

# MENNYIRE VALÓSÁGHŰEK A FESTMÉNYEK VILLÁMAI?

– festett és valódi villámok alakjának összehasonlítása és pszichofizikai vizsgálata

Horváth Gábor, Stromp Mark, Farkas Alexandra, Száz Dénes  
ELTE, Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium

Barta András  
Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Az emberek a kezdetektől fogva igyekeztek megörökíteni a körülöttük lévő világot, többek között barlangrajzok, illetve múzeumokban kiállított rézkarcok, festmények vagy rajzok formájában, amely műalkotásokat néhány esetben már természettudományi szem-

Kutatásunkat az Emberi Erőforrások Minisztérium ÚNKP-17-3 számú pályázata támogatta, amit Száz Dénes kapott az Új Nemzeti Kiválósági Program keretében. Köszönjük Kretzer Balázs kiértékelésében nyújtott segítségét. Hálásak vagyunk a következő amatőr természetfotósoknak az általuk készített számos villámfényképért: Bakos Liza, Bíró Zsófia, Botor Sándor, Csenkey Balázs, Damásdi Eszter, Gaál László, Goda Zoltán, Michael Großmann, Jónás Károly, Jubász Zoltán, Landy-Gyebnár Mónika, Mibályi Dávid, Nagy Olivér, Nagy Zsuzsanna, Őri Ágnes, Polacsek Gergő, Szabó Ádám, Szűcs Péter, Teplíczy Csilla, Timár Gábor, Rajfal Schmall, Ujj Ákos, Várbalmi Sándor. Köszönjük a tíz tesztalanynak a pszichofizikai mérésekbeli közreműködést.



Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa. Évtizedek óta aktív tudományos ismeretterjesztői munkát is folytat előadások és cikkek formájában.



Stromp Mark 2014-ben és 2017-ben készítette biofizikai témájú BSc szakdolgozatát és MSc diplomamunkáját az ELTE Biológiai Fizika Tanszékén Meszéna Géza és Horváth Gábor témavezetésével.



Farkas Alexandra 2005 óta foglalkozik légköroptikai jelenségek megfigyelésével, az ELTE Környezetoptika Laboratóriuma munkájába 2012-ben kapcsolódott be. 2014–2017-ig az MTA Ökológiai Kutatóközpont Duna-kutató Intézet tudományos segédmunkatársa és kommunikációs felelőse volt. Tudománynpszerűsítő munkája révén beválasztották az 50 tehetséges magyar fiatal közé. 2017-től a Szent István Egyetem tartalomnedzsere, 2018-ban a Nemzeti Tehetség Program tudományos védnöke.

pontból is elemeztek. Zerefos és munkatársai [1] például számos festett és valódi napkelte és naplemente színeit vizsgálva megállapították, hogy nagyobb vulkánkitörések után a magasabb légköri aeroszol koncentráció miatt vörösebb színek jelennek meg az égbolton. Lee és Fraser [2] könyvükben egy teljes fejezetet szenteltek a régi szivárványábrázolások hibáinak ismertetésére. Tape és munkatársai [3], Farkas és munkatársai [4] és Seidenfaden [5] rámutattak az általuk elemzett, légköroptikai jelenségeket ábrázoló metszetek tévedéseire, amelyeket az alkotó stílusa, vagy az adott korban jellemző társadalmi hatások és vallási hiedelmek is eredményezhettek.

Számos festő – többek között Joseph Mallord William Turner (1775–1851), Eugene Delacroix (1798–1863) vagy a kortárs Toni Grotte (1960–) – örökölte meg az egyik leglátványosabb légköri jelenséget, a villámlást. A fotózás hajnala előtt készült festményeket szemlélve azonban feltűnik, hogy azokon a villámok furcsának tűnő, lépcsőzetes cikk-cakk alakzatban szelik át az eget. Amint arra Nasmyth [6] rámutatott, ezek a pontatlan ábrázolások vélhetően azokat az ókori görög–római ábrázolásokat utánozhatták, amelyeken Zeusz/Jupiter isten kezében ilyen alakú villám jelenik meg.



Száz Dénes 2013-ban végzett biofizika mesterszakon az ELTE-n. A Biológiai Fizika Tanszéken idén fog doktorálni. Kutatásai felölelik a dunavirág kérészek kivilágtott hidaknál történő fénycsapdázódását, a vikingek égpolárizációs navigációját és a poláros fényszennyezést. 2017-től az ELTE szombathelyi Savaria Egyetemi Központjának fényszennyezés-kutatásaiban is részt vesz, az éjjeli fényszennyezés csillagászati és ökológiai vonatkozásaival foglalkozik. OFKD I. helyezést és Ernst Jenő biofizikai pályadíjat is nyert.



Barta András az ELTE-n végzett fizikusként, majd ugyanott szerzett PhD-fokozatot biofizikából a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. A bio- és környezetoptikával kapcsolatos alap kutatásokon kívül ipari műszerek, elsősorban minőségellenőrző eszközök fejlesztésével foglalkozik az Estrato Kutató és Fejlesztő Kft. vezetőjeként. Számos kutatásfejlesztési pályázat előkészítésében és megvalósításában vett és vesz részt.

Az 1880-as években *William Nicholson Jennings* (1860–1946), a *Pennsylvania Railroad* fotósát is foglalkoztatta a kérdés, hogy e cikk-cakk alakú villámok vajon mennyiben hasonlítanak a valódiakra. Célul tűzte ki az első, bizonyító erejűnek számító villámfotók elkészítését [7]. Első próbálkozásai sikertelenek voltak, mivel eszközei nem voltak elég érzékenyek a rendkívül rövid ideig fölvilanó villámok megörökítésére. Később azonban számos lemezes fényképezőgéppel készült fotóval igazolta a villámágak formai sokféleségét, és sosem talált olyan cikk-cakk villámágakat, amelyeket a festők korábbi festményeiken ábrázoltak. Bár az első villámot ábrázoló dagerrotípiát *Thomas Martin Easterly* (1809–1882) már 1847. június 18-án elkészítette [8], az első villámfotónak mai napig Jennings [9] 1882. szeptember 2-i felvételét tartják (*1. ábra*). Jennings [9] villámfotói és személyes tapasztalatai már röviddel a publikálásuk után nagy hatást gyakoroltak a meteorológiai és más természettudományos kutatásokra, mivel számos szakértő felhasználta azokat a különböző típusú villámok azonosítására és a zivatarokat ábrázoló korábbi festmények hibáinak leleplezésére [7].

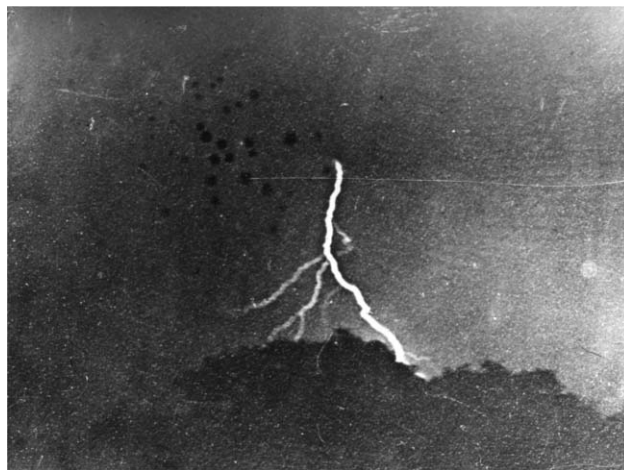
Jennings úttörő munkája által inspirálva, kutatócsoportunk számszerűen kívánta vizsgálni, hogy a festményeken ábrázolt villámok mennyire valóság-hűek [10]. Kutatómunkánk során saját fejlesztésű szoftverünk használatával 100 festett és 400 valódi villám morfológiai jellemzőit mértük és hasonlítottuk össze. Az így kapott eredményeink pontosabb megértéséhez 10 tesztszemély közreműködésével pszichofizikai kísérlet sorozatot is végeztünk, amiben a tesztalanyok feladata a monitoron pillanatszerűen felvilanó fényképeken látszó villámok ágszámának becslése volt.

## Vizsgálati módszerek

### Villámok morfológiájának számszerű vizsgálata

A Világhálóról összesen 100 festett villámot gyűjtöttünk az 1500–2015 közötti időszakból. Habár 10 villámfestmény születésének évét nem tudtuk kideríteni, ezeket is elemzésre érdemesnek találtuk. Összesen 400 valódi villámról kaptunk fényképet számos amatőr fotóstól (lásd a köszönetnyilvánítást az előző oldalon). A vizsgált villámfestmények adatait [11] tartalmazza.

A festett és valódi villámok képeinek kiértékeléséhez az AlgoNet (<http://www.estrato.hu/algonet>) szoftvert használtuk, ami egy képfeldolgozó algoritmusok egyszerű kezelését lehetővé tevő keretrendszer. Először minden vizsgált villámképet egységesen 1000 képpont szélességűre méreteztünk, hogy a későbbi elemzések során egymással összehasonlíthatók legyenek. Ezt követően fekete-fehér bináris képet hoztunk létre a villám fő- és mellékágaiból. E képeken a háttérhez és a villámhoz tartozó képpontokat rendre 0 (fekete) és 1 (fehér) számkóddal láttuk el. A villám kezdőpontjából a végpontjába mutató egyenes vonalat kézzel húztuk meg.

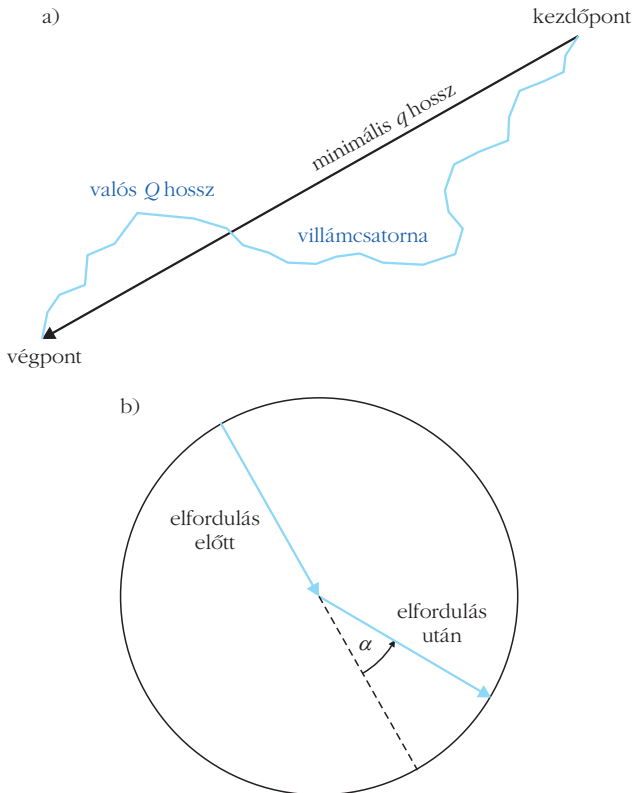


1. ábra. Az első villámfotó, William Nicholson Jennings [9] 1882. szeptember 2-i felvétele.

Ahhoz, hogy a villám főágát meghatározzuk, a színes kép zöld színcsatornáját választottuk, mivel a képalkotó érzékelő Bayer-szűrőjében kétszer annyi zöld képpont van, mint kék vagy piros. Első lépésként egy megfelelő küszöbértékkel kiemeltük a legvilágosabb képpontokat, amivel kiszűrtük a mellékágak nagy részét, miközben a főág zöme megmaradt. Ezt követően morfológiai felfújást végeztünk egy kör alakú magfüggvénnyel (kernellel), ami a főág képpontjai közötti hézagokat töltötte fel. A főág vázát egy 4-szomszédos vázosító, azaz gráfosító (a továbbiakban szkeletonizáló) eljárással képeztük [12]. Végül a villámfőág bináris képét az eredeti fotóra helyezve ellenőriztük, hogy az algoritmus helyesen végezte-e el a főág meghatározását, és kézzel javítottuk a hibás részeket.

A villám mellékágainak meghatározásához ismét a színes kép zöld színcsatornáját használtuk. Ezen zajszűrést alkalmaztunk egy keskeny és egy széles Gauss-függvénnyel, majd az utóbbival szűrt képet elosztottuk az előbbivel szűrt képpel, vagyis az utóbbi minden egyes képpontértékét elosztottuk az előbbi megfelelő képpontértékével. Erre azért volt szükség, mert a fényes villámfőág gyakran túlexponált volt, és egy fokozatosan csökkenő intenzitású halo vette körül. Ennek következményeként a széles Gauss-függvénnyel való szűrés a főág megjelenését nem változtatta meg jelentősen, míg a mellékágak halo nélküliek és vékonyabbak lettek, azaz intenzitásukat a Gauss-szűrés jelentősen csökkentette. Miután a két képet elosztottuk egymással, a főág intenzitása jelentősen különbözött a mellékágakétól. Ezután egy megfelelően választott intenzitásküszöb-értékkel leválasztottuk a kapott képről a mellékágakat, majd a korábbi 4-szomszédos szkeletonizálást alkalmaztuk. Végül a mellékágak bináris képét az eredeti fotóra helyezve ellenőriztük, hogy az algoritmus helyesen végezte-e el azok meghatározását, és kézzel javítottuk a hibás részeket.

A villám alakjának (morfológiájának) jellemzésére három mérőszámot definiáltunk a kapott bináris (fekete = háttér, fehér = fölsimert villám) villámképeken:



2. ábra. a) Egy villám kezdő- és végpontja közti  $q$  minimális hosszának és  $Q$  valós hosszának definíciója, ahol a relatív hossz  $r = q/Q$ . b) A villámcsatorna  $\alpha$  elfordulási szögének definíciója.

1. Relatív hosszúság:  $r = q/Q$ , ahol  $q$  a főág kezdő- és végpontja közti, képpontban mért távolság,  $Q$  pedig a főág tényleges hossza (= a főághoz tartozó összes képpont száma, 2.a ábra). A  $q$  és  $Q$  értékeket a bináris villámképek megfelelő fehér képpontjainak megszámlálásával kaptuk.

2. Ágak  $N_a$  száma. Ennek meghatározásához a mellékágak bináris képein 8-szomszédos szkeletonizálást végeztünk. Az így elvékonyított villámú kép minden pontjának 8 szomszédjára a következők teljesültek: (i) Az ág végpontjában lévő képpontnak pontosan 1 szomszédos képpontja volt fehér. (ii) Az ág egy nem elágazó szakaszán lévő fehér képpontnak pontosan 2 fehér képpont szomszédja van. (iii) Elágazás esetén az elágazási pontban lévő fehér képpontnak 2-nél több fehér képpont szomszédja van. (iv) A háttér adó fekete képpontok 0–8 fehér képponttal lehetnek szomszédosak. E tulajdonságok alapján lineáris szűrést végeztünk az elvékonyított villámú képen egy  $3 \times 3$ -as magfüggvényvel, ahol a középső képpontot 10-szeres súllyal, a 8 határoló képpontot pedig 1-szeres súllyal vettük figyelembe. E szűrés egy olyan képet eredményezett, ahol a háttérhez rendelt súlyérték 0–8 között változhatott, az ágak végpontjának súlyértéke 11 lett, a nem elágazó szakaszok 12-es súlyt kaptak, míg az elágazások súlyértéke nagyobb volt, mint 12. Ezt követően a megfelelő küszöbérték alkalmazásával egy olyan bináris képet kaptunk, ahol csak az elágazások rendelkeztek 0-tól eltérő súllyal. Megjegyzendő azonban, hogy e folyamat után egy elágazás-

hoz egynél több nullától különböző súlyú képpont is tartozhatott. Ezért ahelyett, hogy egyszerűen megszámloltuk volna a nem nulla súlyú képpontokat, a közöttük lévő kapcsolatok számát határoztuk meg a bináris képeken. Ez az érték adta meg a főághoz tartozó mellékágak számát.

3. Végül a villámfőág cikk-cakosságát vizsgáltuk, azaz meghatároztuk a főághoz tartozó azon képpontok számát, amelyek egy adott  $\alpha$  szögben fordulnak el (2.b ábra). Ehhez a villám főágát tartalmazó bináris képen 4-szomszédos szkeletonizálást végeztünk. Minden képpontra meghatároztuk az elfordulás  $\alpha$  szögét a SLOW sarokdetektáló algoritmussal, amely a FAST (*Features from Accelerated Segment Test*) sarokdetektáló algoritmus erősen optimalizálatlan általánosítása [13]. Definiáltunk egy adott sugarú 8-szomszédos kört (azaz a körvonalhoz tartozó képpontok vagy az éleiknél vagy a sarkaiknál kapcsolódnak egymáshoz) a vizsgált főághoz tartozó képpont körül, és meghatároztuk a körszomszédos nem nulla súlyú képpontok számát a körvonal mentén. E szám a vizsgált képpontnál arányos a főág elfordulásának  $\alpha$  szögével. 5 képpontos optimalizált sugárhosszt használtunk, mert nagyobb sugarú kör alkalmazásával a körön belüli elfordulások rejtve maradnak.

## Valódi villámok ágyszámának becslése pszichofizikai kísérletben

Egy elsötétített laboratóriumban két pszichofizikai kísérletet végeztünk 20 és 53 éves kor közti 10 teszt-személlyel. Bár a vidéki lakosok gyakorlottabb villámészlelők lehetnek, mint a városiak, minden tesztalany városban élt. Képernyőn rövid időre felvillanó valódi villámok képein kellett megbecsülniük a villám ágainak  $N_a$  számát.

### 1. kísérlet

E kísérletben 60 különböző valódi villámról készült színes fénykép mutatunk egy számítógép képernyőjén. Minden fotó három eltérő időtartamig volt látható:  $\Delta t = 0,5, 0,75$  és 1 másodpercig. Ezzel szimuláltuk a valódi villámok fölvilánására jellemző rövid ( $\leq 1$  s) időtartamot, hiszen a villámok többsége nem tart tovább 1 másodpercnél [14, 15]. A tesztalany megmondta a látott villám fölismert  $N_a$  ágyszámát a kísérletvezetőnek, majd megnyomott egy billentyűt, hogy a következő villámfotót láthassa. Tehát a villámképek felvilánását maga a tesztalany irányította. Így a véletlenszerű  $\Delta t (= 0,5, 0,75, 1$  s) ideig látszó villámok 3-5 másodpercenként követték egymást. Egy kísérleti alkalom során a 60 különböző villámfotó 3 különböző  $\Delta t$  időtartamig jelent meg, véletlenszerű sorrendben. Így egy alkalommal egy tesztalany  $60 \times 3 = 180$  villámfelvételt látott, amelyek  $N_a$  ágyszámát kellett megbecsülnie.

### 2. kísérlet

E kísérletben 60 különböző valódi villám fehér vázának (1 képpont széles gráfok) fekete háttérre képei villantak föl egy képernyőn. Az 1. kísérletben

az a probléma merült fel, hogy egy adott villámképen a tesztalanyok (i) a gyakran felhőkben, növényzetből és épületekből álló strukturált környezetben először vizuálisan kellett megtalálnia a villámot, majd (ii) megbecsülnie annak  $N_a$  ágyszámát. Az (i) feladat a rendelkezésre álló rövid  $\Delta t$  időtartamból jelentős időt emésztett fel, és ezért a (ii) feladatra nem maradt elég idő. A 2. kísérlet célja ezen probléma kiküszöbölése és a villámfölvillanás jobb utánzása volt, ezért itt homogén fekete hátteret használtunk, hogy a fehér villámvázat (grádot) könnyen és azonnal fel lehessen ismerni, és így az  $N_a$  ágyszám könnyebben megbecsülhetővé vált. A 2. kísérlet minden egyéb részletében megegyezett az 1. kísérlettel.

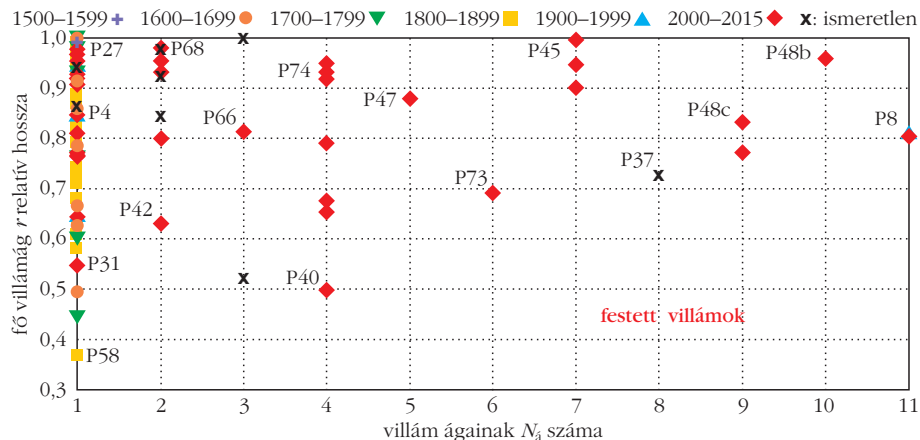
Minden kísérletet 5-ször végeztük el 10 tesztszeméllyel, személyenként 5 különböző napon. A villámképeket véletlenszerű sorrendben villantottuk fel. A mért adatok összehasonlításához a komparatív hibák módszerét alkalmaztuk, vagy statisztikai t-tesztet végeztünk az R statisztikai programcsomaggal.

## Eredmények

### Villámágyszám

A 3–6. ábrákon az  $N_a$  ágyszámokban a festett és a valódi villámok nem válnak el egymástól, az előbbieket az utóbbiak rész-halmazai. Azonban a festett villámok maximális ágyszáma 11, míg a vizsgált valódi villámoké 51. Sok nem elágazó festett (67%) és valódi (22,25%) villám van. Ha a festők egy elágazó villámot ábrázolnak, akkor az 2 (11%) vagy 4 (8%) ágú. A valódi villámok többnyire 5 (7%) vagy 3 (6,75%) ágúak. A festett és valódi villámok átlagosan 2,2 és 8,4 ággal rendelkeznek.

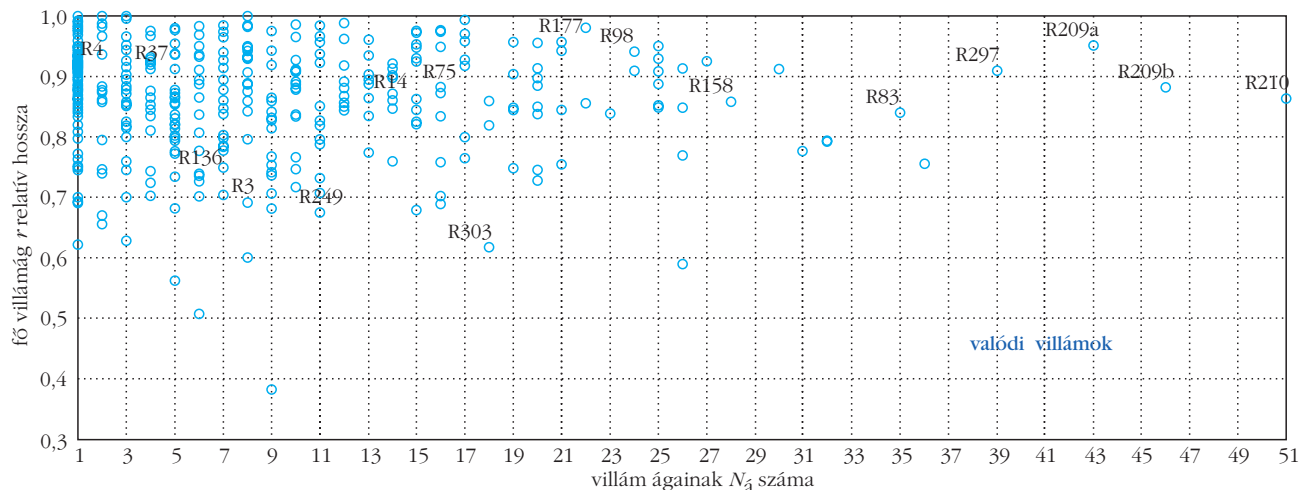
A 7. ábrából egyértelműen látszik, hogy elágazó, festett



3. ábra. 100 festett villám főágának  $r$  relatív hossza az ágak  $N_a$  száma függvényében, ahol az eltérő szimbólumok különböző évszázadokat jelölnek.  $x$ : festett villám ismeretlen dátummal. A különböző P-számú festett villámok képe a 4. ábrán látható.

4. ábra. A 3. ábra különböző P-számú festett villámainak képei.





5. ábra. 400 valódi villám főágának  $r$  relatív hossza az ágak  $N_A$  száma függvényében. 16 villám képe a 6. ábrán látható.

6. ábra. Az 5. ábra különböző R-számú valódi villámainak képei.



villámok már 1882 előtt – amikor William Nicholson Jennings elkészítette első fényképeit elágazó villámokról – is léteztek. Azonban 1882 után több (23) elágazó villámot festettek, mint korábban (10) (7. ábra). 2000 óta a többágú villámfestmények száma jelentősen megnőtt, minden valószínűség szerint a digitális fényképezőgépek gyors terjedése miatt.

#### A villámfőág relatív hossza

A 3. és 5. ábrákon látható módon – néhány villámtól eltekintve – a festett és valódi villámok főágának  $r$  relatív hossza 0,6 és 1 között van. A festett és valódi villámok átlagos  $r$ -értéke rendre 0,83 és 0,88. A 8. ábrán láthatjuk, hogy a festett villámokra vonatkozó  $r_{\text{átlag}}$  (átlagolva egy időben folyamatosan változó 100 éves időszakra) 0,73 és 0,92 között változik. 1882 előtt és után  $r_{\text{átlag}}$  0,81, illetve 0,84 körül alakul.

#### A villámfőág cikk-cakkossága

A 9. ábra szerint a villámfőág  $\alpha$  elfordulási szögének eloszlása  $\alpha_{\text{csúcs}} \neq 0$ -nál 1, 2, 3 vagy 4 csúccsal (helyi maximummal) bír  $\alpha_{\text{min}} = 0^\circ$  (nincs szögelfordulás) körül, és egy helyi minimummal az  $\alpha_{\text{min}} = 0^\circ$ -nál. Ha  $\alpha_{\text{csúcs}} > 0^\circ$  vagy  $\alpha_{\text{csúcs}} < 0^\circ$ ,

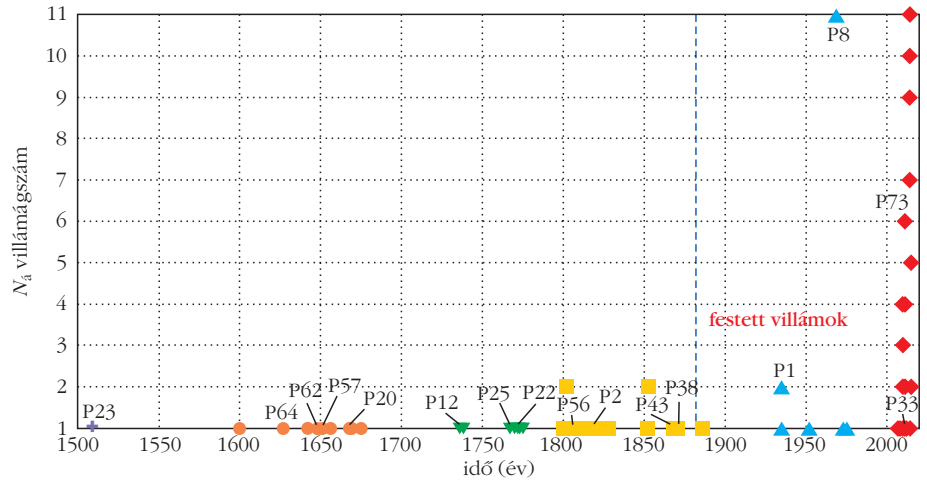
akkor a villámág tendenciózan balra, illetve jobbra fordul (2.b ábra). A 100-100 kiválasztott valódi és festett villám között több (27%) az egycsúcsú valódi villám, mint a festett (17%), ami azonban statisztikailag nem szignifikáns különbség. Ezzel szemben több (75%) kétcsúcsú festett villám van, mint valódi (68%), ami statisztikailag szintén nem szignifikáns különbség. Csak nagyon kevés 3 vagy 4 csúccsal rendelkező festett (8%) és valódi (5%) villám fordul elő. A kiválasztott 100-100 festett és valódi villám közül 83 festettnek és 73 valódi villámnak volt  $\alpha = 0^\circ$ -nál helyi minimuma. E villámok főágai megközelítőleg egyenesek, vagyis az egyenlő  $|\alpha|$  nagyságú, helyi balra ( $\alpha > 0^\circ$ ) és jobbra ( $\alpha < 0^\circ$ ) történő szögelfordulások száma megegyezik.

### Valódi villámok ágyszámbecslése

A 10. ábra a  $\Delta N = N_b - N_a$  különbséget és az  $N_b$  becült ágyszámok  $\sigma$  szórását mutatja a valódi villámok  $N_a$  ágyszámának függvényében, ha a villámképek  $\Delta t = 0,5, 0,75$  és  $1$  másodperc ideig villantak fel a képernyőn, ahol  $N_b$  a 10 tesztalány által becült villámágszám átlaga valódi villámfotókra és szkeletonizált képekre.  $N_a \leq 11$  esetén az  $N_a$  ágyszámot kissé túlbecsülték a tesztalányok ( $\Delta N > 0, N_b > N_a$ ), de e különbség statisztikailag nem szignifikáns. Ezzel szemben az  $N_a > 11$  esetben az  $N_a$  ágyszámot tendenciózan alulbecsülték ( $\Delta N < 0, N_b < N_a$ ), amely alulbecslés gyorsan (exponenciálisan) növekszik az  $N_b$  növekedésével, mind a valódi, mind pedig a szkeletonizált villámképeknél.  $N_b > 30$ -nál ez az alulbecslés szignifikáns. Az 1. táblázat szerint a szkeletonizált villámképek átlagos  $\sigma$  szórásai (4,53–4,74) statisztikailag szignifikánsan kisebbek, mint a valódi villámképekéi (6,22–6,46). Továbbá, a szkeletonizált és a valódi villámképek  $\Delta N$  átlagai nem különböznek szignifikánsan egymástól. Ezekből a következő megállapításokat tettük:

a. Ha a villámágszámok száma nem volt nagyobb 11-nél, akkor azt a tesztalányok elég pontosan becstelték meg.

b. Ha a villámágszámok száma meghaladta a 11-et, akkor a tesztalányok erőteljesen alulbecstelték azt, a tényleges és becstelt ágyszámok közti, exponenciálisan növekvő abszolút különbséggel.



7. ábra. 100 festett villám ágainak  $N_a$  száma az idő függvényében, ahol az eltérő szimbólumok különböző évszázadokat jelölnek. A függőleges szaggatott vonal 1882-et jelöli, amikor William Nicholson Jennings az első villámfényképét készítette.

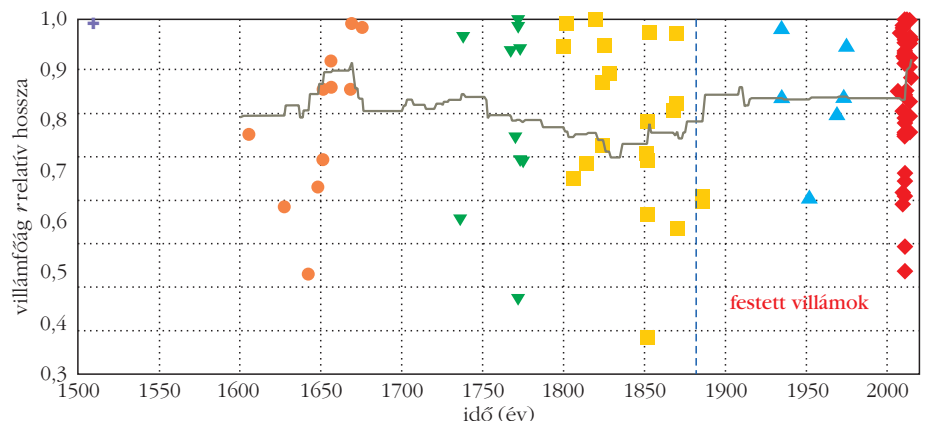
c. A villámágszámok becslése független volt a villámképek  $\Delta t$  ( $= 0,5, 0,75, 1$  s) felvillanási idejétől.

d. A szkeletonizált képeknél a tesztalányok a villámágszámokat pontosabban becstelték meg, mint a valódi villámképek esetében.

### Elemzés

Az írás elején is említettük, hogy néhány kutató korábbi vizsgálata során már számos olyan hibára mutatott rá egyes műalkotásokon (rajzokon, festményeken), amelyek természettudományos szempontból aggályosnak számítanak. Horváth és munkatársai [16, 17] például 1307 darab, történelem előtti időkből és napjainkból származó, járó lovat ábrázoló alkotást (festményt, grafikát, szobrot, bélyeget, domborművet, barlangrajzot) elemezve állapították meg, hogy az ősemberek biomechanikai szempontból jóval pontosabban ábrázolták a négylábúak járását, mint a későbbi korok művészei. Olson és munkatársai [18] korábbi elképzeléseivel szemben, Fikke és munkatár-

8. ábra. 100 festett villám főágának  $r$  relatív hossza az idő függvényében, ahol a folytonos görbe az  $r$ -érték 100 év széles, időben folytonosan eltolódó időablakra vett átlagát mutatja. Az eltérő szimbólumok különböző évszázadokat jelölnek. A függőleges szaggatott vonal 1882-et jelöli, amikor William Nicholson Jennings az első villámfényképét készítette.



1. táblázat

A becült és a tényleges villámágszám közti különbség átlaga és szórásátalaga különböző körülmények között						
	valódi villámok fényképei			valódi villámok szkeletonizált képei		
$\Delta t$ (s)	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
$\langle \Delta N \rangle$	-4,17	-4,46	-4,15	-4,09	-4,09	-4,14
$\langle \sigma \rangle$	6,46	6,22	6,31	4,70	4,74	4,53

A  $\Delta N = N_b - N_a$  különbség

$$\langle \Delta N \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N_i$$

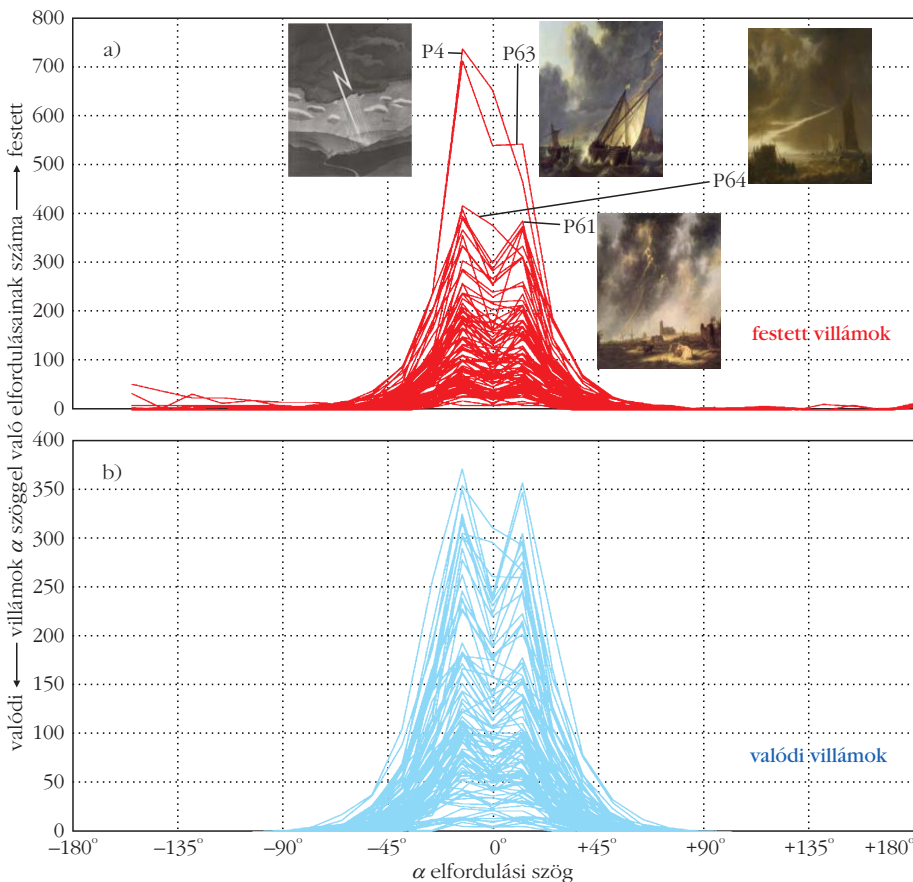
átlaga és a  $\sigma$  szórás

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i$$

átlaga a  $\Delta t = 0,5, 0,75, 1$  s főlviánási idő függvényében valódi villámok fényképei és azok szkeletonizált képei esetén, ahol  $N_a$  a valódi villámok ágainak száma,  $N_b$  a 10 tesztalany által becült villámágszám átlaga, és  $n = 60$  egy adott  $\Delta t$  mellett végzett mérések száma.

sai [19] azt feltételezik, hogy *Edward Munch* (1863–1944) híres, *Sikoly* című festményének háttérében nem vulkáni naplemente látható, hanem sokkal inkább poláris sztratoszférikus felhők festhetik színesre

9. ábra. 100 festett (a) és 100 véletlenül válogatott valódi (b) villám főága  $\alpha$  elfordulási szögének eloszlása, ahol  $\alpha = 0^\circ$  az elfordulásmentes eset,  $\alpha > 0^\circ$  és  $\alpha < 0^\circ$  balra, illetve jobbra fordulást jelent (lásd: 2.b ábra).



az égboltot. *Tape* és munkatársai [3] arra is rámutattak, hogy a halójelenségeket ábrázoló híres középkori metszetek alkalmanként komoly tudományos vitákhoz is vezettek. Nem volt egyértelmű például, hogy a néhány híres metszeten ábrázolt halójelenség – mint az 1661-es gdański halókomplexumot ábrázoló rajzon látható rejtélyes  $90^\circ$  haló, vagy az 1629-es római halókomplexumot bemutató metszeten látszó  $28^\circ$  haló – valóban létezhet-e, vagy csak a rajz készítője vétett hibát. Tudományos vitát szült az is, hogy a hatszöges szimmetriájú légköri jégkristályok mellett a természetben előfordulhatnak-e kocka alakú légköri jégkristályok is, amelyek létezésére korábban csak a metszeten ábrázolt halók alapján következtettek [20]. E régi halóábrázolások azonban olykor teljesen valóságűek, és néhány esetben az ábrázolt ritka légköroptikai tünemény első bizonyítható észlelési időpontját is rögzítik. Így van ez például a Parry-ív esetében is, amelyet első észlelője, *William Edward Parry* (1790–1855) sarkvidéki felfedező után nevezték el, hiszen e jelenséget tudomásunk szerint 1820. április 8-án az Északnyugati átjárónál tett útja során ő észlelte és örökítette meg először [21]. A poláris sztratoszférikus felhők két legkorábbi észlelése szintén egy-egy festményről és naplőbejegyzésből ismert, amit 1901-ben *Aksel Jørgensen* (1883–1957) dán festő, valamint 1903-ban *Edward Adrian Wilson* (1872–1912), a *Robert Falcon Scott* (1868–1912) által vezetett antarktiszi expedíció tagjai örökítették meg [22].

Cikkünkben számszerűen hasonlítottuk össze festett és valódi villámok morfológiáját azon kérdés megválaszolása céljából, hogy mennyire valóságűek a festményeken előforduló villámok [10]. E kérdést először *William Nicholson* Jennings vetette föl az 1880-as években. A festők villámokat leginkább a műtermükben emlékezetből festve illusztrálnak, ahelyett, hogy a szabad ég alatt rögzítenének egy villámot a vásznon egy zivatar alatt vagy rögtön azt követően (hozzá kell tenni, hogy a tubusos festék 19. századi megjelenéséig csak műteremben tudtak dolgozni, a festék kikeverése helyhez kötötte őket). Ez lehet az egyik oka a festett és valódi villámok bizonyos alaktani jellemzői közti különbségeknek. A bizonytalan memóriára való hagyatkozás helyett, a festők villámokról készült fényképekről is a vásznonra

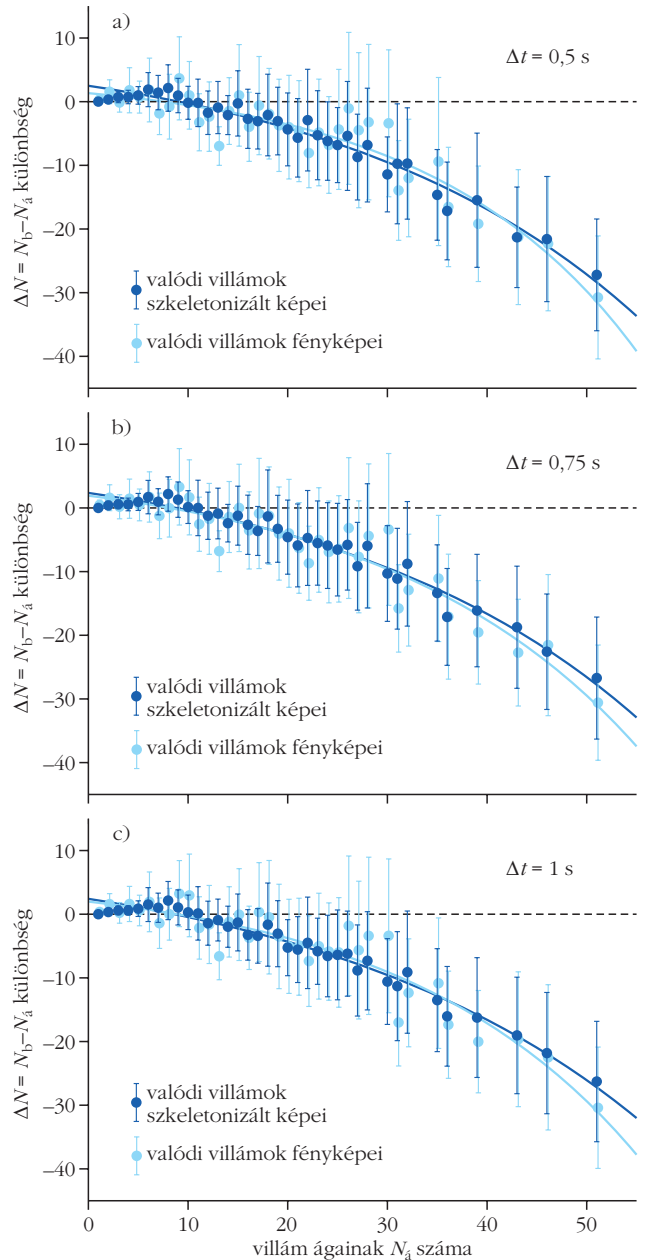
másolhatnak egy villámot. Ez is részben magyarázhatja a festett villámok ágyszámának 2000 utáni növekedését.

Mi a villámok három számszerű alaktani sajátosságát vizsgáltuk: az  $N_a$  ágyszámot, a főág  $r$  relatív hosszát és cikk-cakkosságát. Összehasonlításunk szerint, a festett és valódi villámok leginkább az  $N_b$  becslült ágyszámában különböznek: habár a festett és valódi villámok 67, illetve 22%-a nem elágazó ( $N_b = 1$ ), a vizsgált festett és valódi villámok ágyszámának maximuma 11, illetve 51 volt, és a festett elágazó villámok leggyakrabban 2-4 ággal bírtak, míg a valódi villámoknak legtöbbször 2-10 águk volt.

E különbségek lehetséges okainak megértése érdekében laboratóriumi pszichofizikai kísérleteket folytattunk. Ezekben azt találtuk, hogy a művészek azért festenek maximum 11 ágú villámokat, mert az emberek (tesztalanyok) csak akkor tudják helyesen megbecsülni a villámok ágyszámát, ha az 11-nél nem nagyobb. Ha e szám meghaladja a 11-et, akkor a villámlás rövid ( $\leq 1$  s) időtartama alatt képtelenek vagyunk pontosan megszámlolni a villámágakat. Következésképpen, fokozatosan egyre jobban alulbecsüljük a villámok ágyszámát annak növekedésével. Egy elágazó villámot nézve akkor vagyunk képesek azonnal elkülöníteni a villámágakat és megszámlolni őket, ha azok 11-nél nincsenek többen. Szakmai körökben jól ismert, hogy emberben három különböző fő számolási folyamat létezik: (i) *gyors, pontos becslés* (szubitizmus), amikor a tárgyak (például pontok, vonalak, almák, satöbbi) száma 1 és 5 között van, (ii) *számolás*, amikor a tárgyszám 6 és 10 közti, végül (iii) *becslés*, amikor e szám 10-nél nagyobb [23]. A tárgyak számának növekedésével az emberi számmeghatározás pontossága folyamatosan csökken [24].

Pszichofizikai kísérleteink eredményei szerint, ha a  $\Delta t$  fővillanási időtartam 0,5 másodperc volt, akkor a tesztalanyok a villámok ágait  $N_b = 11$ -ig helyesen voltak képesek megszámlolni, és nem volt szükséges hosszabb  $\Delta t$  e számoláshoz. 11 ág fölött azonban az ágszám helyes becsléséhez még a maximális  $\Delta t = 1$  másodperc sem bizonyult elegendőnek. Ez lehet az oka azon eredményünknek, hogy  $N_b$  független volt a villámfotók vagy -képek  $\Delta t$  ( $= 0,5, 0,75, 1$  s) fővillanási időtartamától.

A valódi villámfotók és vázósított (szkeletonizált) villámképek érzékelése közti egyetlen lényeges különbség, hogy az ágszám becslése pontosabb, ha a tesztalanyok szkeletonizált villámképekkel találkoznak. Ez a következő módon magyarázható: egy adott villámfotón a megfigyelőnek először magát a villámot kell megtalálnia a gyakran strukturált háttérben, és csak utána tudja megbecsülni a villámágyszámot. A villám megtalálásához egy rövid  $\tau$  idő kell, és az ágyszámolás csak a maradék  $\Delta t - \tau$  időtartam alatt végezhető el. Amikor szkeletonizált villámképeket mutatunk a tesztalanyoknak, akkor az egyöntetű fekete háttérrel a fehér villámvázlat (gráfot) nagyon hamar ( $\tau \ll 1$  s) észleli, miáltal elég hosszú  $\Delta t - \tau$  idő marad a villámágak számolására. Mivel  $\tau_{\text{szkeletonizált}} < \tau_{\text{valódi}}$  érthe-



10. ábra. A  $\Delta N = N_b - N_a$  különbség (pontok) valódi villámok  $N_a$  ágyszámára függvényében, ha a villámképek  $\Delta t = 0,5$  (a),  $0,75$  (b) és  $1$  másodperc (c) ideig villantak föl a képernyőn, ahol  $N_b$  a 10 tesztalany által becslült villámágyszám átlaga. Az  $N_b$  becslült villámágyszám  $\sigma$  szórását függőleges pálcikák mutatják. Világoskék: valódi villámok fényképei. Sötétkék: valódi villámok szkeletonizált képei.

tő, hogy a villámágak számának becslése pontosabb a szkeletonizált villámképek esetén, mint valódi villámfotóknál.

Amikor művészek villámokat festenek, tulajdonképpen egy sajátos pszichofizikai kísérletben vesznek részt, aminek eredményei a festett villámok. E villámok morfológiájából arra lehet következtetni, hogy az ember látórendszere milyen pontosan képes érzékelni, feldolgozni és kivonni a releváns alaktani információkat közel 1 másodpercnél nem hosszabb ideig tartó villámlásokról. E festőkkel lezajlott „művészeti pszichofizikai kísérlet” és a mi kísérletünk közti leg-



fontosabb különbség az, hogy a festők többnyire csak a villámlás után viszonylag hosszú idővel rögzítették vászonra a látott villámokat, míg kísérletünkben a tesztalanyok rögtön a képernyőn történő felvillanás után közölték a látott villámok ágszámát. Nyilván, a villámfestmények megszületésében a festő memóriája is fontos szerepet játszik. Egy ilyen kísérletben a villámfestészetet még jobban lehetne utánozni, ha a tesztalanyok egy képen látott villámágszámot csak a képernyőn történő föl-villanás után több nap múlva közölnék. Nyilvánvaló, hogy egy ilyen kísérlet – időigényessége miatt is – kivitelezhetetlen lenne.

Azon ténynek, hogy az emberek általában legfőbb 11 villámágra emlékeznek, egy további oka egyszerűen ezen ágak láthatósága lehet: a mellékágak többnyire nemcsak vékonyabbak a főágnál, hanem kisebb fényerejük is, miáltal kevésbé láthatók és feltűnők. Egy (digitális vagy fotoemulziós) fényképezőgéppel készített képen a villám mellékágai sokkal feltűnőbbek, mint amit az emberi szem retinája és látórendszere érzékelhet, majd a memória rögzíthet. A vizsgálatunkban használt valódi villámképeken előfordult maximum 51 ág minden bizonnyal alulbecsült érték, mivel a fényképezőgépek sem tudják rögzíteni a túl halvány és vékony mellékágakat.

A 2. pszichofizikai kísérletünkben fekete-fehér képeket mutattunk a tesztalanyoknak azért, hogy csak a villámok ágszerkezetének vázát lássák, miáltal a festők által gyakran alkalmazott különböző színárnyalatokat és fényerősségeket figyelmen kívül hagytuk. Ez azonban nem volt probléma, mert a valódi villámok általában nem vagy csak enyhén színesek.

Különböző festők eltérő távolságokból festhettek le villámokat. Hasonlóan, a két pszichofizikai kísérletünkben használt valódi villámokat is különböző (ismeretlen) távolságokból fényképezték le.

Földrajzilag eltérő területeken a villámok morfológiája többé kevésbé különbözhet. Például a következő különböző régiók között képzelhetők el villámok közti alaktani eltérések: (i) trópusi kontra mérsékelt égöv, (ii) erdők kontra fátlan szavannák kontra nagy vízfelületek (folyók, tavak, tengerek), (iii) magas hegyek kontra lapos síkságok. A villámmorfológia esetleges regionalitásáról semmiféle meteorológiai/földrajzi adat sem állt rendelkezésünkre. Ha találtunk is volna ilyen adatokat, akkor sem lettek volna hasznunkra, mert általában teljes homály fedí, hogy egy festő hol látta a megfestett villámot. De elismerjük, hogy a villámmorfológia regionalitása (ha valóban fönállna) befolyásolhatná annak módját, ahogyan a festők emlékeznek a villámok alakjára.

Nem tudható, hogy az itt tanulmányozott festményeken a festők mennyire valóság-hűen szándékozták ábrázolni a villámokat, különös tekintettel az általunk vizsgált három alaktani jellemzőre. Gondolhatjuk, hogy egy atipikus morfológiai sajátosságokkal rendelkező (azaz a valódi villámokra jellemző alaktani paraméterértékektől jelentősen eltérő) festett villám a festő művészi szabadságának vagy helytelen megfigyeléseinek és/vagy rossz memóriájának terméke. Ezt álta-

lában lehetetlen eldönteni, ezért ennek kiderítése nem is volt célja jelen tanulmányunknak.

Mindazonáltal, számos festőművészről jogosan feltételezhető, hogy vizuális környezetük villámain, valamint sok más sajátosságát és tárgyát oly valóság-hűen próbálta a vásznon megörökíteni, amennyire csak lehet. Említhetjük például William Turner híres angol festőművészt, a romantikus tájképek *plain air* stílusú mesterét, aki fiatal éveiben a föllendülésnek indult angol turizmust szolgáló útikönyveknek tájak és városok gyönyörű tájképeivel való illusztrálásával kereste kenyerét. Ilyen múlt után, érthető módon vált a realizisztikus festészet egyik legtipikusabb képviselő-jévé. Legfőbb jellemzője volt, hogy amit a valóságban látott, azt a saját romantikus stílusára fordította és festette vászonra. Mi Turner három villámfestményét elemeztük. Nem véletlenül, mindhárom festett villám alaktani jellemzői megfelelnek a valódi villámokéinak, vagyis nagyon hasonlítanak az utóbbiakhoz.

Sok légköri elektromos kisülés egyetlen felhőben vagy két felhő között kialakuló villám [14, 15]. Az ilyen villámok többé kevésbé ferdek vagy közel vízszintesek és nem érik el a földet. Vizsgálatainkba nem vontunk be ilyeneket, mert a tanulmányozott festményeken ilyenek nem fordultak elő.

A festett villámok legkevésbé tipikus alakja a mindennapi életünkben elterjedt, jól ismert cikk-cakk S forma volt (lásd: a 4. *ábra* P4 festménye). Például az ókori római katonák pajzsán is ilyen villámforma volt, és manapság az elektromosság szimbóluma (gondoljunk a veszélyes nagyfeszültségre figyelmeztető táblákra) is ugyanez a jel. William Nicholson Jennings mutatott rá elsőnek, hogy a festményeken fölbukkanó ilyen cikk-cakk-S alakú villámok valójában nem léteznek.

## Irodalom

1. Zerefos C. S., Tetsis P., Kazantzidis A., Amiridis V., Zerefos S. C., Luterbacher J., Eleftheratos K., Gerasopoulos E., Kazadzis S., Papayannis A.: Further evidence of important environmental information content in red-to-green ratios as depicted in paintings by great masters. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14 (2014) 2987–3015.
2. Lee R. L. Jr., Fraser A. B.: *The Rainbow Bridge: Rainbows in Art, Myth, and Science*. Penn State University Press, Washington, USA (2001)
3. Tape W., Seidenfaden E., Können G. P.: The legendary Rome halo displays. *Applied Optics* 47/34 (2008) H72–H84.
4. Farkas A., Kiricsi Á., Klemm L.: (R)égi csodajelek. 17–18. századi halójelenségek a Magyar Nemzeti Múzeumból. *Fizikai Szemle* 61/12 (2011) 407–413.
5. Seidenfaden E.: Found: a diagram of the 1630 Rome halo displays. *Applied Optics* 50/28 (2011) F60–F63.
6. Nasmyth J.: On the form of lightning. In: *Report of the Twenty-Sixth Meeting of the British Association for the Advancement of Science*, James Murray, London, (1857) p. 14.
7. Igoe L. T.: Capturing 'Jove's Autograph': Late Nineteenth-Century Lightning Photography and Electrical Agency. *Panorama: Journal of the Association of Historians of American Art* 2/1 (2016) 14., <http://journalpanorama.org/capturing-joves-autograph-late-nineteenth-century-lightning-photography-and-electrical-agency> (utolsó megtekintés: 2017. november 3.)
8. Palmquist P. E., Kalibourn T. R.: *Pioneer Photographers from the Mississippi to the Continental Divide. A Biographical Dictionary 1839–1865*. Stanford University Press, Stanford, California (2005)
9. Jennings W. N.: Lightning Photography. *Scientific American* 53/10 (1885) 149.

10. Stromp M., Farkas A., Kretzer B., Száz D., Barta A., Horváth G.: How realistic are painted lightnings? Quantitative comparison of the morphology of painted and real lightnings: a psychophysical approach. *Proceedings of the Royal Society A* 474 (2018) 20170859 (doi: 10.1098/rspa.2017.0859)
11. Stromp M.: *Villámmorfológia számszerű vizsgálata festményeken: Mennyire valóságbűiek a festett villámok?* M.Sc. diplomamunka, ELTE TTK Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratórium, Budapest (2017) 74 o.
12. Zhang T. Y., Suen C. Y.: A fast parallel algorithm for thinning digital patterns. *Communications of the Association for Computing Machinery* 27(1984) 236–239.
13. Rosten E., Drummond T.: Machine learning for high-speed corner detection. *Computer Vision ECCV*(2006): 430–443.
14. Newcott W. R., Menzel P.: Lightning: nature's high-voltage spectacle. *National Geographic* 184(1993 July) 80–103.
15. Rakov V., Uman M.: *Lightning Physics and Effects*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (2003)
16. Horváth G., Csapó A., Nyeste A., Gerics B., Csorba G., Kriska G.: Erroneous quadruped walking depictions in natural history museums. *Current Biology* 19/2 (2009) R61–R62. (doi: 10.1016/j.cub.2008.12.011)
17. Horváth G., Farkas E., Boncz I., Blahó M., Kriska G.: Cavemen were better at depicting quadruped walking than modern artists: Erroneous walking illustrations in the fine arts from prehistory to today. *Public Library of Science ONE* 7/12 (2012) e49786 (doi: 10.1371/journal.pone.0049786)
18. Olson D. W., Doescher R. L., Olson M. S.: When the sky ran red: the story behind the scream. *Sky & Telescope* 107/2(2004) 28–35.
19. Fikke S., Kristjánsson J. E., Nordli O.: Screaming clouds. *Geophysical Research Abstracts* 19 (2017) EGU2017-16489, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-16489.pdf>
20. Riikonen M., Sillanpää M., Virta L., Sullivan D., Moilanen J., Luukkonen I.: Halo observations provide evidence of airborne cubic ice in the Earth's atmosphere. *Applied Optics* 39/33(2000) 6080–6085.
21. Tape W.: *Atmospheric halos*. Antarctic Research Series Vol. 64. American Geophysical Union, Washington D.C. (1994)
22. Lowe D., MacKenzie A. R.: Review of polar stratospheric cloud microphysics and chemistry. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 70/1 (2007) 13–40.
23. Chase W. G. (ed.): *Visual Information Processes*. 1st Edition. Proceedings of the 8. Annual Carnegie Symposium on Cognition (held at the Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA on 19 May 1972) Academic Press, New York (1973)
24. Tomonaga M., Matsuzawa T.: Enumeration of briefly presented items by the chimpanzee (*Pan troglodytes*) and humans (*Homo sapiens*). *Animal Learning and Behavior* 30/2(2002) 143–157.

## KÉT MAGYAR MARSLAKÓ: SZILÁRD LEÓ ÉS TELLER EDE

Radnóti Katalin  
ELTE TTK Fizikai Intézet

Idén ünnepeljük *Szilárd Leó* születésének 120. és *Teller Ede* születésének 110. évfordulóját. Mindkét géniusról számtalan életrajz, megemlékezés látott már napvilágot. Jelen írásban ezért elsősorban ketjük különleges kapcsolatára fókuszálunk.

### Marslakók

A *marslakó* szó átvitt értelemben használatos, azon az Amerikai Egyesült Államokba emigrált magyar tudósok közös elnevezéseként, akik alapvetően járultak hozzá a 20. századi természettudományi tudás – alapvetően fizika – és technológia fejlődéséhez.

Több leírás, visszaemlékezés szerint *Enrico Fermi* tette fel a híres kérdést, vajon hol késnek a földönkívüliek, ha az intelligencia kialakulásának valószínűsége a Világegyetemben állítólag olyan magas. A történet szerint Szilárd Leó válasza ez volt: „Itt vannak közöttünk, de magyaroknak mondják magukat.” A vá-

lasz azon a tényen alapult, hogy Magyarország – azon belül is Budapest (néhány belvárosi középiskolája) lélekszámahoz mérten valószínűtlenül nagy számban adott kiváló tudósokat a világnak. A marslakók legendája a második világháború idején Los Alamosban terjedt el. Teller Ede maga is büszkén emlékezett vissza, hogy sokan felfigyeltek a „marslakókra”, a magyar tudósokra, akik gyakran mutatkoztak együtt és egy másik számára furcsa nyelven – magyarul – beszélgettek. Azon buktak le, hogy – bármilyen soká gyakorolták is – egyetlen földi nyelvet sem tudtak idegen akcentus nélkül beszélni. A marslakók a politikai és a diszciplináris határokat is alig tisztelték. A marslakók sajtóságai közt számon tartják azon szokásukat is, hogy meg akarták váltani a világot [1].

Kik voltak ők? A magyar zsidóság köréből származott a 20. század kiemelkedő tudósai közül legalább hét, akiket kollégáik marslakóknak hívtak: *Kármán Tódor*, *Hevesy György*, *Polányi Mihály*, Szilárd Leó, *Wigner Jenő*, *Neumann János* és Teller Ede. Mindannyian fiatalon hagyták el Magyarországot, sokoldalúak voltak, és nagymértékben járultak hozzá a tudomány és a technológia fejlődéséhez. Már kiskorukban kitűntek tehetségükkel. Amerikába vándorlásukra azért került sor, mert Magyarországon nem volt lehetőségük tudományos munkára – lásd például *Numerus clausus-törvény* (1920) –, és mert a véres erőszakba torkolló antiszemitizmus miatt idővel Európából is menekülniük kellett.

A marslakók már fiatalon találkoztak Budapesten: Teller Ede édesapja, *Teller Miksa*, aki magasan kép-



*Radnóti Katalin* az ELTE TTK-n végzett kémia-fizika szakos tanárként. Több éves középiskolai tanári munkája mellett egyetemi doktorátust szerzett fizikából, majd az ELTE Tanárképző Főiskola oktatójaként a neveléstudomány kandidátusa lett a fizika tanítása témaköréből. Jelenlegi munkahelye az ELTE TTK Fizikai Intézet, főiskolai tanár. Több mint 200 publikációja van, tanári segédletek, tanulmányok, könyvek, könyvfejezetek. Kutatási területe a fizika és a természettudományok tanításának módszertana.