

# ZEBRACSÍKOK FELTÉTELEZETT HŰTŐ HATÁSÁNAK KÍSÉRLETI CÁFOLATA – 2. rész

Horváth Gábor, Pereszlényi Ádám, Száz Dénes

ELTE Biológiai Fizika Tanszék

Barta András

Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Jánosi Imre Miklós

ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Gerics Balázs

Állatorvosi Egyetem, Tájanatómiai Intézet, Bécs, Ausztria

Susanne Ákesson

Lundi Egyetem, Biológia Tanszék, Svédország

## Eredmények

### Léghőmérséklet és szélesség

A vízzel töltött hordók  $T_{\text{mag}}$  maghőmérsékletét befolyásoló két legfontosabb tényezőnek a  $T_{\text{lég}}$  léghőmérsékletet és a  $w$  szélességet tekintettük. A négy kísérlet minden napján a léghőmérséklet a napfelkeltét követően emelkedett, kora délután volt a legmagasabb, majd csökkent. A vártak megfelelően, a szélesség ugyanezt a mintázatot követte. A  $T_{\text{lég}}$  és  $w$  közti erős pozitív korreláció (ami egy jól ismert meteorológiai jelenség és Afrikára is általánosítható) csökkentti annak valószínűségét, hogy a zebracsíkok fölött kialakuló légörvényeknek hűtő hatása van: a legmelegebb időszakban, amikor hűtésre van szük-

sége az állatnak, a nagyobb sebességű szelek könnyen elfújhatják a légörvényeket.

Konvektív légörvények csak a közel vízszintes fekete és fehér csíkok határán alakulhatnak ki, amikor a szomszédos fekete és fehér csíkok közti  $\Delta T_{f-f}$  hőmérséklet-különbség kellően nagy és a szélesség kellően kicsi. Kísérleteink alatt nem volt lehetőségünk folyamatosan mérni a  $\Delta T_{f-f}$ -t, azonban erős pozitív korreláció van a  $T_{\text{lég}}$  és  $\Delta T_{f-f}$  között: minél nagyobb az előbbi, annál nagyobb az utóbbi. Ezért a légörvények kialakulási gyakoriságának megbecsléséhez kilistáztuk azon meteorológiai helyzetek számát, amikor kísérleteink során a  $T_{\text{lég}} > T^*$  és  $w < w^*$  feltételek együttesen teljesültek. Azt találtuk, hogy a kis ( $w < w^* = 2$  km/h) szélességű időjárási helyzetek száma csökkent a növekvő  $T^*$  küszöbhőmérséklet hatására. Erősebb hűtés melegebb ( $T_{\text{lég}} > 25$  °C) időben szükséges, azonban 25 °C fölött elsősorban nagyobb ( $w > 5$  km/h) szélességek fordultak elő, ami megakadályozta a zebracsíkok fölötti légörvények kialakulását. Mindazonáltal a zebrát – izzadsága gyorsabb párologtatásával – a megnövekedett

Hálásak vagyunk *Simon Istvánnak*, hogy a gödi Szálender lovastanyán megengedte a terepkísérleteink elvégzését. Köszönjük a Fővárosi Állat- és Növénykertnek, hogy hőkamerával vizsgálhattuk az ott élő zebrákat. Horváth Gábor kutatásait az NKFIH K-123930 (*Zebracsíkok termofiziológiai vizsgálata: új magyarázat a zebracsíkok szerepére*) pályázat, Száz Dénes kutatómunkáját pedig az Emberi Erőforrások Minisztériuma Új Nemzeti Kiválósági Programjának 17-3. számú pályázata támogatta.



*Horváth Gábor* fizikus, az MTA doktora, egyetemi tanár, 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.



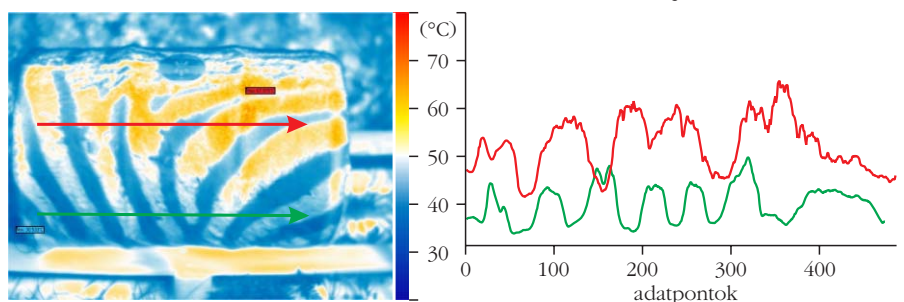
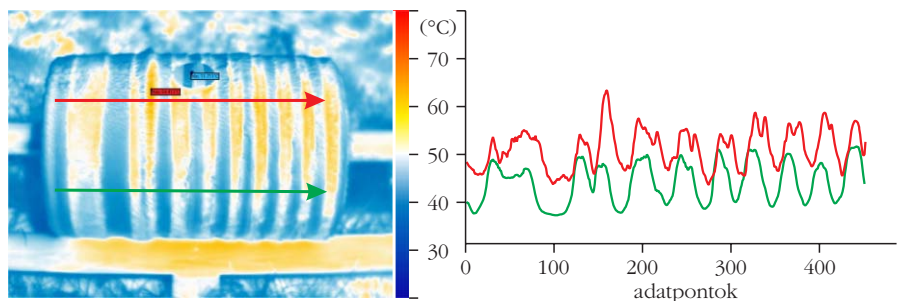
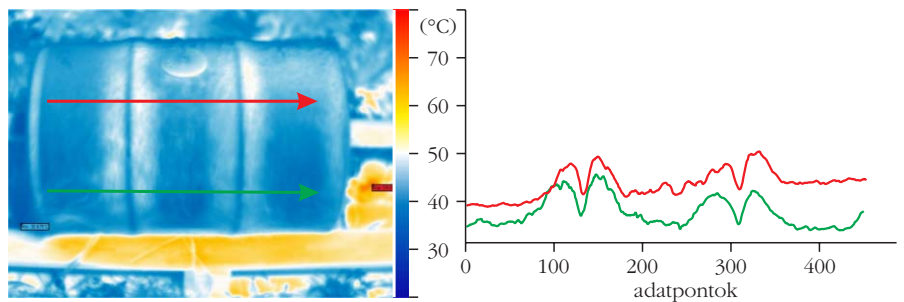
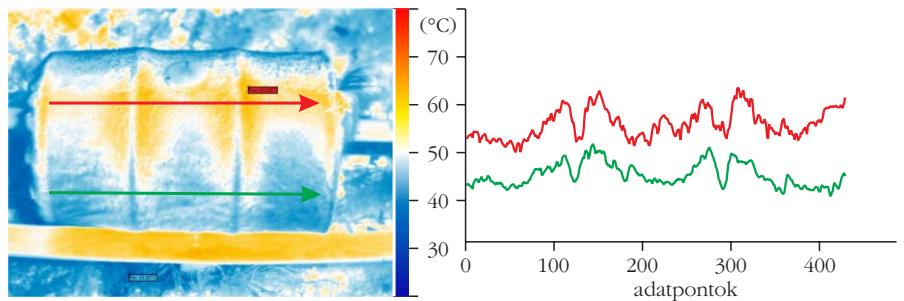
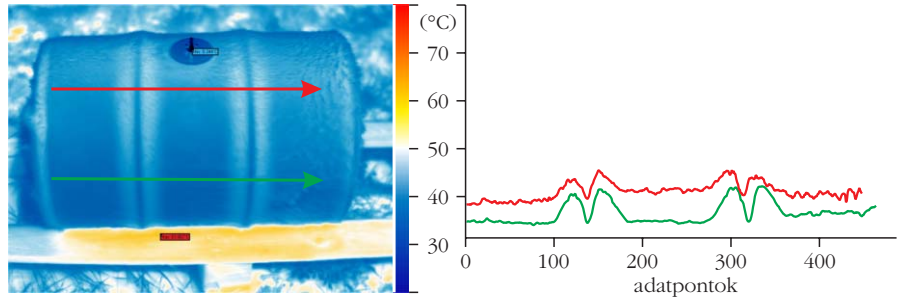
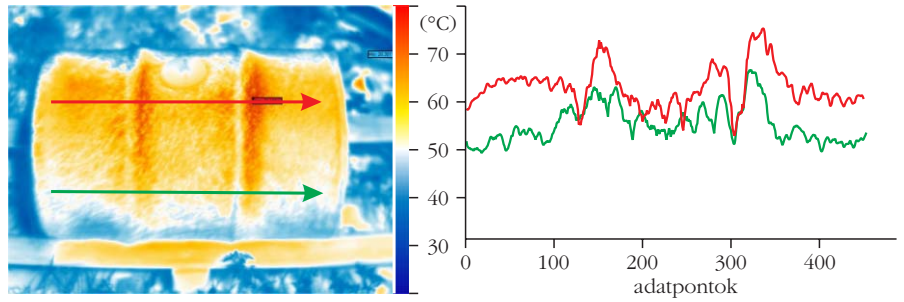
*Száz Dénes* 2013-ban végzett biofizika mesterszakon az ELTE-n. A Biológiai Fizika Tanszéken 2018-ban doktorált. Kutatásai felölelik a dunavirág kérszék kivilágtott hidaknál történő fénycsapdázódását, a vikingek égpolarizációs navigációját és a poláros fényszennyezést. 2017-től az ELTE szombathelyi Savaria 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.



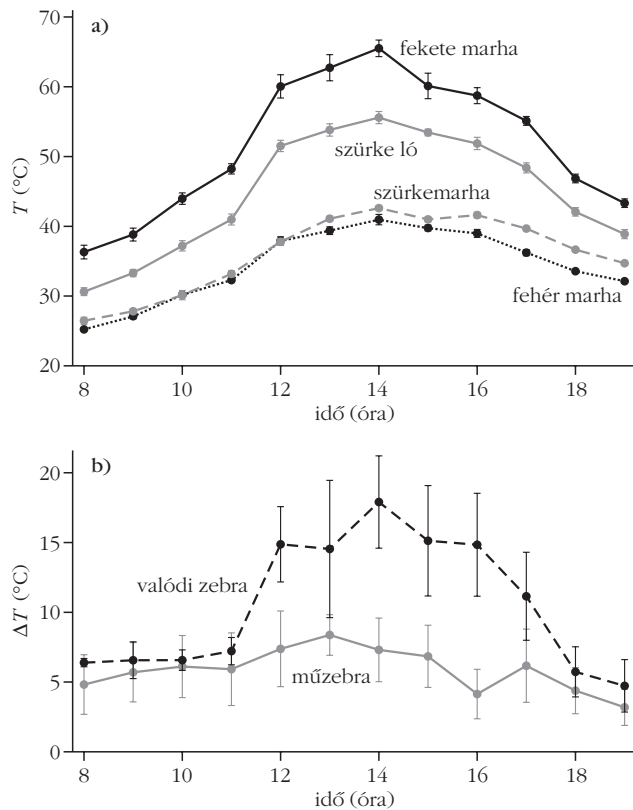
*Pereszlényi Ádám* az ELTE-n végzett biológus, jelenleg doktorandusz az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. Emellett a Magyar Természettudományi Múzeum Madárgyűjteményében segédmuzeológus. A biológiai és biofizikai kutatások mellett állatpreparálás is foglalkozik.



*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.







4. ábra. a) A homogén színű állatbőrökkel fedett hordók felületi hőmérsékletének  $T$  (°C) átlaga (pontok)  $\pm \sigma_T$  (°C) standard deviációja (függőleges pálcikák). b) A zebracsíkos bőrökkel borított hordók szomszédos fekete és fehér csíkjai közti felületi hőmérséklet-különbség  $\Delta T$  (°C) átlaga (pontok)  $\pm \sigma_{\Delta T}$  (°C) szórása (függőleges pálcikák) napközben az idő (UTC + 2 óra) függvényében. A hordók felületi hőmérsékletét hőkamerával mértük 2017. augusztus 15-én. Az így kapott termogramokból a napsütötte hordók palástjának tején egy egyenes mentén vettük a hőmérsékleti adatokat.

szélesebbég önmaga is hűti, így a nagyobb szélesebbég hatékonyabban hűtheti az állatot, mint a csíkos felület fölött feltételezett légörvények.

### Az állatbőrökkel burkolt hordók hőképe

A homogén színű bőrökkel bevont hordók  $T \pm \sigma_T$  (átlag  $\pm$  szórás) felületi hőmérsékletét és a csíkos bőrökkel borított hordók szomszédos fekete és fehér csíkjai közti  $\Delta T_{f-f} \pm \sigma_{\Delta T}$  hőmérséklet-különbségeket három napon, 2017. július 18-án és 30-án, valamint augusztus 5-én mértük egy hőkamerával (3. és 4. ábra). A hőmérsékletértékek kiértékelését a hordók

3. ábra az előző oldalon. A 3. és 4. terepkísérletben használt, különböző állati (fekete marha, fehér marha, szürke ló, szürkemarha, müzezebra, valódi zebra) bőrrel borított hat napsütötte hordó fényképe és hőképe (színekódolt hőmérséklet-eloszlása, termogramja), valamint a hordók  $T$  (°C) felületi hőmérsékletének változása a termogramokon két, nyíllal jelölt egyenes vonal mentén. A felső és alsó vonal a hordópалást napsütötte, illetve árnyékos részén fut. A nyílak kezdő- és végpontja (feje) a  $T$  görbék első és utolsó adatpontjának felel meg. Az e) és f) ábrán jól látszanak a szomszédos fekete és fehér csíkok közti nagy hőmérséklet-különbségek a termogramokon és a  $T$  görbékben egyaránt. A fényképek a termogramoktól függetlenül készültek, ezért rajtuk nem teljesen azonos a hordók helye.

azonos részein, egy vízszintes vonal mentén végeztük. A fekete, szürke és fehér hordók  $T$  felületi hőmérséklete 8 órától 14-15 óráig folyamatosan (de nem mindig monoton módon) emelkedett, majd a tetőzést követően a mérés befejeztéig csökkent. A vártnak megfelelően mindig a fehér és fekete bőrfelületek voltak a leghidegebbek, illetve a legmelegebbek, míg a szürke bőrfelületek hőmérsékletei a kettő közé estek. Hasonlóan, a fekete és fehér csíkok közti hőmérséklet-különbségek 8 órától 14-15 óráig nőttek, majd csökkentek. A valódi zebrabőrön mért hőmérséklet-különbségek általában magasabbak voltak, mint a mű zebrabőrön. 11 és 17 óra között a valódi zebrabőrön a csíkok közti hőmérséklet-különbség 7–18 °C volt, míg a mű zebrabőrön 6–12 °C. Ezekből az eredményekből megállapítható, hogy a fekete-fehér csíkok közötti hőmérséklet-különbségek a napsütötte napokon 6 órán keresztül voltak magasak, így a csíkok fölötti légörvények kialakulásának egyik előfeltétele, azaz a kellően magas hőmérséklet-különbség, biztosított volt e 6 órában.

Az 5. ábra a Budapesti Állat- és Növénykertben napon vagy árnyékban lévő zebrák (*Equus burchelli boehmi*) fényképeit és hőképeit, továbbá a hőképeken jelölt egyenes vonalak mentén mért hőmérséklet-változásokat mutatja. Az eredményekből (5. ábra) egyértelműen megállapítható volt, hogy a csíkok között magas hőmérséklet-különbség csak akkor



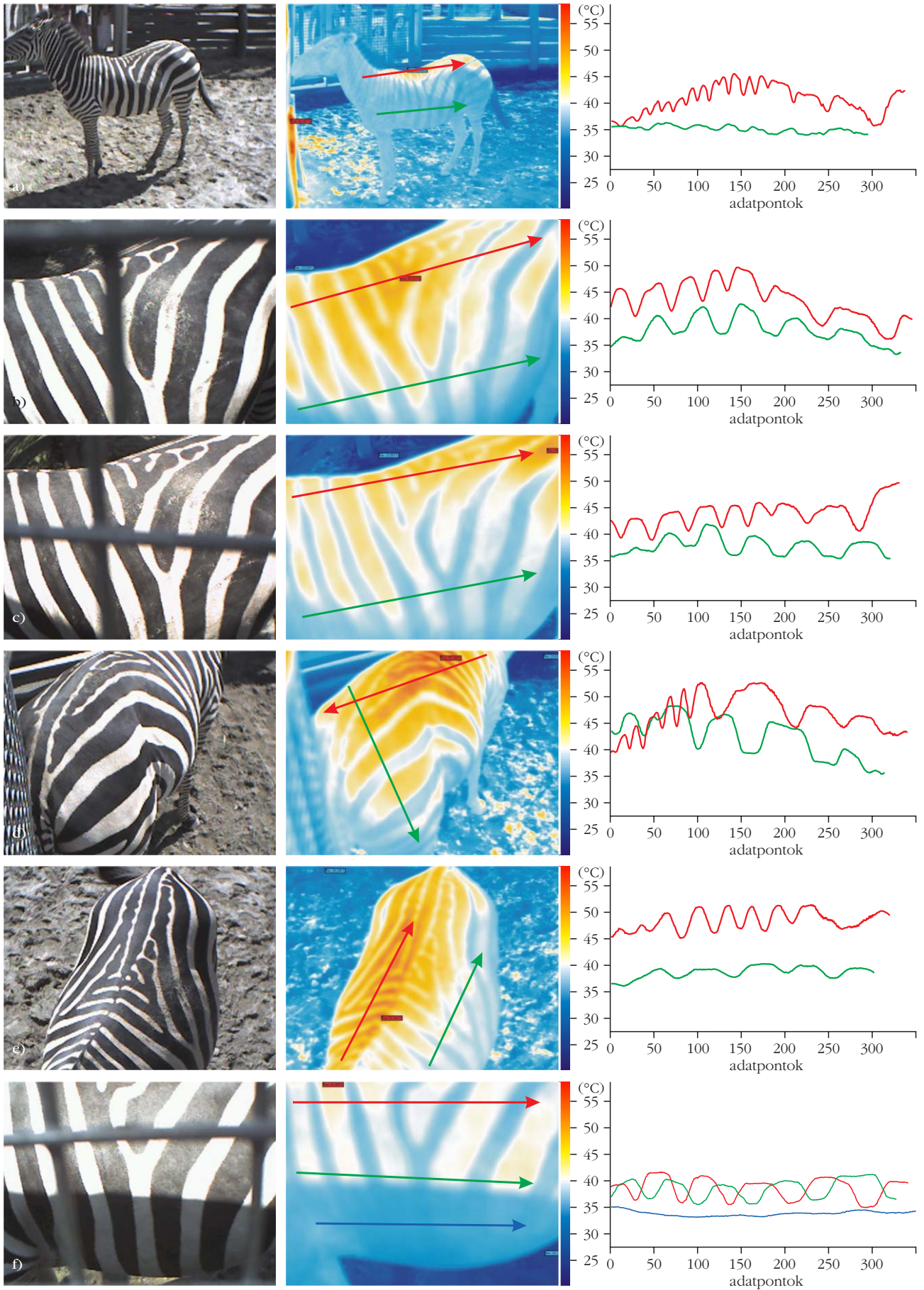
János Imre Miklós fizikus, az MTA doktora, az ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszéken egyetemi tanár, a Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium egyik alapítója. Érdeklődési területei a geofizikai hidrodinamikával kapcsolatos jelenségek modellezése és elemzése, nemlineáris idő-sor-analízis, légköri és óceáni adatbankok „bányászata”. Az ELTE Környezettudományi Doktori Iskola vezetője.



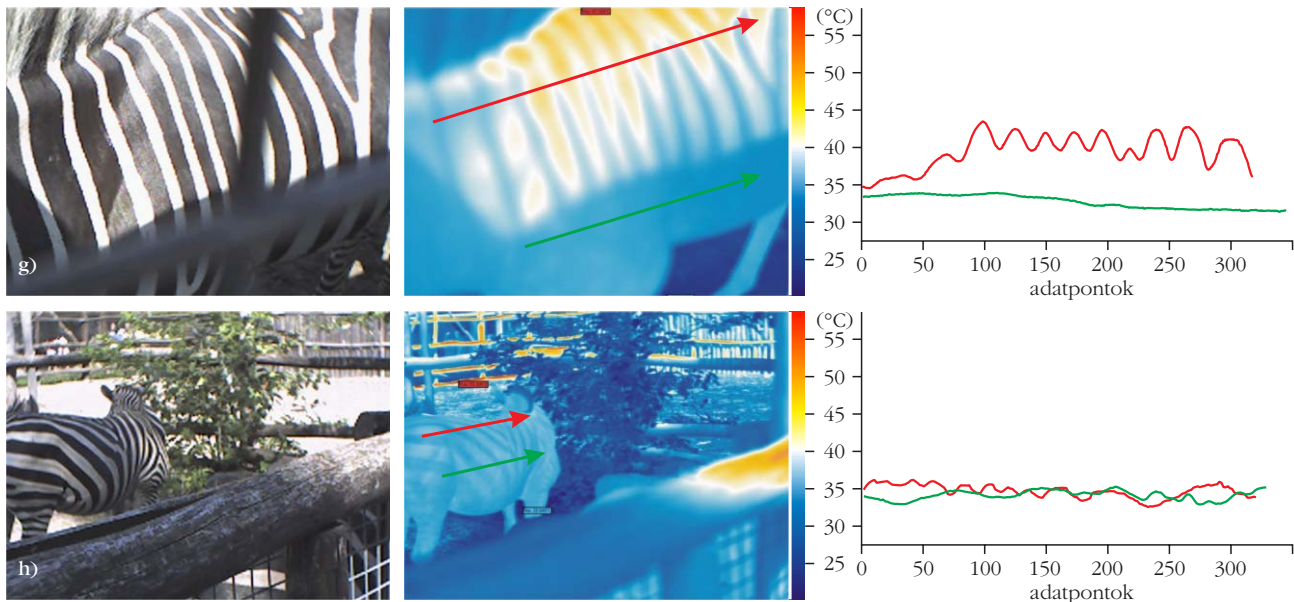
Gerics Balázs állatorvosi diplomáját Berlinben, a Humboldt Egyetemen szerezte 1988-ban. 30 évig Budapesten, jelenleg Bécsben oktatja házi emlősök funkcionális és alkalmazott anatómiáját. Korábban az idegrendszer funkcionális morfológiai változásait kutatta. Az utóbbi években a lovak patkolásához kapcsolódó témákkal foglalkozik.



Susanne Åkesson a svéd Lundi Egyetem Biológia Tanszékének biológus-ökológus professzora és a lundii Centre for Animal Movement Research igazgatója. Nemzetközi tudományos expedíciók szervezője-résztevője, amelyeken főleg a madarak orientációját vizsgálja. Az állatok (különösen a rovarok és madarak) navigációjának, mozgásának és ökológiájának neves kutatója. Számos szakcikk és több szakkönyv szerzője. Rangos szakmai kitüntetések – többek között a fizikai Ig Nobel-díj – birtokosa.







5. ábra az előző oldalon és itt. A Budapesti Állat- és Növénykert napsütötte a)–g) és árnyékos h) zebráinak (*Equus burchelli boebei*) fényképe és hőképe, valamint a zebrák  $T(^{\circ}\text{C})$  felületi hőmérsékletének változása a termogramokon nyilakkal jelölt egyes vonalak mentén. A felső és alsó vonal a zebratest napsütötte, illetve árnyékos részén fut. A nyilak kezdő- és végpontja (feje) a  $T$  görbék első és utolsó adatpontjának felel meg. Jól látszanak a napsütötte fekete és fehér zebracsíkok közti hőmérséklet-különbségek a termogramokon és a  $T$  görbékben egyaránt. A fényképek és a termogramok közti kis helybeli eltérések oka az optokamera és a hőkamera látóterének kis eltérése. Mivel az optokamera közvetlenül a hőkamera alatt volt, ezért a b), c), d) és g) ábrán az optokamera látta a zebrakarám kerítésének (vízszintes, függőleges) fém rudjait, míg e rudak a hőkamera látóterén kívülre estek.

alakult ki, amikor közvetlen napfény érte a zebrákat. A zebratest árnyékos felületrészein gyakorlatilag ( $\Delta T_{f-f} < 0,2^{\circ}\text{C}$ ) nem volt hőmérséklet-különbség. Ez azzal magyarázható, hogy a fekete csíkok csak napfényen tudnak fölmelegedni, amikor sokkal több napfényt nyelnek el, mint a fehér csíkok.

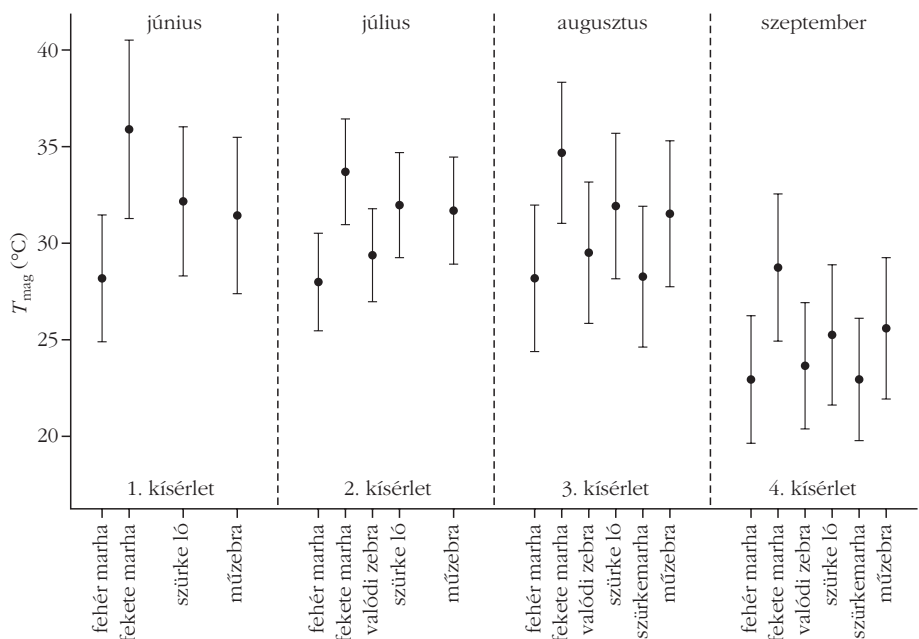
A hőképek vizsgálatából (3–5. ábra) megállapítottuk, hogy a kísérleteinkben használt, csíkos bőrökkel borított hordók felszíni hőmérséklet-eloszlásai jól modellezték az élő zebrák testfelszíni hőmérséklet-mintázatát.

### A hordókat borító állatbőrök visszaverődési spektruma

A mű zebrabőr fekete és fehér marhabőr-csíkokból készült, így a mű zebrabőr fekete és fehér csíkjainak visszaverődési spektruma megegyezett a fekete, illetve fehér marhabőrökével. A valódi zebrabőr fekete csíkjai sötétbarnák voltak, amelyek a legtöbb fényt 600 és 750 nm között verték vissza. A valódi és a mű zebrabőrök átlagspektrumaik gyakorlatilag

azonosak voltak a szürkemarhabőrrel. A szürke ló bőr kissé barnás volt, ezért a  $600 < \lambda < 650$  nm között verte vissza a legtöbb fényt. Ha a bőrök fehérségi fokát a fehér marhabőréhez ( $w_b = 1$ ) viszonyítjuk, akkor a szürkemarha-, valódi zebra-, szürke ló- és fekete marhabőr fehérsége rendre a következő volt:  $w_b = 0,55$ ,

6. ábra. A hordók  $T_{\text{mag}}$  maghőmérsékletének forró napokra számított átlaga (pontok)  $\pm$  szórása (függőleges pálcikák), amikor az átlagos napi léghőmérséklet  $25^{\circ}\text{C}$  fölött volt (amikor a zebracsíkok fölötti, hűtő hatású konvektív légörvények kialakulásának esélye a legnagyobb volt) 12:00 és 18:00 óra (UTC + 2 ó) között júniusban (1. kísérlet), júliusban (2. kísérlet) és augusztusban (3. kísérlet), valamint 12:00 és 17:00 óra között szeptemberben (4. kísérlet).



0,53, 0,43, 0,25, 0,03. Így a valódi zebrabőr fehérsége (0,53) gyakorlatilag megegyezett a szürkemarháéval (0,55), míg a mű zebrabőrnél (0,43) és a szürke lóbőrnél (0,25) nagyobb (világosabb) volt.

A hordók maghőmérsékletének időkésése a léghőmérséklethez képest

A négy kísérlet legmelegebb napjain (június 28., július 20., augusztus 10., szeptember 1.) a 6:00 és 20:00 óra közti időszakokra minden hordónál meghatároztuk, hogy a hordó maghőmérsékletének változása mekkora  $\Delta t$  időkéséssel követi a léghőmérséklet változását. A meteorológiai körülményektől és a hordót borító bőrtől függően  $\Delta t$  15 és 120 perc között változott, általában a fekete hordónál volt a legrövidebb.  $\Delta t$  nagy ingadozása miatt a további számításainkat  $\Delta t = 0, 30, 60, 90$  és 120 percre végeztük el.

A hordók maghőmérsékletének összehasonlítása az összes napon

A 6. ábra a hordók  $T_{mag}$  maghőmérsékletének meleg napokra (amikor a léghőmérséklet átlaga magasabb volt 25 °C-nál) számolt átlagát és szórását mutatja. Nem találtunk statisztikailag szignifikáns különbségeket a szürke ló-, mű zebra-, valódi zebra- és szürkemarhabőrrel fedett hordók maghőmérsékletei között. A fekete és fehér marhabőrökkel fedett hordók maghőmérsékletei szignifikánsan különböztek a homogén szürke és csíkos bőrökkel fedettekétől. Ahogy vártuk, a fehér hordó maghőmérséklete mindig szignifikánsan alacsonyabb volt a feketéénél. A statisztikailag szignifikáns maghőmérséklet-különbségeket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

A hordók maghőmérsékletének összevetése  $T^*$  és  $w^*$  szűrővel

A 7.a ábrán a görbe azon napok számát mutatja, amikor a  $w$  szélesség és a  $T_{lég}$  léghőmérséklet értékei egyszerre teljesítették a  $w < w^*$  és  $T_{lég} > T^*$  feltételeket a 3. kísérletben. A 7.b ábra görbéje azon meteorológiai helyzetek számát mutatja, amikor a  $w < w^*$  és  $T_{lég} > T^*$  környezeti feltételek együttesen teljesültek a 3. kísérletben. Mind a napok száma, mind a meteorológiai helyzetek száma drasztikusan csökkent, amikor a  $w^*$  szélességküszöb 3 km/h-nál kisebb volt. Ez azt jelenti, hogy kis szélességeknél a hordók maghőmérséklet-különbségeit csak jóval kevesebb adatból számolhattuk, mint nagy szélességeknél.

A 7.c ábra egy adott ( $i$ ) bőrral bevont hordó és a mű zebrabőrrel burkolt hordó maghőmérsékletei közötti  $\Delta T = T_i - T_{műzebra}$  különbségek átlagát és szórását mutatja a 3. kísérletben  $\Delta t = 60$  perc időkésés mellett. A 7.c ábrán a szélesség  $w^*$  küszöbértéke 10 és 1 km/h között, míg a léghőmérséklet  $T^*$  küszöbértéke 25 és 37 °C között változik. Hangsúlyozzuk, hogy a  $w < w^*$  és  $T_{lég} > T^*$  körülmények kedveznek a zebra-csíkok fölötti hűtő légáramok kialakulásának. A 7.c

1. táblázat

**Az 1.–4. terepkísérletben használt hordók  $T_{mag}$  maghőmérsékletei közti, statisztikusan szignifikáns különbségi relációk\* minden napra és csak a forró\*\* napokra történő hordópáronkénti összehasonlításban.**

összehasonlítás minden napra	1. kís.	feh < szl, feh < mz, szl < fek, mz < fek
	2. kís.	feh < szl, vz < fek
	3. kís.	vz < fek, szm < fek
	4. kís.	szm < fek
összehasonlítás csak a forró** napokra	1. kís.	feh < szl, feh < mz, szl < fek, mz < fek
	2. kís.	feh < szl, feh < mz, vz < fek
	3. kís.	vz < fek, szm < fek
	4. kís.	vz < fek, szm < fek

Jelmagyarázat: feh: fehér, fek: fekete, szl: szürke ló, mz: műzebra, vz: valódi zebra, szm: szürkemarha, kís.: kísérlet

\* < jelentése: kisebb, mint

\*\*  $T_{lég} > 25$  °C átlagos léghőmérsékletű

ábrán látható, hogy a fekete hordó maghőmérsékletének átlaga 3-3,5 °C-kal mindig magasabb volt a mű zebrabőrös hordónál. A mű zebrabőrrel burkolt hordó maghőmérsékletéhez viszonyítva a fehér marhabőrrel és szürkemarhabőrrel bevont hordók maghőmérséklete mindig 3-3,5 °C-kal alacsonyabb volt, a szürke lóbőrrel borított hordó 0-0,5 °C-kal melegebb volt, és a valódi zebrabőrrel bevont hordó 1,5-2,5 °C-kal volt hidegebb.

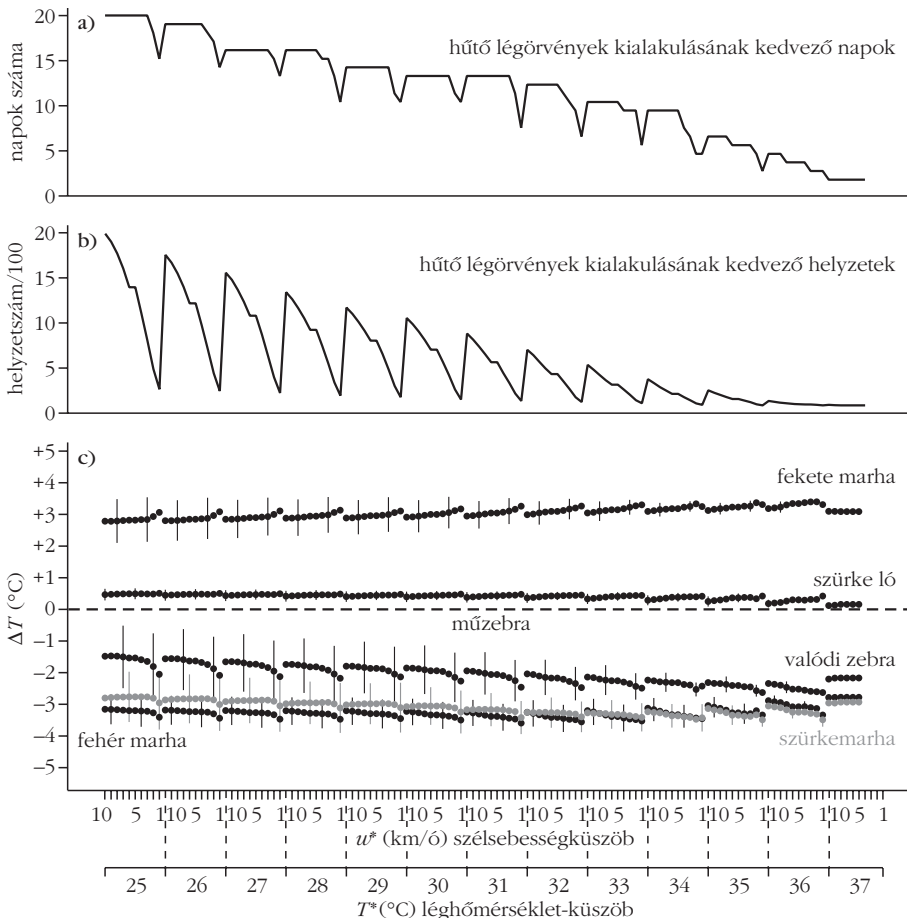
A  $\Delta t$  időkéséstől függetlenül, a páros Wilcoxon-teszt erősen szignifikáns különbséget mutatott ( $p < 0,00001$ ) a következő hordópáronál: műzebra/szürke ló, műzebra/szürkemarha, műzebra/valódi zebra. Azonban e szignifikáns különbségek csupán annyit jelentenek, hogy a hordók maghőmérséklete egymáshoz képest szinkronizáltan változott. Még abban az esetben is, amikor a  $\Delta T_{mag}$  maghőmérséklet-különbség csupán 0,1 °C vagy kisebb, a páros Wilcoxon-teszt eredménye erősen szignifikáns. Ezért ez a statisztikai eredmény csak az állandóan fennálló hőmérséklet-különbségeket bizonyítja.

E maghőmérsékleti különbségek egyszerűen magyarázhatók a hordókat fedő bőrök fehérségi foka által meghatározott napfényelnyelés melegítő hatásával: minél kisebb a bőr átlagos fehérsége (minél sötétebb a szürkése), annál több napfényt elnyelve, egyre nagyobb a hordó maghőmérséklete. A hordók fehérségi foka csökkenő sorrendben a következő volt: fehér marha ( $w_b = 1$ ), szürkemarha (0,55), valódi zebra (0,53), műzebra (0,43), szürke ló (0,25), fekete marha (0,03). A hordók átlagos maghőmérséklete emelkedő sorrendben ugyanezt a sorrendet követte: fehér marha < szürkemarha < valódi zebra < műzebra < szürke ló < fekete marha (7.c ábra).

Figyelemre méltó, hogy a hordók egymáshoz viszonyított maghőmérsékletei függetlenek voltak a  $\Delta t$  (= 0, 30, 60, 90, 120 perc) időkéséstől, valamint a szélesség és léghőmérséklet  $w^*$  és  $T^*$  küszöbértékeitől (7. ábra).  $w^*$  és  $T^*$  változásai csak csekély hatással voltak a

maghőmérsékletekre: csökkenő  $w^*$  csupán enyhe ívet eredményezett a  $\Delta T(w^*, T^*)$  görbéken, általában növekvő maghőmérséklet-különbséggel, míg a növekvő  $T^*$  hatására kissé nagyobb lett a maghőmérséklet-különbség. Csökkenő  $w^*$  és növekvő  $T^*$  hatására a  $w < w^*$  és  $T_{\text{lég}} > T^*$  feltételek együttes teljesülését biztosító meteorológiai helyzetek  $N$  száma drasztikusan csökkent mindegyik kísérletben. Kis  $N$  esetén a véletlen meteorológiai hatásoknak nagyobb befolyása volt a maghőmérséklet-különbségekre. Ahogy  $N$  csökkent (párhuzamosan a napok számával, amikor a  $w < w^*$  és  $T_{\text{lég}} > T^*$  feltételek teljesültek), a  $\Delta T$  szórása szintén csökkent. A növekvő  $\Delta t$  időközés picivel kisebb maghőmérséklet-különbségeket eredményezett. Mind a négy kísérletben a  $\Delta t = 0$  és 120 perces időközéssel számított  $\Delta T(w^*, T^*)$  görbéket összehasonlítva, a  $\Delta T$  különbségek minden esetben kisebbek voltak 0,5 °C-nál.

7. ábra. A hordók maghőmérsékleteinek összehasonlítása. a) Azon napok száma, mikor a  $w$  napi átlagos szélesség és a  $T_{\text{lég}}$  napi átlagos léghőmérséklet a  $w < w^*$  és  $T_{\text{lég}} > T^*$  feltételeket teljesítette a 3. kísérlet során, amely meteorológiai viszonyok kedveztek a zebracsíkos felületek fölötti hűtő légörvények kialakulásának. b) Azon meteorológiai helyzetek száma, mikor a pillanatnyi  $w$  és  $T_{\text{lég}}$  a  $w < w^*$  és  $T_{\text{lég}} > T^*$  feltételeket teljesítette a 3. kísérletben. c) Egy adott  $i$  állati (fekete pontok,  $i$ : fekete marha, szürke ló, valódi zebra, fehér marha; szürke pontok,  $i$ : szürkemarha) bőrrel fedett hordó  $T_i$  átlagos maghőmérséklete és a mű zebrabőrrel borított hordó  $T_{\text{műzebra}}$  átlagos maghőmérséklete közti  $\Delta T = T_i - T_{\text{műzebra}}$  (fekete vagy szürke pontok) különbség a 3. kísérletben a  $t$  idő függvényében  $\Delta t = 60$  perc időközés mellett. A  $\Delta T = 0$  °C-nál húzódozó vízszintes vonal a viszonyítási alapul szolgáló mű zebrabőrrel fedett hordót jelenti. A vízszintes tengely felső skálája alatt a szélesség  $w^*$  küszöbértéke látható, ami periodikusan csökken 10 km/h-ról 1 km/h-ra 1 km/h lépéssel az alsó skálán feltüntetett léghőmérséklet egy állandó  $T^*$  küszöbértéke mellett, amely 25 °C-ról 37 °C-ra nő 1 °C lépésként. A függőleges pálcikákkal ábrázolt szórást – a könnyebb átláthatóság kedvéért – csak minden 5. adatpontra tüntettük fel.



## Elemzés

Sokak feltételezése szerint napsütésben fel- és leszálló légáramlatok alakulnak ki a zebrák fekete, illetve fehér csíkjai fölött [4, 5]. Larison és munkatársai [5] is megjegyezték, hogy ezek az áramlások csak vízszinteshez közeli csíkos felületek fölött keletkezhetnek. (Ha a zebrát nem éri közvetlen napsugárzás, akkor ezen légörvények nem formálódhatnak, hiszen hiányzik a szomszédos fekete-fehér csíkok közti hőmérséklet-különbség.) Az ilyen konvektív légörvények hűthetik a napsütötte zebratestet, ami forró, napos időjárásakor előny. Napfényben – főleg szélcsendes időben – a csíkos bőrökkel bevont hordóink csaknem vízszintes, legfelsőbb sávja fölött ilyen légörvények alakulhattak ki. Napsütésben a csíkos hordóink reprodukálták a napsütötte zebrák testfelszíni hőmérséklet-mintázatát. Ezért terepkísérleteinkben két hordóknak csíkozásának némi hűtő hatása volt várható. Arra számítottunk, hogy a csíkos hordókban a víz lényegesen alacsonyabb hőmérsékletű lesz, mint a hasonló átlagos fehérségű szürke hordókban. Legfontosabb kérdésünk az volt, hogy a zebrák törzsét modellező, napsütötte fekete-fehér csíkos bőrökkel borított, hengeres testek (vízzel töltött hordók) fölött esetleg kialakuló légörvények hatékony hűtőhatással bírnak-e. A négy kísérletünk egyikében sem találtunk ilyen feltételezett hűtő hatást.

Bár a csíkos hordóink fölött esetleg kialakulhattak konvektív légörvények, ezek hűtő hatása nem érvényesült a bennük lévő víz maghőmérsékletének alakulásában. A maghőmérsékletet sokkal inkább a hordókat borító állatbőrök átlagos fehérsége – azaz a napfény átlagos elnyelődése – határozta meg. Vizsgálataink szerint, napsütésben a fekete lovak és szarvasmarhák szenvedik meg leginkább a napsugárzás melegítő hatását, míg a fehérek a legkevésbé. A zebrák, valamint szürke lovak és marhák e tekintetben középpontot foglalnak helyet a kísérleteinkben használt szürke hordóinkhoz hasonlóan. E következtetésünket támasztják alá Caro [3] fekete bivalyokon, csíkos zebrákon, világosbarna impalákon és foltos zsiráfokon mért terepi adatai is.

Meleg, napsütéses időben a zebrák, sok más patás állathoz hasonlóan [8], izzadással tudják hűteni magukat, mert verejtékük párologtatása csökkenti bőrük hőmérsékletét. Alternatívaként, egy emlős módosíthatja egyes testrészeinek véráramlását (mint például az afrikai elefántok füleinek hőleadása hőségben, vagy a lovak patáinak időszakos hőszigetelése hóban). Kísérleteinkben nem modelleztük a verejtékezés és vérkeringés hűtő hatását. Elsősorban ez magyarázhatja, miért volt a csíkos hordóink palástjának legfelső sávján nagyobb a szomszédos fekete és fehér csíkok közti hőmérséklet-különbség (5–16 °C), mint a vizsgált élő zebrák hátán (2–10 °C).

Caro [3] szerint a zebracsíkok hőszabályozási szerepének ellentmondó további érvek a következők: (i) Termográfiai terepi mérési adatok. (ii) Szeles időben, vagy a zebrák mozgásakor nem alakulhatnak ki a test fölötti légörvények. (iii) A meleg és száraz környezetben élő emlősök többsége világos szőrzetű. (iv) A zebrákkal azonos környezetben élő többi növényevő nem csíkos, pedig a testük hűtésére nekik is szükségük van. (v) A nagyon forró éghajlaton élő többi lófélé (például az ázsiai és az afrikai vad szamár) sem csíkos. (vi) A hegyi zebrák hátán fekete-fehér rácsos mintázat van, ami nem segíti elő fölöttük a konvektív légörvények kialakulását.

Terepkísérleteinkben azt találtuk, hogy napsütésben a zebracsíkos állatmodelleink (hordóink) maghőmérsékletei soha sem különböztek jelentősen a hasonló átlagos fehérségű homogén szürke modellekétől. Ez olyan kísérleti bizonyíték, ami nem támasztja alá a fekete-fehér csíkok hűtő hatásáról szóló, széles körben elterjedt feltételezést.

Kísérleteinkben nem alkalmaztunk a lovak, zebrák és szarvasmarhák lábait modellező függőleges támasztékokat: hordóink 10 cm magasságban voltak a füves talaj fölött, ami befolyásolhatta a hordók körüli légmozgásokat. Mivel a szélesebbég némileg nagyobb lehet a zebrák testmagasságában (1-1,5 m), mint a talaj közelében, ezért a szelek hűtő hatása jobban érvényesülhet a zebráknál, mint hordóinknál. Minthogy mindegyik hordóink egy adott időpontban ugyanolyan szélviszonyoknak volt kitéve, ezért maghőmérsékletüket a szelek egyformán befolyásolhatták. Másrészt pedig, ha hordóink a zebratesthez hasonlóan lábakon álltak volna, akkor a körülöttük várhatóan erősebb légmozgások jelentősebb hatással bírhattak volna. A földközélen elhelyezett zebracsíkos hordóink fölött így könnyebben alakulhattak ki konvektív légörvények. Ennek ellenére e lehetséges örvények hűtő hatásának semmi jelét sem tudtuk kimutatni.

A vérkeringés hatékonyan homogenizálja a melegvérű emlősök testhőmérsékletét. A hordóink belsejében lévő víz sem volt nyugalomban, mert már kis vízszintes hőmérséklet-különbségek is vízmozgást keltettek bennük. Ilyen hőmérséklet-különbség a hordók hossz tengelyének kelet-nyugati irányulásából adódott, mivel a hordópalást alsó, északi negyedét soha nem érte közvetlen napfény.

Meg kell jegyeznünk, hogy a zebrák törzsének és nyakának oldalán, valamint lábain (amelyek ferde

vagy függőleges felületek) a fekete csíkok előfordulása a hőhátartás szempontból hátrányos, mivel e csíkok napfényelnyelés miatti melegítő hatását konvektív légörvények nem ellensúlyozhatják, mert ilyenek semmilyen körülmények között sem alakulhatnak ki ott. Az a tény, hogy a zebrák oldalai és lábai is csíkozott mintázatúak, szintén ellentmond a csíkok hűtő hatásáról szóló hipotézisnek.

Az emlősök számos módját alkalmazzák testhőmérsékletük szabályozásának, beleértve szőrzetük színét, szerkezetét és testük néhány fiziológiai folyamatát [8]. Terepkísérleteink azt mutatták, hogy a zebrák csíkjai nem hűtik a testüket.

## Következtetések

Négy terepkísérletünk eredményei alapján az alábbi következtetésekre jutottunk:

– A maghőmérséklet mindig a fekete hordóban volt a legmagasabb.

– A maghőmérséklet mindig a fehér hordóban volt a legalacsonyabb.

– A két zebracsíkos hordó és a homogén szürke hordó maghőmérsékletei a fehér és a fekete hordókéi között voltak.

– A szürke lóbőrrel bevont hordó átlagos maghőmérséklete 0,5 °C-kal volt magasabb, a valódi zebra-bőrrel borított hordó pedig 1,5-2,5 °C-kal volt alacsonyabb, mint a mű zebrabőrrel borítotté. A számos (55) forró napon (átlaghőmérséklet > 25 °C) sem volt szignifikáns különbség a csíkos és a szürke hordók maghőmérsékletei között. Ezt a légmozgás és az aktuális léghőmérséklet sem befolyásolta.

– A léghőmérséklet és a szélesebbég küszöbértékeit változtatva sem módosult jelentősen a szürke és a csíkos hordók maghőmérsékleteinek különbsége. Azonos maradt az időkésés is, amivel a forró napokon a mag- és léghőmérsékletek változásai egymást követték. Ez arra utal, hogy a napsütötte csíkos hordók fölötti esetleges légörvények nem befolyásolták e hordók maghőmérsékletét. A csíkos és szürke hordók maghőmérsékletei közti jelentéktelen (1,5-2,5 °C-nyi) különbség egyszerűen a napfény elnyelését meghatározó átlagos felületi fehérséggel magyarázható.

Mindezen kísérleti eredmények cáfolják a zebracsíkok hűtő hatására vonatkozó hipotézist, hiszen a csíkos szőr nem tartja a test maghőmérsékletét alacsonyabban, mint az azonos átlagos fehérségű homogén szürke szőr.

## Irodalom

8. K. Cena, J. L. Monteith: Transfer processes in animal coats. I. Radiative transfer. II. Conduction and convection. III. Water vapour diffusion. *Proceedings of the Royal Society of London B* 188 (1975) 377–393., 395–411., 413–423.

## HELYESBÍTÉS

Ezen írás első részében, a 120. oldalon – a műszaki szerkesztő tévesztése miatt – „≤” helyett következetesen „≥” szerepel, amelyért a szerzőktől és az olvasóktól is elnézést kér.