

hogy a kielégítő orvosi tomográfias vizsgálatok kivitelezésének legalább négy feltétele volt: a képrekonstrukció matematikai megoldása (lásd a keretes írást); a hatékony számítógépes adatfeldolgozás; az optimális (gyors és kis sugárdózissal járó) vetületi képeket készítő technika; a módszer hasznosságának bizonyítása. A matematikailag korrekt megoldást Tetelbaum, Cormack és Hounsfield adta meg. Kuhl 1973-ban publikált egy kielégítő módszert, de ez még nem volt matematikailag korrekt. A hatékony számítógépes képrekonstrukciót Hounsfield és részben Kuhl tudta elsőként megvalósítani, felhasználva az 1970-es évek elején már rendelkezésre álló „nagyobb” kapacitású számítógépeket, illetve kettőjüknek sikerült az optimális humán vizsgálatot lehetővé tevő technika kidolgozása is. A tomográfiai vizsgálatok klinikai hasznosságát azonban egyedül Hounsfieldnek sikerült átütő módon bizonyítania, amiben elvülhetetlen érdemei vannak természetesen Ambrose-nak is. Költői kérdés, hogy mi történt volna, ha Hounsfield nem találkozik James Ambrose radiológussal, aki a kezdetektől meg volt győződve a CT módszer pótolhatatlan képességeiről. Ambrose kiváló és sokoldalú társa volt Hounsfieldnek, nagyszerűen kiegészítették egymást a munkában. A 60-as évek végén például marhaagyvelő CT-vizsgálatával próbálták minél több információt kapni a módszer érzékenységéről, de megdöbbenve tapasztalták, hogy a vágóhídról beszerzett agyvelőkben az egész agyra kiterjedő agyvérzés látható, ami teljesen használhatatlanná teszi az eredményeket. Már szinte nem látzott kiút, amikor Ambrose-nak eszébe jutott, hogy a globális agyvérzés valószínű oka az, hogy az állatokat áramokkal ölik le. A kóser hentesek nem így járnak el: ettől kezdve Hounsfield a kóser henteseket járta, hogy megfelelő kísérleti objektumokhoz jusson (gyakran dobozban, buszon szállította a marhaagyakat). 1971 után Hounsfield és Ambrose számos nemzetközi radiológiai konferencián számolt be módszerük érzékenységéről és eredményeiről. Bár mindentűt átütő sikert értek el, érdekes módon Hounsfield cége, az EMI még ekkor sem hitte, hogy nagy igény lenne a CT-készülékre. 1972-ben úgy gondolták, hogy megközelítően 25 CT kielégítené a világ szükségleteit. Az EMI nagy tapasztalatokkal rendelkezett a zenei iparban (ők voltak többek között a Beatles fő támogatói), de nyilván nem értettek az orvos diagnosztikához. Végül eladták a CT-üzletágot, de amit nem vártak, mégis bekövetkezett: 5 évvel később már több mint 1000 CT üzemelt a világban.

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy az orvosi tomográfok kifejlesztésének útja több kutató párhuzamos munkájának eredményeképpen valósult meg. Bár az 1979-es orvosi Nobel-díj valószínűleg nem minden meghatározó szerepet játszó kutató munkáját ismerte el, Cormack és Hounsfield teljes joggal kapta meg e kimagasló elismerést. Hounsfield nem volt „hivatásos” kutató. Elektromérnöki diplomáját is igen későn, 30 éves kora után szerezte meg, sohasem dolgozott egyetemen, tudományos minősítése sem volt, az EMI Central Research Laboratorytól ment nyugdíjba 1984-ben. De nyilván nem ez számít, hanem az az eredmény és hatás, amelyet munkájával elért és amellyel alapvetően hozzájárult a modern orvostudomány kialakulásához, évente milliárd életminőségének javításához. A CT kidolgozása és elfogadása adott hatalmas lendületet az orvosi tomográfok következő generációinak kifejlesztéséhez, időrendi sorrendben a SPECT-, a PET-, majd az MRI-diagnosztika kialakulásához. Ezeknek a módszereknek a lényegét és orvosi diagnosztikai szerepét néhány következő cikkben mutatjuk be. ♪

Köszönetnyilvánítás. A Semen Tetelbaumra vonatkozó számos adathoz Valentyina Volynets és Marina Mirochnichenko (Scientific and Technical Library, Kiev Polytechnic Institute) segítségével által jutottam.

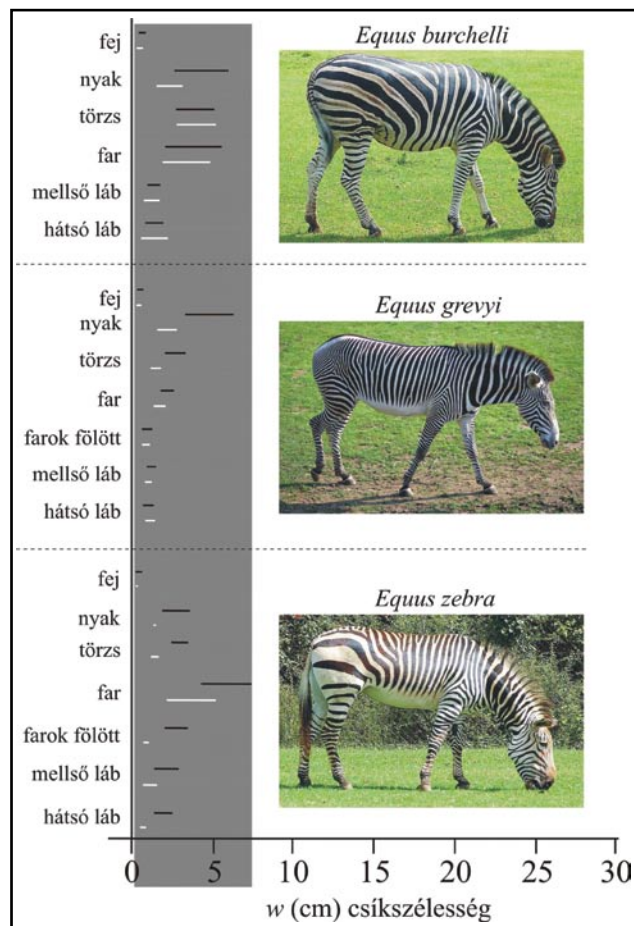
IRODALOM

The birth of the first CT scanner. IEEE Engineering in Medicine and Biology, 2000, 19(1): 121
Principles of computer assisted tomography (CAT) in radiographic and radioisotopic imaging. 1976, Phys. Med. Biol. 21:689
Godfrey Hounsfield and the dawn of computed tomography. Neurosurgery 2006, 58:780
 Bettyann H. Kevles: *Naked To The Bone. Medical Imaging in the Twentieth Century.* Cambridge, Perseus Publishing. 1998.

A zebraék fején, nyakán és törzsén a csíkok nagyjából függőleges lefutásúak, míg megközelítőleg vízszintesek a hátoldalon és a lábakon. A zebraék három faja Közép- és Dél-Afrikában él (1. ábra). A leggyakoribb az alföldi zebra (*Equus burchelli*, 12 alfajjal), amely Afrika déli és keleti részén egyaránt elterjedt. Az állat farán mindkét oldalon 26 széles csík látható, melyek közül néhány a has irányába elhajlik. A legtermesebb faj a Grévy-zebra (*E. grevyi*), amelynek mindkét oldalán közel 80, a test hosszstengelyére merőleges lefutású csík van. A Grévy-zebra Etiópia és Kenya nyugati részének fűvespusztáin él. A harmadik faj a hegyi zebra (*E. zebra*), amelynek két alfaja él Afrika dél-nyugati részén. A hegyi zebra hasa fehér és mindkét oldalán 55 csík található, amelyek közül három vízszintesen fut a hátsó combokon. Az 1800-as évek végén kipusztult kvaggának (*E. quagga*) volt még részben csíkozott kultakarója, ami a legkifejezettebben a fejen, nyakon és a test elülső részén alakult ki, míg a hátulsó testfél és a hátsó lábak sötétbarnák voltak.

A zebraék csíkos mintázatának szerepe régóta vitatott kérdés. Wallace [1] azt feltételezte, hogy a csíkoknak a magas fűben való rejtőzködésben van szerepe. Charles Darwin [2] bírálta e magyarázatot, mivel a zebraék nem a növényzettel sűrűn benőtt területeken élnek, hanem inkább a nyílt szavannákon, ahol alacsony a fű. Számos további elmélet

1. ábra. A három recens zebra faj (*Equus burchelli*, *E. grevyi*, *E. zebra*) képe, valamint a különböző testrészeken (fej, nyak, törzs, far, fark fölött, mellső láb, hátsó láb) mért fekete, illetve fehér csíkok *w* szélességének átlagai és szórásai. A függőleges sűrű oszlop (átlag minimuma – szórás = 0.23 cm < *w* < 7.47 cm = átlag maximuma + szórás) a zebraék csíkvastagságának tartományát öleli át. A vízszintes fekete és fehér vonalak középpontja a csíkszélesség átlagának felel meg, a végpontok pedig az átlag ± szórás értékeinek.



Miért csíkos a zebra?

A poláros fényszennyezés csökkentésének trükkje

[3, 4] látott még napvilágot arra vonatkozóan, hogy milyen funkciói és esetleges evolúciós előnyei lehetnek a zebra fekete-fehér csíkos mintázatának:

– *Látzólagos méretnövekedés.* A csíkok, egy vizuális illúzió révén, nagyobbak láttathatják a zebra a valóságos méreténél, ami előnyt jelenthet a ragadozókkal szembeni védekezés során.

– *Láthatóság csökkenése gyér fényviszonyoknál.* Gyengébb megvilágítási körülmények között (alkonyatkor, hajnalban, holdfényben) a csíkok megnehezíthetik, hogy a zebra a ragadozók fölisméjék.

– *A mozgó csíkok látványa elkápráztathatja a ragadozókat.* A csordában menekülő zebra ideoda mozgó csíkjai megnehezíthetik a ragadozók számára a zebraegyedek elkülönítését.

– *Rejtőzködés.* A csíkos kültakaró lehetővé teszi a zebra számára, hogy észrevétlenül maradjon természetes környezetükben a test határvonalának nehezebb fölismérhetősége miatt. Az egyébként nem csíkos mintázatú patás fajok többségénél a sebezhetőbb fiatal és a kifejlett nőstény egyedeknél is megfigyelhető a hatékonyabb álcázást biztosító csíkos testmintázat.

– *Szociális előnyök.* Mivel a csíkos kültakaró egyedi jellegzetességeket mutat, mint az emberi ujjlenyomat, a zebra esetleg azonosítást tudják egymást a testmintázatuk alapján. E képesség különösen fontos lehet az anyaállat és csikójának kapcsolattartásában, vagy udvarlaskor a hímek és nőstények közti kommunikációban.

– *A fizikai állapot jelzése.* A sebesülések, sérülések vagy valamilyen kóros elváltozás miatt kialakuló szabálytalanságok a csíkos mintázatban vizuálisan jelezhetik az egyed leromlottabb fizikai állapotát (fitnessét), ami hatással lehet a párvalasztásra.

– *Hőszabályozás.* A bőr alatti zsírszövet és a fekete csíkok elhelyezkedése összhangban áll egymással, miáltal a zsírszövetcsíkok egyfajta hőtároló szervként működhetnek, ami szerepet játszhat a test hőszabályzásában. Másrészt, a fekete és a fehér csíkok eltérő mértékű fölmelegedése miatt a kültakaró fölött apró föl- és leszálló légáramok alakulhatnak ki, melyek fokozhatják a hőleadást.

– *Védelem a cecelegyek ellen.* Egyes megfigyelések szerint a zebra kevésbé támadják a vérszívó cecelegyek, mint más egyszínű patás állatokat. A cecelegyek vérszívásukkal súlyos betegségek, többek között az afrikai álomkór kórokozóit terjesztik.

Ruxton [3] és Caro [4] arra a következtetésre jutottak, hogy a hipotézisek többségét semmiféle kísérleti adat nem támasztja alá, miáltal még ma sem tudjuk, hogy miért alakult ki a zebra csíkos mintázata. Mindazonáltal, a legelfogadottabb magyarázat szerint a csíkok védhetnek a cecelegyek ellen [5].

Bögölyök és lovak

A nőstény bögölyöknek petéik érleléséhez emlősök vérére van szükségük. Vérszívásukkal (2. ábra) számos veszélyes kórokozó hordozói és



2. ábra. Barna ló vért szívó nőstény bögöly (b) és a kibuggyanó vérből lakmározó más legyek (l).

terjesztői, emellett vérvesztést okoznak, fájdalmas csípéssel pedig zaklatják a legelő lovakat és szarvasmarhákat, ami jelentős gazdasági kárral (lassabb testtömeg-gyarapodással, csökkent tejtermeléssel) jár. Attól függően, hogy a különböző bögölyfajok milyen a földrajzi eloszlása Afrika-szerte, e vérszívó legyek súlyos állategészségügyi problémákat jelenthetnek a zebra számára is.

A bögölyfajok vizek közelében rakják le petecsomóikat, lárváik vízben vagy nedves talajban fejlődnek. Emiatt a kifejlett nőstények és hímek vonzódnak a vízszintesen poláros fényhez, mert a vízről visszaverődő ilyen fény alapján találják meg a vizet [6]. A bögölyök pozitív polarotaxisának öt fontos funkciója van. (i) A nőstények számára ki-

jelöli a jó peterakó helyet, ahol a lárvák a vízbe juthatnak. (ii) Nagyobb eséllyel találnak a nőstények gazdaállatot, hiszen a társas növényevők gyakran megtalálhatók az édesvizek mellett, ahol isznak, vagy fürdenek. (iii) Útmutató a nőstények és a hímek számára a vizelelőhelyek felé, ahol ihatnak és hűthetik magukat. (iv) Mindkét nemet olyan helyre irányítja, ahol nagy valószínűséggel egymásra találnak és párosodhatnak. (v) A bögölyök kevésbé vonzódnak a fehér, mint a sötét (fekete, barna) szőrű emlősökhöz, továbbá a szőrzetről visszaverődő fény polarizációja is segíti őket a gazdaállat megtalálásában [7].

A zebra csíkos kültakaró átmenet az egyszínű fekete és fehér között, ezért azt vártuk, hogy a zebra bögölyvonzó-képessége a fehér és fekete lovaké közé esik. Ezt több terepkísérletben tanulmányoztuk.

Terepkísérletek zebra csíkos mintázatok bögölyvonzásának vizsgálatára

Az 1. kísérletben egy szokolyai lovas tanya közelében három, étolajjal töltött, fehér peremű fekete tálca helyeztünk a földre, melyekből több héten keresztül, naponta begyűjtöttük a csapdázott bögölyöket. Az egyik tálca teljesen fekete volt, a másikon és harmadikon 2, illetve 6 fehér csík egymásra merőlegesen (3. ábra, 1. sor). A tálcák sorrendjét naponta véletlenszerűen változtattuk. Mivel a különböző számú fehér csíkokkal ellátott tálcák fekete összfelülete kissé eltérő volt, ezért a bögölyökre kifejtett vonzóképeség vizsgálatok a csapdázott bögölyöknek az egyszínű fekete (a fényt erősen és vízszintesen polarizáló) csapdafelületre eső számát hasonlítottuk össze.

Az 2. kísérletben egy gödi lovas tanyán két hónapon át öt, étolajjal teli tálca hagyunk a földön, néhány naponta változó sorrendben (3. ábra, 2. sor): egy fekete és egy fehér tálca, valamint három másik, kétszer akkora felületű tálca 1–1, 3–3, illetve 6–6 darab fekete-fehér párhuzamos csíkkal, azonos nagyságú fehér és fekete összfelülettel. Itt is rendszeres időközönként begyűjtöttük a csapdázott bögölyöket.

Az 3. kísérletben az említett szokolyai lovas tanya mellett egy hónapig volt a földön naponta véletlenszerűen változó sorrendben három azonos nagyságú, fekete-fehér csíkos tesztfelület, melyeket átlátszó, színtelen, szagtalan, eső- és napfényálló ragaccsal kentünk be. Az 50–

50%-ban fekete és fehér felületeken 1–1, 2–2, illetve 4–4 volt a fekete-fehér csíkok száma (3. ábra, 3. sor).

A 4. kísérletben a szokolyai lovas tanya közelében két hónapig volt véletlenszerűen változó sorrendben fölállítva egy bama, egy fekete, egy fehér és egy fekete-fehér zebra csíkos lómodell (4. ábra), melyek felületét az említett ragaccsal kentük be néhány naponta. A ragacos felületeken talált bögölyöket kétnaponta összeszámoltuk és eltávolítottuk.

A budapesti és a stockholmi természettudományi múzeumokban őrzött számos zebra bőr és kitömött zebra (*Equus burchelli*, *E. grevyi*, *E. zebra*) különböző testtájain (fej, nyak, törzs, far, fark fölött, mellső láb, hátsó láb), ahol viszonylag egyenletesek a csíkok, hosszabb-rövidebb egyenesek mentén mértük a fekete és fehér csíkok szélességének átlagát és szórását.

A terepkísérletekben használt különféle tesztfelületek és lómodellek fénypolarizáló-képességét (4. ábra) képzalkotó polarimetriával mértük a spektrum vörös, zöld és kék tartományában. Ugyancsak mértük a Magyar Természettudományi Múzeum egy kitömött zebra (*E. burchelli*) tesztfelületének polarizációs mintázatait. A mérési adatok felhasználásával meghatároztuk a tesztfelületek és lómodellek azon részeit, melyeket a polarotaktikus bögölyök vízként érzékelnek. Az ilyen felületek egy fajspecifikus p^* küszöbértéknél nagyobb p ($> p^*$) polarizációfokú fényt vernek vissza, melynek rezgéssíkja egy $\Delta\alpha$ küszöbértéknél kisebb mértékben tér el a vízszintestől. Korábbi méréseink alapján $p^* = 10\%$ és $\Delta\alpha = 10^\circ$ küszöbértékeket alkalmaztunk, melyek pontos értéke azonban nem befolyásolta a végkövetkeztéseinket.

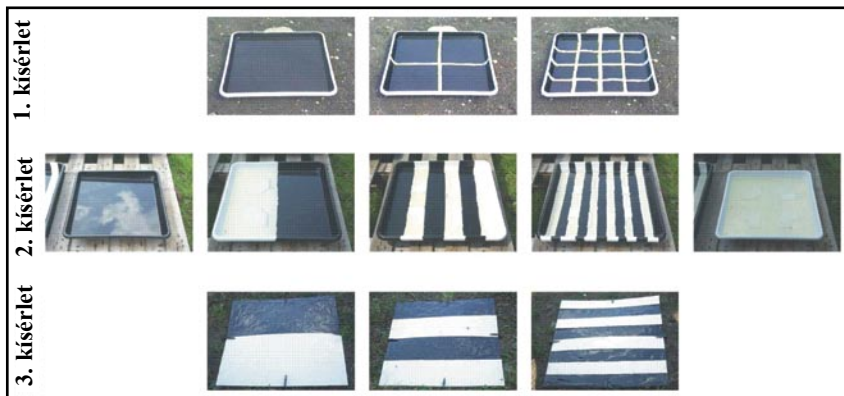
A csíkossabb mintázat kevesebb bögölyt vonz

Az 1. kísérletben (3. ábra, 1. sor) azt tapasztaltuk, hogy minél sűrűbb volt a fehér színű rács az étolajjal töltött fehér keretes fekete tálcán, annál kevesebb bögölyt vonzott. A fehér keretes rács nélküli fekete tálcá szignifikánsan nagyobb hányadát (53,1%) fogta meg a bögölyöknek, mint a 2, illetve 6 egymásra merőleges fehér csíkot viselő tálcák (39,8%, illetve 7,1%). A csapdázott bögölyök felületi sűrűsége 1167,3; 955,6 és 206,3 darab/m² volt a rács nélküli, és a 2, illetve 6 fehér merőleges csíkkal borított tálcáknál. A fehér csíkok polarizálatlan fényt vernek vissza, míg a tálcák fekete tartományai erősen vízszintesen polárosak, ami nagyon vonzó a polarotaktikus bögölyök számára. E kísérletet azt demonstrálta, hogy a vízszintesen poláros fényt visszaverő fekete felületek egyre kevésbé vonzóak a bögölyöknek, ha a depolarizáló fehér csíkok száma nő.

A 2. kísérletben (3. ábra, 2. sor) az étolajjal töltött fehér és fekete tálcá volt a legkevésbé, illetve leginkább vonzó a bögölyöknek, rendre 3 és 145 megfogott egyeddel. Minél kisebb volt a fekete/fehér csíkok száma, annál több bögöly esett csapdába: a 12, 6, illetve 2 csíkos tálcá rendre 24, 66, illetve 138 bögölyt fogott. A tálcák fekete csíkjai erősen és vízszintesen poláros fényt vernek vissza, ami a polarotaktikus bögölyöket vonzotta. Másrészt, a fehér csíkok nem voltak vonzó, mert nagyon alacsony ($p < 5\%$) polarizációfokú, és nem mindig vízszintesen poláros fényt vernek vissza.

A 3. kísérletben (3. ábra, 3. sor) a 2-csíkos ragadós tesztfelület vonzotta a legtöbb bögölyt ($N = 321$), a 4-csíkos felület kevésbé volt vonzó ($N = 290$), míg a 8-csíkos volt a legkevésbé vonzó ($N = 19$). A ragadóságnak köszönhetően a leszálló bögölyök azonnal hozzáragadtak a tesztfelületekhez, így a landolás után már nem mozdulhattak el. Az erősen és vízszintesen polarizáló fényes fekete csíkok 3-szor (8-csíkos tesztfelület), 3,5-szer (4-csíkos tesztfelület), illetve 5-ször (2-csíkos tesztfelület) több bögölyt vonzottak magukhoz, mint a gyengén, és nem mindig vízszintesen polarizáló fényes fehér csíkok.

A 4. kísérletben (4. ábra) a fekete ($N = 562$) és a barna ($N = 334$) ló-



3. ábra. Az 1., 2. és 3. terepkísérletben használt fekete-fehér csíkos vízszintes csapdafelületek. Az 1. és 2. kísérletben étolajjal voltak töltve a tálcák, míg a 3. kísérletben átlátszó, szintelen ragacos anyag fedte a tesztfelületeket.

makett volt a leginkább vonzó a bögölyök számára, a fehér sokkal kevésbé ($N = 22$), és meglepő módon a legkevésbé a fekete-fehér csíkos zebra modell vonzotta a bögölyöket ($N = 8$). A fekete és barna lómodell erősen poláros fényt tükrözött ($p > 80\%$), míg a fehér lómodell gyakorlatilag polarizálatlan ($p \approx 0\%$) fényt vert vissza (4. ábra). A zebra modell fekete és fehér csíkjaiból visszaverődő fény polarizációfoka nagy ($p > 80\%$), illetve kicsi ($p \approx 0\%$) volt. Oldalról és hátulról nézve, a fekete és barna lómodell háta utánozta leginkább a vizet a polarizáció révén (4. ábra, 4. sor). Így e tartományok voltak nagyon vonzóak a polarotaktikus bögölyöknek. A fehér lómodellnél nem volt ilyen polarizációs vonzó felület, míg a zebra modell hátán csak a fekete csíkok polarizáltak erősen a fényt. E polarizációs mintázatok részben magyarázzák a 4. kísérletben szereplő lómodellek bögölyvonzó-képességét.

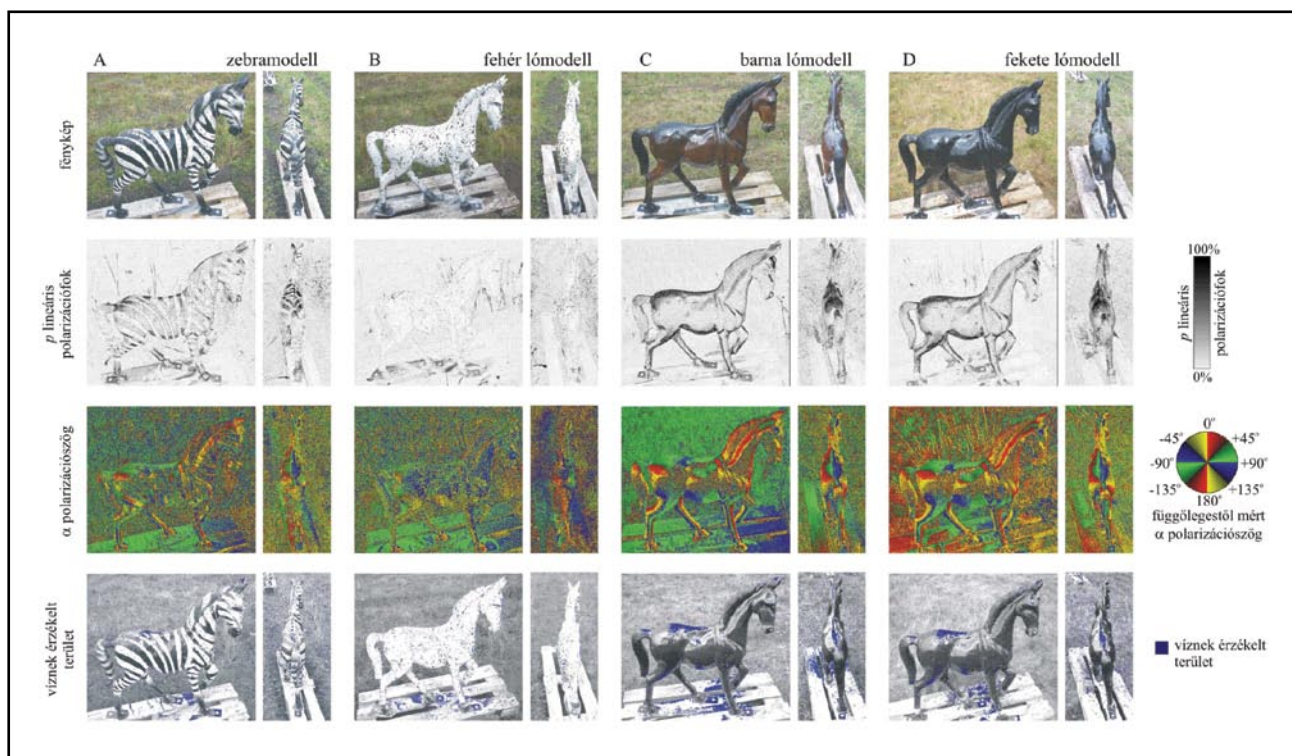
Méréseink szerint egy valódi, kitömött zebra (*E. burchelli*) polarizációs mintázatai gyakorlatilag megegyeztek a 4. kísérletben használt zebra modellével. A fényviszonyoktól, a testtartástól és a Naphoz viszonyított nézőponttól függően, a fekete csíkok a zebra hátán erősen és vízszintesen poláros fényt vernek vissza, ami vonzó lenne a polarotaktikus bögölyöknek, ha a fekete csíkok nem lennének elválasztva depolarizáló fehér csíkokkal.

Az 5. ábra foglalja össze a négy terepkísérletünkben használt zebra csíkos tesztfelületek mért A vonzóképeségét a fekete-fehér csíkok w szélességének függvényében. Az $A(w)$ vonzóképeségek bögölyökre nézve monoton csökkennek, ahogy a w csíkvastagság csökken, s e csökkenés mértéke egyre rohamosabb $w < 15$ cm esetén. Az 5. ábrán az átlagolt pontozott vonalú görbe szerint a vízszintes zebra csíkos felület elveszti bögölyvonzó-képességét ($A = 0$) $0 \text{ cm} \leq w \leq 4,5$ cm csíkvastagságok mellett. A leginkább figyelemre méltó, hogy az *Equus burchelli*, az *E. grevyi* és az *E. zebra* zebrafajok átlagos csíkvastagságai ($0,23 \text{ cm} < w < 7,47 \text{ cm}$, mely tartományt az 5. ábrán a függőleges szürke sáv szemlélteti) alig lépik túl e "bögölymentes tartományt". Ez az oka a 4. kísérletben a zebra modell igen csekély bögölyvonzó-képességének.

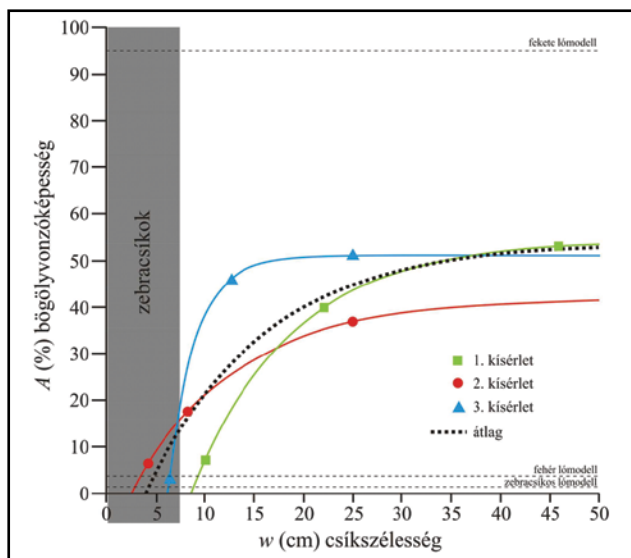
Arra a következtetésre jutottunk tehát, hogy a zebra fekete-fehér csíkjai megfelelően keskenyek ahhoz, hogy minimalizálják a bögölyökre kifejtett vonzást.

A csík mintázat bizonyított előnye

Mindhárom zebrafajnak a fején és a lábain legkeskenyebbek a csíkok (1. ábra), ahol a csík szélesség annyira kicsi, hogy már gyakorlatilag nem is vonzza a bögölyöket (5. ábra). E jelenség az evolúciós alkalmazkodás egyik szép példája. Számos érzékszerv a fejen található (szemek, fül, nyelv, orr, száj), melyek kifogástalan működése elengedhetetlen a zebra túléléséhez. A lábának is a lehető legjobb állapotban kell lenniük, hiszen csak így tudnak elmenekülni a zebra a raga-



4. ábra: 1-3. sor: A 4. kísérletben használt zebracsíkos (A), fehér (B), barna (C), és fekete (D) ragacos felületű lómodellek fényképei, valamint a róluk visszaverődő fény p lineáris polarizációfokának és függőlegestől mért α polarizációs szögének mintázatai oldalról és hátulról a spektrum kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mérve. 4. sor: A polarotaktikus bögölyök által víznek érzékelt területek (kékkel színezve), melyekről a visszavert fény jellemzői: $10\% < p < 100\%$, $80^\circ < \alpha < 100^\circ$. A lómodelleket közvetlen napfény érte, a polariméter optikai tengelye pedig -20° -os szöget zárt be a vízszintessel.



5. ábra: A terepkísérleteinkben használt zebracsíkos tesztfelületek A (%) bögölyvonzó-képessége a fekete-fehér csíkok w (cm) szélességének függvényében. A folytonos exponenciális görbék az 1., 2. és 3. kísérletben mért három eltérő $A_n(w_n)$, ($n = 1, 2, 3$) átlagértékre illeszkednek, míg a pontozott exponenciális görbe a 9 egyesített mérési pontra van illesztve. A három vízszintes szaggatott egyenes vonal a 4. kísérletbeli fekete, fehér és zebracsíkos lómodellek átlagos bögölyvonzó-képességét mutatja. A függőleges szürke oszlop (átlag minimuma – szórás = $0.23 \text{ cm} < w < 7.47 \text{ cm} = \text{átlag maximuma} + \text{szórás}$) a zebrák csíkvastagságának mért tartományát öleli át.

dozóktól. Ezek miatt a fejet és a lábakat kell legjobban védeni a vérszívó rovaroktól (például a bögölyöktől és a cecelegyektől), mert ezek bármelyikének sérülése nagyban rontja a zebrák túlélési esélyeit. Továbbá, a fejen és a lábakon vékonyabb a bőr, miáltal a vérszívó rovarok számára könnyebben hozzáférhetőek a vérerek, ezért itt fokozottabb „csíkos védelemre” van szükség, mint a többi testrészen. A sűrű csíkmintázat a zebrák fején és lábain tehát egyfajta vizuális alapon működő védőrendszernek tekinthető.

A csíkos, foltos és pöttyös barna/fehér kültakaró meglehetősen elterjedt az afrikai emlősök körében (6. A–E ábra), melyek a fajgazdag afrikai bögölyfauna gazdaállatai. E csíkos-foltos-pöttyös mintázatok is taszíthatják a vérszívó cecelegyeket és bögölyöket, ami nagy szelekciós előnnyel bír. A zsiráfok (*Giraffa camelopardalis*) is gazdaállatai a cecelegyeknek és bögölyöknek. A zsiráfok kültakaróján sötét alapon világos sávok alakítanak ki egy jellegzetes rácsmintázatot (6F ábra), melyek hasonlóak az 1. kísérletünkben használt tesztfelületekhez (3. ábra, 1. sor). Amint kimutattuk, az ilyen rácsmintázat is jelentősen csökkenti a felület bögölyvonzó-képességét. Így a zsiráf rácsszerű mintázata, más gazdaállatok csíkos-foltos mintázataihoz hasonlóan, a „bögölytaszító” zebracsíkok hatékony alternatívája.

Nem elképzelhetetlen, hogy az afrikai őslakosok jellegzetes sötét-világos csíkos-pöttyös-rácsos testfestésének (6. G ábra) is lehet némi szerepe a veszélyes vérszívó élősködők (például cecelegyek, bögölyök) elleni védelemben. E törzs-, nem- és korfüggő testfestési mintázatokat talán az afrikai emlősök kültakarójának a vérszívó legyek ellen védő csíkos-foltos-pöttyös mintázatai ihlették. E testfestés bizonyára spirituális, kulturális eredetű, de minden bizonnyal megvan az a hasznos mellékhatása is, hogy többé-kevésbé véd a vérszívó legyek ellen, amint a hasonló mintázatú zebrák és más emlősök esetén is (6. A–F ábra).

A poláros fényszennyezés csökkentésének zebráktól elleshető trükkje

Érdekes párhuzam húzódik a zebrák bögölyálló csíkmintázata, valamint az aszfaltutak [8] és napelemtáblák [9] poláros fényszennyezésének egyik csökkentési módja között. Az ember alkotta tárgyak némelyike olyan intenzív vízszintesen poláros fényt verhet vissza, hogy "szuper víznek" tűnhet a szállva vizet kereső vízirovarok számára, melyek a vizes petéző- és élőhelyüket a vízfelületről tükröződő vízszintesen poláros fény segítségével találják meg. A poláros fény ilyen természetellenesen szupernormális forrásai poláros ökológiai csapdákként működhetnek, amennyiben vizet utánozva a megtévesztett és magukhoz vonzott polarotaktikus vízirovarok rájuk rakják a petéiket, amelyek menthetetlenül elpusztulnak. E jelenséget nevezzük poláros fényszennyezésnek [10]. Mivel az ilyen ökológiai csapdák az érintett rovarpopulációk gyors csökkenéséhez vagy akár összeomlásához vezethetnek, ezért a napjainkban fölsímsert poláros fényszennyezés csökkentése vagy kiküszöbölése a poláros fényszennyező források rohamos elterjedése miatt a környezetvédelem egyik egyre fontosabb feladata.

6. ábra: A bögölyök gazdaállatai közé tartozó néhány csíkos afrikai emlősfaj. (A) Csíkos gnu (*Connochaetes taurinus*). (B) Felőtt (hátl) és fiatal (elől) Lesser kudu (*Tragelaphus imberbis*). (C) Okapi (*Okapia johnstoni*). (D) Csíkos hiéna (*Hyaena hyaena*). (E) Csíkos-pöttös fiatal tapír (*Tapirus terrestris*). (F) Zsiráf (*Giraffa camelopardalis*). (G) Egy afrikai törzs jellegzetes csíkos testfestési mintázatai.



Kimutattuk, hogy például a sötétszürke vagy fekete aszfaltutak [8], valamint a csillogó fekete napelemtáblák és napkollektorok [9] erős poláros fényszennyező források. Megfigyeltük és kísérletileg igazoltuk, hogy polarotaktikus kérészek, tegzesek, szúnyoglábu legyek és bögölyök sokkal jobban vonzódnak a napelemtáblákhoz és napkollektorokhoz s petéznek rájuk, mint a kisebb polarizációfokú fényt visszaverő felületekhez, továbbá elkerülik azon fehér keretes napelemtáblákat, amelyek felületét egy megfelelően sűrű, nem-polarizáló, fehér rács borítja. Fölfedeztük, hogy ha egy erősen és vízszintesen polarizáló fekete felületet egy vékony csíkokból álló fehér rácsmintázattal megfelelően apró cellákra osztunk, akkor a polarotaktikus rovarokra kifejtett vonzóképesége akár 1/30-adára is csökkenhet. E szabadalmaztatás alatt álló módszerrel tehát jelentősen csökkenthető a korábban teljesen környezetbarátan tekintett napelemtáblák és napkollektorok poláros fényszennyezése. Hasonló módszerrel csökkenthető, illetve kiküszöbölhető ki az aszfaltutak poláros fényszennyezése [8]. Ha az aszfaltfelületekre alkalmas sűrűségű és vastagságú fehér csíkokat festenek, akkor már nem vonzzák a polarotaktikus rovarokat. Ez különösen fontos a veszélyeztetett vízirovarfajok menedékhelyeül szolgáló, szigorúan védendő vizes élőhelyek (tavak, folyók, mocsarak) mellett húzódó aszfaltutaknál.

A megfelelő sűrűségű fehér rácsok és csíkok tehát megakadályozzák a polarotaktikus vízirovaroknak a fényt erősen és vízszintesen polarizáló fekete mesterséges felületekhez való vonzódását és csapdába esését. Figyelemre méltó módon a zebrák lényegében ugyanezt az optikai/vizuális trükköt fejlesztették ki az evolúció során: a zebrák a fekete testfelületükön fehér csíkokkal biztosítják, hogy a cecelegyek és a polarotaktikus bögölyök ne vonzódnak hozzájuk.

✳
EGRI ÁDAM–HORVÁTH GÁBOR–KRISKA GYÖRGY–
FARKAS RÓBERT–SUSANNE ÁKESSON

Köszönetnyilvánítás: Kutatásainkat az Európai Unió (Eu-FP7, TabanOid-232366: Trap for the novel control of horse-flies on open-air fields) és az OTKA (K-6846: Közvetlen és közvetett polarotaxis vizsgálata tegzeseknél és kétszárnyúaknál) is támogatja. Köszönjük Dr. Csorba Gábor főmuzeológusnak, hogy a Magyar Természettudományi Múzeum Emlős Gyűjteményében megmérhettük a zebrák csíkszélességét.

IRODALOM

[1] Wallace, A. R. (1867) Mimicry, and other protective resemblances among animals. *Westminster Review*, p. 5
 [2] Darwin, C. R. (1871) *The descent of man, and selection in relation to sex*. vol. 2, p. 302, John Murray, London
 [3] Ruxton, G. D. (2002) The possible fitness benefits of striped coat coloration for zebra. *Mammal Review* 32: 237-244
 [4] Caro, T. (2009) Contrasting coloration in terrestrial mammals. *Philosophical Transactions of The Royal Society B* 364: 537-548
 [5] Waage, J. K. (1981) How the zebra got its stripes - biting flies as selective agents in the evolution of zebra coloration. *Journal of the Entomological Society of South Africa* 44: 351-358
 [6] 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
 [7] Horváth, G.; Blahó, M.; Kriska, G.; Hegedűs, R.; Gerics, B.; Farkas, R.; Ákesson, S. (2010) An unexpected advantage of whiteness in horses: The most horsefly-proof horse has a depolarizing white coat. *Proceedings of the Royal Society of London B* 277: 1643-1650
 [8] 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
 [9] 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* (in press)
 [10] 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