén:  $d_{\text{átlag-vörös}} = 16,3 \%$ ,  $d_{\text{átlag-zöld}} = 16,7 \%$ ,  $d_{\text{átlag-kék}} = 17,6 \%$ ;  $d_{\text{max-vörös}} = 19,3 \%$ ,  $d_{\text{max-zöld}} = 19,4 \%$ ,  $d_{\text{max-kék}} = 19,4 \%$ .

Az 1.24C, F, I és L ábrák a tiszta és füstös napsütötte és holdvilágos égboltok  $\alpha$  polarizációs szögének mintázatait mutatják a spektrum kék tartományában, melyeken a 8-as alakzaton átmenő szoláris-antiszoláris meridián mentén látható kis fehér körök a Nap/Hold feletti Babinet-pontot, a zenitet, illetve az antiszoláris/antilunáris pont feletti Arago-pontot reprezentálják. Munkánk során e két neutrális pont zenittől mért  $\gamma$ , és egymástól mért  $\delta$  hullámhosszfüggő szögtávolságait is mértük a vörös, zöld és kék tartományban, mely eredményeket az 1.5. táblázat tartalmazza. Az Arago- és Babinet-pont egymástól mért  $\delta$  szögtávolsága napsütötte égboltok esetén füst jelenlétében kisebb volt:  $\delta_{\text{tiszta-vörös}} = 116,8^\circ$ ,  $\delta_{\text{tiszta-zöld}} = 115,2^\circ$ ,  $\delta_{\text{tiszta-kék}} = 113,9^\circ$ ;  $\delta_{\text{füstös-vörös}} = 113,9^\circ$ ,  $\delta_{\text{füstös-zöld}} = 106,1^\circ$ ,  $\delta_{\text{füstös-kék}} = 106,4^\circ$ , amikor a Nap horizont feletti szögmagassága  $\theta_{\text{N-tiszta}} = 46^\circ$  és  $\theta_{\text{N-füstös}} = 47,5^\circ$  volt. Amikor azonban a napmagasság  $\theta_{\text{N-tiszta}} = 20,5^\circ$  és  $\theta_{\text{N-füstös}} = 19,1^\circ$  volt,  $\delta$  értékei a füstös égbolt esetén bizonyultak nagyobbak:  $\delta_{\text{tiszta-vörös}} = 124,8^\circ$ ,  $\delta_{\text{tiszta-zöld}} = 124,5^\circ$ ,  $\delta_{\text{tiszta-kék}} = 122,7^\circ$ ;  $\delta_{\text{füstös-vörös}} = 129,6^\circ$ ,  $\delta_{\text{füstös-zöld}} = 130,8^\circ$ ,  $\delta_{\text{füstös-kék}} = 130,7^\circ$ . Az Arago- és Babinet-pont holdvilágos égbolt esetében is füst jelenlétében volt közelebb egymáshoz:  $\delta_{\text{tiszta-vörös}} = 114,7^\circ$ ,  $\delta_{\text{tiszta-zöld}} = 113,7^\circ$ ,  $\delta_{\text{tiszta-kék}} = 111,3^\circ$ ;  $\delta_{\text{füstös-vörös}} = 107,4^\circ$ ,  $\delta_{\text{füstös-zöld}} = 107,8^\circ$ ,  $\delta_{\text{füstös-kék}} = 105,4^\circ$ , amikor a Hold horizont feletti szögmagassága  $\theta_{\text{H-tiszta}} = 45,7^\circ$  és  $\theta_{\text{H-füstös}} = 44,1^\circ$  volt.  $\theta_{\text{H-füstös}} = 47,8^\circ$  esetén  $\delta$  értékei a következőképpen alakultak:  $\delta_{\text{füstös-vörös}} = 111,4^\circ$ ,  $\delta_{\text{füstös-zöld}} = 108,2^\circ$ ,  $\delta_{\text{füstös-kék}} = 108,2^\circ$ .

#### 1.4.4. Elemzés

GÁL *et al.* (2001b) korábban már megállapította, hogy a napsütötte és holdvilágos égboltok polarizációs mintázatainak sajátosságai jórészt megegyeznek, ha a Nap és Hold horizont feletti szögmagasságai hozzávetőleg azonosak. Az említett tanulmány szerzői említették ugyanakkor azt is, hogy az égbolt polarizációs sajátosságai, valamint a  $d = 0\%$  polarizációfokkal jellemezhető neutrális (polarizálatlan) pontok helyei bizonyos meteorológiai körülmények között (például aeroszolok jelenlétében) megváltozhatnak, aminek következtében pedig a



napsütötte és holdvilágos égboltok korábban megfigyelt hasonló sajátságai között akár nagyobb eltérések is adódhatnak. Korábban más kutatók is rámutattak, hogy az égboltfény polarizációfokának  $d_{\max}$  maximuma ezen eltérések miatt különösen érzékeny indikátora lehet az aeroszolok légköri jelenlétének, főként hosszabb hullámhosszokra (SEKERA 1957; BELLVER 1967a; COULSON 1980, 1988; HORVÁTH *et al.* 1998; BOESCHE *et al.* 2006; SHUKUROV & SHUKUROV 2006). Eredményeink újabb adatokkal támasztják alá, hogy az égboltfény tiszta égboltnál megfigyelt  $d$  polarizációfok-eloszlása napsütötte és holdvilágos égbolt esetén egyaránt jelentősen megváltozik, ha a légkörben erdőtűz okozta füst terjed szét.

Míg tiszta, felhőtlen égbolt alatt  $d_{\max}$  értéke a hullámhossz növekedésével fokozatosan csökken, a levegő füst miatti szennyezettsége e spektrális függést akár meg is fordíthatja. COULSON (1988) ennek szemléltetésére Los Angeles szennyezett városi ege alatti polarizációs mérések eredményeit hozza fel példaként, melynél  $d_{\max}$  értéke 795 nm-en magasabb volt, mint 320 nm-en. Képzalkotó polarimetriai méréseink kiértékelésekor ehhez hasonló eredményre jutottunk: a legmagasabb  $d_{\max}$ -értékeket tiszta napsütötte égbolt esetén a kék spektrális csatornában, füstös napsütötte égbolt esetén pedig vörös hullámhossz esetén mértem. Holdvilágos égboltokra vonatkozó méréseink során azonban azt találtuk, hogy míg tiszta égbolt esetén  $d_{\max}$  kékben volt a legmagasabb, addig füst jelenlétében  $d_{\max}$  szeptember 1-jén a vörösben, szeptember 2-án azonban a kékben volt nagyobb (1.4. táblázat). Ezek a különbségek nem magyarázhatók a mérési helyszín környezetében lévő felszín albedójának változásával, mivel a képzalkotó polarimetriai méréseket mindig ugyanazon a helyszínen végeztük. A  $d_{\max}$  értékek spektrális változásait nagy valószínűséggel az erdőtűz füstcsóvjának áthelyeződése és szétterjedése okozta.

Az 1.5. táblázatban összefoglalt eredmények szerint a légkörben szétterjedt füst jelenléte miatt a  $d = 0$  % polarizációfokú neutrális (polarizálatlan) pontok helyei szintén megváltoztak, az Arago- és Babinet-pontok egymástól mért  $\delta$  szögtávolságai napsütötte és holdvilágos ég alatt egyaránt csökkentek. E változás COULSON (1988) és BELLVER (1967b) alapján szintén érzékeny indikátora az aeroszolok jelenlétének. Továbbá COULSON (1988) szerint a Babinet-pont égi helyének szélsőséges érzékenysége a sztratoszférikus aeroszolok bármilyen célú detektálására is lehetőséget ad, míg NEUBERGER (1950) szerint az Arago-pont helyének szisztematikus mérése is jó adatokat szolgáltat a légköri szennyezettség mértékére.

A vulkáni eredetű aeroszolok az erdőtűzfűsthöz hasonlóan szintén megváltoztatják az égbolt polarizációs sajátságait, ahogy erről több korábbi tanulmány is beszámolt. CORNU (1884) például kimutatta, hogy a Krakatau katasztrófális méretű kitörése után az égbolt  $d$

polarizációfokának maximuma igen drasztikus módon  $d_{\max} = 75\%$ -ról  $d_{\max} = 4,8\%$ -ra csökkent. Az égbolt polarizációfokának  $d_{\max}$  maximuma ugyanekkor a tiszta éggel ellentétben a vörösben alacsonyabb volt, mint a kékben. CORNU (1884) megfigyelései szerint az Arago-, Babinet és Brewster-féle neutrális pontok helyei is nagymértékben megváltoztak. Mérései során továbbá CORNU (1884) igen szokatlan módon négy további rendellenes neutrális pontot is kimutatott a vulkáni aeroszollokkal szennyezett égbolton, melyek ráadásul a szokásostól távolabb is estek a szoláris-antiszoláris meridiántól.

KIMBALL (1913), JENSEN (1928, 1942) és DORNO (1919a,b) a Katmai 1912-ben bekövetkező kitörése után szintén leírták az égbolt maximális polarizációfokának  $d_{\max} = 27\%$ -ra való drasztikus lecsökkenését, továbbá a neutrális pontok helyének eltolódását. A kitörés után az Arago-pont és az antinap közti szögtávolság  $5^\circ$ -ról  $12,5^\circ$ -ra nőtt, a Babinet-pont pedig még kifejezettebben, mintegy  $17^\circ$ -kal tolódott el a Naptól.

COULSON (1983, 1988) szerint az El Chichón 1982-ben bekövetkező kitörése még ennél is drasztikusabban változtatta meg az ég polarizációs sajátságait. Míg például az Arago-pont antiszoláris ponttól való szögtávolsága  $18^\circ$ -ról  $30^\circ$ -ra nőtt, a Babinet-pont olykor teljesen eltűnt, és ebben az esetben is megjelent egy rendellenes neutrális pont a Babinet-pont és a Nap égi helye között. Ahogy COULSON (1988) kiemelte, az El Chichón és a Katmai említett vulkánkitöréseinek az égbolt polarizációs sajátságaira való közvetlen hatásai között azért lehettek eltérések, mert az El Chichón vulkán aeroszolfelhője sűrűbb lehetett, továbbá a két vulkán kitörési felhőjének maximális légköri magassága is eltérhetett. Ezzel ellentétben áll BOESCHE *et al.* (2006) állítása, mely szerint az aeroszolkok légköri magassága az égbolt polarizációs sajátságainak vizsgálatokor elhanyagolható jelentőséggel bírt.

A tiszta égboltnál megfigyelt  $d$  polarizációfok-eloszlás felhők, köd és pára jelenléte miatt szintén nagymértékben megváltozik (GÁL *et al.* 2001a; POMOZI *et al.* 2001a; HEGEDÜS *et al.* 2007a,b). HEGEDÜS *et al.* (2007b) szerint például az égbolt  $d$  polarizációfokának átlaga köd jelenlétében  $d_{\text{átlag}} = 4\text{-}15\%$ -ra csökkent a fény apró ködcseppeken vagy jégzemcséken való szóródása miatt. A tiszta ég  $\alpha$  polarizációszögének mintázata ugyanakkor többnyire robosztus a felhők alatt is, a felhő típusától, vastagságától és magasságától, valamint a Nap láthatóságától függően (KÖNNEN 1985; COULSON 1988; POMOZI *et al.* 2001a). Emellett teljes napfogyatkozás totalitásakor térben és időben olyan bonyolultan változnak a megvilágítási viszonyok, hogy az égbolt polarizációs mintázata ilyenkor is drasztikusan megváltozik (POMOZI *et al.* 2001b; HORVÁTH *et al.* 2003; SIPÖCZ *et al.* 2008). GÁL *et al.* (2001a) ugyanakkor azt is kimutatta, hogy  $d_{\max}$  és a neutrális pontok zenittől mért szögtávolsága akár

úgy is megváltozhat néhány óra leforgása alatt, hogy az égbolt látszólag egész nap tisztának tűnik. Ilyenkor az égbolt polarizációs sajátságainak szemmel nem látható, de képalkotó polarimetriával mérhető eltéréseit a légszennyezés kismértékű változásával lehet magyarázni.

Mindezen mérések és megfigyelések biológiai jelentősége abban áll, hogy az égbolt polarizációs tulajdonságaiban az erdőtüzfüst vagy vulkáni aeroszolok jelenléte miatt bekövetkező fenti változások hatással lehetnek a polarizáció-érzékeny állatok tájékozódására is (1.1.4. fejezet). Ám míg az égboltfény  $d$  polarizációfoka nem csökken le jelentősen, a polarizáció-érzékeny állatok az égbolt polarizációs iránymintázatát követve képesek megfelelő pontosságú tájékozódásra (BRINES & GOULD 1982; HORVÁTH & VARJÚ 2004).

## 2. fejezet

# A fénypolarizáció szerepe a vikingek navigációjában

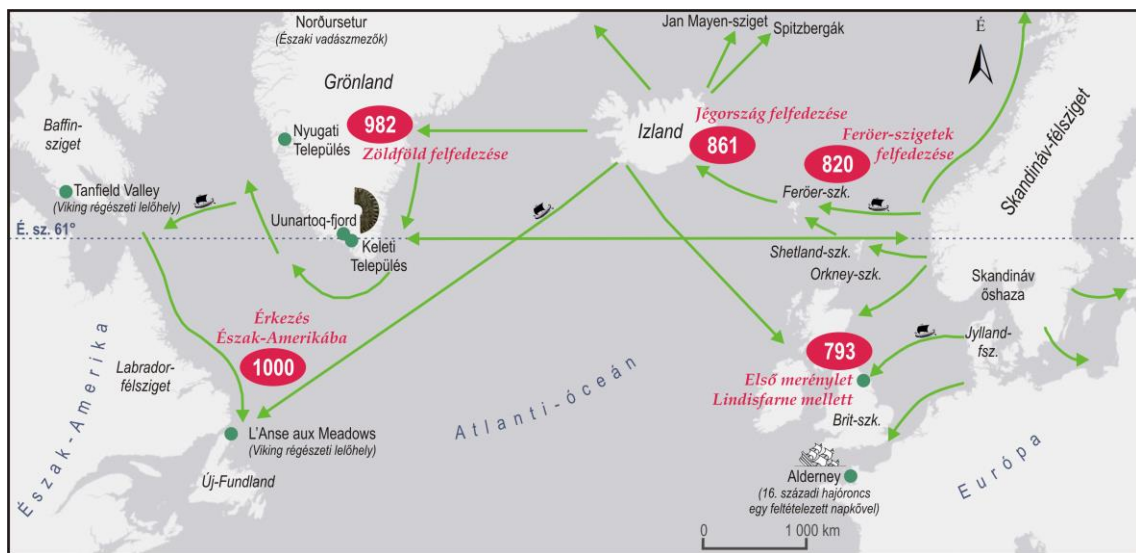
### 2.1. Irodalmi áttekintés

#### 2.1.1. A vikingek felfedező hajóújtjai

A 9–12. század között az Atlanti-óceán északi részét a vikingek uralták, akik településeiket kiváltképp a szűk, de hajózható skandináv fjordok mentén alakították ki. Igazán hírhedtté és rettegetté a lindisfarne-i kolostorban 793-ban elkövetett véres fosztogatás után váltak, így a viking kort innen számítjuk. Ezután sokszor hajtottak végre váratlan kalóztámadásokat a Brit-szigetek térségében az év azon időszakaiban, mikor a tenger elég nyugodt volt a vitorlázáshoz. Nem minden viking közösség volt azonban a portyák híve, néhányan új területek felfedezésének reményében hagyták el korábbi lakóhelyeiket (2.1. ábra). Nyugat felé eljutottak az akkor már lakott Shetland- és Orkney-szigetekre, 820 körül felfedezték a Feröer-szigeteket, majd 861-ben Izlandot és 982-ben Grönlandot is (BRØNDSTED 1983; PÖRTNER 1983; MCGOVERN *et al.* 2007), 1000 körül pedig az észak-amerikai kontinens partvidékére is eljutottak (INGSTAD & INGSTAD 2000).

A Feröer-szigeteken a sós tengeri pára miatt nem volt művelhető síkság (HANSEN 2003; EDWARDS 2005). Izlandon ezzel szemben dús hegyi legelőket és halban gazdag folyókat találtak a vikingek (MCGOVERN *et al.* 2007), a Golf-áramlás által fűtött déli part pedig alkalmas volt növénytermesztésre (DIAMOND 2007). Izland más területeit azonban lakhatatlanná tették az összefüggő jég- és lávafelszínek (SMITH 1995; DUGMORE *et al.* 2007). Később Grönland délnyugati, jégmentes parti sávján is találtak letelepedésre alkalmas földet (PÖRTNER 1983; MCGHEE 1984; VÉSTEINSSON *et al.* 2002), a gabona azonban a kedvezőtlen éghajlat okán nem termett meg ott. Éppen ezért a vadászat kulcsfontosságú szerepet töltött be minden grönlandi település életében, hiszen az így tulajdonukba kerülő értékes fókabőrt,

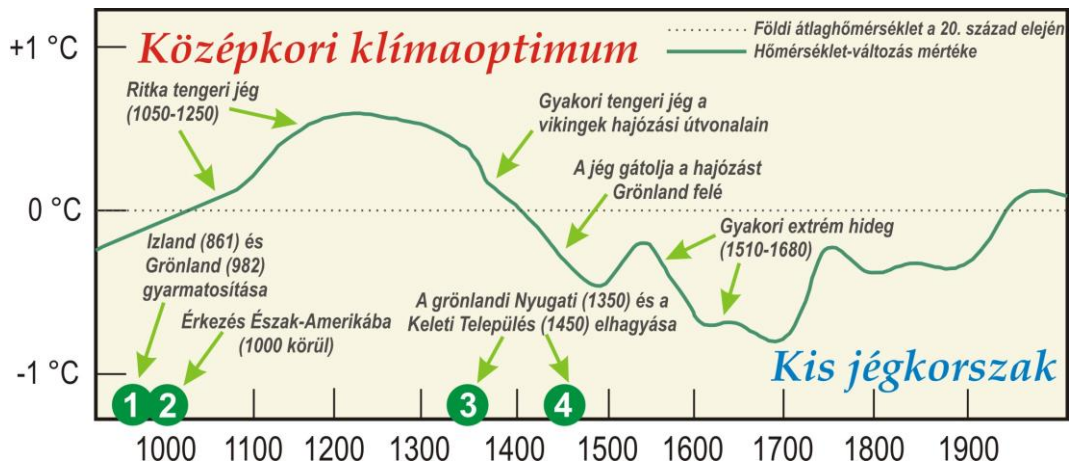
jegesmedveprémet és rozmáragyart az európai piacokon élelmiszerekre cserélhették (BRÖNDSTED 1983; DIAMOND 2007; OGILVIE *et al.* 2009). Hogy a vikingek a más módon nem beszerezhető árukhoz hozzájussanak, a rövid nyári hónapok alatt rendszeres kereskedelmi hajóforgalmat kellett fenntartaniuk. A skandináv őshaza és az új viking gyarmatok között mindig ugyanazokon a hajóútvonalakon haladtak, amelyek egyike a 61. szélességi kör mentén haladt (2.1. ábra; THIRSLUND 2001).



2.1. ábra. A viking felfedezőutak fő irányai.

### 2.1.2. A viking kor klimatikus viszonyai

Felszíni formakincsek és faégyűrűk változásainak vizsgálata, valamint grönlandi jég- és tőledék-elemzések is egyértelműen igazolják, hogy a vikingek felfedezőútjai a (650–880 között kezdődő és 1030–1220 között véget érő) középkori klímaoptimum időszakára estek (2.2. ábra). Ebben az időszakban az átlagosnál melegebb és szárazabb nyarak, illetve enyhébb telek voltak jellemzők, ami 1-2 °C-kal magasabb évi átlaghőmérséklettel járt együtt a 20. század eleji értékekhez képest (LAMB 1965; HUGHES & DIAZ 1994; MCGOVERN 1997; OGILVIE *et al.* 2000; GROVE 2001; KAPLAN *et al.* 2002; SOON & BALIUNAS 2003; BEHRINGER 2010). Az úszó sarkvidéki jégtáblák ritkán jelentek meg a szigetekenél, ami az átlagosnál 2-4 °C-kal melegebb tengervíz is jelenthetett. Sohasem tapasztalt hajózási és kereskedelmi lehetőségek nyíltak meg a jég visszahúzódása miatt megnövekedett termőterületek, valamint a jégmentessé váló folyókon és tengereken meghosszabbodó hajózási időszak következtében (FARKAS 2013; HORVÁTH *et al.* 2016).



2.2. ábra. A középkori éghajlat-ingadozások és a viking terjeszkedés összefüggései.

Az észak-atlanti óceáni viking telepek később elnéptelenedtek: a 14. század közepén (1341–1363 között) a grönlandi Nyugati, majd a 15. század közepén (1450 körül) a Keleti Települést is elhagyták a vikingek. Az elnéptelenedés folyamatának és okainak feltárásával számos tanulmány foglalkozott (BERGLUND 1986; MCGOVERN 1991, 1997; OGILVIE *et al.* 2000; ORLOVE 2005; DIAMOND 2007; D’ANDREA *et al.* 2011). MCGOVERN (1997) szerint a grönlandi viking telepek elnéptelenedését a kezdettől fogva sérülékeny gazdaság összeomlása okozhatta, a talaj kimerülése (FREDSKILD 1992; MASSA *et al.* 2012) és a csökkenő állattenyésztés pedig együtt súlyos élelmiszerhiányt eredményezhetett. A grönlandi telepések eltűnésében azonban a fő szerepet a korábban sem kellően ideális éghajlati viszonyok 1270-től meginduló drasztikus, kis jégkorszaki romlása játszhatta, ami a fenti okokkal együtt jelenthetett végzetes problémát (MCGOVERN 1991, 1997; GROVE 2001; BROECKER 2001; BRADLEY *et al.* 2003; ORLOVE 2005). A lehűlés az izlandi telepeket is érintette, ahol a termékeny völgyeket hónapokra elzárták a gleccserek és a torlódó tengeri jégtablák. Az összefüggő sarki jégtakaró délre húzódásával lehetetlenné vált a hajózás a 60. szélességi foktól északra (BEHRINGER 2010; RIBEIRO *et al.* 2011), azaz éppen a vikingek fő hajózási útvonalain, így a készletek felélése után kereskedelem útján sem tudtak élelmiszerekhez jutni.

### 2.1.3. A vikingek partközeli navigációja

A vikingek tengeri hajóútjai bizonytalansággal voltak terhesek, hiszen nem álltak rendelkezésükre hajózási térképek, ködkürtük és világítótornyok sem, a mágneses iránytű pedig szintén csak később terjedt el Európában (GUCMA *et al.* 2016), annak első európai említése 1187-ből való (MAY 1955). Partközeli útjaikon a viking hajósok természetes

tájékozódási pontokat figyeltek: hegyeket, öblöket, szigeteket, magányos fákat és kőhalmokat, továbbá bizonyos állatok (bálnák, madarak) élőhelyének határait (THIRSLUND 1997; DOUGLAS 2014; HORVÁTH *et al.* 2014).

#### **2.1.4. A vikingek nyílt tengeri tájékozódásának lehetséges segédeszközei**

A vikingek nyílt tengeri navigációs módszerei alig ismertek (PUCHALSKA 2015; HORVÁTH *et al.* 2016). A fő égtájak (észak, dél, kelet, nyugat) viking útleírásokban való megjelenése azt jelzi, hogy a földrajzi szélességi és hosszúsági körök mentén hajóztak anélkül, hogy ismerték volna e fogalmakat (THIRSLUND 1997). Bár KEMP & D'OLIER (2016) szerint a Sarkcsillag irányt mutatott számukra, HORVÁTH *et al.* (2014) kihangsúlyozza, hogy a 10. században ez a csillag még 6°-nál távolabb helyezkedett el az égbolt északi pólusától. A hajósoknak SAWATZKY & LEHN (1976) és LEHN & SCHROEDER (1979) szerint a nyílt tenger felszíne feletti délibábok is irányt mutathattak. ROSLUND & BECKMAN (1994) azt állítja, hogy a vikingek nyílt tengeri tájékozódásakor nem volt szükség semmilyen bonyolult segédeszközre, hiszen a (felhő, köd vagy horizont által takart) Nap égi helyének szabad szemmel történő becslése könnyen és nagy pontossággal elvégezhető a felhők fényességmintázata, a felhőtető fényes kontúrjai, az alkonyi fények kontrasztjai, vagy a Nap irányába mutató fény-árnyék pászmák (Tyndall-jelenség) megfigyelésével. BARTA *et al.* (2005) azonban laboratóriumi pszichofizikai kísérletben bizonyította, hogy ROSLUND & BECKMAN (1994) ezen állítása téves, a légköroptikai jelenségek figyelésével ugyanis csak igen nagy hibával határozható meg a takart Nap égi helye. BARTA *et al.* (2005) eredményei szerint a felhős égboltokat ábrázoló fényképeken a tesztalanyok által becsült nappozíciók közti maximális szögtávolságok 8°-tól 163°-ig terjedtek, az alkonyati égboltképeken pedig a Nap becsült irányszögeinek szórása 0,6° és 42° közé, maximális szögtávolságuk pedig 2,1° és 99° közé esett.

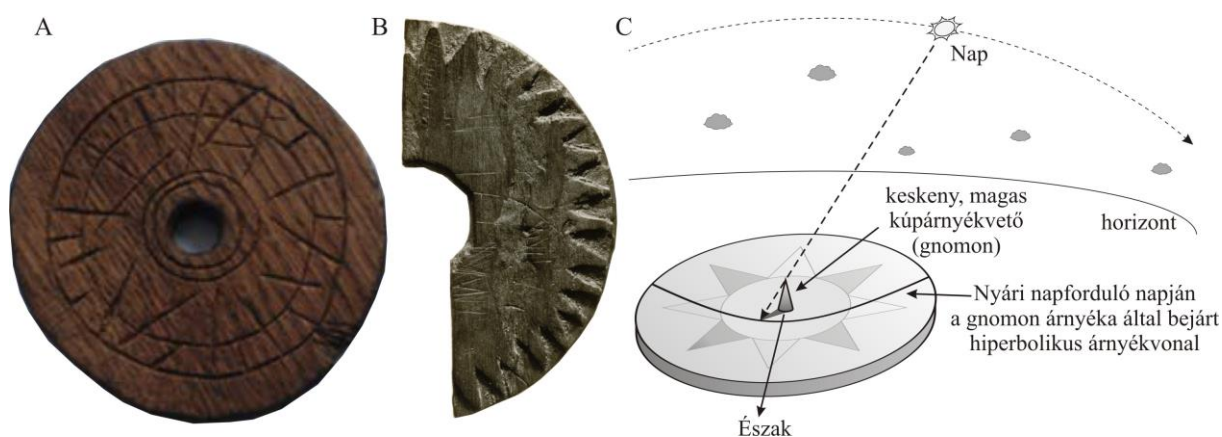
#### **2.1.5. A vikingek nyílt tengeri tájékozódása napiránytűvel**

A vikingek nyílt tengeri navigációjával kapcsolatban jól ismert az a lelet, melyet 1948-ban a grönlandi Uunartoq-fjordnál, az egykor vikingek által lakott Keleti Település közelében tártak fel (2.3B ábra; THIRSLUND 1991, 1993). A vésett fatárcsatöredék luc- vagy vörösfenyőből készült 1000 körül. Eredetileg 7 cm átmérőjű lehetett, közepén egy 1,7 cm átmérőjű lyukkal, külső íve mentén pedig háromszög alakú jelzésekkel, amelyekből a teljes tárcsán 32 darab lehetett. A lelet karcolatainak TAYLOR *et al.* (1954) nem tulajdonított nagy jelentőséget, és a



töredéket edényfedélnek vagy díszítőelemnek gondolta. Bár a lelet funkciója máig tartó, fordultatos vita tárgya, az a legelfogadottabb elmélet szerint egy napiránytű része lehetett, amit a vikingek derült időben használhattak az Atlanti-óceánon történő tájékozódásukkor.

SØLVER (1953, 1954) dán navigációs szakértő elmélete szerint a fatárcsa közepén egy a felületből függőlegesen kiálló vékony árnyékvető pálca (görögül *gnomon*) helyezkedhetett el. Ha a nap-éj egyenlőség és a nyári napforduló napján a 61. szélességi kör mentén (azaz a leírásokban szereplő fő viking útvonalon) állva a tárcsát vízszintesen tartjuk, és bejelöljük rajta a pálca árnyékának csúcsa által napkeltétől napnyugtáig megtett utat, akkor a tárcsára vésettekhez hasonló vonalakat kapunk: nap-éj egyenlőségkor kelet–nyugat irányú egyenes, a nyári napforduló napján pedig hiperbolikus árnyékvonal adódik. Az elmélet szerint a májustól augusztusig hajózó vikingek navigátorának napsütéses időben vízszintesen kellett tartania a tárcsát, majd a gnomon mint tengely körül addig forгатni, míg a gnomonárnyék csúcsa érintette a tárcsára karcolt árnyékvonalat. Ekkor a tárcsára vésett apró jelsor hossz tengelye a földrajzi észak felé mutatott (2.3C ábra), ami egyezik az árnyékvonalak tükörszimmetria-tengelyével. A napiránytű elmélete mellett szól, hogy az egykor vikingek lakta területekről több hasonló lelet is előkerült, például a Balti-tenger partján fekvő Wolin-szigetről 2000-ben is előkerült egy 11. század első felében készített fatárcsa (2.3A ábra, INDRUSZEWSKI & GODAL 2006; GUCMA *et al.* 2016).



2.3. ábra. A Wolin-szigeten feltárt fatárcsát (A) és a Grönlandon talált fatárcsatöredéket (B) eredetileg napiránytűként használhatták a viking hajósok. (C) A klasszikus napiránytű nyári napfordulókör úgy használható, hogy a keskeny gnomon árnyékának csúcsát a tárcsa forgatásával a hiperbolikus árnyékvonalra kell illeszteni, s ekkor az eszköz megmutatja a földrajzi északi irányt. A gnomonárnyék azonban csak magasan álló Nap esetén elég rövid ahhoz, hogy csúcsa a tárcsára vetüljön, így az eszköz használhatósága korlátozott (GUCMA *et al.* 2016; Danish Maritime Museum; HORVÁTH *et al.* 2016).

### 2.1.6. A vikingek nyílt tengeri tájékozódása napkövel: az égbolt-polarizációs viking navigáció hipotézise és lépései

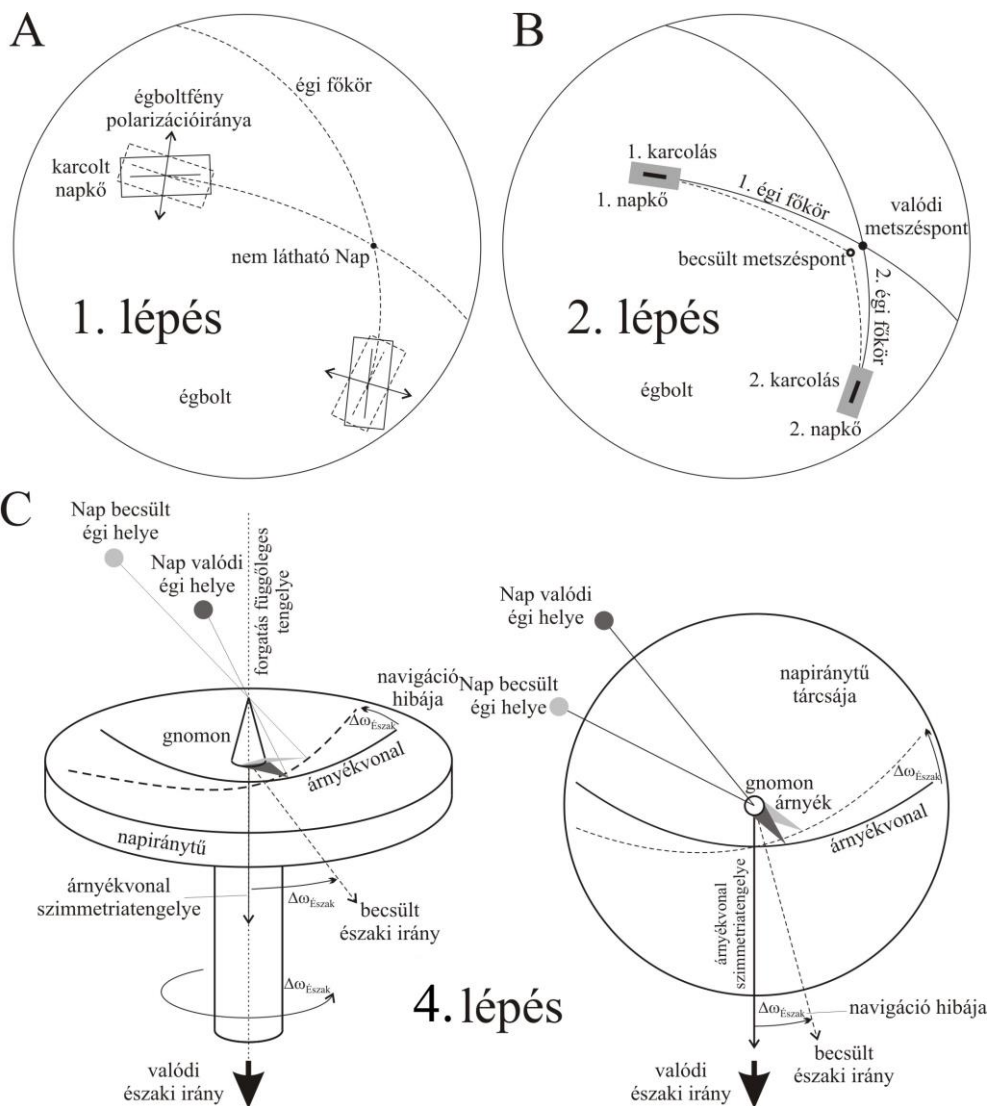
A napiránytű használatához szükség volt közvetlen napfényre, a vikingek által uralt észak-atlanti-óceáni térségben viszont gyakran köd vagy felhő takarta a Napot, és így nem látszott a központi árnyékvető tájékozódáshoz nélkülözhetetlen árnyéka (HORVÁTH *et al.* 2011, 2014, 2016). RAMSKOU (1967) dán régész szerint a viking hajósok ilyen helyzetekben napköveket használtak tájékozódásukkor. Ezek olyan dikroikus kordierit- vagy turmalin-, illetve kettős törő izlandi pát vagy kalcit-kristályok lehettek (FOOTE 1956; WALKER 1978; SCHAEFER 1997; WILD & FROMME 2007; EINARSSON 2010; BALL 2011; HAWTHORNE & DIRLAM 2011; KARMAN *et al.* 2012; ROPARS *et al.* 2012; SKALWOLD & BASSET 2016), melyekkel az égboltfény rezgéssíkját, azaz  $\alpha$  polarizációs szögét határozhatták meg, ami alapján a takart Nap égi helyére következtethettek. Ezután a napiránytű árnyékvetőjének nem látható árnyékát valamilyen segédeszközzel, például egy nyílhegyszerű árnyékpálcával helyettesítették, melynek adott távolságra lévő lyukai különböző napállásokhoz tartozhattak (BERNÁTH *et al.* 2013a). Végül napiránytűjükkel meghatározták a földrajzi északi irányt és haladási irányukat.

A földrajzi északi irány napkövel történő meghatározása négy lépésben zajlott, ehhez azonban előbb kalibrálni kellett a napkö-kristályokat (HORVÁTH *et al.* 2011b, 2016; SZÁZ *et al.* 2016b,c). A vikingeknek először napsütéses, felhőtlen időben kellett nézniük az ég egy megfelelően nagy  $d$  polarizációfokú pontját (HORVÁTH *et al.* 2011b), például egy kordierit- vagy turmalinkristályon át, majd meg kellett keresniük a napkö azon kitüntetett irányulását, ahol a napkövön át figyelt égbolt a legfényesebbnek vagy a legsötétebbnek látszott. Ezt az irányt rögzítették, majd a kristály felületén egy olyan egyenes karcot ejtettek, ami a Nap felé mutatott. E kalibrációt az égbolt bármely (elegendően poláros) pontján elvégezheték, mert a polarizációs iránymintázat (Nap körüli érintő irányú) jellegéből adódóan a karc minden esetben a Nap felé mutat a Rayleigh-féle fényszórás sajátosságainak következtében (SUHAI & HORVÁTH 2004). A bekarcolt napkövet akkor vették elő újra, mikor felhő vagy köd kúszott a Nap elé, és így az árnyékok eltűnésével napiránytűjük használhatatlanná vált. Az égbolt-polarizációs viking navigáció a hipotézis szerint a következőképpen zajlott (2.4. ábra):

- **1. lépés:** A navigátor az ég egy kellően poláros, tiszta foltját nézte a napkövön át, majd addig forgatta azt, amíg az égbolt azon keresztül nézve a legfényesebbnek vagy a legsötétebbnek látszott, így a korábban bevéselt karc a takart Nap felé mutatott.

Az így meghatározott égi főkörön a Nap még bárhol elhelyezkedhetett, ezért a mérést az égbolt egy másik, kellően poláros pontján is meg kellett ismételni (2.4A ábra)

- **2. lépés:** A navigátor a kapott két éggömbi főkör metszéspontját megkeresve becsülte meg a nem látható Nap égi helyét (2.4B ábra).
- **3. lépés:** Maga előtt kinyújtott kezének öklei és ujjai segítségével meghatározta az általa becsült nappozíció horizont feletti magasságát ököl-ujj egységekben.
- **4. lépés:** A valódi árnyékot helyettesítő árnyékpálca előre kifűrt lyukai közül megkereste az ököl-ujj egységekben mért napmagasságnak megfelelőt, majd a kiválasztott lyukat a napiránytű függőleges árnyékvetőjének csúcsára helyezte. Amikor az árnyékpálca hegye érintette a napiránytű vízszintes tárcsájának valamely előre bevéssett (napfordulókor vagy nap-éj egyenlőségkor érvényes) árnyékvonalt, akkor a vétsor alapján következtetni tudott a földrajzi északi irányra (2.4C ábra).



2.4. ábra. (A-C) Az égbolt-polarizációs viking navigáció 1., 2. és 4. lépése.

A hipotézis szerint kettőstörő kalcitkristályok is használhatók lehettek napkőként (WALKER 1978; SCHAEFER 1997; WILD & FROMME 2007; BALL 2011; ROPARS *et al.* 2012), ám azok optikai tulajdonsága és alkalmazása eltér az előzőektől (HORVÁTH *et al.* 2016). Kalcit használatakor először a kialakuló kettős képet el kell választani egymástól, amit a kalcit egyik oldalának lefedésével érhetnek el, a kristály felületéből kizárólag egy apró lyukat vagy egy vékony rést szabadon hagyva. A lyuk vagy a rés egymástól elkülönülten látható két képének intenzitása a kalcit forgatásakor ahhoz hasonlóan változik, mintha két különböző, egymásra merőleges áteresztési irányú turmalin- vagy kordieritkristályuk lenne egymás mellé helyezve. A kalcit mint napkő kalibrációjához (azaz a Nap irányába mutató karcolás bevézéséhez) azon két irányulás valamelyikét használhatták fel, ahol a lyuk vagy a rés két képének intenzitása megegyezik, vagy ahol az intenzitáskülönbség a legnagyobb. Felhős vagy ködös időben az égbolt egy pontját a kalcit napkövön át nézve tehát a viking navigátorok (a kalibrált állástól függően) újra addig forgatták kristályukat, amíg a kettős kép intenzitása egyforma lett, vagy a köztük lévő intenzitáskülönbség a legnagyobb lett. A mérést az ég egy másik pontjában megismételve, majd a kapott két éggömbi főkör metszéspontját megbecsülve így két kalcittal is megállapíthatták a nem látható Nap égi helyét, ami támpontot adott számukra a napiránytű további használatához.

RAMSKOU (1967) égbolt-polarizációs viking navigációs hipotézisét a tudományos közösség jelentős része minden kritika nélkül elfogadja (KREITHEN & KEETON 1974; WEHNER 1976; KÖNNEN 1985; SCHAEFER 1997; VILHJÁLMSOON 1997, 1999; THIRSLUND 2001; WILD & FROMME 2007; PUCHALSKA 2015). Pedig az elmélet helyességét nem támasztja alá bizonyíték, továbbá korábban a módszer használhatóságát és lépéseinek pontosságát sem igazolták. A rejtélyes napkövek azonban valószínűleg léteztek, hiszen a „speciális tulajdonságokkal rendelkező”, „lekerekített” vagy „sima felületű” kristályokról több helyen is szó esik (FOOTE 1956; EINARSSON 2010). RAMSKOU (1967) hipotézise mellett szól, hogy az égbolt polarizációs mintázatán alapuló navigáció az állatvilágban is ismeretes (*1.1.4. fejezet*; WEHNER 1976; KRISKA 2000; HORVÁTH & VARJÚ 2004; HORVÁTH & CSABAI 2014; HORVÁTH *et al.* 2016), és az is, hogy a Skandináv Légitársaság pilótái sokáig szintén az égbolt polarizációjának mérésén alapuló eszközt, a Kollman-féle égi iránytűt használták navigációjukhoz az Északi-sark környéke felett repülve (PEDERSEN 1955, 1958). Ezt az optikai eszközt egy lineáris polárszűrőként működő kristállyal, valamint lencsékkel, csavarokkal és fokbeosztásos skálákkal látták el. Használatakor a repülőgép navigátora addig forgatta a kristályt a függőleges tengelye körül, amíg a legfényesebbnek, illetve

legsötétebbnek nem látta az égboltot a zeniten, majd a kristály világos és sötét állásaiból a Nap irányára tudott következtetni (HORVÁTH *et al.* 2011). Egy ROPARS *et al.* (2014) által említett, egykori izlandi Viking-településen feltárt apró kalcit-töredék, valamint a LE FLOCH *et al.* (2013) által bemutatott 16. századi viking hajóroncsban talált kalcitkristály szintén tovább erősítheti az elképzelést, miszerint a napköveket navigációs célra használhatták a mágneses iránytű Európában való megjelenése előtt (MAY 1955).

### **2.1.7. A vikingek nyílt tengeri tájékozódása napkövel:**

#### **az égbolt-polarizációs viking navigáció légköroptikai feltételei és terepi vizsgálata**

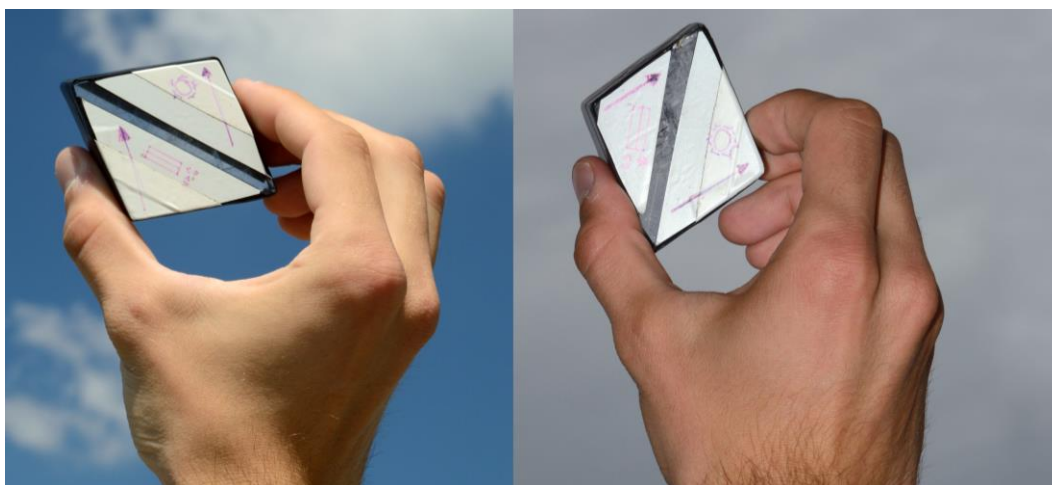
Ahhoz, hogy a viking navigátorok napköveik segítségével a lehető legpontosabban következtetni tudjanak a felhő, köd vagy horizont által takart Nap égi helyére, majd az égtájak irányára, HORVÁTH *et al.* (2011) szerint két légköroptikai feltételnek kell teljesülnie: (i) Az égboltfény  $d$  polarizációfokának megfelelően nagyoknak kell lennie, különben a szem előtt ide-oda forgatott napköveken átnézve nem lesz észlelhető az égbolt periodikus kifényesedése és elsötétedése. (ii) A napkövek megfelelő használatához az égboltfény rezgéssíkjának merőlegesnek kell lennie a fényszórási síkra (amit a megfigyelő, a megfigyelt égi pont és a Nap feszít ki), vagyis az égboltfény  $\alpha$  polarizációs szögének meg kell egyeznie a Rayleigh-modell jósolta iránnyal.

A viking navigáció két légköroptikai feltétele SUHAI & HORVÁTH (2004) szerint teljesen tiszta égbolt esetén (annak 13–69 %-án) teljesül leginkább, hiszen a Rayleigh-modell jósolta mintázathoz az ilyen meteorológiai szituációban mért jellemzők hasonlítanak a legjobban (1.2. ábra). A legnagyobb eltérések a Nap/antinap és a neutrális pontok között tapasztalhatók, ahol egyrészt az égbolt  $d$  polarizációfokának drasztikus csökkenése miatt a fent említett első légköroptikai feltétel nem teljesül (GÁL *et al.* 2001a; HORVÁTH *et al.* 2016), másrészt pedig itt az égboltfény rezgéssíkja pont merőleges a Rayleigh-modell által jósolt irányra, miáltal a második feltétel sem teljesül. A tiszta égbolt más részein is hiába teljesül azonban a két feltétel, a viking hajósoknak napsütötte ég alatt hajózva nem volt szükségük napkövekre, hiszen csupán napiránytűjük használatával is képesek voltak a nyílt vízi tájékozódásra (HORVÁTH *et al.* 2016).

Felhők jelenlétében gyakran felléphet a többszörös fényszórás, aminek következtében a felhőfény  $\alpha$  polarizációs szöge eltérhet a Rayleigh-modell által jósolt iránytól (1.2. ábra; SUHAI & HORVÁTH 2004). A felhőkről érkező fény  $d$  polarizációfoka is alacsonyabb lesz, mint a környező tiszta égbolté, így összességében a felhőkkel részben borított égboltnak már

csak kisebb hányadán (4–69 %-án,  $d_{\text{felhős}} = 14\text{--}16\%$ ) teljesülnek a viking navigáció légköroptikai feltételei (HORVÁTH *et al.* 2011). A feltételek teljesülése ugyanakkor a napmagasságtól is függ: minél kisebb a Nap horizonttól mért szögtávolsága, annál nagyobb a részben felhős ég viking navigációra alkalmas hányada (HORVÁTH *et al.* 2011). Alacsony napmagasságnál ugyanis a tiszta égboltra jellemző szórás mintázat a felhők alatt is ki tud alakulni a Nap által közvetlenül megvilágított légrétegen. A felhők jelenléte tehát önmagában nem zárja ki a napkövek használhatóságát, részben felhős időben akár a navigációs módszer mindkét légköroptikai feltétele is teljesülhet.

Mivel a borult ég  $\alpha$  polarizációs szögének mintázata hasonló a tiszta égéhez ugyanazon nappozíciónál, a második feltétel teljesen borult égbolt mellett is teljesülhet (HEGEDÜS *et al.* 2007a; HORVÁTH *et al.* 2011). Ilyenkor azonban az égboltnak  $d$  polarizációfoka nagyban lecsökken (1.2. ábra;  $d_{\text{tiszta}} = 21\text{--}34\%$ ,  $d_{\text{borult}} = 3\text{--}8\%$ ), így a napkő szem előtti forgatásakor alig észlelhető az égbolt periodikus fényességváltozása. Az első légköroptikai feltétel teljesülésének hiánya tehát valószínűtlenné teszi, hogy teljesen borult égbolt alatt egy viking navigátor képes lett volna napkövével megállapítani a Nap égi helyét (2.5. ábra; HORVÁTH *et al.* 2016).



2.5. ábra. A kalcit-napkő kettős résképének periodikus sötétedése és világosodása derült égbolt esetén könnyen észlelhető (balra), ám borult égbolt alatt a kristály forgatásakor nincs látható intenzitáskülönbség (jobbra).

HEGEDÜS *et al.* (2007b) szerint napsütötte ködben a napkő-használat második légköroptikai feltétele közel annyira teljesül, mint tiszta égboltnál, hiszen ha a ködöt felülről közvetlen napfény éri (azaz a köd felett nincsenek felhők), akkor a ködös égbolt  $\alpha$  polarizációs szögének mintázata nagyon hasonló a tiszta égéhez (HORVÁTH *et al.* 2011). Ugyanakkor a ködös égbolt

fényének  $d$  polarizációfoka a borult égboltéhoz hasonlóan nagyon alacsony ( $d_{\text{ködös}} = 8\text{--}9\%$ ), ami korlátozza a napköves navigáció lehetőségét (HEGEDÜS *et al.* 2007b).

Egy terepi pszichofizikai kísérletsorozatban BERNÁTH *et al.* (2013a) vizsgálta, hogy a különböző meteorológiai szituációkban milyen pontossággal lehet megállapítani a földrajzi északi irányt a viking navigáció három lépésével, két kalcit napkő, egy árnyékpálca és egy napiránytű használatával. Az 1. vizsgált meteorológiai szituációt derült égbolt és napsütés jellemezte, így a tesztalanyoknak elegendő volt a napiránytűt használniuk. A 2. szituációban a felhők jelenléte miatt már nem volt közvetlenül látható árnyéka a napiránytű árnyékvetőjének, ekkor tehát a tesztalanyok a felhők fényességmintázata alapján becsülték meg a nem látható Nap égi helyét, a becsült árnyékot pedig árnyékpálcával helyettesítették. A 3. helyzetben a teljes borultság miatt szabad szemmel csak azt lehetett megállapítani, hogy a Nap az égbolt melyik felén foglal helyet, tehát ekkor a Nap égi helyének becslése két kalcit napkő segítségével történt, majd a tesztalanyok árnyékpálca használatával forgatták be a napiránytűt a földrajzi északi irányba. A 4. szituációban már azt sem lehetett eldönteni, hogy a Nap az égbolt melyik felén jár, ekkor tehát csak a kalcit napkövekkel, az árnyékpálcával és a napiránytűvel végzett mérésekre lehetett hagyatkozni a tájékozódás során. Az északi irány tesztalanyok általi megállapításának átlagos hibája az égbolt felhősödésével folyamatosan nőtt: az 1. szituációban  $-0,9^\circ \pm 5,9^\circ$ , a 2. szituációban  $-8^\circ \pm 12,3^\circ$ , a 3. szituációban  $+12,5^\circ \pm 16,1^\circ$  volt. A 4. szituációban az égboltfény  $d$  polarizációfokának drasztikus csökkenése miatt a tesztalanyok által becsült északi irány a szélrózsa minden irányába mutatott,  $4,3^\circ \pm 89,9^\circ$  átlagos hibával. BERNÁTH *et al.* (2013a) szerint tehát az ég borultságának növekedésével a napkövel való navigáció pontossága egyre kisebb, ami ellenérvet szolgáltathat RAMSKOU (1967) hipotézisével szemben.



## 2.2. Az égbolt-polarizációs viking navigáció 2. lépésének planetáriumi vizsgálata<sup>4</sup>

### 2.2.1. Célkitűzések

Az ELTE Környezetoptika Laboratóriumában elért eddigi eredmények kulcsfontosságú mérföldkövei az 1967 óta széles körben elfogadott Ramskou-elmélet részletes elemzésének, ám az égbolt-polarizációs viking navigációs módszer lehetőségének végérvényes igazolásához vagy cáfolatához még számos kérdésre kellett választ találni.

Habár BERNÁTH *et al.* (2013a) terepkísérletekben kimutatta, hogy az égbolt-polarizációs viking navigáció módszerét és eszközeit használva a földrajzi északi irány megállapításának hibája folyamatosan nő az égbolt felhőborítottságának növekedésével, eredményeik nem tisztázták, hogy az adott mérés hibája a *2.1.5 fejezetben* bemutatott három lépés elvégzésekor milyen arányban jelentkezik. Ezért célul tűztük ki egy planetáriumi pszichofizikai kísérletsorozat elvégzését, amelynek során mérni kívántuk, hogy a feltételezett navigációs módszer 2. lépésében mekkora pontossággal határozható meg a nem látható Nap helye az 1. lépés által meghatározott mérőpontokon átmenő égi főkörök metszéspontjának becslésével. Azt is vizsgálni szándékoztunk, hogy a tesztalanyok által becsült nappozíciót a navigáció 3. lépésében felhasználva milyen pontosan lehet meghatározni a földrajzi északi irányt. Az így kapott eredmények fontos bemenő adatait képezték annak az átfogó vizsgálatnak, amely az égbolt-polarizációs viking navigációs módszer lépéseinek 1080 különböző meteorológiai helyzetben várható együttes pontosságát és korlátait vizsgálta.

---

<sup>4</sup> FARKAS A., SZÁZ D., EGRI Á., BLAHÓ M., BARTA A., NEHÉZ D., BERNÁTH B., HORVÁTH G. (2014): Accuracy of sun localization in the second step of sky-polarimetric Viking navigation for north determination: anavig planetarium experiment. *Journal of the Optical Society of America A*, 31, 1645–1656. (Q1, IF: 1,448)

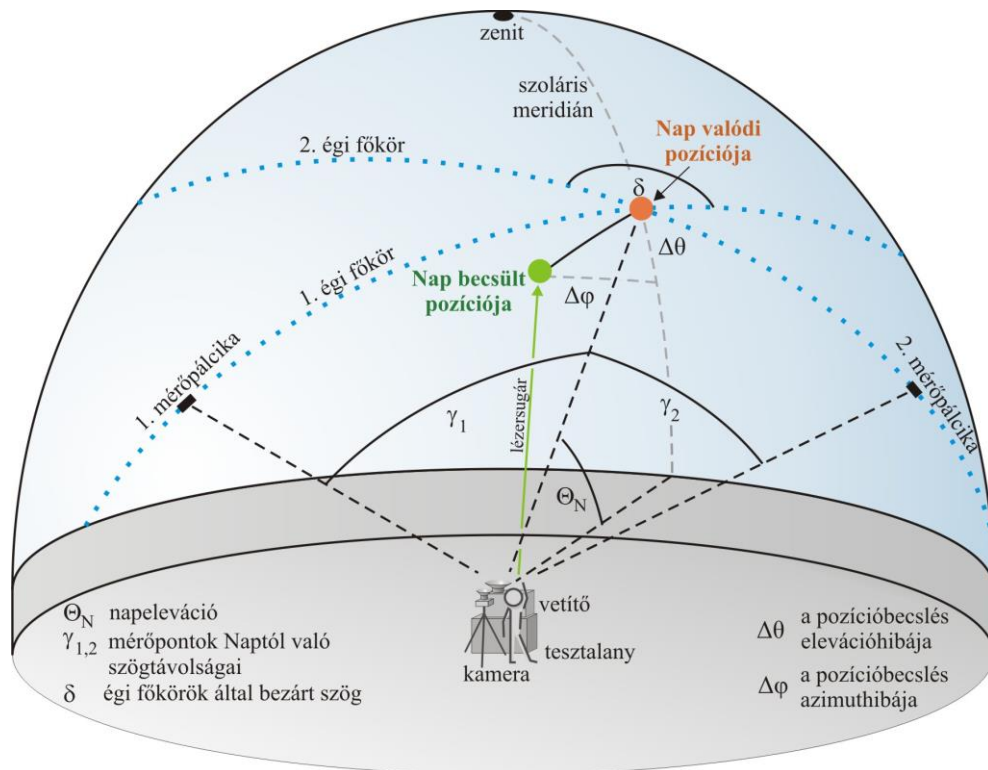
## 2.2.2. Anyag és módszer

### *Planetáriumi kísérlet és az eredmények rögzítése*

Az égbolt-polarizációs viking navigáció 2. lépésének pontosságát az ELTE Természettudományi Karának Lágymányosi Planetáriumában vizsgáltuk 2013-ban. A pszichofizikai kísérletsorozatban arra kerestük a választ, hogy a mérésben közreműködő 11 önkéntes, 23 és 63 év közötti férfi tesztalany milyen pontossággal képes megkeresni két adott égi főkör képzeletbeli metszéspontját. Az egyes mérések során az égi főkörök egy-egy  $0,6^\circ$  széles,  $5^\circ$  hosszú részletét vetítettük ki a 8 méter átmérőjű fehér kupola (Digitalis Education Solutions, Inc., Bremerton, USA, felbontás: 2400 pixel) két különböző pontjára (2.6. ábra), mely mérőpálcikák megfeleltethetők a viking navigátor legjobb tudása szerint az 1. lépésben beforgatott napkövek rögzített irányultságainak. A közvetlenül (30 cm-rel) a planetáriumi vetítő mellett felváltva helyet foglaló tesztalanyoknak kizárólag ezen információk alapján kellett (i) megbecsülni a mérőpálcikákon átmenő égi főköröket, majd (ii) megkeresni és (iii) egy zöld lézerrel megjelölni azok képzeletbeli metszéspontját. A parallaxishiba minimalizálása és a projektor erős fényének zavaró hatása csökkentése érdekében a tesztalanyok szemmagassága a planetáriumi vetítő lencséjétől számítva maximum 5 cm-rel lentebb esett. A különálló szektorokból álló fehér kupola rendelkezett egy észrevehető halvány körkörös mintázattal, ezt azonban nem lehetett kiküszöbölni.

A fekete égi mérőpálcikákat négy független paraméter alapján vetítettük a kupolára egy *Nightshade 11.12.1.* digitális planetáriumi szoftverben vetíthető, e kísérletre készített szkript segítségével. Változtattuk (i) a  $\theta_N$  napelevációt, (ii)–(iii) az égi mérőpontok Naptól való  $\gamma_1$  és  $\gamma_2$  szögtávolságát, és (iv) a két égi főkör egymással bezárt  $\delta$  szögét (2.6. ábra). A kísérletben kizárólag olyan mérési helyzeteket vizsgáltunk, melyek a vikingek által rendszeresen használt 61. szélességi kör menti atlanti-óceáni hajóútvonalon a valóságban is előfordulhattak (THIRSLUND 2001). Mivel a napmagasság a 61. szélességi körön maximum  $\theta_N = 52,5^\circ$  lehet, a kísérletben  $\theta_N$ -t  $5-25^\circ$  és  $35-55^\circ$  között változtattuk. A viking navigátorok a Naphoz és antinaphoz közel eső neutrális (polarizálatlan) pontok (KÖNNEN 1985; COULSON 1988; HORVÁTH *et al.* 2002; HORVÁTH & VARJÚ 2004) környezetét kiválasztva egyáltalán nem láthattak periodikus sötétedést és világosodást napkövükben, így a kísérletben sem vizsgáltunk olyan eseteket, ahol a beforgatott napkő irányultságát szimbolizáló fekete mérőpont Naptól számított  $\gamma_{1,2}$  szögtávolsága  $30^\circ$ -nál kisebb vagy  $150^\circ$ -nál nagyobb lett

volna. Azon szituációkat sem vizsgáltuk, ahol a mérőpálcikák Naptól való  $\gamma_{1,2}$  szögtávolsága  $120^\circ$  és  $150^\circ$  közé esett volna, hiszen így egyes mérési esetekben a mérőpálcikák a horizont alá kerültek volna.



2.6. ábra. A planetáriumi kísérlet elrendezésének vázlatja.

A négy paraméter ( $\theta_N$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\delta$ ) értékeit ezután  $30^\circ$ -os szögtartományokra bontottuk, melyek alsó és felső  $5^\circ$ -os tartományát ( $0-5^\circ$  és  $25-30^\circ$ ) a későbbiekben nem használtuk annak érdekében, hogy az egyes csoportok még jobban elkülöníthetők legyenek egymástól. Ennek megfelelően a  $\theta_N$  napeleváció lehetséges értékeit  $5-25^\circ$  és  $35-55^\circ$  között, az égi mérőpálcikák Naptól való  $\gamma_1$  és  $\gamma_2$  szögtávolságait  $35-55^\circ$ ,  $65-85^\circ$  és  $95-115^\circ$  között, míg a két égi főkör egymással bezárt  $\delta$  szög értékeit  $35-55^\circ$ ,  $65-85^\circ$ ,  $95-115^\circ$  és  $125-145^\circ$  közé állítottuk be. A lehetséges  $\theta_N$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\delta$  értéktartományok kombinálásával 48 eltérő mérési szituációt különítettünk el, melyek mindegyikében öt konkrét vizsgálandó esetet választottunk ki véletlenszerűen. Mind a 11 tesztalany ugyanabban a 240 mérési szituációban kereste a kivetített mérőpálcikákon átmenő égi főkörök metszéspontját, ám az egyes mérések véletlenszerű sorrendben és véletlenszerűen elforgatva követték egymást.

A vizsgálandó eseteket reprezentáló  $2048 \times 2048$  pixel méretű, később a planetáriumi kupolára vetített képeket egy erre a célra készített szoftverrel generáltuk (2.7. ábra). Egy  $1024$  pixel sugarú kör kerülete a horizontot, középpontja pedig a zenitet jelentette. Egy tetszőleges

pont planetáriumban érvényes  $\varphi$  azimutszögét és  $\theta$  elevációszögét egy  $\underline{p}$  helyvektorral az alábbiak szerint definiáltuk:

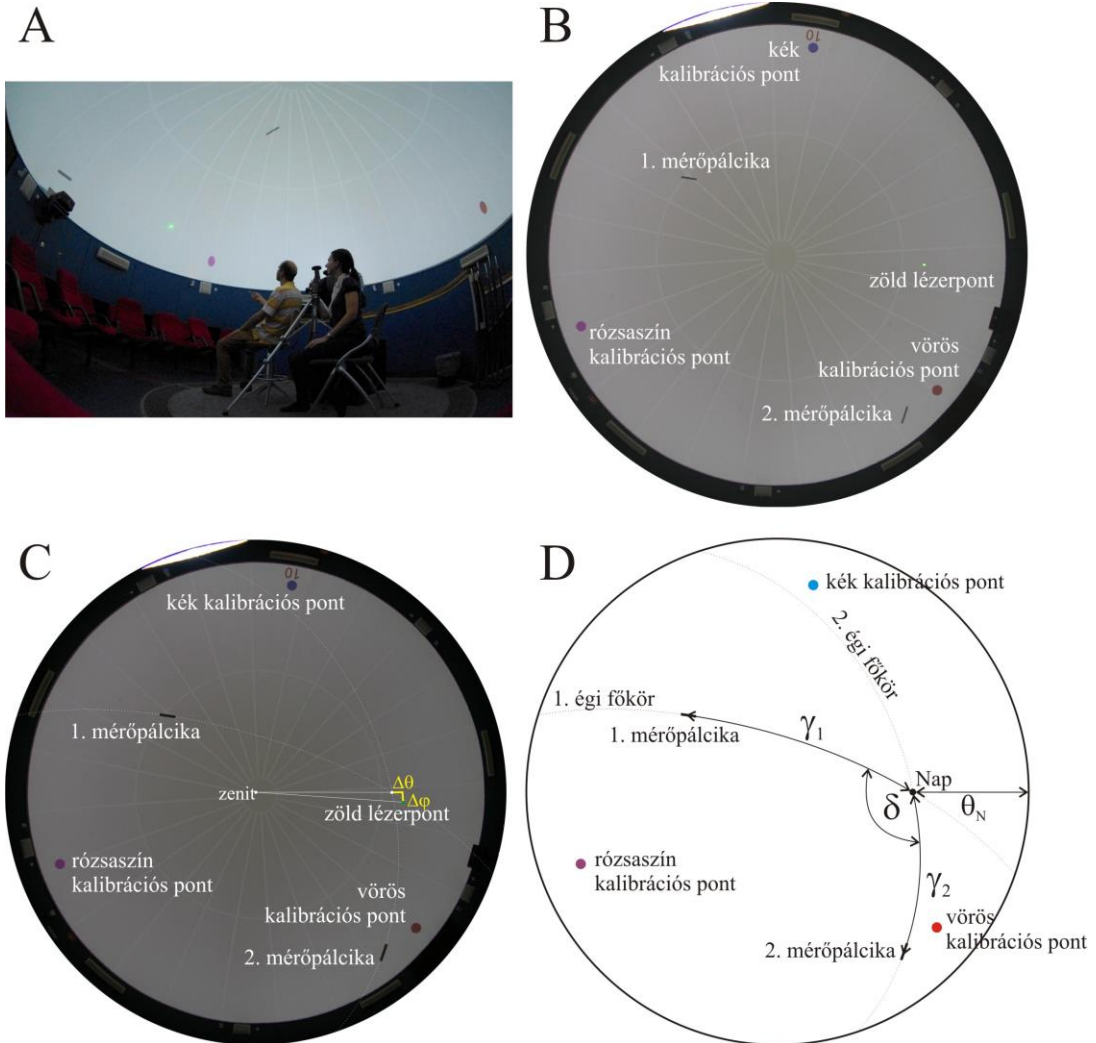
$$\varphi = \begin{cases} \arctan\left(\frac{(\underline{o} - \underline{p})_y}{(\underline{o} - \underline{p})_x}\right), \dots \text{ha} & (\underline{o} - \underline{p})_x > 0 \\ \arctan\left(\frac{(\underline{o} - \underline{p})_y}{(\underline{o} - \underline{p})_x}\right) + \pi, \dots \text{ha} & (\underline{o} - \underline{p})_y \geq 0, (\underline{o} - \underline{p})_x < 0 \\ \arctan\left(\frac{(\underline{o} - \underline{p})_y}{(\underline{o} - \underline{p})_x}\right) - \pi, \dots \text{ha} & (\underline{o} - \underline{p})_y < 0, (\underline{o} - \underline{p})_x < 0 \\ + \frac{\pi}{2}, \dots \text{ha} & (\underline{o} - \underline{p})_y > 0, (\underline{o} - \underline{p})_x = 0 \\ - \frac{\pi}{2}, \dots \text{ha} & (\underline{o} - \underline{p})_y < 0, (\underline{o} - \underline{p})_x = 0 \\ \text{nem definiált}, \dots \text{ha} & (\underline{o} - \underline{p})_y = 0, (\underline{o} - \underline{p})_x = 0 \end{cases} \quad (2.2.1)$$

$$\theta = 90^\circ - \frac{|\underline{o} - \underline{p}|}{r} \cdot 90^\circ, \quad (2.2.2)$$

ahol  $\underline{o}$  a kép középpontjának helyvektora,  $r$  pedig a kép sugara. A képek generálása során először a Nap pozícióját definiáltuk egy adott  $\theta_N$  napeleváció mellett. Mivel a képeket a planetárium dómjára véletlenszerű azimutszöggel elforgatva vetítettük ki, a Nap azimutszögét a következő értékkel definiáltuk:  $\varphi_N = 0$ . Ezután kiválasztottunk két, egymással  $\delta$  szöget bezáró égi főkört, melyek metszéspontja jelentette a Nap égbolton elfoglalt helyét. Ezt követően a két kiválasztott égi főkörön a Naptól  $\gamma_1$  és  $\gamma_2$  szögtávolságra helyeztük el a két  $5^\circ$  hosszú fekete mérőpálcika középpontját. A tesztalanyok számára kivetített képeken végül csak a két fekete mérőpálcika látszott, az égi főkörök és azok metszéspontja nem. A képeken elhelyeztünk egy-egy vörös, kék és rózsaszín kalibrációs pontot is, melyekre a mérések kiértékelésekor volt szükség (2.7. ábra). Ezek  $\theta = 10^\circ$  magasságban voltak kivetítve, egymástól  $\varphi = 120^\circ$  szögtávolságra. E kalibrációs pontok nem nyújtottak támpontot a mérésben résztvevő tesztalanyoknak, mivel az egyes mérési helyzetek véletlenszerűen elforgatva követték egymást.

Miután a tesztalanyok szemükre hagyatkozva megbecsülték, hogy a két kivetített fekete mérőpálcikán átmenő főkörök hol metszik egymást, egy zöld lézernyalábbal a vélt pontra mutattak (2.7A ábra). E pont reprezentálta a nem látható Nap általuk becsült helyét. A lézerpont helyét ezután egy állványra erősített, Nikon FC-E8 cirkuláris halszemoptikával ellátott Nikon Coolpix 8700 fényképezőgéppel rögzítettük. A kísérlet alatt a tesztalanyok semmilyen visszajelzést nem kaptak mérésük helyességéről vagy pontatlanságáról, hiszen az egyes mérések között nem vetítettük ki számukra az égi főkörök valódi metszéspontjait a

planetáriumi kupolára. Egy tesztalany egy alkalommal 40 mérési helyzetet mért, így minden személy 6 különböző alkalommal jelent meg a planetáriumi méréssorozaton. Egy személy egy nap maximum kétszer vehetett részt a kísérletben, minimum 20 perces szünetet beiktatva a két mérés közé. Így módon a 11 tesztalany összesen 2640 mérést végzett.



2.7. ábra. (A) A kísérletben részt vevő személy zöld lézerrel mutat rá a két kivetített fekete mérőpálcikán átmenő égi főkörök általa vélt metszéspontjára, azaz a Nap becsült helyére. (B) Az ELTE Planetáriumának dómjára kivetített mérési szituációk egyike a két fekete mérőpálcikával, illetve a vörös, rózsaszín és kék kalibrációs pontokkal, ahol a négy független paraméter értéke a következő volt:  $\theta_N = 41^\circ$ ,  $\gamma_1 = 84^\circ$ ,  $\gamma_2 = 50^\circ$ ,  $\delta = 129^\circ$ . A kék kalibrációs pont alatti szám az adott mérési szituáció szkriptbeli sorszámát kódolja. (C) A zöld lézerrel jelölt becsült nappozíció és a fehér ponttal kódolt valódi nappozíció közti  $\Delta\varphi$  azimut- és  $\Delta\theta$  elevációhibát a mérés elején lefényképezett kalibrációs kép (2.8 ábra) megfelelő forgatása után számoltuk. (D) A fekete mérőpálcikákat négy független paraméter alapján vetítettük a kupolára:  $\theta_N$ : napeleváció,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ : mérőpálcikák Naptól való szögtávolságai,  $\delta$ : égi főkörök által bezárt szög. A Nap az 1. és 2. mérőpálcikákon átmenő égi főkörök metszéspontjában van, mely főkörök a méréskor nem voltak kivetítve.

## Korrekcio és kiértékelés

Az adott nappozícióbecslés  $\Delta\varphi$  azimut- és  $\Delta\theta$  elevációhibáját a rögzített felvételeken látható zöld lézerpont helye és az égi főkörök ismert valódi metszéspontja közti szögtávolságok alapján számítottuk ki, a teljes kupolát átfogó halszemoptikás fényképfelvételek utólagos kiértékelésével (2.7B–C ábrák). Ám mivel a planetárium középpontjában a vetítógép foglalt helyet, az amellé helyezett, felfelé néző halszemoptikás fényképezőgép a kupolára kivetített képet (és a zöld lézerpontot) kissé torzultan örökítette meg. Az elkészült mérési felvételek kiértékelése előtt tehát e hatás korrekciójára volt szükség. Ennek megfelelően minden (40 mérési szituációból álló) planetáriumi mérési alkalom előtt egy 20 koncentrikus kört és 16 sugárirányú egyenest ábrázoló kalibrációs képet (KK) vetítettünk ki (2.8A ábra) és fotóztunk le (FKK) (2.8B ábra). A kiértékelés során kézzel minden rácspontban 9 pixel átmérőjű, jól látható színes pontokat helyeztünk el a KK-ra és az FKK-ra. Ezután egy e célra írt számítógépes program felismerte az egymásnak megfeleltethető színes pontpárokat, kiszámolta középpontjaik koordinátáit, majd megadta a köztük lévő különbségvektorokat ( $\underline{u}_{i,j}$ ,  $\underline{u}_{i+1,j}$ ,  $\underline{u}_{i,j+1}$ ,  $\underline{u}_{i+1,j+1}$ ; 2.8C ábra). Ily módon létrejött egy  $\Delta\varphi = 22,5^\circ$  és  $\Delta\theta = 5^\circ$  felbontású vektorokból álló  $\underline{u}_{i,j}$  mátrix (kétdimenziós vektortömb), ahol  $i = 0, \dots, 16$  az azimutindex;  $j = 0, \dots, 18$  az elevációindex. A korrigált kép minden egyes pixelének színe az egymással összepárosítható KK-FKK rácspontokhoz számított  $\underline{v}$  vektorok alapján került megállapításra. A színes pontokon kívüli, tetszőleges  $(\varphi, \theta)$  pontpárok esetén  $\underline{v}$  lineáris interpolációval került kiszámításra:

$$\underline{v} = (1 - \tilde{\varphi}) \cdot (1 - \tilde{\theta}) \cdot \underline{u}_{i,j} + (1 - \tilde{\varphi}) \cdot \tilde{\theta} \cdot \underline{u}_{i,j+1} + \tilde{\varphi} \cdot (1 - \tilde{\theta}) \cdot \underline{u}_{i+1,j} + \tilde{\varphi} \cdot \tilde{\theta} \cdot \underline{u}_{i+1,j+1},$$

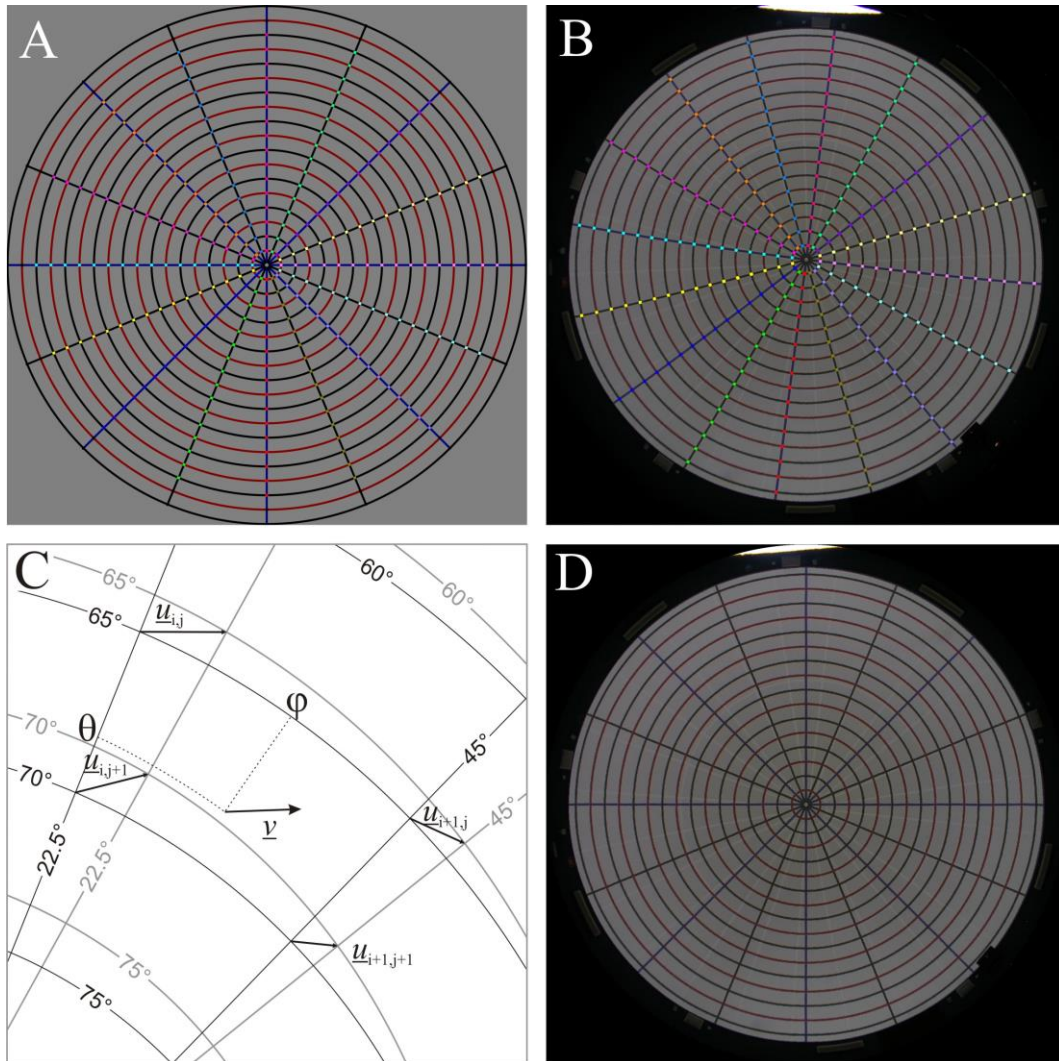
$$\tilde{\varphi} = \frac{\varphi - i \cdot \Delta\varphi}{\Delta\varphi}, \quad \tilde{\theta} = \frac{\theta - j \cdot \Delta\theta}{\Delta\theta}, \quad (2.2.3)$$

ahol  $\underline{u}_{i,j}$ ,  $\underline{u}_{i+1,j}$ ,  $\underline{u}_{i,j+1}$ ,  $\underline{u}_{i+1,j+1}$  a mátrix négy szomszédos korrekciós vektora (2.8C ábra). Az általunk alkalmazott módszer a mérni kívánt  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta\theta$  és  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  értékek pontosságához mérten megfelelő kalibrációt tett lehetővé.

Ezután a kiszámított  $\underline{u}_{i,j}$  mátrixal korrigáltuk az adott planetáriumi mérési alkalom mind a 40 szituációjakor készített halszemoptikás felvételt a következők szerint: Ha a kép adott pontja a kép középpontjától számítva  $r = 1024$  pixel (kép sugara) távolságnál távolabbra esett, akkor nem volt szükség korrekcióra, hiszen e pontok a mérés során a planetáriumi kupolán kívülre estek. Ha a kép adott pontja a kép középpontjától számítva  $r = 1024$  pixel távolságnál közelebb esett, az adott képpont azimut- és elevációszögét  $(\varphi, \theta)$  a (2.2.1) és



(2.2.2) egyenletek szerint állapítottuk meg. Ezután  $\underline{v}$  vektort az  $\underline{u}_{i,j}$  vektorok által meghatározott  $\underline{u}_{i,j}$  mátrix alapján interpoláltuk a (2.2.3) egyenlet szerint. A korrigált mérési felvétel minden egyes képpontjának színe (vörös-, zöld- és kék-csatorna értékei) az adott képpont koordinátái, illetve a  $\underline{v}$  vektor alapján került megállapításra.



2.8. ábra. A 180° látószögű halszemoptikás felvételek kiértékeléshez szükséges kalibrációja. (A) Minden kísérlet előtt a planetáriumi kupolára kivetített kalibrációs kép (KK), melyre az utólagos kiértékeléskor kézzel minden rácspontba jól látható színes pontokat helyeztünk el. (B) A planetáriumi kupolára kivetített kalibrációs kép halszemoptikás fényképezőgéppel lefotózott, nem középpontosan szimmetrikus fotója (FKK). A kiértékelés során a megfelelő rácspontok felismerését az utólag kézzel beillesztett színes pontok segítették. (C) A fekete háló a KK, a sötétszürke pedig az FKK rácst jelöli. A korrigált kép (D) minden egyes pixelének színe az egymással összepárosítható KK-FKK rácspontokhoz számított vektorok alapján került megállapításra. A  $\underline{v}$  vektort a négy körülhatároló  $\underline{u}_{i,j}$ ,  $\underline{u}_{i+1,j}$ ,  $\underline{u}_{i,j+1}$ ,  $\underline{u}_{i+1,j+1}$  vektorok alapján interpoláltuk. (D) Korrigált FKK.

A kalibrációs kép (KK) legalacsonyabbra eső két koncentrikus köre ( $\theta = 0^\circ, j = 0$  és  $\theta = 5^\circ, j = 1$ ) a planetáriumi kupolán kívülre (a függőleges falra) esett, így nem kerülhetett rá a fényképre (FKK). Így azon pixelek esetében, ahol az eleváció  $10^\circ$ -nál kisebbnek adódott, a korrekció során interpoláció helyett extrapolációt alkalmaztunk.

Az alkalmazott korrekciós eljárás után kapott képek mindegyike gyakorlatilag megegyezett az eredetileg kivetített korrekciós képpel (KK), maximum 2 pixel pontossággal ( $2/2048 \times 180^\circ = 0,18^\circ$ ).

Miután mind a 2640 mérési szituáció esetében rögzített fénykép korrekcióját elvégeztük, mind az eredeti, mind a lefotózott (az eredetihez képest adott szöggel elforgatott) képen detektáltuk a vörös, rózsaszín és kék kalibrációs pontok helyét, majd megállapítottuk a köztük lévő  $\varphi_{cal}$  elforgatási szöget. A méréskor készült képeket adott  $-\varphi_{cal}$  szöggel visszaforgattuk, hogy az eredetileg kivetített képek és a kupoláról készült fotók teljesen átfedjenek egymással. Ezután a kupoláról készült fotókon beazonosítottuk a Nap becsült helyét reprezentáló zöld lézerpont helyét és kiszámítottuk annak  $(\varphi, \theta)$  koordinátáit. A kiértékelés utolsó lépéseként minden tesztalany és minden mérési szituáció esetében kiszámítottuk a zöld lézerpont és a Nap ismert valódi helye közti azimut- és elevációhibát ( $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_N, \Delta\theta = \theta - \theta_N$ ). A különböző mérési helyzetekben mért  $\Delta\varphi$  és  $\Delta\theta$  értékeket cirkuláris statisztikai módszerrel ábrázoltuk és elemeztük (BATSCHLET 1981). Az  $R$  átlagos hibavektorok irányát és hosszát  $\Delta\varphi$  és  $\Delta\theta$  esetében is megállapítottuk; a szórást  $1 - R$  adja meg (BATSCHLET 1981).

#### *Navigációs hiba számítása a nappozícióbecslések hibái alapján*

Azt is vizsgáltuk, hogy a 11 tesztalany által az összes planetáriumi mérési szituációban becsült,  $\Delta\varphi$  azimut- és  $\Delta\theta$  elevációhibákkal terhelt nappozíciót a navigáció 3. lépésében felhasználva milyen  $\Delta\omega_{Észak}$  hibával lehet meghatározni a valódi  $\omega_{Észak}$  földrajzi északi irányt. A tájékozódási hiba  $\Delta\omega_{Észak}$  mértékét az északi irányt jelentő  $0^\circ$ -hoz képest adtuk meg, ahol a negatív fokértékek nyugat felé, míg a pozitívak kelet felé mért eltéréseket jelentenek.

A  $\Delta\omega_{Észak}$  tájékozódási hiba kiszámításához egy e célra írt számítógépes programmal minden egyes becsült nappozíció által vetett gnomonárnyékot digitálisan rávetítettünk az Unartoq-fjordnál talált viking napiránytű (digitalizált) vízszintes tárcsájára. Azokban az esetekben, amikor a tesztalanyok nem vétettek hibát ( $\Delta\varphi = 0, \Delta\theta = 0$ ), a gnomonárnyék éppen érintette a tárcsára vésett árnyékvonalat, ekkor pedig az árnyékvonal szimmetriatengelyét jelentő vésetsor pontosan a földrajzi észak felé mutatott (2.4C ábra). Amikor azonban a

tesztalanyok hibásan becsülték meg a Nap égi helyét ( $\Delta\varphi \neq 0$ ,  $\Delta\theta \neq 0$ ), az árnyékcúcs már nem érintette az árnyékvonalat. Ezekben az esetekben az erre a célra készített szoftver  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  szöggel addig forgatta a tárcsát annak függőleges tengelye körül, míg a becsült árnyék az árnyékvonalra esett (2.4C ábra).

Mivel a fatárcsatöredékre vésett kelet–nyugat irányú egyenes vonal nap-éj egyenlőségkor (március 21.), a hiperbolikus vonal pedig a nyári napforduló napján (június 21.) mutatja a Nap pályájának (megközelítőleg pontos) árnyékvonalát,  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  értékeit is e nevezetes napokra számítottuk ki a vikingek által rendszeresen használt, 61. szélességi kör menti tengeri hajóútvonalra. Az ezekre a napokra és erre a helyszínre érvényes, teljesen pontos árnyékvonalakat a BERNÁTH *et al.* (2013b) által írt szoftverrel rajzoltuk ki. Mivel SZÁZ *et al.* (2016b) szerint a Nap a 61. szélességi kör mentén napfordulókör maximum  $\theta_N = 29^\circ$  magasra kúszik az égen,  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hibát erre a dátumra nem lehetett kiszámítani azon planetáriumi mérési szituációk esetében, ahol  $35^\circ < \theta_N < 55^\circ$ .

Mivel egy adott  $\theta_N$  napeleváció egy nap két alkalommal, délelőtt és délután is előfordul, így az összes mérési szituációhoz két különböző (egy délelőtti és egy délutáni)  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  értéket számítottunk.

A különböző planetáriumi szituációk esetén számított  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  értékeket cirkuláris statisztikai módszerrel ábrázoltuk és elemeztük (BATSCHLET 1981).

### 2.2.3. Eredmények

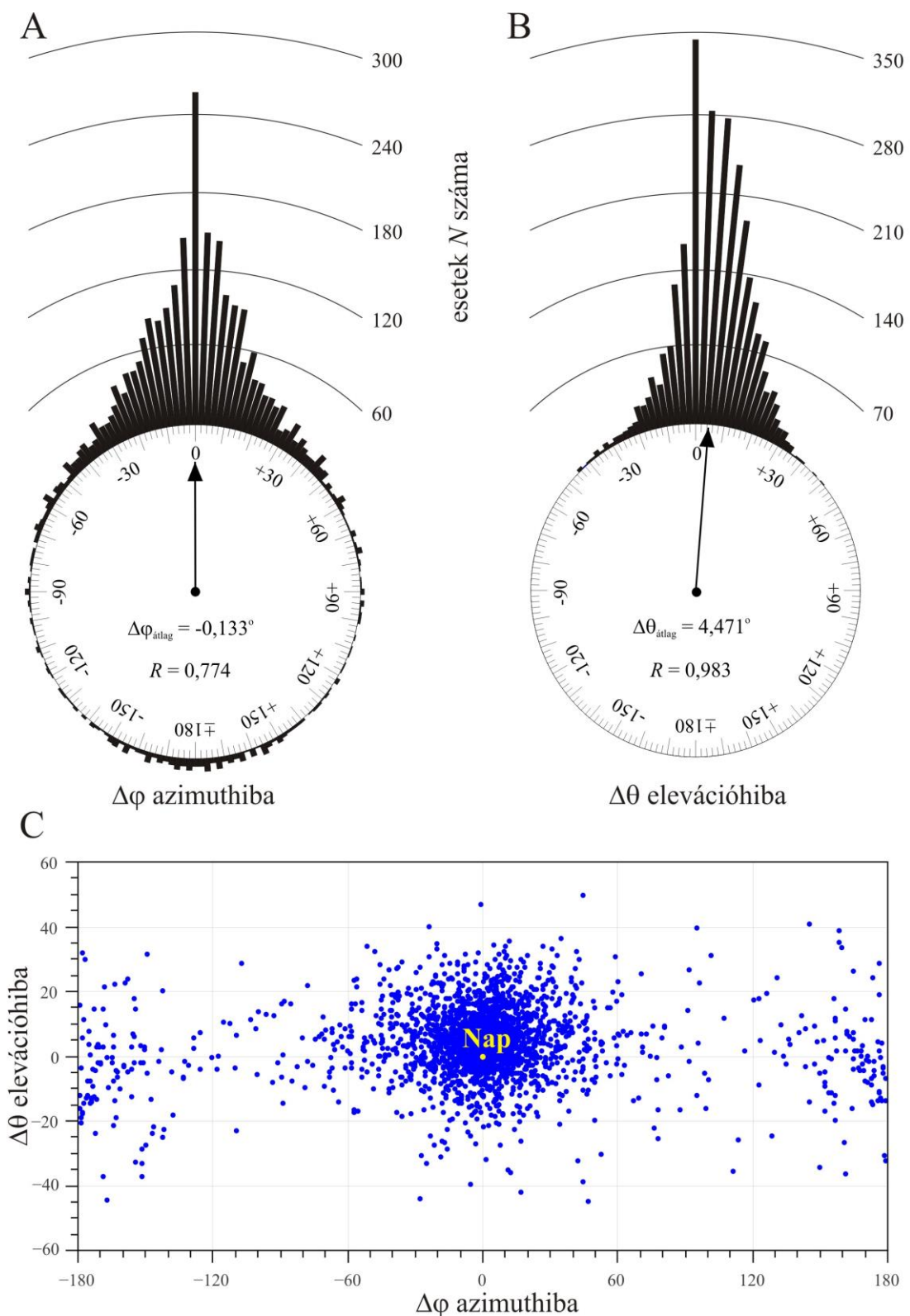
#### *A nappozíció becslésének azimut- és elevációhibája*

A 2640 mérés alapján a 11 tesztalany átlagosan  $\Delta\varphi = -0,133^\circ$  pontossággal ( $-3,86^\circ \leq \Delta\varphi \leq +1,99^\circ$ ) határozta meg a Nap azimutirányát (2.9A ábra), míg a Nap horizont feletti magasságát jellemzően mindegyikük felülbecsülte ( $+0,58^\circ \leq \Delta\theta \leq +8,81^\circ$ ), átlagosan  $\Delta\theta = +4,47^\circ$  hibával (2.9B ábra). Néhány esetben a tesztalanyok a Nap helyett tévesen az antinap helyét becsülték meg, ezzel  $\Delta\varphi \approx \pm 180^\circ$  hibát vétve (2.9A és 2.9C ábrák).

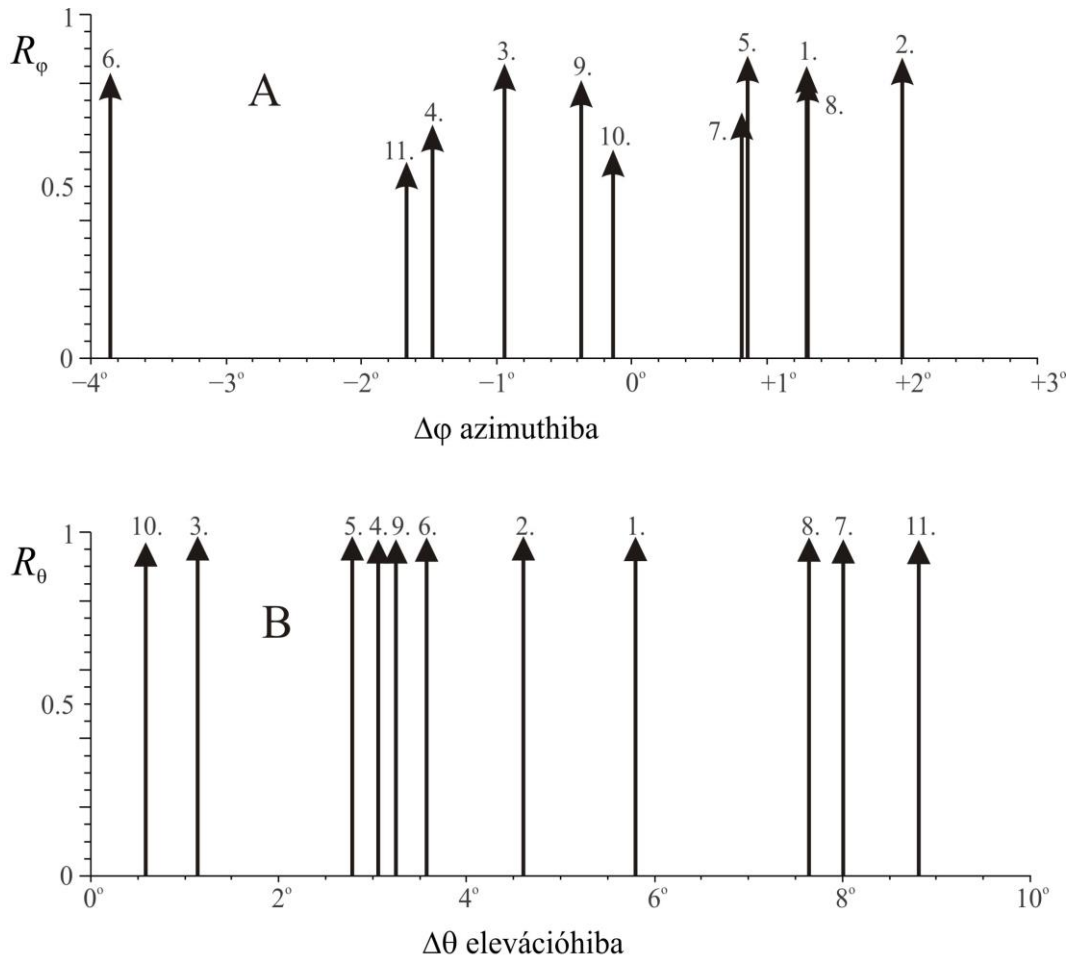
A 2.10A és 2.10B ábrák a 11 tesztalany által vétett  $\Delta\varphi$  azimut- és  $\Delta\theta$  elevációhibák átlagát mutatják. Az  $\Delta\varphi_{\text{átlag}}$ -vektorok és  $\Delta\theta_{\text{átlag}}$ -vektorok  $R$  hosszát és irányát a 2.1. táblázat mutatja. A 10. tesztalany mindössze  $\Delta\varphi_{\text{átlag}} = -0,14^\circ$  átlaghibával állapította meg a Nap azimutirányát, szórása azonban magas volt ( $1-R_{\text{azimut}} = 0,392$ ). A legpontosabb napmagasságbecslést szintén a 10. tesztalany végezte ( $\Delta\theta_{\text{átlag}} = 0,58^\circ$  átlaghibával). A legkevésbé pontos azimutbecslést a 6. tesztalany végezte ( $\Delta\varphi_{\text{átlag}} = -3,86^\circ$ ), a legkevésbé pontos napmagasság-becslést pedig a 11. tesztalany ( $\Delta\theta_{\text{átlag}} = 8,81^\circ$ ). Az azimutirány becslésénél tapasztalt legalacsonyabb és legmagasabb szórás  $1-R_{\text{azimut}} = 0,119$  és  $1-R_{\text{azimut}} = 0,427$ , a napmagasság-becslésnél tapasztalt legalacsonyabb és legmagasabb szórás pedig  $1-R_{\text{eleváció}} = 0,010$  és  $1-R_{\text{eleváció}} = 0,028$  volt.

2.1. táblázat. A 11 tesztalany által vétett azimut- és elevációhibák átlagai, a tavaszi nap-éj egyenlőségkor és nyári napfordulókör általuk vétett  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hibák nagysága és a hibavektorok  $R$  hossza.  $n$ : lehetséges szituációk száma.

Tesztalany	Azimuthiba		Elevációhiba		Tájékozódási hiba tavaszi nap-éj egyenlőségkor (márc.21.)			Tájékozódási hiba nyári napfordulókör (jún.21.)		
	$\Delta\varphi_{\text{átlag}}$	$R_{\text{azimut}}$	$\Delta\theta_{\text{átlag}}$	$R_{\text{eleváció}}$	$\Delta\omega_{\text{Észak}}$	$R$	$n$	$\Delta\omega_{\text{Észak}}$	$R$	$n$
1.	1,29°	0,852	5,79°	0,987	0,29°	0,401	240	1,64°	0,628	450
2.	1,99°	0,875	4,60°	0,989	2,81°	0,427	240	3,09°	0,639	450
3.	-0,95°	0,858	1,13°	0,989	0,91°	0,411	240	0,06°	0,717	450
4.	-1,48°	0,681	3,06°	0,980	0,05°	0,329	240	-0,32°	0,630	450
5.	0,86°	0,881	2,77°	0,990	2,77°	0,431	240	0,50°	0,718	450
6.	-3,86°	0,832	3,56°	0,987	-2,52°	0,419	240	-3,34°	0,650	450
7.	0,81°	0,716	8,00°	0,980	-1,36°	0,335	240	0,83°	0,549	450
8.	1,30°	0,825	7,64°	0,986	1,06°	0,411	240	0,25°	0,616	450
9.	-0,38°	0,810	3,24°	0,981	1,09°	0,351	240	-1,28°	0,683	450
10.	-0,14°	0,608	0,58°	0,972	3,25°	0,166	240	-0,86°	0,691	450
11.	-1,67°	0,573	8,81°	0,979	6,29°	0,193	240	-1,33°	0,564	450



2.9. ábra. (A, B) A planetáriumi kísérletben résztvevő 11 tesztalany által becült nappozíciók  $\Delta\varphi$  azimuthibáit és  $\Delta\theta$  elevációhibáit mutató cirkuláris hisztogramok (radiális skála lépésköze  $2^\circ$ ,  $N$ : esetek száma). A fekete nyilak az  $R$  hosszal jellemezhető átlagos hibavektorok irányait mutatják. (C) A tesztalanyok által becült nappozíciókat és a Nap valódi helyét ábrázoló pontdiagram.



2.10. ábra. A planetáriumi kísérletben résztvevő tesztalanyok által becsült nappozíciók  $\Delta\varphi$  azimuthibáinak (A) és  $\Delta\theta$  elevációhibáinak (B) átlagvektorai, ahol  $R$  a hibavektor hossza. A fekete nyilak fejénél látható számok a tesztalanyok sorszámjai.

#### A földrajzi északi irány becslésének hibája

A 11 tesztalany által tavaszi nap-éj egyenlőségkor (március 21.) és nyári napfordulókör (június 21.) vétett  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hibák nagyságát és a hibavektorok  $R$  hosszát a 2.1. táblázat tartalmazza.  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  értékei az északi irányt jelentő  $0^\circ$ -hoz képest láthatók, ahol a negatív fokértékek nyugat felé, míg a pozitívak kelet felé mért eltéréseket jelentenek. Az eredmények szerint  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  értékei nyári napfordulókör kisebbek, mint tavaszi nap-éj egyenlőségkor. Az északi irány becslésének legkisebb hibája napfordulókör  $\Delta\omega_{\text{Észak}} = 0,06^\circ$  (ahol  $1-R = 0,283$ ), nap-éj egyenlőségkor pedig  $\Delta\omega_{\text{Észak}} = 0,05^\circ$  (ahol  $1-R = 0,671$ ). A  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  legkisebb szórása napfordulókör ( $1-R = 0,282$ ) és nap-éj egyenlőségkor ( $1-R = 0,569$ )



egyaránt az 5. tesztalanynál volt tapasztalható, aki a Nap azimut- és eleváció értékeit szintén a legkisebb szórással állapította meg.

A 11 tesztalany  $\Delta\varphi$  azimuth- és  $\Delta\theta$  elevációhibái alapján a tavaszi nap-éj egyenlőség (március 21.) és nyári napforduló (június 21.) dátumaira és az összes planetáriumi mérési szituációra számolt  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hibák átlagait és a hibavektorok  $R$  hosszát a 2.2. táblázat és a 2.11. ábra mutatja.

A  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hiba értékei számításaink szerint  $-3,34^\circ \leq \Delta\omega_{\text{Észak}} \leq +6,29^\circ$  közé esnek. A legpontatlanabb iránybecslés ( $\Delta\omega_{\text{Észak}} = -16,3^\circ$ ) ahhoz a mérési szituációhoz kapcsolódik, ahol a napmagasság  $5^\circ \leq \theta_N \leq 25^\circ$  közé esett, a mérési pontok pedig a Naptól ( $35^\circ \leq \gamma_1, \gamma_2 \leq 55^\circ$ ) és egymástól is távol helyezkedtek el ( $125^\circ \leq \delta \leq 145^\circ$ ). Nyári napfordulókor a legpontosabb iránybecslés ( $\Delta\omega_{\text{Észak}} = 0,2^\circ$ ) a következő paraméterek esetében adódott:  $35^\circ \leq \theta_N \leq 55^\circ$ ,  $95^\circ \leq \delta \leq 115^\circ$ ,  $35^\circ \leq \gamma_1 \leq 55^\circ$  és  $35^\circ \leq \gamma_2 \leq 55^\circ$ . A legkisebb tájékozódási hiba tavaszi napéj egyenlőségkor ( $\Delta\omega_{\text{Észak}} = 0,1^\circ$ ) a következő paraméterek esetében adódott:  $5^\circ \leq \theta_N \leq 25^\circ$ ,  $65^\circ \leq \delta \leq 85^\circ$ ,  $35^\circ \leq \gamma_1 \leq 55^\circ$  és  $35^\circ \leq \gamma_2 \leq 55^\circ$ .

A legnagyobb szórások általánosságban akkor tapasztalhatók, amikor tavaszi nap-éj egyenlőségkor a napeleváció  $5^\circ \leq \theta_N \leq 25^\circ$  volt. A legkisebb szórás ( $1-R = 0,16$ ) a következő szituációhoz és a napforduló időpontjához kapcsolódik:  $35^\circ \leq \theta_N \leq 55^\circ$ ,  $95^\circ \leq \delta \leq 115^\circ$ ,  $35^\circ \leq \gamma_1 \leq 55^\circ$  és  $65^\circ \leq \gamma_2 \leq 85^\circ$ . A  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hibavektor  $R$  hossza tavaszi nap-éj egyenlőségkor adódott a legnagyobbknak ( $R = 0,16$ ), a  $5^\circ \leq \theta_N \leq 25^\circ$ ,  $125^\circ \leq \delta \leq 145^\circ$ ,  $65^\circ \leq \gamma_1 \leq 85^\circ$ ,  $95^\circ \leq \gamma_2 \leq 115^\circ$  mérési szituációban.

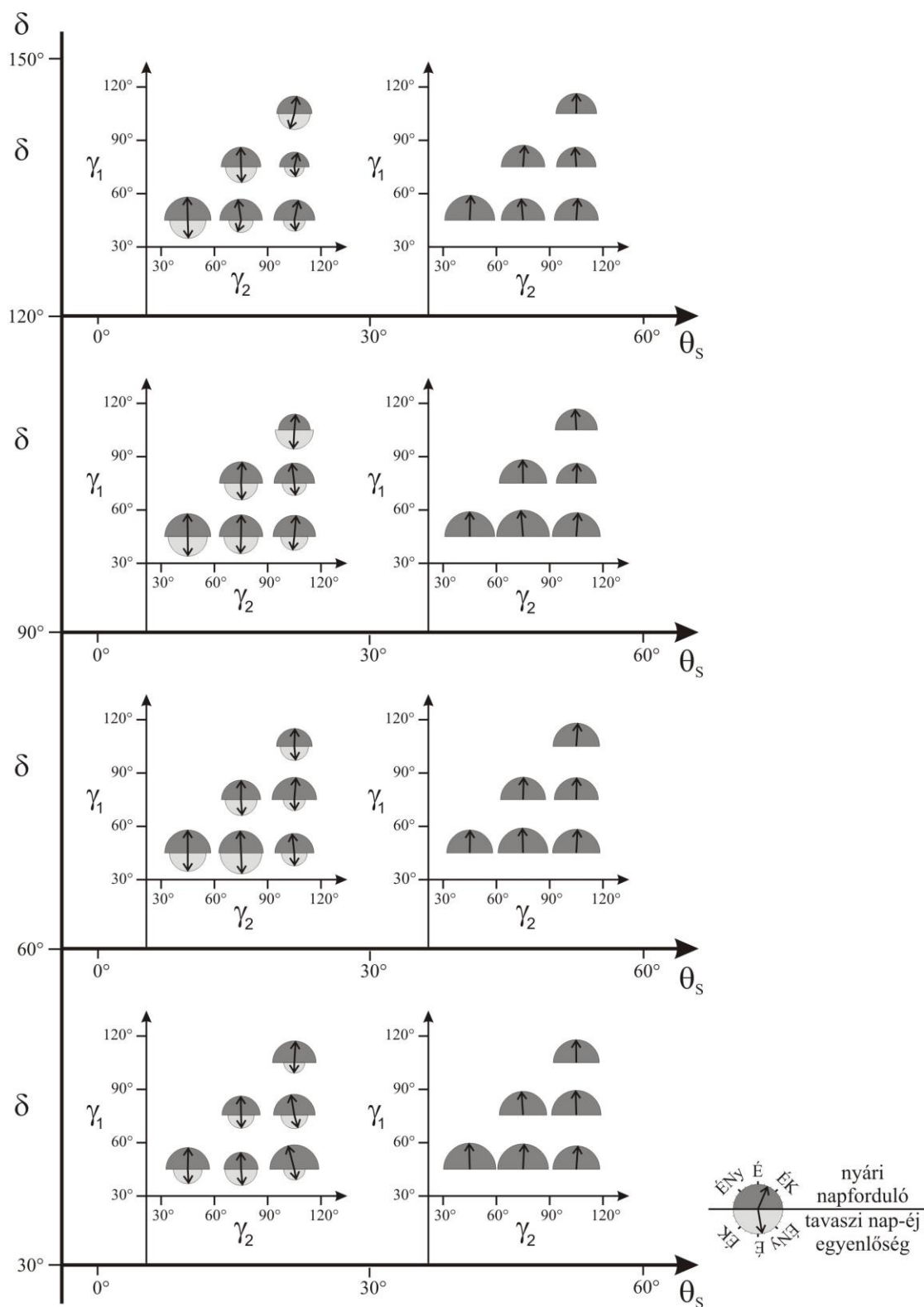
A 2.11. ábra alapján a következő három következtetés vonható le: (i) az északi irány megállapítása nyári napfordulókor jóval pontosabb, (ii) az északi irány becslésének hibája  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  és  $\delta$  értékeinek növekedésével együtt nő, (iii) az északi irány megállapítása jóval pontosabb, ha a Nap magasabban jár az égbolton ( $35^\circ \leq \theta_N \leq 55^\circ$ ).

---

2.2. táblázat. A  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hibák átlagai tavaszi nap-éj egyenlőség (március 21) és nyári napforduló (június 21) idején az összes mérési szituációban.  $\theta_N$ : napeleváció,  $\gamma_1, \gamma_2$ : mérőpálcikák Naptól való szögtávolságai,  $\delta$ : égi főkörök által bezárt szög,  $R$ : hibavektor hossza,  $n$ : lehetséges szituációk száma.  $\rightarrow$

---

<i>Mérési szituáció</i>				<i>Tavaszi nap-éj egyenőség</i>			<i>Nyári napforduló</i>		
$\theta_N$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\delta$	$\Delta\omega$ Észak	$R$	$n$	$\Delta\omega$ Észak	$R$	$n$
5°-25°	35°-55°	35°-55°	35°-55°	3,4°	0,34	110	-1,2°	0,64	110
5°-25°	65°-85°	65°-85°	35°-55°	1,9°	0,29	110	1,0°	0,53	110
5°-25°	95°-115°	95°-115°	35°-55°	-1,5°	0,18	110	-3,2°	0,64	110
5°-25°	35°-55°	65°-85°	35°-55°	4,9°	0,41	110	0,8°	0,46	110
5°-25°	35°-55°	95°-115°	35°-55°	10,2°	0,19	110	14,6°	0,76	110
5°-25°	65°-85°	95°-115°	35°-55°	15,6°	0,31	110	9,4°	0,60	110
5°-25°	35°-55°	35°-55°	65°-85°	0,1°	0,50	110	0,3°	0,69	110
5°-25°	65°-85°	65°-85°	65°-85°	3,9°	0,41	110	-0,5°	0,55	110
5°-25°	95°-115°	95°-115°	65°-85°	5,3°	0,33	110	-1,8°	0,48	110
5°-25°	35°-55°	65°-85°	65°-85°	2,4°	0,60	110	2,2°	0,66	110
5°-25°	35°-55°	95°-115°	65°-85°	1,1°	0,29	110	6,5°	0,56	110
5°-25°	65°-85°	95°-115°	65°-85°	3,5°	0,20	110	-4,4°	0,67	110
5°-25°	35°-55°	35°-55°	95°-115°	0,5°	0,55	110	0,7°	0,69	110
5°-25°	65°-85°	65°-85°	95°-115°	3,1°	0,44	110	-3,0°	0,63	110
5°-25°	95°-115°	95°-115°	95°-115°	-2,9°	0,54	110	-4,9°	0,40	110
5°-25°	35°-55°	65°-85°	95°-115°	-1,8°	0,45	110	-0,7°	0,64	110
5°-25°	35°-55°	95°-115°	95°-115°	-7,0°	0,31	110	-4,8°	0,62	110
5°-25°	65°-85°	95°-115°	95°-115°	5,5°	0,25	110	7,1°	0,59	110
5°-25°	35°-55°	35°-55°	125-145	2,0°	0,49	110	1,3°	0,70	110
5°-25°	65°-85°	65°-85°	125-145	2,4°	0,39	110	1,1°	0,56	110
5°-25°	95°-115°	95°-115°	125-145	-16,3°	0,40	110	-8,0°	0,48	110
5°-25°	35°-55°	65°-85°	125-145	-16,5°	0,26	110	8,5°	0,62	110
5°-25°	35°-55°	95°-115°	125-145	7,6°	0,20	110	-11,4°	0,60	110
5°-25°	65°-85°	95°-115°	125-145	8,1°	0,16	110	-12,9°	0,56	110
35°-55°	35°-55°	35°-55°	35°-55°	-	-	0	1,4°	0,82	88
35°-55°	65°-85°	65°-85°	35°-55°	-	-	0	3,7°	0,72	88
35°-55°	95°-115°	95°-115°	35°-55°	-	-	0	0,6°	0,69	110
35°-55°	35°-55°	65°-85°	35°-55°	-	-	0	-2,8°	0,80	110
35°-55°	35°-55°	95°-115°	35°-55°	-	-	0	-4,0°	0,72	110
35°-55°	65°-85°	95°-115°	35°-55°	-	-	0	1,5°	0,76	88
35°-55°	35°-55°	35°-55°	65°-85°	-	-	0	-0,8°	0,69	110
35°-55°	65°-85°	65°-85°	65°-85°	-	-	0	-1,5°	0,67	66
35°-55°	95°-115°	95°-115°	65°-85°	-	-	0	-3,8°	0,71	110
35°-55°	35°-55°	65°-85°	65°-85°	-	-	0	1,4°	0,78	88
35°-55°	35°-55°	95°-115°	65°-85°	-	-	0	-2,9°	0,72	110
35°-55°	65°-85°	95°-115°	65°-85°	-	-	0	-1,1°	0,65	110
35°-55°	35°-55°	35°-55°	95°-115°	-	-	0	0,2°	0,78	88
35°-55°	65°-85°	65°-85°	95°-115°	-	-	0	0,9°	0,72	110
35°-55°	95°-115°	95°-115°	95°-115°	-	-	0	3,0°	0,61	88
35°-55°	35°-55°	65°-85°	95°-115°	-	-	0	4,8°	0,84	110
35°-55°	35°-55°	95°-115°	95°-115°	-	-	0	-4,2°	0,73	66
35°-55°	65°-85°	95°-115°	95°-115°	-	-	0	-2,3°	0,58	88
35°-55°	35°-55°	35°-55°	125°-145°	-	-	0	-2,6°	0,78	66
35°-55°	65°-85°	65°-85°	125°-145°	-	-	0	-4,4°	0,64	88
35°-55°	95°-115°	95°-115°	125°-145°	-	-	0	-0,4°	0,59	110
35°-55°	35°-55°	65°-85°	125°-145°	-	-	0	4,9°	0,64	88
35°-55°	35°-55°	95°-115°	125°-145°	-	-	0	-3,9°	0,65	110
35°-55°	65°-85°	95°-115°	125°-145°	-	-	0	3,9°	0,57	110



2.11. ábra. A  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hibák átlagvektorai (fekete nyíllal) tavaszi nap-éj egyenlőség (világosszürke félkör) és nyári napforduló (sötétszürke félkör) idején a 61. földrajzi szélességi fokon a 11 tesztalany  $\Delta\varphi$  azimuth- és  $\Delta\theta$  elevációhibái alapján számolva az összes planetáriumi mérési szituációban. A félkörök sugara megegyezik a hibavektorok  $R$  hosszával. A tavaszi nap-éj egyenlőséghez tartozó értékek az összehasonlíthatóság érdekében  $180^\circ$ -kal elforgatva lettek ábrázolva.

## 2.2.4. Elemzés

Bár a viking hajósok egyes meteorológiai helyzetekben légköroptikai jelenségeket (például alkonyati sugarakat, Tyndall-jelenséget) is segítségül hívhattak nyílt tengeri tájékozódásaik során a nem látható Nap égi helyének meghatározásához, teljesen borult és ködös égbolt esetén ezeket sem használhatták. Emellett a homogén nyílt tengeri optikai környezetben a part menti tereptárgyak sem adhattak számukra iránymutatást. RAMSKOU (1967) hipotézise szerint a viking navigátorok ezekben az esetekben napkövek használatával tájékozódtak.

Az elképzelés szerint a viking navigátoroknak először meg kellett keresniük a dikroikus kordierit- vagy turmalinkristály azon kitüntetett állását, ahol az azon keresztül figyelt égbolt a legfényesebbnek vagy a legsötétebbnek látszott; illetőleg a kalcit azon irányultságát, ahol az azon hagyott lyukon vagy résen át figyelt égbolt kettős képének intenzitása egyforma, vagy az azok közti intenzitáskülönbség a legnagyobb volt. Az így rögzített kristályirány a polarizációs iránymintázat (Nap körüli érintő irányú) jellegéből adódóan minden esetben a Nap felé mutat a Rayleigh-féle fényszórás sajátosságainak következtében (KÖNNEN 1985; COULSON 1988; SUHAI & HORVÁTH 2004). A napkövek használatához azonban először derült időben kalibrálni kellett a kristályokat egy a felhőtlen időben látható Nap felé mutató egyenes karcólással (2.1.6 fejezet). A bekarcolt napkövet akkor vették elő újra a viking navigátorok, mikor felhő vagy köd kúszott a Nap elé. Az égbolt két kellően poláros pontján végzett mérés után kapott két éggömbi főkör horizont feletti metszéspontját megkeresve aztán megbecsülhették a nem látható Nap égi helyét. HEGEDÜS *et al.* (2007a,b), illetve SZÁZ *et al.* (2016b) azonban korábban már megállapította, hogy ködös és borult időben az égbolt  $d$  polarizációfoka olyannyira lecsökken, hogy az égbolt-polarizációs viking navigáció 1. lépése nem végezhető el a biztonságos tájékozódáshoz szükséges precizitással.

Amikor viszont az égbolt csak részben felhős, és a megfigyelő elől a Napot is felhők takarják, akkor a viking navigátorok az égbolt kellően tiszta és poláros részeit figyelve már használhatták napköveiket. Ezek a tiszta foltok azonban olykor meglehetősen távol lehetnek a Naptól ( $\gamma_1, \gamma_2 > 90^\circ$ ), mely távolság az általunk végzett planetáriumi méréssorozat eredményei alapján a 2. lépés és az egész navigáció pontosságát egyaránt lerontotta, még akkor is, ha az 1. lépést hibátlanul végezte volna el a navigátor (2.1. és 2.2. táblázatok; 2.9–2.11. ábrák). Az egymástól távoli mérőpontok esetén ráadásul a planetáriumi kísérletben résztvevő tesztalanyok alkalmanként a valódi Nap helyett tévesen az antinap helyét becsülték meg, ezzel

$\pm 180^\circ$  körüli hibát vétele (2.9. ábra). A valódi viking navigátor azonban az égbolt fényességmintázata alapján még vastag felhők vagy sűrű köd jelenlétében is észlelhette, hogy a Nap melyik irányban van nagyobb valószínűséggel, így módon az antinapbecslés esélye a terepi napköves mérések során az általunk mértnél alacsonyabb lehetett.

A Nap horizont feletti  $\theta_N$  magasságát a planetáriumi kísérletben résztvevő tesztalanyok jellemzően felülbecsülték, átlagosan  $\Delta\theta = +4,47^\circ$  hibával (2.9B ábra). Valószínűtlen, hogy mindez azért következett be, mert a planetáriumi kupola alsó része a tesztalanyok szemmagassága fölé esett, és ez megzavarta volna méréseiket. BERNÁTH *et al.* (2013a, 2014) az égbolt-polarizációs viking navigáció hipotézisének más aspektusait vizsgáló – korábbi szabadtéri pszichofizikai kísérleteiben részt vevő tesztalanyok ugyanis hasonlóan felülbecsülték a nem látható Nap horizont feletti  $\theta_N$  magasságát. Az emberi agy az euklideszi geometriával megoldható kihívásokhoz szokott, melyekhez képest két égi főkör metszéspontjának képzeletbeli becslése igen szokatlan feladatnak számít. Egyrészt a tesztalanyok hajlamosok lehetnek arra, hogy az (égboltot helyettesítő) planetáriumi kupolára vetített (a két napkövő 1. lépésben rögzített irányultságait reprezentáló) fekete mérőpontokat ne egy égi főkör mentén hosszabbítsák meg, hanem nyílegyenesen. Másfelől, az ember hajlamos túlbecsülni a függőleges távolságokat, melynek egyik közismert példája az az illúzió, hogy a telihold nagyobbak látszik (KAMMANN 1967; HERSHENSON 1989). Mindkét említett jelenség a Nap égi helyének hibás becsléséhez vezet.

Megállapítottuk, hogy nagyobb napeleváció esetén pontosabb a földrajzi északi irány becslése, és az iránybecslés hibája nő, ha a kivetített fekete mérőpontok Naptól való  $\gamma_1, \gamma_2$  távolsága és az általuk meghatározott égi főkörök által bezárt  $\delta$  szög nő. Mindez az emberi szem látószögének korlátaival magyarázható. Ha a viking navigátor napköves méréséhez meteorológiai okok miatt nem tud közeli égboltpontokat választani, akkor az égbolt polarizációs tulajdonságait egymástól távoli pontokban kénytelen meghatározni. Utóbbi esetekben azonban a mérőpontokon átmenő égi főköröket csak a feje gyakori ide-odaforogatásával képes csak összekötni, ami hibát eredményez. Eredményeink alapján megállapítható, hogy az égi főkörök horizont feletti metszéspontjának (azaz az Nap égi helyének) becslése könnyebben elvégezhető, ha a két kiválasztott égi mérőpont egymáshoz és a Naphoz is közelebb esik, és ha e három égi pont magasabban van.

A kísérletben részt vevő tesztalanyok a Nap horizont feletti magasságát pontosabban (kisebb  $\Delta\theta$  hibával) határozták meg, mint annak azimutirányát (nagyobb  $\Delta\varphi$  hibával). De még az ilyen kis  $\Delta\theta$  elevációhiba is okozhat nagy  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hibát, főként ha a Nap közel

jár a horizonthoz. Ilyenkor ugyanis kis elevációhiba is eredményezhet nagy gnomonárnyékhosszbeli különbségeket, így pedig a valóstól eltérő hosszúságú gnomonárnyék messzebb végződhet az aktuális árnyékvonaltól. Ahol tehát ilyen esetekben a navigátorok nagy hibával becsülik a Nap helyét, ott az északi iránybecslés  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  hibája is nagy lehet.

Bár a kísérlet helyszínét jelentő planetárium kupolája alapvetően homogén fehér színű, felépítéséből adódóan rendelkezik egy halványan észrevehető körkörös mintázattal is (2.7A-C ábrák). Mivel e mintázatot a kísérletsorozatban nem lehetett kiküszöbölni, így azt a tesztalanyok is elkerülhetetlenül látták a két kivetített fekete mérőponton átmentő égi főkörök metszéspontjának keresése közben. A kupola szóban forgó mintázata tehát a kísérleti feladatok elvégzésekor befolyásolhatta a tesztalanyokat, ezáltal pedig a kapott eredményeket is. Az eredmények tehát eltérhetnek attól, amit egy külső helyszínen végzett valódi navigáció közben várhatunk. A körkörös kupolamintázat esetleges hatását a kísérlet során azzal csökkentettük, hogy a fekete mérőpontokat véletlenszerűen elforgatva vetítettük ki a kupolára.

Az égbolt-polarizációs viking navigáció 2. lépésében a navigátor feladata az, hogy a két napkő 1. lépésben rögzített irányultságai által kijelölt, és az égbolt polarizációs iránymintázata által meghatározott égi főkörök metszéspontját a lehető legpontosabban meghatározza. Az eljárás pontosabb lehetne, ha a navigátor kettőnél több pontban vizsgálná az ég polarizációját, azaz már az 1. lépésben is három vagy több pontban használná a napköveket, és így kettőnél több égi főkör metszéspontját becsülné. Ez azonban a valóságban, tengeri körülmények között nehézkes lenne egy olyan rögzített tartószerkezet igénybevétele nélkül, amely egyidejűleg több napkő rögzítésére és forgatására is alkalmas. Egy ilyen kiegészítő segédeszköz hiányában – melynek létezésére egyelőre nincs semmilyen régészeti bizonyíték – a viking navigátor egyidejűleg csak a jobb és bal kezében tartott egy-egy napkövel lehetett képes az égbolt polarizációjának mérésére.

Az égbolt-polarizációs viking navigáció 2. lépésének pontosságát vizsgáló pszichofizikai kísérletsorozat tesztalanyai olyan emberek voltak, akik korábban nem vettek részt hasonló tájékozódási feladatok elvégzésében. Érdekes lenne megvizsgálni, hogyan teljesítenének azok a tesztalanyok, akik a kísérlet előtt megfelelően alapos képzést kapnának és ezáltal kellő gyakorlatra tennének szert. Nyilvánvaló ugyanis, hogy egy tapasztalt viking navigátor kisebb hibát véthetett, mint a kísérletben részt vevő gyakorlatlan tesztalanyok. Mindebből következik, hogy a planetárium kísérletben kapott eredményeink a 2. lépés pontosságát alulbecsülték.



A 2. lépés pontosságát vizsgáló mérésorozatot követően az égbolt-polarizációs viking navigáció 1., 3. és 4. lépésének (2.4. ábra) pontosságát is kimértük (SZÁZ *et al.* 2016b,c, 2017). Az 1. lépést vizsgáló pszichofizikai kísérletben azt vizsgáltuk (SZÁZ *et al.* 2016b), hogy a tesztalanyok a felhőzöttség függvényében milyen pontosan képesek a különféle napkő-kristályokat (kétféle kalcitot, turmalint és kordieritet) az előre meghatározott helyes irányba forgatni, majd ez alapján a földrajzi északi irányt megállapítani. Az eredmények szerint a tesztalanyok derült idő esetén mindhárom napkő-kristállyal igen pontosan meg tudták határozni a földrajzi északi irányt, bár a navigáció pontosságát csökkenti, ha a kiválasztott kalcit karcos. Derült időben viszont tulajdonképpen nincs is szükség napkőre, hiszen kizárólag a 2.1.5. fejezetben bemutatott napiránytűvel is kellően jól lehet boldogulni. A borult és ködös időnek megfelelő szituációk (ha  $d_{\text{égbolt}} < 10\%$ ) laboratóriumi vizsgálatában ugyanakkor a tesztalanyok csak hasraütés-szerűen, igen nagy hibával tudták elvégezni a navigáció 1. lépését, mivel alig érzékelték fényintenzitás-változást a napkő-kristályok elforgatásakor (SZÁZ *et al.* 2016b). A navigáció 1. lépésének hibája tehát nagyobb, ami pedig a 2. lépés általunk mért viszonylagos pontossága ellenére az egész navigációt meghiúsíthatta.

Az égbolt-polarizációs viking navigáció 3. lépésének pontosságát mérő pszichofizikai kísérletsorozatban arra kerestük a választ (SZÁZ *et al.* 2016c), hogy a mérésben közreműködő tesztalanyok milyen pontossággal képesek megállapítani a Napot reprezentáló, planetáriumi kupolára kivetített fekete mérőpont horizont feletti magasságát. A tesztalanyok becslés közben kizárólag a kinyújtott kézzel szorosan egymás fölé tett ökleiket és ujjukat használhatták, ahol egy ököl mérete négy ujj együttes méretével volt egyenlő. Bár a 2. lépés pontosságának planetáriumi mérésekor megállapítottuk, hogy egymáshoz közeli égi mérőpontok és nagyobb napmagasság esetén pontosabb a nappozíció becslése, a 3. lépés planetáriumi tesztjének eredményei ugyanakkor arra utalnak, hogy a napmagasság-becslés ököl-ujj hibája a napmagasság emelkedésével együtt nő, így a vikingek tengeri hajózására közvetlenül napkelte után és napnyugta előtt, alacsony napmagasság esetén nyílhatott a legjobb lehetőség (SZÁZ *et al.* 2016c).

Ahhoz, hogy a különböző laboratóriumi, planetáriumi és terepi méréseink eredményeit együttesen tudjuk értelmezni, és végérvényesen ki tudjuk jelenteni e navigációs módszer használhatóságának pontos körülményeit, a 4. lépés pontosságát is meg kellett határoznunk. E pszichofizikai kísérletsorozatban arra kerestük a választ, hogy a mérésben közreműködő tesztalanyok milyen pontossággal képesek megállapítani a Napot reprezentáló, planetáriumi kupolára kivetített fekete mérőpont azimutuszögét (SZÁZ *et al.* 2017). A közvetlenül a

planetáriumi vetítő mellett helyet foglaló teszt Navigátorok egy árnyékpálcát modellező precíz mérőműszerrel hajtották végre a feladatot. Miután az árnyékpálcá hossz tengelyét legjobb tudásuk szerint a kivetített fekete mérőpontot tartalmazó függőleges főkörrel párhuzamosították, az árnyékpálcá egy digitális szög mérő által kijelzett azimut szögét a mérés vezető feljegyezte. Eredményeink alapján elmondható, hogy a 4. lépés hibája (a 3. lépés hibájához hasonlóan) folyamatosan nőtt a napmagasság növekedésével (SZÁZ *et al.* 2017).

Az 1–4. lépések hibafüggvényei fontos bemenő adatait képezték annak az átfogó vizsgálatnak, amely az égbolt-polarizációs viking navigációs módszer négy lépésének 1080 különböző meteorológiai helyzetben várható együttes pontosságát és korlátait vizsgálta (SZÁZ *et al.* 2017). Az egyes lépések közben felmerülő hibák ugyanis összetett hibaterjedést eredményezve egymásra is hatással vannak, ami nagyban nehezíti a földrajzi északi irány meghatározását, ezáltal pedig a nyílt vízi tájékozódást is. A kordierit és turmalin, valamint a legjobb és legrosszabb optikai minőségű kalcit-napkő használatok kapott eredményeket is felhasználtuk, így módon arra is fény derülhetett, hogy elméletileg melyik napkő-kristállyal lehetett a legpontosabban tájékozódni. Az 1080 meteorológiai helyzetben elvégzett összegzés végeredményeként kiderülhetett, hogy a Thorkild Ramskou dán régész által 1967-ben megalkotott navigációs hipotézis adott felhő fedettség és napmagasság esetén mekkora hibával működhetett.

Vizsgálataink alapján kijelenthető, hogy a kalcit-napkő pontosabb navigációt biztosíthatott, mint a másik két kristály (SZÁZ *et al.* 2017). Eredményeink arra is rámutatnak, hogy a tiszta és gyengén felhős égboltok esetén jóval pontosabb lehet az égbolt-polarizációs viking navigációs módszer, alacsony napmagasság esetén ugyanakkor a navigáció nagyobb fokú felhőzettség esetén is lehetséges lehetett. A háromféle napkő nyári napfordulókor akkor eredményezte a legpontosabb navigációt, amikor a Nap  $35\text{--}40^\circ$ -os szögben járt a horizont felett, és az égboltot csak kevés (1–3 okta) felhő borította. Ha viszont a Nap égi pályájának legmagasabb pontján ( $45\text{--}50^\circ$  között) járt, vagy ha napkeltekor vagy napnyugtakor több volt a felhőzet (5–8 okta), akkor e navigációs módszer gyakorlatilag használhatatlannak bizonyult (SZÁZ *et al.* 2017). A közel másfél évtizede folyó kutatás utolsó lépéseként azt fogjuk kideríteni, hogy a mért navigációs hibák mennyiben befolyásolhatták a teljes út sikerét, azaz hogy egy 3 hetes hajóút során, amikor az időjárási helyzet akár óráról órára is változhatott, elérhették-e így is a kívánt úti célt a viking hajósok.

## 2.3. Az égbolt-polarizációs viking navigáció szürkületkor használható eszköze: az alkonyfény-iránytű<sup>5</sup>

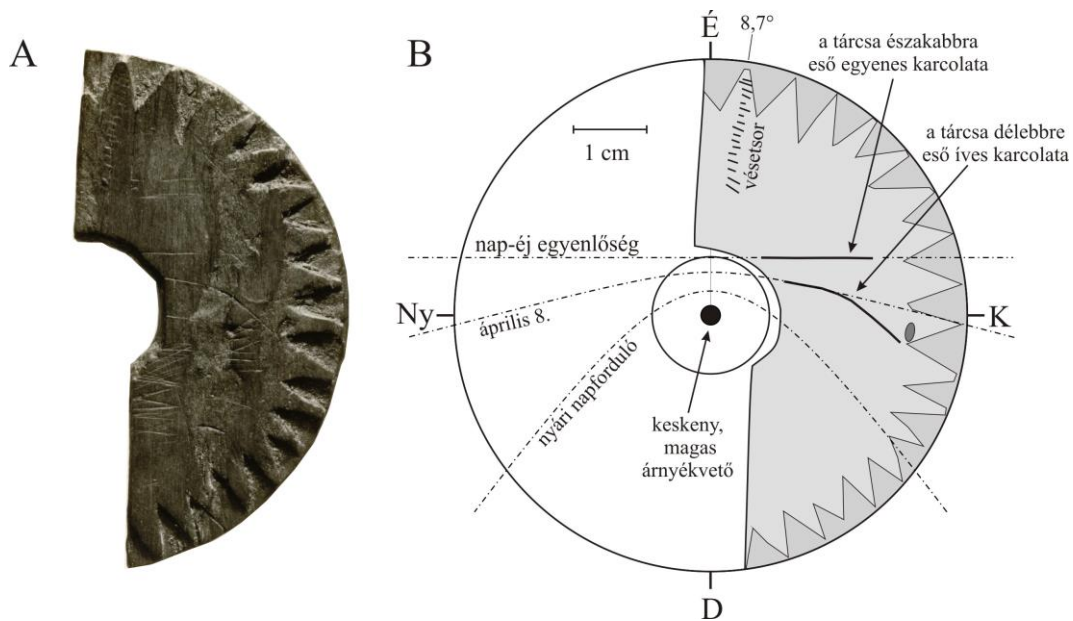
### 2.3.1. Bevezetés

A grönlandi vésett fatárcsatöredék (2.3. és 2.12A ábrák) nevezetes viking régészeti leletnek számít, amit 1948-as felfedezése óta már számos vizsgálatnak alávetettek (SØLVER 1953, 1954; TAYLOR *et al.* 1954; THIRSLUND 1991, 1993; BERNÁTH *et al.* 2013b). Az egyes kutatók azonban eltérően értelmezték a rajta lévő véseteket, így lehetséges funkciójáról is több elmélet látott napvilágot. A legelfogadottabb ezek közül SØLVER (1953, 1954) elmélete, mely szerint a lelet egy napiránytű része volt, és a vikingek ilyen eszközökkel tájékozódhattak az Atlanti-óceánon. Bernáth Balázs azonban részletes elemzésnek vetette alá a fatárcsatöredék véseteit és a SØLVER-féle napiránytű-elmélet számos hibájára mutatott rá (BERNÁTH *et al.* 2014):

- i. Ha a tárcsa északabbra eső egyenes karcolata (2.12B ábra) valóban egyezik (a 61. szélességi kör mentén) a nap-éj egyenlőségkor érvényes árnyékvonallal, akkor a tárcsa északi oldalára vésett jelsor nem a valódi földrajzi északi irányt mutatja, hanem  $8,7^\circ$ -kal eltér attól az óramutató járásával azonos irányban, mely hiba egy precíz navigációs eszköznél megengedhetetlen.
- ii. Bár a tárcsa délebbre eső íves karcolata hasonlít a 61. szélességi kör mentén a nyári napfordulókör érvényes hiperbolikus árnyékvonalhoz, attól jelentősen eltér, és valójában az április 8-án érvényes árnyékvonal részeként értelmezhető (2.12B ábra).
- iii. Egy keskeny, magas központi gnomon árnyéka napkelte és napnyugta idején túlnyúlna a tárcsán, így annak csúcsát ezekben az időszakokban nem lehetne ráilleszteni a bevéselt árnyékvonalakra. A vikingek atlanti-óceáni hajóútvonalai mentén pedig nemcsak napkeltekor és napnyugtakor, hanem az év nagy részén napközben is alacsonyan járja be a Nap égi útját, így a tárcsának több méter szélesnek kellett volna lennie ahhoz, hogy az árnyékcúcs ilyenkor is a bevéselt árnyékvonalakra essen.

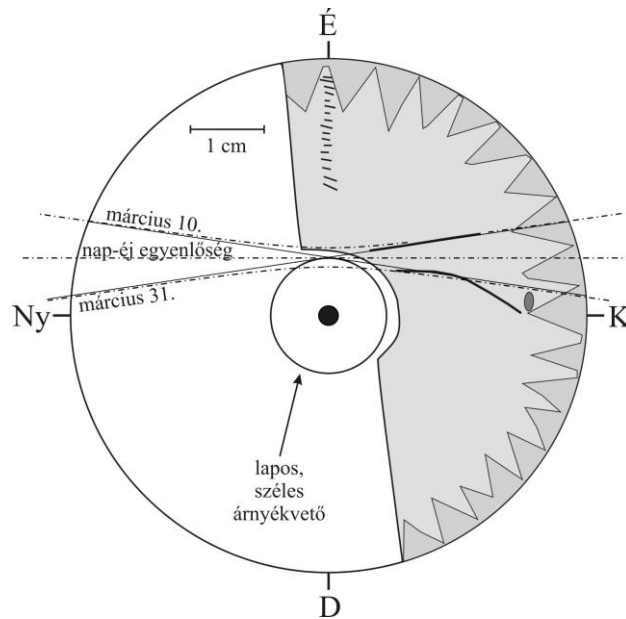
---

<sup>5</sup> BERNÁTH B., FARKAS A., SZÁZ D., BLAHÓ M., EGRI Á., BARTA A., ÁKESSON, S., HORVÁTH G. (2014): How could the Viking Sun compass be used with sunstones before and after sunset? Twilight board as a new interpretation of the Uunartoq artefact fragment. *Proceedings of the Royal Society A*, 470, 2166, 20130787. (Q1, IF: 1,998)

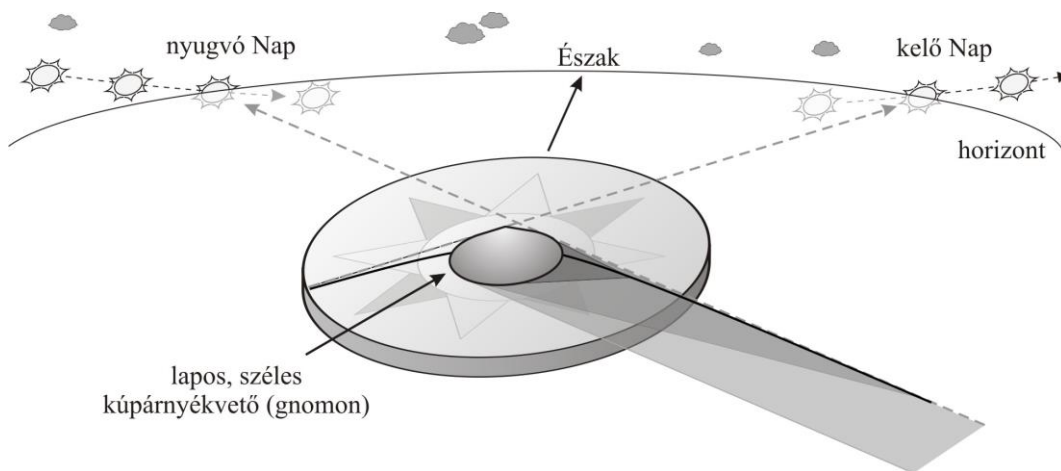


2.12. ábra. (A) A grönlandi Uunartoq-fjordnál feltárt, luc- vagy vörösfenyőből készült viking kori fatárcsatöredék a legelfogadottabb elmélet szerint napiránytűként funkcionált (Danish Maritime Museum). (B) Ha a tárcsa északabbra eső egyenes karcolata valóban egyezik a 61. szélességi kör mentén a nap-éj egyenlőségkor érvényes árnyékvonallal, akkor az északi oldalon látható vésetsor  $8,7^\circ$ -kal eltér a valódi földrajzi északi iránytól. A délebbre eső íves karcolat pedig valójában nem a napfordulókör, hanem az április 8-án érvényes árnyékvonal részeként értelmezhető (BERNÁTH *et al.* 2014).

A lelet funkcióját illetően a részletes elemzés után Bernáth Balázs új elméletet dolgozott ki (BERNÁTH *et al.* 2014, 2015), az új eszközt pedig kúpárnyékvetős napiránytűnek nevezte el (2.13. és 2.14. ábrák). Elképzelése szerint a tárcsa északi oldalán lévő vésetsor valóban a földrajzi északi irányt jelenthette (2.13. ábra), ám a tárcsa közepén lévő lyukba nem egy keskeny, magas gnomon, hanem egy lapos, széles kúpárnyékvető illeszkedhetett (2.14. ábra). Egy megfelelő méretű kúp hosszúra nyúló árnyékának széle így pontosan illeszkedik a tárcsára vésett árnyékvonalakra, így nem okoz gondot a tárcsáról messze lelógó árnyék. Az új eszköz tehát alacsony napmagasság esetén, napkelte és napnyugta idején is jól használható derült időben a földrajzi északi irány meghatározására, alkalmazásához pedig nincs szükség több méteres tárcsára, csupán éppen akkorára, mint amekkora a Grönlandon feltárt töredék (2.12A ábra). A grönlandi lelet közepén lévő lyukba pontosan akkora kúp illik, melynek árnyéka épp a tárcsára vésett vonalakra illeszkedne a 61. szélességi kör mentén. A széles gnomon azonban az árnyékcúcs útjának közepét mindenképpen takarja (2.13. ábra), így magasan járó Nap mellett nem használható, és csak a sarkkörök közelében igazán praktikus.

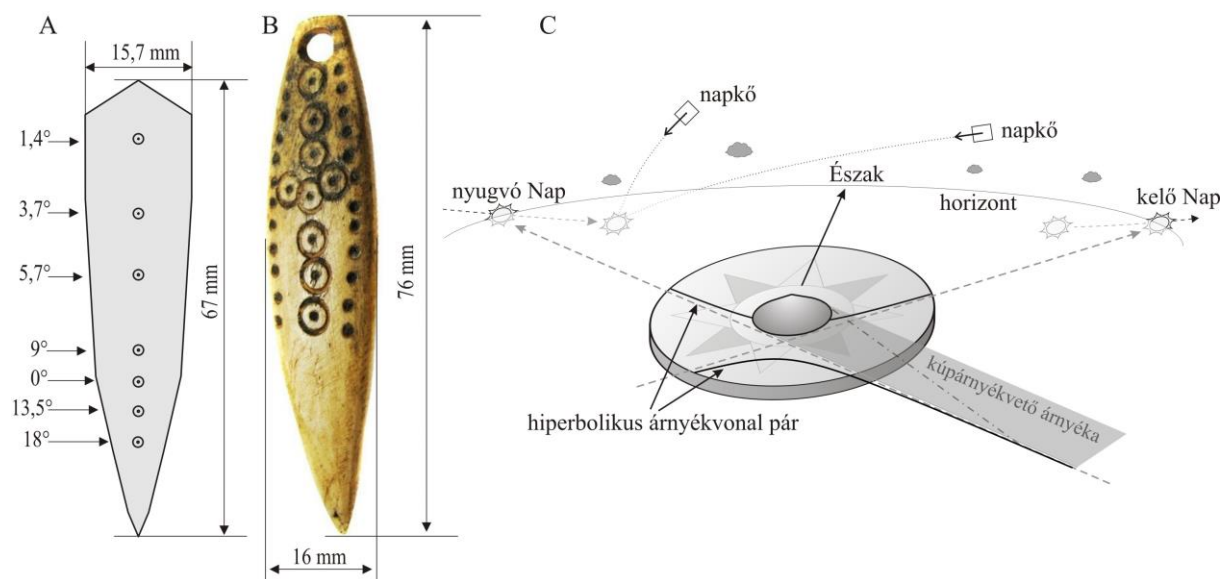


2.13. ábra. Ha BERNÁTH *et al.* (2014) szerint a tárcsa északi oldalán lévő vésetsor valóban észak felé mutatott, illetve a tárcsa közepén egykor egy lapos, széles árnyékvető foglalt helyet, akkor a tárcsára vésett északi és déli karcolatok nem a nap-éj egyenlőségkor és napfordulókor érvényes árnyékvonalakat, hanem egy március 10-én és március 31-én érvényes árnyékvonalpárt jelenthették (melyek egyike annyi nappal esik nap-éj egyenlőség elé, amennyivel a másik a nap-éj egyenlőség utánra).



2.14. ábra. A viking hajósok atlanti-óceáni hajóútvonalai mentén a Nap gyakran tartózkodik a horizont közelében. Ekkor a lapos és széles központi árnyékvető árnyékának csúcsa messze túlnyúlik a tárcsa peremén, ám az árnyék széle könnyen ráilleszthető a tárcsára vésett árnyékvonalra. A kúpárnyékvető napiránytűvel tehát alacsony napálláskor is lehetséges a nyílt tengeri tájékozódás (BERNÁTH *et al.* 2014, 2015).

A kúpárnyékvetős napiránytűt két napkövel és egy egymástól változó távolságra lévő lyukak sorával ellátott, nyílhegy alakú árnyékpálcával kiegészítve akkor is lehet használni a tájékozódáshoz, amikor a Nap már a horizont alatt tartózkodik, vagyis alkonyfény-iránytűként is működik (2.15. ábra; BERNÁTH *et al.* 2014). Ehhez a tárcsán árnyékvonal-párokat kell feltüntetni, melyek egyike annyi nappal esik napéjegylenlőség elé, amennyivel a másik a napéjegylenlőség utánra. Míg a Nap a horizont felett van, az adott napra érvényes árnyékvonalat kell használni, napnyugta után pedig a tárcsát 180°-kal el kell forgatni, majd a központi kúpgnomon árnyékát helyettesítő árnyékpálca (2.15A ábra) szélét a másik árnyékvonalhoz kell illeszteni mindaddig, míg az ég elég világos a napkövek használatához. Az északi vizeken a hosszú szürkületi időszakok során ez akár több órányi biztonságos hajózást is jelenthetett. BERNÁTH *et al.* (2014) elemzése szerint a grönlandi fatárcsatöredékre (2.12A ábra) vésett árnyékvonalak március 10-én és március 31-én érvényes párt alkotnak (2.13. ábra), tehát ez a lelet egy tavaszi nap-éj egyenlőség környékén használatos alkonyfény-iránytű része is lehetett, ami pirkadattól alkonyat végéig mutathatott utat a viking hajósoknak.



2.15. ábra. Amikor a Nap a horizont felett jár, a kúpárnyékvetős napiránytű önmagában használható. Ha azonban a Nap a horizont alá bukik, az alkonyfény-iránytűt a következőképpen lehetett használni: A viking navigátornak először (a 2.1.6. fejezetben ismertetett 1–3. lépések szerint) két napkö használatával meg kellett becsülni a horizont alatt járó Nap helyét (C), majd annak nem látható árnyékát a speciálisan a tárcsához szerkesztett árnyékpálcával (A) kellett helyettesítenie, melynek lyukai az ábrán jelölt napállásokhoz tartoznak. Ehhez az árnyékpálcát a megfelelő lyukkal a központi árnyékvető tetejére kellett helyeznie, majd a pálca szélét a tárcsára vésett árnyékvonalra illeszteni. Ekkor a tárcsán lévő vésetsor dél felé mutatott (hiszen a tárcsa korábban 180°-kal el lett forgatva). (B) Árnyékpálcához hasonló viking kori csontfüggő, amit a lyukak közti távolságok alapján nem e célra használhattak (BERNÁTH *et al.* 2014).



### 2.3.2. Célkitűzések

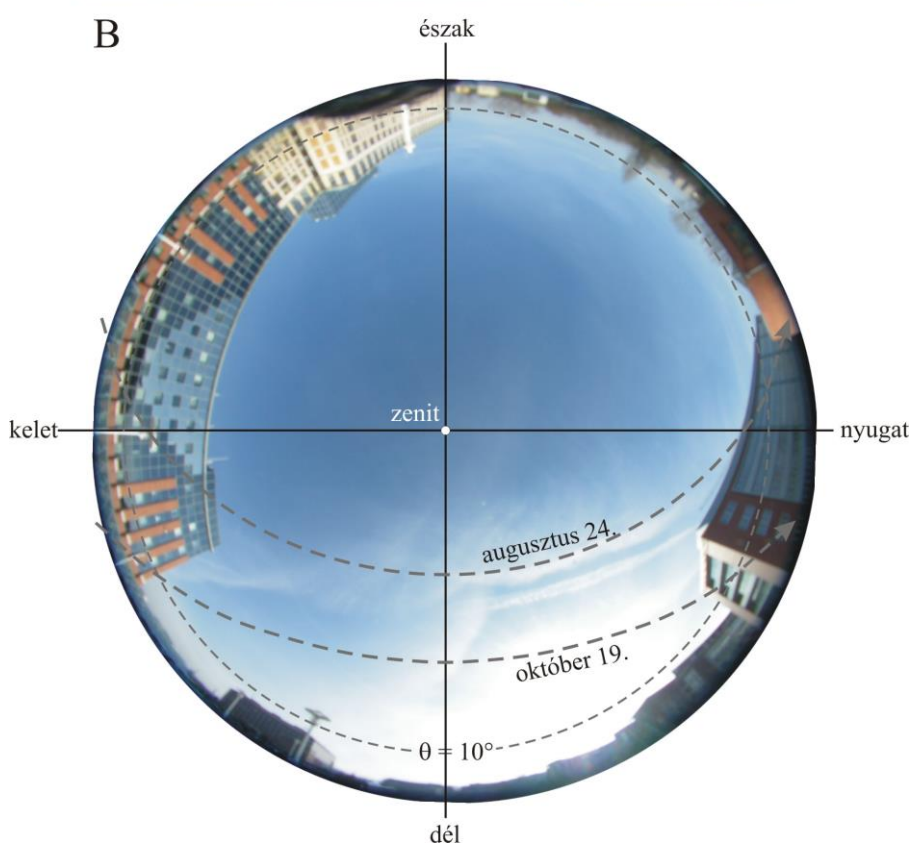
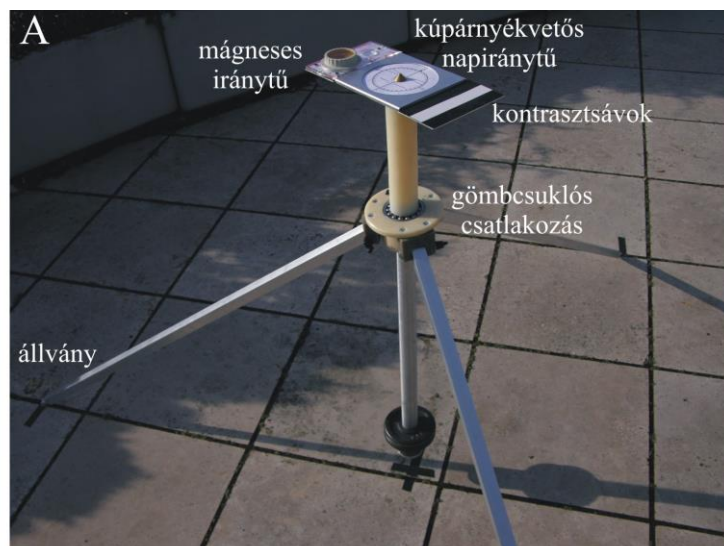
BERNÁTH *et al.* (2013a) egy korábbi kísérletsorozatban már felmérte, hogy a különböző meteorológiai szituációkban az égbolt-polarizációs viking navigáció 1–3. lépésével milyen pontossággal lehet megállapítani a földrajzi északi irányt, két kalcit napkő, egy árnyékpálca és egy napiránytű használatával (2.1.7. fejezet). E vizsgálat azonban nem terjedt ki a szürkület azon rövid időszakára, amikor a Nap még vagy már a horizont alatt jár, a tiszta égbolt polarizációs mintázata ugyanakkor érzékelhető lehet a navigációs módszer 1. lépésének elvégzéséhez, hiszen a napiránytű a gnomonárnyék eltűnése miatt ilyenkor használhatatlan. Bernáth Balázs azonban részletes elemzésnek vetette alá a grönlandi fatárcsatöredéket, majd a rajta látható vésetek újraértelmezése után a napkelte előtt és naplemente után is használható kifinomult viking navigációs eszközrendszert – az alkonyfény-iránytűt – vélte felfedezni (BERNÁTH *et al.* 2014). Az elmélet ellenőrzésére rekonstruált középkori eszközzel terepi pszichofizikai kísérletsorozatban kívántuk vizsgálni az alkonyfény-iránytű kezelhetőségét és pontosságát, tiszta égbolt alatt, hajnalban és alkonyatkor.

### 2.3.3. Anyag és módszer

#### *Pszichofizikai terepkísérlet és az eredmények rögzítése*

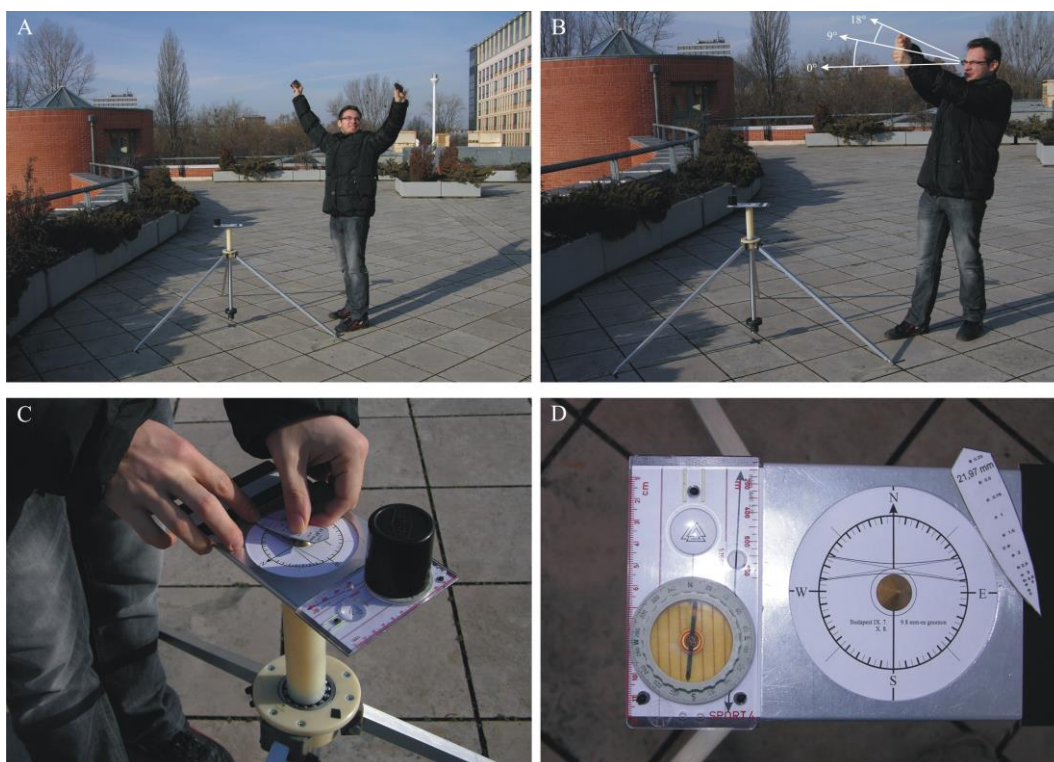
Az alkonyfény-iránytű használhatóságát és pontosságát 2012. augusztus 24. és 2012. október 19. között, hat 25 és 40 év közti tesztalany részvételével vizsgáltuk az ELTE Természettudományi Kar Lágymányosi Északi Tömbjének 2. emeleti külső teraszán, ahol a horizont felett járó Napot a kísérlet idején mindvégig épületek takarták (2.16. ábra). A terepkísérletek kizárólag akkor zajlottak, mikor az égbolt tiszta volt és a Nap a horizont felett legfeljebb  $10^\circ$  magasan, de a horizont alatt  $8^\circ$ -nál nem alacsonyabban járt ( $-8^\circ < \theta_N < 10^\circ$ ).

A kísérletben használt kúpárnyékvetős napiránytű (2.16A ábra) méretei pontosan megegyeztek a grönlandi lelet méreteivel. Hazánk délebbi fekvése miatt ugyanakkor a 61. szélességi körön használhatónál magasabb (9,8 mm magas és 17 mm átmérőjű) központi gnomonra volt szükség a kísérlethez, máskülönben az alacsonyabb gnomon csúcsa az adott kísérleti napra érvényes árnyékvonalat nem érinthette volna. A használt gnomon akkor vethet árnyékot a tárcsára, ha a Nap horizont feletti magassága  $\theta_N < 49^\circ$ , a gnomonárnyék csúcsa ugyanakkor túlnyúlik a tárcsán, ha  $\theta_N < 15,7^\circ$ . Az adott kísérleti napokon érvényes gnomonvonalakat és a gnomonhoz illő árnyékpálcát Bernáth Balázs szerkesztette.



2.16. ábra. (A) A kísérletben használt rekonstruált kúpárnyékvetős napiránytű a kísérlet helyszínén egy gömbcsuklós állványon volt elhelyezve, ami az állvány függőleges tengelye körül tetszőlegesen forgatható volt. A napiránytű mellett egy kiértékelés során használt mágneses iránytű kapott helyet, amit a mérések alatt fekete kupakkal takartunk el a tesztalanyok elől. A háromlábú állvány minden kísérleti napon ugyanazon a helyen állt, amit a földre ragasztott fekete jelzések segítettek elő. A fekete-fehér sávok a tárcsa fotózásakor nyújtottak kontrasztreferenciát. (B) A kísérlet helyszínéről látható környezet. A kelő és nyugvó Napot (amikor  $\theta_N \leq 10^\circ$ ) a tesztalanyok elől épületek takarták el, az égbolt méréshez szükséges többi részére azonban zavartalan volt a rálátás. A szaggatott vonalak a Nap égi útját jelölik a kísérleti időszak első (augusztus 24.) és utolsó (október 19.) napján.

Egy adott mérés során a tesztalanyok feladatai a következők voltak: Először a tiszta ég egy tetszőleges, kellően poláros foltját kellett nézniük egy csiszolt,  $5 \times 5 \times 2,5$  cm-es kalcit-napkövön át, majd addig forgatni azt, míg az égbolt arra ejtett résen keresztül látott kettős képének fényintenzitása megegyezett, vagy ahol a kettős kép közti intenzitáskülönbség a legnagyobb volt. Ekkor a napkőre vésett karcolás a nem látható Nap felé mutatott (2.17A ábra). Az így meghatározott égi főkörön a Nap még bárhol járhatott, így a mérést egy másik kalcit-napkővel is meg kellett ismételniük az ég egy másik, kellően poláros pontjában (lásd 2.1.6 fejezet, 1. lépés).



2.17. ábra. A kísérletben résztvevő tesztalanyok két napkővel becsülték meg a nem látható Nap helyét (A), majd ökleiket használva ököl-egységekben mérték a becsült nappozíciónak megfelelő magasságot (B). Ezután az árnyékpálca becsült ökölmagasságnak megfelelő lyukát rá kellett illeszteniük a kúpárnyékvető napiránytű gnomonjára (C), majd addig kellett forgatniuk a tárcsát, míg az árnyékpálca csúcsa érintette az árnyékvonalat. Ekkor a napiránytűre rajzolt nyíl a tesztalanyok által becsült északi irányba mutatott, amit a mérésvezető a fekete kupak eltávolítása után a mágneses iránytűvel együtt lefényképezett (D). Az adott mérés azimuthhibáját a tesztalany által becsült északi irány és a valódi északi irány közti szögeltérés adta meg. (A képsorozat kizárólag a lépések szemléltetésének célját szolgálja, nem valódi mérést ábrázol.)

Ezután meg kellett becsülniük a kapott két éggömbi főkör metszéspontját, mely megadta számukra a takart Nap helyét (lásd 2.1.6 fejezet, 2. lépés). Következő lépésként kinyújtott kezeik ökleit használva ököl-egységekben meg kellett mérniük a becsült nappozíció horizont

alatti vagy horizont feletti magasságát (2.17B ábra), amit későbbi kiértékeléshez (a mérés időpontjával és a tesztalany sorszámával együtt) feljegyeztünk. Ezután a Nap becsült helyzete (iránya és ökölmagassága) alapján a használt tárcsához szerkesztett árnyékpálcával a tesztalanyoknak helyettesíteniük kellett a becsült égi nappozícióhoz tartozó képzeletbeli gnomonárnyékot (lásd 2.1.6 fejezet, 3. lépés), melyhez az árnyékpálca becsült ökölmagasságnak megfelelő lyukát rá kellett illeszteniük a kúpárnyékvetős napiránytű gnomonjára (2.17C ábra). A tesztalanyok által mért ökölmagasság-értékek és az adott  $\theta_N$  napmagasság-értékek a 2.3. táblázat szerint feleltethetők meg egymásnak (a tesztalanyok ökleinek méretei megegyeztek).

2.3. táblázat. Adott ökölmagasságokhoz tartozó  $\theta_N$  napmagasságértékek.

<b>Ökölmagasság</b>	<b><math>\theta_N</math> napmagasság</b>
0,25 ököl (1 ujj)	1,4°
0,5 ököl (2 ujj)	3,7°
0,75 ököl (3 ujj)	5,7°
1 ököl (4 ujj)	9°
1,5 ököl (6 ujj)	13,5°
2 ököl (8 ujj)	18°

Amikor az árnyékpálca széle érintette a tárcsa megfelelő árnyékvonalát, a tárcsára rajzolt fekete nyíl észak felé mutatott. Amikor a Nap a horizont alatt járt, e lépés előtt a tárcsát 180°-kal el kellett forgatni, ez esetben a tárcsára rajzolt, déli irányt jelző nyíl mutatott észak felé. A beállított árnyékpálcát a fekete kupak eltávolítása után a Freiburger Präzisionsmechanik Sport 4 típusú mágneses iránytűvel együtt lefényképeztük (2.17D ábra). Fotózás során a tesztalanyok nem láthatták a mágneses iránytű irányultságát, tehát méréseik helyességéről a kísérlet közben nem kaptak visszajelzést. A 6 tesztalany összesen 642 mérést végzett, az egyes tesztalanyok mérésszámait a 2.4. táblázat tartalmazza.

#### *Az eredmények kiértékelése*

A kísérletsorozatban feljegyzett adatok (időpont, tesztalany száma, mért ökölmagasság) és a 642 mérési fotó alapján minden tesztalany esetében kiszámításra került az adott mérés  $\Delta\theta$  elevációhibája és  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hibája. A  $\Delta\theta$  elevációhibát a tesztalanyok által becsült ökölmagasság és a valódi  $\theta_N$  napmagasság közti szögeltérés adta meg, melyhez a kísérlet helyszínén és időpontjában érvényes valódi  $\theta_N$ -értékek a United States Naval Observatory adatbázisából származtak [www.usno.navy.mil]. A  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  tájékozódási hibát a tesztalanyok

által becsült északi irány és a valódi északi irány közti különbség adta meg. Ennek megállapításakor figyelembe kellett venni a mágneses deklinációt, azaz a mágneses iránytű által mutatott mágneses északi irány és a valódi földrajzi északi irány közti szögeltérést is, melynek egyik összetevője a tágabb térségre érvényes átlagérték, másik összetevője pedig a pontos helyszínen jelenlévő fémszerkezeti elemek függvénye [mfgi.hu; hajozzunk.hu]. A mágneses deklináció értéke a kísérlet helyszínén és idején Bernáth Balázs mérése szerint  $+3,2^\circ$  volt. A kísérletben rögzített mérési eredményeket cirkuláris statisztikai módszerrel ábráztuk és elemeztük (BATSCHLET 1981), az adatokat az alábbi napelevációtartományok szerint is megvizsgáltuk: 1. csoport:  $10^\circ > \theta_N > 3^\circ$ , 2. csoport:  $3^\circ > \theta_N > 0^\circ$ ; 3. csoport:  $0^\circ > \theta_N > -3^\circ$ ; 4. csoport:  $-3^\circ > \theta_N > -8^\circ$ . E tartományokat az égbolt polarizációs mintázatának naplemente és napkelte környékén lezajló gyors átalakulása alapján választottuk meg.

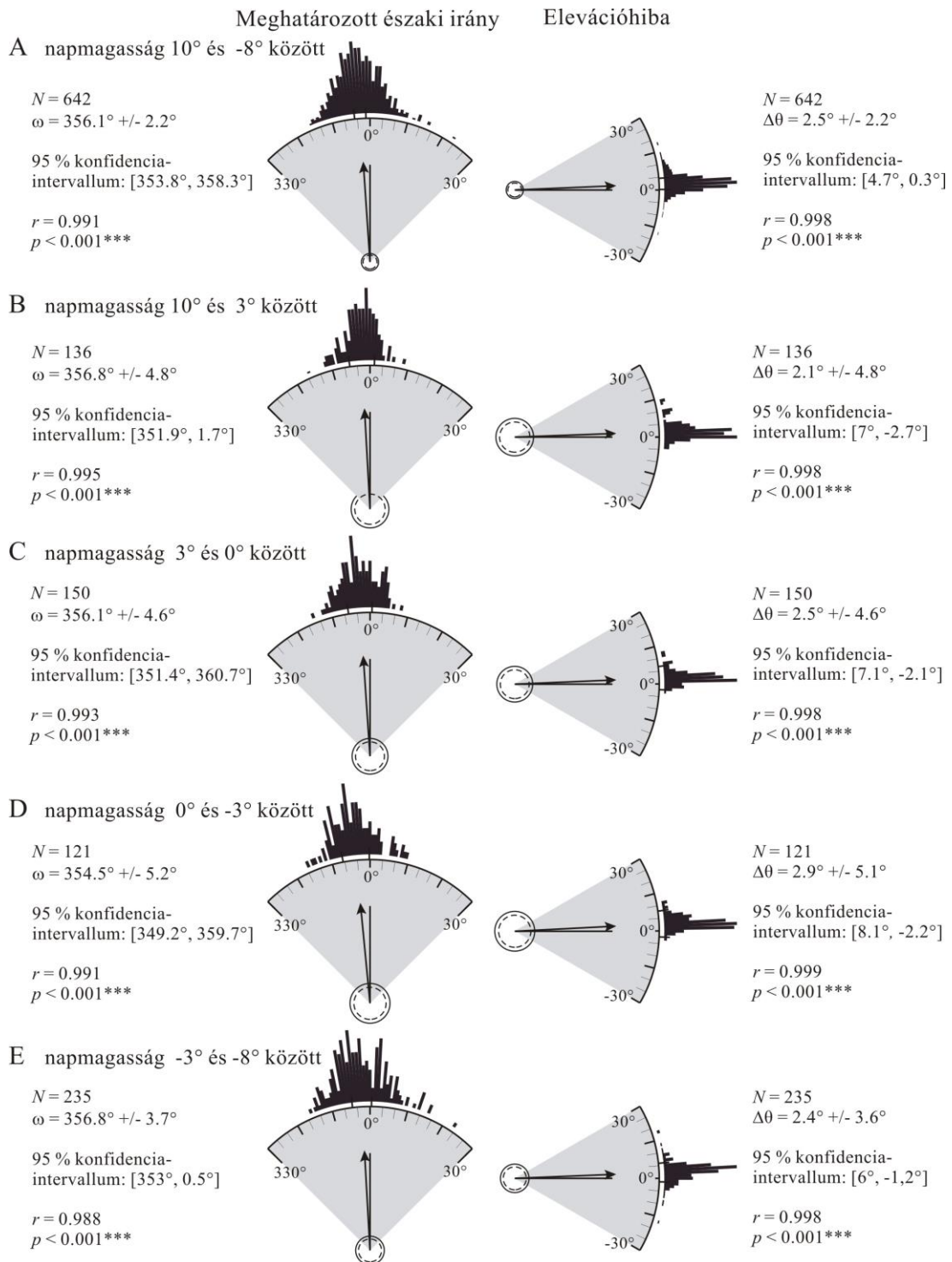
### 2.3.4. Eredmények

Az alkonyfény-iránytű használhatóságát és pontosságát vizsgáló terepkísérletben résztvevő 6 tesztalany összesen 642 mérést végzett. Az 1–6. tesztalanyok által vétett  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  és  $\Delta\theta_N$  hibák átlagait a 2.4. táblázat tartalmazza. Az általuk becsült átlagos földrajzi északi irány a 2.19A ábrán is látható módon  $\omega = 356,1^\circ \pm 2,2^\circ$  volt (95 %-os konfidencia-intervallum figyelembe vételével). A legjobban teljesítő 1. és 2. tesztalanyok átlagosan  $\Delta\omega_{\text{Észak}} = +1,5^\circ$  hibával becsülték meg az északi irányt, a legpontatlanabb 6. tesztalany pedig átlagosan  $\Delta\omega_{\text{Észak}} = +6,6^\circ$  hibát vétett. A tesztalanyok a számukra előírt öklös módszerrel  $\Delta\theta = 2,5^\circ \pm 2,2^\circ$  hibával határozták meg a napmagasságot (95%-os konfidencia-intervallum figyelembe vételével). A legjobban teljesítő 5. tesztalany átlagosan  $\Delta\theta = +1,1^\circ$  hibával becsülte a napmagasságot, a legpontatlanabb 6. tesztalany pedig átlagosan  $\Delta\theta = +4,8^\circ$  hibát vétett.

2.4. táblázat. Az alkonyfény-iránytű használhatóságát és pontosságát vizsgáló terepkísérlet 6 tesztalanya által végzett mérések száma és az általuk vétett  $\Delta\omega_{\text{Észak}}$  téjékozdási hibák átlagai, illetve napmagasságbecsléseik  $\Delta\theta$  átlagos hibái.

<b>Tesztalany</b>	<b>Mérések száma</b>	<b><math>\Delta\omega_{\text{Észak}}</math></b>	<b>Konfidencia-intervallum</b>	<b><math>\Delta\theta</math></b>	<b>Konfidencia-intervallum</b>
<b>1.</b>	103	$1,5^\circ$	$\pm 5,6^\circ$	$2,1^\circ$	$\pm 5,5^\circ$
<b>2.</b>	114	$1,5^\circ$	$\pm 5,3^\circ$	$2,2^\circ$	$\pm 5,3^\circ$
<b>3.</b>	152	$3,2^\circ$	$\pm 4,6^\circ$	$1,4^\circ$	$\pm 4,5^\circ$
<b>4.</b>	64	$4,8^\circ$	$\pm 7,1^\circ$	$3,9^\circ$	$\pm 7,1^\circ$
<b>5.</b>	114	$5,5^\circ$	$\pm 5,3^\circ$	$1,1^\circ$	$\pm 5,2^\circ$
<b>6.</b>	95	$6,6^\circ$	$\pm 6,0^\circ$	$4,8^\circ$	$\pm 5,8^\circ$





2.19. ábra. Az alkonyfény-iránytű használhatóságát vizsgáló terepkísérlet 642 mérése során 6 tesztalany által meghatározott északi irányhibák és napmagasságbecslési hibák összesítve (A), és adott horizont feletti (B-C) és horizont alatti (D-E) napmagasságtartományok szerint.  $N$ : mért szituációk száma,  $\omega$ : rögzített északi irányvektorok átlaga,  $r$ : Rayleigh-statisztika paramétere,  $p$ : szignifikanciaszint, fekete vonal: várt északi irány ( $0^\circ$ ) és várt elevációhiba ( $0^\circ$ ), nyíl: meghatározott északi irányok és a mért elevációhibák átlaga, fekete kör: átlagvektor hossza 1%-os szignifikanciaszint esetén, fekete szaggatott kör: átlagvektor hossza 5%-os szignifikanciaszint esetén.

### 2.3.5. Elemzés

Az unartoq-i fatárcsatöredék minden bizonnyal egy navigációra használt segédeszköz vagy annak egy része lehetett. Hasonló leletek vagy a használatukat bemutató viking kori feljegyzések azonban egyelőre nem állnak rendelkezésre, így valójában csak találgathatunk, hogy pontosan miként és mire használhatták ezt az eszközt. Ebből következően a tárcsa lehetséges funkciójáról számos elmélet látott már napvilágot: Míg SØLVER (1953, 1954) szerint az eszköz egy napiránytű része lehetett (2.1.5. fejezet), BERNÁTH (2013b) alternatív rekonstrukciója alapján a tárcsa a földrajzi szélesség meghatározására használható fejlett műszer része volt. Mindkét műszer használatához szükség volt azonban közvetlen napfényre, a vikings által uralt térségben azonban gyakran előfordult, hogy nem látszott a központi árnyékvető tájékozódáshoz nélkülözhetetlen árnyéka (HORVÁTH *et al.* 2011, 2014, 2016). ROSLUND & BECKMAN (1994) szerint ilyen esetekben a (felhő, köd vagy horizont által takart) Nap égi helyének szabad szemmel történő becslése könnyen és nagy pontossággal elvégezhető a felhők fényességmintázata, a felhőtetők fényes kontúrjai, az alkonyi fények kontrasztjai, vagy a Nap irányába mutató fény-árnyék pászmák megfigyelésével. BARTA *et al.* (2005) azonban bizonyította, hogy e légköroptikai jelenségek figyelésével csak nagy hibával határozható meg a takart Nap helye. RAMSKOU (1967) szerint a viking hajósok ilyen helyzetekben dikroikus vagy kettőstörő napköveket használtak, mellyel a poláros égboltfény rezgéssíkját határozhatták meg, ami alapján a takart Nap helyére következtethettek. E módszer pontosságát, feltételeit és létjogosultságát azonban már számos tanulmányban megkérdőjelezték (például ROSLUND & BECKMAN 1994; SUHAI & HORVÁTH 2004; HORVÁTH *et al.* 2011). A napkövek sokkal praktikusabbak lehettek azokban az esetekben, amikor az ég horizontközeli részét felhő vagy vízfelszín felett hömpölygő köd takarta, a zenit környéke ugyanakkor tiszta, felhőmentes volt (KARLSEN 2003; BARTA *et al.* 2005).

A Bernáth Balázs által kidolgozott új elmélet szerint a grönlandi fatárcsatöredék a sarkkörök közelében igen hosszúra nyúló szürkületkor praktikusán használható alkonyfény-iránytű része lehetett. Az eszköz két napkövel és egy árnyékpálcával kiegészítve tavaszi nap-ég egyenlőség környékén pirkadattól alkonyat végéig mutathatott utat a viking hajósoknak derült égbolt alatt, akár akkor is, amikor a Nap már a horizont alatt volt (BERNÁTH *et al.* 2014).

Az alkonyfény-iránytű használhatóságát és pontosságát vizsgáló terepkísérlet során megállapítottuk, hogy a kísérletben részt vevő személyek által becsült átlagos földrajzi északi



irány  $\omega = 356,1^\circ \pm 2,2^\circ$  volt. Az 1. és 2. tesztalanyok ugyanakkor ennél pontosabban, átlagosan  $+1,5^\circ$  hibával becsülték meg a földrajzi északi irányt (2.4. táblázat), ami vetekszik egy mai zsebiránytű pontosságával. Egy mágneses iránytű hibája ugyanakkor néha még ennél nagyobb is lehet, főként a magas földrajzi szélességeken. További tájékozódásra alkalmas segédeszközök (mint például a szextáns) növelhetnék ugyan az alkonyfény-iránytű pontosságát, ám arra vonatkozóan nincs régészeti bizonyíték, hogy ilyen eszközök a viking hajósok birtokában lettek volna (KARLSEN 2003).

Az egyes tesztalanyok által vétett tájékozódási hibák nagysága eltérő volt (2.4. táblázat), amely arra utal, hogy az egyénekre jellemző becslési módszerek különböző hibalehetőségeket vetnek fel, ugyanakkor kellő tengeri hajózási gyakorlattal egy navigátor északi iránybecslésének pontossága nagymértékben javulhat. A navigáció pontossága emellett nagymértékben függ az időjárás helyzettől, továbbá a Nap horizont feletti magasságának és azimutirányának becslésétől is.

Fontos megjegyezni, hogy mai elképzeléseink szerint egy alkonyfény-iránytűhöz hasonló precíz műszer szerkesztése nem tartozik a vikingek mindennapos képességei, adottságai közé. A több korabeli forrásban is említett napköveket ugyanakkor akár szürkület idején is használhatták, bár az már nem egyértelmű, hogy azzal pontosan miként is állapíthatták meg a Nap égi helyét. Egy LE FLOCH *et al.* (2013) által bemutatott, 16. századi európai hajóroncsban talált kalcitkristály azonban tovább erősítheti az elképzelést, miszerint a napkövek valóban lehettek a tengeri navigáció egyfajta segédeszközei. Az árnyékpálca navigációhoz történő használatáról viszont egyelőre nem áll rendelkezésre semmilyen tárgyi vagy írásos régészeti bizonyíték. Az ilyen apró tárgyak ugyanakkor valószínűleg csak igen rossz állapotban őrződhetek volna meg. Árnyékpálcához hasonló viking kori csontfüggőt ugyanakkor már találtak (2.15B ábra), még ha azok valódi funkciójára napjainkig nem is derült fény.

Hogy valóban használtak-e a vikingek alkonyfény-iránytűt, az egyelőre nem tudható, az azonban bizonyosnak látszik, hogy a Grönlandon talált fatárcsatöredék egy olyan navigációs műszer része lehetett, ami épp az északi vizeken használható legjobban. A rajta látható árnyékvonalakból a viking kereskedőhajók menetrendjét is kiolvashatjuk: A Gergely-naptár szerint március első napjaiban indulhattak útnak Skandináviából, hogy a mainál kevésbé jeges óceánon átkeljenek, majd nagyjából két héttel később (nap-éj egyenlőségkor) kötöttek ki Grönlandon. Egy-két hét alatt az üzletek megkötöttek, a hajó sérüléseit kijavították, az értékes rakomány pedig útnak indulhatott Európa piacai felé.

# Irodalomjegyzék

- AZZAM R. M. A., BASHARA N. M. (1989) *Ellipsometry and Polarized Light*. North-Holland, Amsterdam
- BALDAVÁRI L. (2001) A teljes napfogyatkozás egy méhészetben 1999. augusztus 11-én videofelvétel alapján. *Állattani Közlemények*, 86, 137–143
- BALL P. (2011) Material witness: a light compass? *Nature Materials*, 10, article no. 909
- BARTA A., HORVÁTH G. (2004) Why is it advantageous to perceive the polarization of downwelling light under clouds and canopies in the UV? *Journal of Theoretical Biology*, 226, 429–437
- BARTA A., HORVÁTH G., MEYER-ROCHOW V. B. (2005) Psychophysical study of the visual sun location in pictures of cloudy and twilight skies inspired by Viking navigation. *Journal of the Optical Society of America A*, 22, 1023–1034
- BARTA A., HORVÁTH G., HORVÁTH Á., EGRI Á., BLAHÓ M., BARTA P., BUMKE K., MACKE A. (2015) Testing a polarimetric cloud imager aboard research vessel polarstern: comparison of color-based and polarimetric cloud detection algorithms. *Applied Optics*, 54, 1065–1077
- BATSCHLET E. (1981) *Circular Statistics in Biology*. Academic Press, London
- BEHRINGER W. (2010) *A klíma kultúrtörténete. A jégkorszaktól a globális felmelegedésig*. Corvina Kiadó, Budapest
- BELLVER C. (1967a) Estimation of the influence of particulate pollution on the degree of polarization of the sky-light scattered by the atmospheric aerosol. *Atmospheric Environment*, 22, 2323–2327
- BELLVER C. (1967b) Influence of particulate pollution on the positions of neutral points in the sky at Seville (Spain). *Atmospheric Environment*, 21, 699–702.
- BERGLUND J. (1986) The Decline of the Norse Settlements in Greenland. *Arctic Anthropology*, 23, 109–135
- BERNÁTH B., HORVÁTH G. (1999) Visual deception of a great white egret by shiny plastic sheets. *Ornis Hungarica*, 8–9, 57–61
- BERNÁTH B., SZEDENICS G., MOLNÁR G., KRISKA G., HORVÁTH G. (2001a) 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 Nature Conservation and Landscape Research*, 40, 89–109
- BERNÁTH B., SZEDENICS G., MOLNÁR G., KRISKA G., HORVÁTH G. (2001b) Visual ecological impact of a peculiar waste oil lake on the avifauna: dual-choice field experiments with water-seeking birds using huge shiny black and white plastic sheets. *Archives of Nature Conservation and Landscape Research*, 40, 1–28
- BERNÁTH B., POMOZI I., GÁL J., HORVÁTH G., WEHNER R. (2001c) Égboltpolarizáció az 1999. augusztus 11-i teljes napfogyatkozásakor és lehetséges biológiai vonatkozásai. *Allattani Közlemények*, 86, 81–92
- BERNÁTH B., SZEDENICS G., WILDERMUTH H., HORVÁTH G. (2002) How can dragonflies discern bright and dark waters from a distance? The degree of polarization of reflected light as a possible cue for dragonfly habitat selection. *Freshwater Biology*, 47, 1707–1719
- BERNÁTH B., GÁL J., HORVÁTH G. (2004) Why is it worth flying at dusk for aquatic insects? Polarotactic water detection is easiest at low solar elevations. *Journal of Experimental Biology*, 207, 755–765
- BERNÁTH B., BLAHÓ M., EGRI Á., BARTA A., KRISKA G., HORVÁTH G. (2013a) Orientation with a Viking sun-compass, a shadow-stick, and two calcite sunstones under various weather conditions. *Applied Optics*, 52, 6185–6194
- BERNÁTH B., BLAHÓ M., EGRI Á., BARTA A., HORVÁTH G. (2013b) An alternative interpretation of the Viking sundial artefact: an instrument to determine latitude and local noon. *Proceedings of the Royal Society A*, 469, article no. 20130021
- BERNÁTH B., FARKAS A., SZÁZ D., BLAHÓ M., EGRI Á., BARTA A., ÅKESSON S., HORVÁTH G. (2014) How could the Viking sun-compass be used with sunstones before and after sunset? Twilight board as a new interpretation of the Unartoq artefact fragment. *Proceedings of the Royal Society A*, article no. 2166
- BERNÁTH B., FARKAS A., HORVÁTH G. (2015): Navigáció égre néző vikingekkel. 1. rész. Alkonyfény-iránytű. *Élet és Tudomány*, 70, 307–309
- BERRY M. V., DENNIS M. R., LEE R. L. (2004) Polarization singularities in the clear sky. *New Journal of Physics*, 6, 162
- BLAHÓ M., EGRI Á., BARTA A., ANTONI G., KRISKA G., 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, article no. e103339
- BODA P., HORVÁTH G., KRISKA G., BLAHÓ M., CSABAI Z. (2014) Phototaxis and polarotaxis hand in hand: night dispersal flight of aquatic insects distracted synergistically by light intensity and reflection polarization. *Naturwissenschaften*, 101, 385–395
- BOESCHE E., STAMMES P., RUHTZ T., PREUSKER R., FISCHER J. (2006) Effect of aerosol microphysical properties on polarization of skylight: sensitivity study and measurements. *Applied Optics*, 45, 8790–8805
- BOLDOGH S., DOBROSI D., SAMU P. (2007) The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. *Acta Chiropterologica*, 9, 527–534
- BRADBEER P. A., SAVAGE A. A. (1980) Some observations on the distribution and life history of *Caenis robusta* Eaton (Ephemeroptera) in Cheshire and North Shropshire, England. *Hydrobiology*, 68, 87–90
- BRADLEY R. S., HUGHES M. K., DIAZ H. F. (2003) Climate in Medieval Time. *Science*, 302, 404–405
- BRÉON F. M., DEUZE J. L., TANRÉ D., HERMAN M. (1997) Validation of space-borne estimates of aerosol loading from sun photometer measurements with emphasis on polarization. *Journal of Geophysical Research D*, 102, 17187–17195
- BRINES M. L., GOULD J. L. (1982) Skylight polarization patterns and animal orientation. *Journal of Experimental Biology*, 96, 69–91
- BRODSKIY A. K. (1973) The swarming behavior of mayflies (Ephemeroptera). *Entomological Review*, 52, 33–39
- BROECKER W. S. (2001) Was the Medieval Warm Period Global? *Science*, 291, 1497–1499
- BRØNDSTED J. (1983) *A vikingek*. Corvina Kiadó. Budapest
- CAO F., GUICHARD F., HORNUNG H., MASSON L. (2009) Sensor information capacity and spectral sensitivities. *Proceedings SPIE*, 7250, *Digital Photography V*, 725006
- COLLETT E. (1994) *Polarized Light. Fundamentals and Applications*. M. Dekker Inc. New York

- CORNU M. A. (1884) Observations relatives à la couronne visible actuellement autour du soleil. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 4, 53–59
- COULSON K. L. (1980) Characteristics of skylight at the zenith during twilight as indicators of atmospheric turbidity. 1: Degree of polarization. *Applied Optics*, 19, 3469–3480
- COULSON K. L. (1983) Effects of the El Chichon volcanic cloud in the stratosphere on the polarization of light from the sky. *Applied Optics*, 22, 1036–1050
- COULSON K. L. (1988) *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*. A. Deepak Publishing. Hampton. Virginia. USA
- CRONIN T. W., WARRANT E. J., GREINER B. (2006) Celestial polarization patterns during twilight. *Applied Optics*, 45, 5582–5589
- CSABAI Z., BODA P., BERNÁTH B., KRISKA G., HORVÁTH G. (2006) A ‘polarisation sun-dial’ dictates the optimal time of day for dispersal by flying aquatic insects. *Freshwater Biology*, 51, 1341–1350
- DACKE M., NILSSON D. E., WARRANT E. J., BLEST A. D., LAND M. F., O’CARROLL D. C. (1999) Built-in polarizers form part of a compass organ in spiders. *Nature*, 401, 470–473
- DACKE M., NORDSTRÖM P., SCHOLTZ C. H. (2003) Twilight orientation to polarized light in the crepuscular dung beetle *Scarabaeus zambesianus*. *Journal of Experimental Biology*, 206, 1535–1543
- D’ANDREA W. J., HUANG Y., FRITZ S. C., ANDERSON N. J. (2011) Abrupt Holocene climate change as an important factor for human migration in West Greenland. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 24, 9765–9769
- DAVIES T. W., DUFFY J. P., BENNIE J., GASTON K. J. (2014) The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12, 347–355
- DIAMOND J. (2007) *Összeomlás. Tanulmányok a társadalmak továbbéléséhez*. Typotex Kiadó, Budapest
- DORNO C. (1919a) Himmelshelligkeit, Himmelpolarisation und Sonnenintensität in Davos (1911 bis 1918). I. *Meteorologische Zeitschrift*, 36, 109–128
- DORNO C. (1919b) Himmelshelligkeit, Himmelpolarisation und Sonnenintensität in Davos (1911 bis 1918). II. *Meteorologische Zeitschrift*, 36, 181–192
- DOUGLAS L. (2014) The vikings made to last. *Engineering & Technology*, 9, 42–45

- DUGMORE A. J., CHURCH M. J., MAIRS K. A., MCGOVERN T. H., PERDIKARIS S., VÉSTEINSSON O. (2007) Abandoned Farms, Volcanic Impacts and Woodland Management: Revisiting pjórsárdalur, the „Pompeii Of Iceland”. *Arctic Anthropology*, 44, 1–11
- EDWARDS K. J. (2005) „On the Windy Edge of Nothing”: A Historical Human Ecology of the Faroe Islands. *Human Ecology*, 33, 585–596
- EGRI Á., BLAHÓ M., SÁNDOR A., KRISKA G., GYURKOVSZKY M., FARKAS R., HORVÁTH G. (2012a) New kind of polarotaxis governed by degree of polarization: attraction of tabanid flies to differently polarizing host animals and water surfaces. *Naturwissenschaften*, 99, 407–416
- EGRI Á., BLAHÓ M., KRISKA G., FARKAS R., GYURKOVSZKY M., AKESSON, S., HORVÁTH G. (2012b) 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. (2013a) 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., BLAHÓ M., SZÁZ D., KRISKA G. (2013b) A horizontally polarizing liquid trap enhances the tabanid-capturing efficiency of the classic canopy trap. *Bulletin of Entomological Research*, 103, 665–674
- EGRI Á. (2017) A világ ugróvillás szemmel. *Élet és Tudomány*, 72, 50–52
- EINARSSON Á. (2010) Sólarsteinninn: Tæki eða tákni (The sunstone: fact and fiction). *Gripla*, 21, 281–297
- FARKAS A. (2013) A viking kaland és a középkori éghajlat-ingadozások. Miért tűntek el a vikingek Grönlandról? *Természet Világa*, 144, 205–207
- FARKAS A., SZÁZ D., EGRI Á., BLAHÓ M., NEHÉZ D., BERNÁTH B., HORVÁTH G. (2014) Accuracy of sun localization in the second step of sky-polarimetric Viking navigation for north determination: a planetarium experiment. *Journal of the Optical Society of America A*, 31, 1645–1656
- FREDSKILD B. (1992) Erosion and vegetational changes in South Greenland caused by agriculture. *Geografisk Tidsskrift*, 92, 14–21

- FOOTE P. G. (1956) Icelandic sólarsteinn and the Medieval Background. *Arv. Journal of Scandinavian Folklore*, 12, 26–40
- FRISCH VON K. (1949) Die Polarisation des Himmelslichtes als orientierender Faktor bei den Tänzchen der Bienen. *Experientia*, 5, 142–148
- GÁL J., HORVÁTH G., WEHNER R. (1997) Légtükrözések polarizációs mintázata – Miért nem tévesztheti meg a délibáb a vízirovarokat? *Fizikai Szemle*, 47, 37–42
- GÁL J., HORVÁTH G., MEYER-ROCHOW V. B., WEHNER R. (2001a) Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the Arctic Circle. *Proceedings of the Royal Society A*, 457, 1385–1399
- GÁL J., HORVÁTH G., BARTA A., WEHNER R. (2001b) Polarization of the moonlit clear night sky measured by full-sky imaging polarimetry at full moon: comparison of the polarization of moonlit and sunlit skies. *Journal of Geophysical Research D*, 106, D19, 22647–22653
- GÁL J., HORVÁTH G., MEYER-ROCHOW V. B. (2001c) Measurement of the reflection-polarization pattern of the flat water surface under a clear sky at sunset. *Remote Sensing of Environment*, 76, 103–111
- GASTON K. J., BENNIE J., DAVIES T. W., HOPKINS J. (2013) The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews*, 88, 912–927
- GEHRELS T. (1974) *Planets, Stars, and Nebulae Studied with Photopolarimetry*. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona
- GODDARD S. M., FORWARD JR. R. B. (1991) The role of the underwater polarized light pattern in sun compass navigation of the grass shrimp, *Palaemonetes vulgaris*. *Journal of Comparative Physiology A*, 169, 479–491
- GROVE J. M. (2001) The Initiation of the „Little Ice Age” in Regions Round the North Atlantic. *Climatic Change*, 48, 1, 53–82
- GUCMA L., PRZYWARTY M., BUDZAN T., KARWOWSKI L., VIDMAR P., HRIBAR U. (2016) Using maritime simulation systems to present complex information in maritime museums. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 45, 75–81
- HANSEN S. S. (2003) The Early Settlement of the Faroe Islands: The Creation of Cultural Identity. In: BARRETT J. H. (ed.) *Contact, Continuity, and Collapse. The Norse Colonization of the North Atlantic*. Studies in the Early Middle Ages. Vol. 5. Brepols Publishers, Turnhout. pp. 33–71



- HAWTHORNE C. F., DIRLAM D. M. (2011) Tourmaline the indicator mineral: from atomic arrangement to Viking navigation. *Elements*, 7, 307–312
- HEGEDÜS R., ÅKESSON S., HORVÁTH G. (2007a) Polarization patterns of thick clouds: overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies. *Journal of the Optical Society of America A*, 24, 8, 2347–2356
- HEGEDÜS R., ÅKESSON S., WEHNER R., HORVÁTH G. (2007b) Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies. *Proceedings of the Royal Society A*, 463, 1081–1095
- HEGEDÜS R., ÅKESSON S., HORVÁTH G. (2007c) Anomalous celestial polarization caused by forest fire smoke: Why do some insects become visually disoriented under smoky skies? *Applied Optics*, 46, 2717–2726
- HERSHENSON M. (1989) *The Moon Illusion*. Erlbaum, New Jersey, USA
- HERZMANN D., LABHART T. (1989) Spectral sensitivity and absolute threshold of polarization vision in crickets: a behavioral study. *Journal of Comparative Physiology A*, 165, 315–319
- HORVÁTH G. (1995) Reflection-polarization patterns at flat water surfaces and their relevance for insect polarization vision. *Journal of Theoretical Biology*, 175, 27–37
- HORVÁTH G., VARJÚ D. (1995) Underwater refraction-polarization patterns of skylight perceived by aquatic animals through Snell's window of the flat water surface. *Vision Research*, 35, 1651–1666
- HORVÁTH G., ZEIL J. (1996) Kuwait oil lakes as insect traps. *Nature*, 379, 303–304
- HORVÁTH G., GÁL J., WEHNER R. (1997) Why are water-seeking insects not attracted by mirages? The polarization pattern of mirages. *Naturwissenschaften*, 84, 300–303
- HORVÁTH G., GÁL J., POMOZI I., WEHNER R. (1998) Polarization portrait of the Arago point: Video-polarimetric imaging of the neutral points of skylight polarization. *Naturwissenschaften*, 85, 333–339
- HORVÁTH G., WEHNER R. (1999) Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by video polarimetry. *Journal of Comparative Physiology A*, 184, 1–7
- HORVÁTH G., BERNÁTH B., SUHAI B., BARTA A., WEHNER R. (2002) First observation of the fourth neutral polarization point in the atmosphere. *Journal of the Optical Society of America A*, 19, 2085–2099

- HORVÁTH G., POMOZI I., GÁL J. (2003) Neutral points of skylight polarization observed during the total eclipse on 11 August 1999. *Applied Optics*, 42, 465–475
- HORVÁTH G., VARJÚ D. (2004) *Polarized Light in Animal Vision – Polarization Patterns in Nature*. Springer-Verlag, Heidelberg – Berlin – New York
- 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., MAJER J., HORVÁTH L., SZIVÁK I., KRISKA G. (2008) Ventral polarization vision in tabanids: horseflies and deerflies (Diptera: Tabanidae) are attracted to horizontally polarized light. *Naturwissenschaften*, 95, 1093–1100
- 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
- HORVÁTH G., BARTA A., POMOZI I., SUHAI B., HEGEDÜS R., AKESSON, S., MEYER-ROCHOW B., WEHNER R. (2011) On the trail of Vikings with polarized skylight: experimental study of the atmospheric optical prerequisites allowing polarimetric navigation by Viking seafarers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 366, 772–782
- HORVÁTH G. (2014) Chapter 16. Polarization Patterns of Freshwater Bodies with Biological Implications. In: HORVÁTH G. (ed.) (2014) *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences* (2nd edition) *Springer Series in Vision Research*, Volume 2. Springer: Heidelberg, Berlin, Dordrecht, London, New York. pp. 333–344
- HORVÁTH G., CSABAI Z. (2014) Chapter 5. Polarization Vision of Aquatic Insects. In: HORVÁTH G. (ed.) (2014) *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences* (2nd edition) *Springer Series in Vision Research*, Volume 2. Springer: Heidelberg, Berlin, Dordrecht, London, New York. pp. 113–145
- HORVÁTH G., FARKAS A., BERNÁTH B. (2014) Chapter 25. Sky-polarimetric Viking navigation. In: HORVÁTH G. (ed.) (2014) *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences* (2nd edition) *Springer Series in Vision Research*, Volume 2. Springer: Heidelberg, Berlin, Dordrecht, London, New York. pp. 603–635

- HORVÁTH G., FARKAS A., KRISKA G. (2016) *A poláros fény környezetoptikai és biológiai vonatkozásai*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest
- HUGHES M. K., DIAZ H. F. (1994) Was there a 'Medieval Warm Period', and if so, Where and When? *Climatic Change*, 26, 109–142
- IBANEZ C., ESCOSA R., MUNOZ N., PRAT N. (1991) Life cycle and production of *Ephoron virgo* (Ephemeroptera: Polymitarcyidae) in the lower river Ebro (NE Spain). In: ABATERCER J., SANCHEZ-ORTEGA A. (eds.): *Overview and Strategies of Ephemeroptera and Plecoptera*. Sandhill Crane Press, USA, pp. 483–492
- INDRUSZEWSKI G., GODAL J. (2006) Maritime skills and astronomic knowledge in the Viking Age Baltic Sea. *Studia Mytologica Slavica*, IX, pp. 15–39
- INGSTAD H., INGSTAD A. S. (2000) *The Viking discovery of America. The excavation of a Norse settlement in L'Anse aux Meadows*. Breakwater Book Ltd. Newfoundland. St. John's
- JENSEN C. (1928) Die Himmelsstrahlung, *Handbuch der Physik*. Springer, Vol. 19, pp. 70–152
- JENSEN C. (1942) Die Polarization des Himmelslichts, *Handbuch der Geophysik*. Springer, Vol. 8, pp. 527–620
- JÉKELY G. (2009) Evolution of phototaxis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, 2795–2808
- KAMMANN R. (1967) The overestimation of vertical distance and slope and its role in the moon illusion. *Perception and Psychophysics*, 2, 585–589
- KAPLAN M. R., WOLFE A. P., MILLER G. H. (2002) Holocene Environmental Variability in Southern Greenland Inferred from Lake Sediments. *Quaternary Research*, 58, 149–159
- KARMAN S. B., DIAH S. Z. M., GEBESHUBER I. C. (2012) Bio-inspired polarized skylight-based navigation sensors: a review. *Sensors*, 12, 14232–14261
- KAZANCI N. (2013) The swarm of *Ephoron virgo* (Olivier, 1791) (Ephemeroptera: Polymitarcyidae) as nuptial behaviour in Sakarya River (Turkey). *Review of Hydrobiology*, 6, 69–80
- KEMP J., D'OLIER B. (2016) Early Navigation in the North Sea – The Use of the Lead and Line and other Navigation Methods. *Journal of Navigation*, 69, 4, 673–697
- KERESZTESSY K., FARKAS J., SEVCSIK A., WEIPERTH A. (2013) Effects of habitat rehabilitation on the fish fauna of the Öreg-turján peatland at Ócsa. *Pisces Hungarici*, 7, 37–43

- KIMBALL H. H. (1913) The effect of the atmospheric turbidity of 1912 on solar radiation intensities and skylight polarization. *Bulletin of the Meteorological Weather Observatory*, 5, 295–312
- KÖNNEN G. P. (1985) *Polarized Light in Nature*. Cambridge University Press. Cambridge
- KREITHEN M. L., KEETON W. T. (1974) Detection of polarized light by the homing pigeon, *Columba livia*. *Journal of Comparative Physiology*, 89, 83–92
- 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. (2000) Polarotaxis a rovarvilágban. *Állattani Közlemények*, 85, 17–27
- KRISKA G., ANDRIKOVICS S. (2000) A kérészek vízdetektálási viselkedése, avagy miért petéznek a kérészek száraz aszfaltutakra? *Állattani Közlemények*, 85, 29–42
- 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., BERNÁTH B., HORVÁTH G. (2007) Positive polarotaxis in a mayfly that never leaves the water surface: polarotactic water detection in *Palingenia longicauda* (Ephemeroptera). *Naturwissenschaften*, 94, 148–154
- 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
- LABHART T. (1980) Specialized photoreceptors at the dorsal rim of the honeybee’s compound eye: polarizational and angular sensitivity. *Journal of Comparative Physiology A*, 141, 19–30
- LABHART T., MEYER E. P., SCHENKER L. (1992) Specialized ommatidia for polarization vision in the compound eye of cockchafers, *Melolontha melolontha* (Coleoptera, Scarabaeidae). *Cell and Tissue Research*, 268, 419–429

- LABHART T., MEYER E. P. (1999) Detectors for polarized skylight in insects: a survey of ommatidial specializations in the dorsal rimarea of the compound eye. *Microscopy Research and Technique*, 47, 368–379
- LAMB H. H. (1965) The early Medieval Warm Epoch and its sequel. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1, 13–37
- LANGFORD T. E., BRAY E. S. (1969) The distribution of Plecoptera and Ephemeroptera in a Lowland Region of Britain (Lincolnshire). *Hydrobiology*, 34, 243–271
- LE FLOCH A., ROPARS G., LUCAS J., WRIGHT S., DAVENPORT T., CORFIELD M., HARRISSON M. (2013) The sixteenth century Alderney crystal: a calcite as an efficient reference optical compass? *Proceedings of the Royal Society A*, article no. 2153
- LEHN W. H., SCHROEDER I. I. (1979) Polar Mirages as Aids to Norse Navigation. *Polarforschung*, 49, 173–187
- LOESEL R., HOMBERG U. (2001) Anatomy and physiology of neurons with processes in the accessory medulla of the cockroach *Leucophaea maderae*. *Journal of Comparative Neurology*, 439, 193–207
- LONGCORE T., RICH C. (2004) Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2, 191–198
- MASSA C., BICHET V., ÉMILIE G., BIANCA B. P., OLIVIER M., CHRISTOPHE P., FABRICE M., JACQUES G., RÉMI L., HERVÉ R. (2012) A 2500 year record of natural and anthropogenic soil erosion in South Greenland. *Quaternary Science Reviews*, 32, 119–130
- MAY W. E. (1955) Alexander Neckham and the Pivoted Compass Needle. *Journal of Navigation*, 8, 283–284
- MALIK P., HEGEDÜS R., KRISKA G., HORVÁTH G. (2008) Imaging polarimetry of glass buildings: Why do vertical glass surfaces attract polarotactic insects? *Applied Optics*, 47, 4361–4374
- MÁLNÁS K., POLYÁK L., PRILL É., HEGEDÜS R., KRISKA G., DÉVAI G., HORVÁTH G., LENGYEL S. (2011) Bridges as optical barriers and population disruptors for the mayfly *Palingenia longicauda*: An overlooked threat to freshwater biodiversity? *Journal of Insect Conservation*, 15, 823–832
- MCGHEE R. (1984) Contact between native North Americans and the medieval Norse: a review of the evidence. *American Antiquity*, 49, 4–26

- MCGOVERN T. H. (1991) Climate, correlation, and causation in Norse Greenland. *Arctic Anthropology*, 28, 77–100
- MCGOVERN T. H. (1997) Death in Norse Greenland. *Science*, 275, 924–926
- MCGOVERN T. H., VÉSTEINSSON O., FRIDRIKSSON A., CHURCH M., LAWSON I., SIMPSON I. A., EINARSSON A., DUGMORE A., COOK G., PERDIKARIS S., EDWARDS K. J., THOMSON A. M., ADDERLEY W. P., NEWTON A., LUCAS G., EDVARDSSON R., ALDRED O., DUNBAR E. (2007) Landscapes of Settlement in Northern Iceland: Historical Ecology of Human Impact and Climate Fluctuation on the Millennial Scale. *American Anthropologist*, 109, 27–51
- MEEUS J. (1998) *Astronomical Algorithms*. 2nd edition, Willmann-Bell Inc., Richmond, VA, USA
- MEYER-ROCHOW V. B. (1981) Electrophysiology and histology of the eye of the bumblebee *Bombus hortorum*. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 11, 123–153
- MOLNÁR Á., HEGEDŰS R., KRISKA G., HORVÁTH G. (2011) Effect of cattail (*Typha* spp.) mowing on water beetle assemblages: changes of environmental factors and the aerial colonization of aquatic habitats. *Journal of Insect Conservation*, 15, 389–399
- MUHEIM R. (2011) Behavioural and physiological mechanisms of polarized light sensitivity in birds. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 366, 763–771
- NEUBERGER H. (1950) Arago's neutral point: a neglected tool in meteorological research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 31, 119–125
- OGILVIE A. E. J., BARLOW L. K., JENNINGS A. E. (2000) North Atlantic climate c. ad. 1000: Millennial reflections on the Viking discoveries of Iceland, Greenland and North America. *Weather*, 55, 34–45
- OGILVIE A. E. J., WOOLLETT J. M., SMIAROWSKI K., ARNEBORG J., TROELSTRA S., PÁLSDÓTTIR A., MCGOVERN T. H. (2009) Seals and Sea Ice in Medieval Greenland. *Journal of the North Atlantic*, 2, 60–80
- ORLOVE B. (2005) Human adaptation to climate change: a review of three historical cases and some general perspectives. *Environmental Science & Policy*, 8, 589–600
- PAWSON S. M., BADER M. K. F. (2014) LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. *Ecological Applications*, 24, 1561–1568
- PEDERSEN E. S. (1955) The S.A.S. Transatlantic Flights. *Journal of Navigation*, 8, 138–144
- PEDERSEN E. S. (1958) Airline Navigation in Polar Areas. *Journal of Navigation*, 11, 356–360

- PILCHER C. W. T., SEXTON D. B. (1993) Effects of the gulf war oil spills and well-head fires on the avifauna and environment of Kuwait. *Sandgrouse*, 15, 6–17
- PHILIPSBORN A., LABHART T. (1990) A behavioural study of polarization vision in the fly, *Musca domestica*. *Journal of Comparative Physiology A*, 167, 737–743
- POMOZI I., HORVÁTH G., WEHNER R. (2001a) How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: fullsky measurements and implications for animal orientation. *Journal of Experimental Biology*, 204, 2933–2942
- POMOZI I., GÁL J., HORVÁTH G., WEHNER R. (2001b) Fine structure of the celestial polarization pattern and its temporal change during the total solar eclipse of 11 August 1999. *Remote Sensing of Environment*, 76, 181–201
- PÖRTNER R. (1983) *A viking kaland*. Kossuth Kiadó
- PROSCH T., HENNINGS D., RASCHKE E. (1983) Video polarimetry: A new imaging technique in atmospheric science. *Applied Optics*, 22, 1360–1363
- PUCHALSKA J. K. (2015) Vikings Television Series: When History and Myth Intermingle. *The Polish Journal of the Arts and Culture*, 15, 89–106
- RAMSKOU T. (1967): Solstenen. *Skalk*, 2, 16–17
- REID S. F., NARENDRA A., HEMMI J. M., ZEIL J. (2011) Polarized skylight and the landmark panorama provide night-active bull ants with compass information during route following. *Journal of Experimental Biology*, 214, 363–370
- RIBEIRO S., MOROS M., ELLEGAARD M., KUIJPERS A. (2012) Climate variability in West Greenland during the past 1500 years: evidence from a high-resolution marine palynological record from Disco Bay. *Boreas*, 41, 68–83
- RICH C., LONGCORE T. (eds.) (2006) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press. Washington. Covelo. London
- ROPARS G., GORRE G., LE FLOCH A., ENOCH J., LAKSHMINARAYANAN V. (2012) A depolarizer as a possible precise sunstone for Viking navigation by polarized skylight. *Proceedings of the Royal Society A*, 468, 671–684
- ROPARS G., LAKSHMINARAYANAN V., LE FLOCH A. (2014) The sunstone and polarised skylight: ancient Viking navigational tools? *Contemporary Physics*, 55, 302–317
- ROSLUND C., BECKMAN C. (1994) Disputing Viking navigation by polarized skylight. *Applied Optics*, 33, 4754–4755
- ROZENBERG G. V. (1966) *Twilight*. Plenum. New York



- SAWATZKY H. L., LEHN W. H. (1976) The Arctic Mirage and the Early North Atlantic. *Science*, 192, 1300–1305
- SCHAEFER B. E. (1997) Vikings and Polarization Sundials. *Sky and Telescope*, 93, 91–94
- SCHWIND R. (1985) Sehen unter und über Wasser, Sehen von Wasser. *Naturwissenschaften*, 72, 343–352
- SCHWIND R. (1991) Polarization vision in water insects and insects living on a moist substrate. *Journal of Comparative Physiology A*, 169, 531–540
- SCHWIND R., HORVÁTH G. (1993) Reflection-polarization pattern at water surfaces and correction of a common representation of the polarization pattern of the sky. *Naturwissenschaften*, 80, 82–83
- SEKERA Z. (1957) Light Scattering in the Atmosphere and the Polarization of Sky Light. *Journal of the Optical Society of America*, 47, 484–490
- SHUKUROV A. Kh., SHUKUROV K. A. (2006) Field Studies of the Correlation between the Atmospheric Aerosol Content and the Light Polarization at the Zenith of the Daytime Sky. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 42, 68–73
- SIPŐCZ B., HEGEDŰS R., KRISKA G., HORVÁTH G. (2008) 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. *Applied Optics*, 47, H1–H10
- SKALWOLD E. A., BASSETT W. A. (2016) Blue Minerals: Exploring Cause & Effect. *Rocks & Minerals*, 91, 61–77
- SMITH K. P. (1995) Landnám: the settlement of Iceland in archaeological and historical perspective. *World Archaeology*, 26, 319–347
- SØLVER C. V. (1953) The Discovery of an Early Bearing-Dial. *Journal of Navigation*, 6, 294–296
- SØLVER C. V. (1954) *Vestervejen. Om Vikingernes Sejlads*. Weilbach Co. Copenhagen
- SOON W., BALIUNAS S. (2003) Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years. *Climate Research*, 23, 89–110
- SPIETH H. T. (1940) Studies on the biology of the Ephemeroptera II. The nuptial flight. *Journal of the New York Entomological Society*, 48, 379–390
- STEVANI C. V., PORTO J. S., TRINDADE D. J., BECHARA E. J. H. (2000a) Automotive clearcoat damage due to oviposition of dragonflies. *Journal of Applied Polymer Science*, 75, 1632–1639

- STEVANI C. V., FARIA D. L. A., PORTO J. S., TRINDADE D. J., BECHARA E. J. H. (2000b) Mechanism of automotive clearcoat damage by dragonfly eggs investigated by surface enhanced Raman scattering. *Polymer Degradation and Stability*, 68, 61–66
- SUHAI B., HORVÁTH G. (2004) How well does the Rayleigh model describe the E-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? A full-sky polarimetric study. *Journal of the Optical Society of America A*, 21, 1669–1676
- SZÁZ D., HERCZEG T. (2013) A bögölyök (Tabanidae) polarotaktikus viselkedésével kapcsolatos tudományos ismeretek összefoglalása. *Tájökológiai Lapok*, 11, 183–192
- SZÁZ D., HORVÁTH G., BARTA A., ROBERTSON B., FARKAS A., EGRI Á., TARJÁNYI N., RÁCZ G., KRISKA G. (2015) Lamp-lit bridges as dual light-traps for the night-swarming mayfly, *Ephoron virgo*: Interaction of polarized and unpolarized light pollution. *Public Library of Science ONE*, 10, article. no. e0121194
- SZÁZ D., MIHÁLYI D., FARKAS A., EGRI Á., BARTA A., KRISKA G., ROBERTSON B., HORVÁTH G. (2016a) Polarized light pollution of matte solar panels: Anti-reflective photovoltaics reduce polarized light pollution but benefit only some aquatic insects. *Journal of Insect Conservation*, 20, 663–675
- SZÁZ D., FARKAS A., BLAHÓ M., BARTA A., EGRI Á., KRETZER B., HEGEDÜS T., JÄGER Z., HORVÁTH G. (2016b) Adjustment errors of sunstones in the first step of sky-polarimetric Viking navigation: Studies with cordierite, tourmaline and calcite crystals. *Royal Society Open Science*, 3, article no. 150406
- SZÁZ D., FARKAS A., BARTA A., KRETZER B., EGRI Á., HORVÁTH G. (2016c) North error estimation based on solar elevation errors in the third step of sky-polarimetric Viking navigation. *Proceedings of the Royal Society A*, 472, article no. 20160171
- SZÁZ D., FARKAS A., BARTA A., KRETZER B., BLAHÓ M., EGRI Á., SZABÓ G., HORVÁTH G. (2017) Accuracy of the hypothetical sky-polarimetric Viking navigation versus sky conditions: revealing solar elevations and cloudinesses favourable for this navigation method. *Proceedings of the Royal Society A*, 473, article no. 20170358
- SZENTKIRÁLYI F., SZALAY L. (2001) A teljes napfogyatkozás hatása a háziméhek viselkedésére és gyűjtési aktivitására 1999. aug. 11-én. *Állattani Közlemények*, 86, 115–136
- TAYLOR E. G., MAY W. E., MOTZO R. B., LETHBRIDGE T. C. (1954) A Norse Bearing-Dial? *Journal of Navigation*, 7, 78–84

- TEAGUE M. R. (1980) Image analysis via the general theory of moments. *Journal of the Optical Society of America*, 70, 920–930
- TERCEDOR J. A., ORTEGA A. S. (eds.) (1991) *Overview and Strategies of Ephemeroptera and Plecoptera*. The Sandhill Crane Press. Gainesville. Florida
- THIRSLUND S. (1991) A presumed sun compass from Narsarsuaq. In: VEBÆK C. L.: *The Church Topography of the Eastern Settlement and the Excavation of the Benedictine Convent at Narsarsuaq in the Uunartoq Fjord*. Meddelelser om Grønland. Bioscience. Geoscience. Man & Society. 14. The Commission for Scientific Research. Grønland. pp. 65–71
- THIRSLUND S. (1993) The Discovery of an Early Bearing-Dial. Further Investigations. *Journal of Navigation*, 46, 33–48
- THIRSLUND S. (1997) Sailing Directions of the North Atlantic Viking Age (from about the year 860 to 1400). *Journal of Navigation*, 50, 55–64
- THIRSLUND S. (2001) *Viking Navigation. Sun-compass guided Norsemen first to America*. Humlebæk. Denmark
- TURCSÁNYI I., SZENTKIRÁLYI F., BERNÁTH B., KÁDÁR F. (2009) Flight of mayflies towards horizontally polarised and unpolarised light. *Aquatic Insects*, 31, 301–310
- TUXBURY S. M., SALMON M. (2005) Competitive interactions between artificial lighting and natural cues during seafinding by hatchling marine turtles. *Biological Conservation*, 121, 311–316
- VÉSTEINSSON O., MCGOVERN T. H., KELLER C. (2002) Enduring Impacts: Social and Environmental Aspects of Viking Age Settlement in Iceland and Greenland. *Archaeologia Islandica*, 2, 98–136
- VILHJÁLMSSON Þ. (1997) Time and Travel in the Old Norse Society. In: POSTER C., UTZ R. (ed.) *Disputatio. An International Transdisciplinary Journal of the Late Middle Ages*. Vol. 2. Constructions of Time in the Late Middle Ages. Northwestern University Press. Evanston. Illinois. pp. 89–114
- VILHJÁLMSSON Þ. (1999) *The Navigation and Vinland*. Approaches to Vinland: a conference on the written and archaeological sources for the Norse settlements in the North-Atlantic region and exploration of America. Reykjavík. 9–11. August 1999
- VOSS K. J., LIU Y. (1997) Polarized radiance distribution measurements of skylight. I. System description and characterization. *Applied Optics*, 36, 6083–6094

- WALKER J. (1978) The Amateur Scientist: More about polarizers and how to use them, particularly for studying polarized sky light. *Scientific American*, 238, 132–136
- WARRANT E. J., KELBER A., GISLÉN A., GREINER B., RIBI W., WCISLO W. T. (2004) Nocturnal vision and landmark orientation in a tropical halictid bee. *Current Biology*, 14, 1309–1318
- WATERMAN H. (1981) Polarization sensitivity. In: AUTRUM H. (ed.): *Handbook of Sensory Physiology*. Springer Verlag. Berlin. pp. 281–469
- WEHNER R. (1976) Polarized-light navigation by insects. *Scientific American*, 235, 106–115
- WEHNER R. (1997) The ant's celestial compass system: spectral and polarization channels. In: LEHRER M. (ed.) *Orientation and communication in Arthropods*. Birkhäuser Verlag. Basel. pp. 145–185
- WILD W., FROMME B. (2007) Der Sonnenstein der Wikinger. Navigation mit polarisiertem Himmelslicht. *Praxis der Naturwissenschaften*, 56, 33–38
- WILDERMUTH H. (1998) Dragonflies recognize the water of rendezvous and oviposition sites by horizontally polarized light: a behavioural field test. *Naturwissenschaften*, 85, 297–302
- 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

### **Egyéb források:**

hajózzunk.hu [[www.hajozzunk.hu](http://www.hajozzunk.hu)]

Magyar Földtani és Geofizikai Intézet honlapja [[mfgi.hu](http://mfgi.hu)]

NASA LANCE/ESDIS MODIS Images [<http://earthdata.nasa.gov/data/nrt-data/rapid-response>]

United States Naval Observatory honlapja [[www.usno.navy.mil](http://www.usno.navy.mil)]

# Köszönetnyilvánítás

Az értekezésemben leírt eredmények eléréséért nyújtott segítségükért köszönet illeti

- témavezetőimet, Prof. Horváth Gábort és dr. Kriska Györgyöt,
- közvetlen kollégámat az MTA ÖK Duna-kutató Intézetből: dr. Egri Ádámot,
- kollégáimat a Környezetoptika Laboratóriumból: dr. Barta Andrást, dr. Bernáth Balázst, dr. Blahó Miklóst, dr. Hegedüs Ramónt, Kretzer Balázst, Mászáros Ádámot, Száz Dénest,
- az ELTE Lágymányosi Planetárium használatának engedélyezéséért Prof. Petrovay Kristófot és a használatban nyújtott technikai segítségéért Tarczay-Nehéz Dórát,
- megjelent cikkeim ismeretlen bírálóit.

Kutatómunkám feltételeinek biztosításáért köszönetet mondok a következő támogatásokért:

- MTA Fiatal Kutatói pályázat (2014–2017),
- dr. Horváth Gábor kutatási pályázata (OTKA K-105054, 2012-2016),
- dr. Egri Ádám kutatási pályázata (NKFIH OTKA PD-115451, 2016-2019),
- Magyar Templeton Program (2016),
- Nemzet Fiatal Tehetségeiért Ösztöndíj (NTP-NFTÖ-18-B-0074, 2018).

# Összefoglalás

Biológiai, földrajzi, meteorológiai és légköroptikai tudományterületeket érintő doktori értekezésem fejezeteit a fénypolarizáció köti össze. Kimutattuk, hogy az *Ephoron virgo* és *Caenis robusta* kérészek kevésbé vonzódnak a függőlegesen poláros, mint a vízszintesen poláros és polarizálatlan fényhez. E viselkedés jelentősége abban áll, hogy a kérészek vízfelszíni repülésükkor a vízszintesen poláros fényt tükröző vízfelszín felett maradnak, a függőlegesen vagy nem vízszintesen poláros fényt tükröző, rajzásuk és petezésük szempontjából alkalmatlan partrészekről pedig visszafordulnak.

Feltártuk, hogy részleges holdfázis idején, a napkeltét megelőzően vagy napnyugta után az égbolt polarizációs mintázata átmenetileg rendellenes, ilyenkor ugyanis a légkörben szórt napfény és holdfény közel egyforma intenzitása miatt az égbolt polarizációs mintázata tükörszimmetria-tengelyének iránya a szoláris-antiszoláris és a lunáris-antilunáris meridián között folyamatosan változik. Megmutattuk, hogy az égbolt polarizációs mintázata akkor is módosul, amikor a légkörben erdőtűz okozta füst terjed szét. A holdfényes szürkületi égbolt rendellenes polarizációátmenete és a füsttel szennyezett égbolt polarizációja egyaránt hatással lehet a polarizációérzékeny állatok térbeli tájékozódására.

Kutatómunkám során mértem az égboltfény polarizációján alapuló hipotetikus viking navigáció 2. lépésének pontosságát is. Amikor egy viking navigátor napköves méréséhez meteorológiai okok miatt csak a Naptól és egymástól távoli tiszta égboltpontokat tud választani, akkor a mérőpontokon átmenő égi főkörök feje ide-odaforogtatásával lesz csak képes összekötni, miáltal a 2. lépés hibája megnő. A nappozícióbecslés pontosabb, ha a kiválasztott égi mérőpontok egymáshoz és a Naphoz is közelebb esnek, és ha e három égi pont magasabban van az égbolton. Nagyobb napeleváció esetén pontosabb a földrajzi északi irány becslése is, melynek hibája nő, ha az égi mérőpontok Naptól mért szögtávolsága és az általuk meghatározott égi főkörök által bezárt szög is nagyobb.

Eredményeink alapján kijelenthető, hogy a felhőtlen szürkületi időben használható alkonyfény-iránytű pontossága vetekszik egy mai mágneses zsebiránytű pontosságával, ami megerősíti az újonnan feltételezett viking navigációs eszköz létjogosultságát. Rámutattunk ugyanakkor arra, hogy a használatkor vétett tájékozódási hibák nagysága a meteorológiai helyzettől és a navigátor személyétől is függ, az egyént jellemző gyakorlottság és módszer ugyanis különböző hibalehetőségeket rejt magában.

# Summary

In the first part of my Ph.D. dissertation, I present the results of two field experiments, in which we studied the behaviour of polarotactic mayflies. We found that *Ephoron virgo* and *Caenis robusta* mayflies are less attracted to vertically polarized light than to horizontally polarized and unpolarized one. We pointed out that this polarotactic behaviour helps mayflies to stay above highly and horizontally polarized water surfaces and to avoid unsuitable habitats.

We also found that the celestial polarization pattern is temporarily irregular at partial moon immediately after sunset or before sunrise, because the intensities of scattered sunlight and moonlight are comparable. In that case the symmetry axis of sky polarization is intermediate in such a way that it switches from the lunar-ant lunar meridian to the solar-antisolar meridian prior to sunrise, and *vice versa*, from the solar-antisolar meridian to the lunar-ant lunar meridian after sunset. We also found that the sky polarization pattern, which is necessary for orientation of many polarization-sensitive animal species, can change drastically when the sky is covered by forest fire smoke, also in case of sunlit and moonlit skies.

In the second part of my Ph.D. work, I tested the accuracy of the second step of the sky-polarimetric Viking navigation method. We pointed out that if a Viking navigator cannot choose two nearby sky points for the sunstone analysis because of foggy or cloudy meteorological conditions, he has to determine the celestial polarization characteristics at distant celestial points. In this case he has to rotate his head a lot, which leads to inaccuracies in the estimation of angles and directions on the sky-dome. We found that the navigator can determine the above-horizon intersection of the two celestial great circles more easily, if the two selected sky points are closer to each other and the sun, and these three celestial points have higher elevations. We also found that the most precise North determination happened at the highest solar elevation and the inaccuracy of this navigation method can be higher when the two selected celestial points are far from the sun and the angle between the planes of the two celestial great circles increases.

We successfully tested the twilight-board, which is optimized for use when the sky is clear and the sun is close to the horizon. We found that the accuracy of this method highly depends on the meteorological conditions, the azimuth and elevation of the sun and the estimation method of a verdant or a qualified navigator.