

ZEBRACSIKOK TERMOFIZIOLÓGIAI VIZSGÁLATA, AVAGY MIÉRT CSÍKOS A ZEBRA?¹

Horváth Gábor¹, Pereszlényi Ádám^{1,2}, Száz Dénes¹, Takács Péter¹,
Egri Ádám^{1,3}, Jánosi Imre⁴

¹ ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Budapest

² Deutsches Meeresmuseum, Stralsund, Németország

³ Ökológiai Kutatóközpont, Budapest

⁴ Nemzeti Köszolgálati Egyetem, Víz- és Környezetpolitikai Tanszék, Budapest

Bevezetés

Charles Darwin és Alfred Wallace 1860–1870-es években folyt vitája óta foglalkoztatja a biológusokat az a kérdés, hogy mi lehet a szerepe a zebrák feltűnő fekete-fehér csíkjainak, milyen előnyt és/vagy hátrányt jelenthetnek a viselőiknek. Számos elmélet született minderre, amelyek zömét eddig még nem ellenőrizték. Az egyik hipotézis szerint a csíkok hűtő hatásúak lehetnek. A kísérletileg legjobb

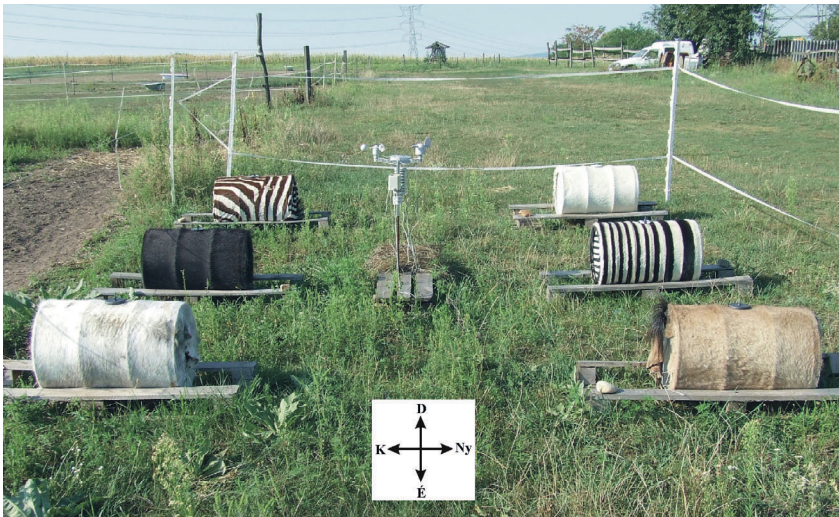
igazolt magyarázat, hogy a csíkos kültakaró nem vonzza a vérszívó cecelegyeket és bögölyöket, ami nagy előny a csíkos gazdaállat számára, mert e parazita legyek súlyos, gyakran halálos betegségek kórokozóit terjesztik vérszívásuk közben. Szakmai körökben az is rejtélynek számított, hogy a bögölyök miért a sötét színű gazdákat kedvelik, és azokat miért főleg csak napsütésben támadják meg. Az elmúlt bő évtizedben mi is bekapcsolódtunk e kérdések vizsgálatába, miközben teszteltünk egy korábbi hipotézist, továbbá a zebracsíkok szerepére találtunk egy optikai (fénypolarizációs) és egy termofiziológiai új ma-

gyarázatot. Mivel az előzőről részben már beszámoltunk a Fizikai Szemlében is [1, 2], ezért jelen cikkünkben csak az utóbbiról írunk.

A csíkjai nem hűtik a zebrát

A zebrák fehér és fekete csíkjairól kimutattuk [3, 4, 5], hogy optikailag/vizuálisan nem vonzzák a vérszívó nöstény bögölyöket, amelyeket többek között azért célszerű elriasztani, mert vérszívásukkor súlyos betegségeket közvetítő kórokozókat juttatnak a gazdaállatok vérébe. Egy közkeletű hipotézis szerint a csíkjaik hűtik a zebrákat, amit azonban egy terepkísérlet-

¹ E cikkünkkel a 2023. augusztus 20-án tragikus hirtelenséggel, váratlanul elhunyt szerzőtársunkra, Jánosi Imre fizikus professzorra emlékezünk.



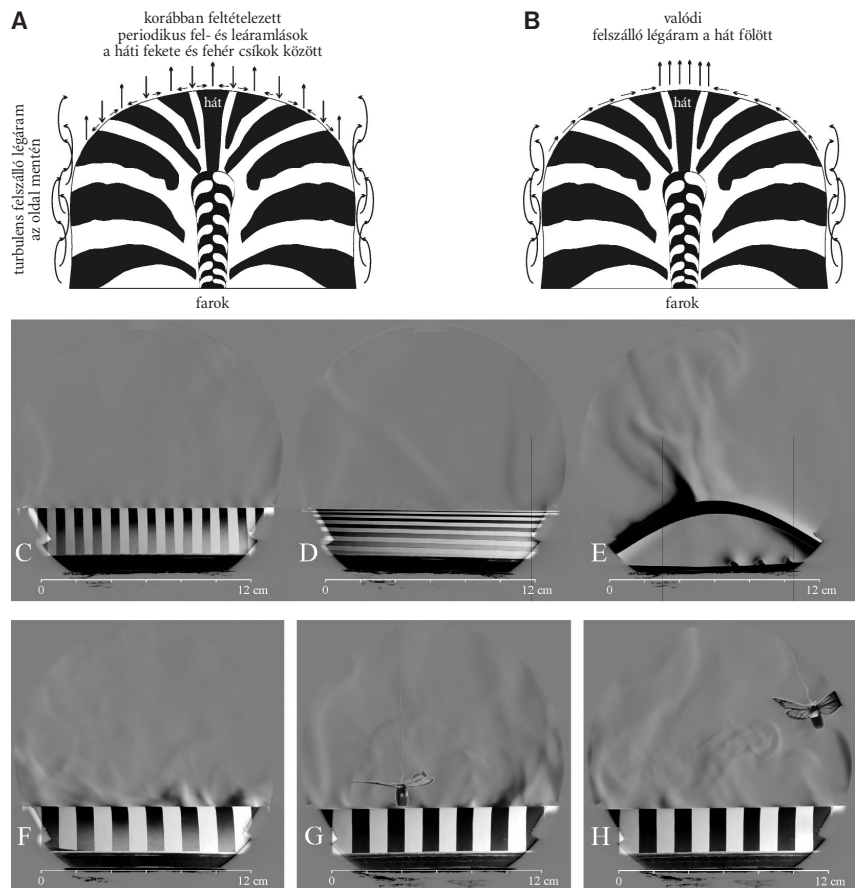
1. ábra. Egy terepkísérletben szarvasmarhák, lovak és egy zebra eltérő színű és mintázatú bőreivel borított, víztöltetű fémhordókat használtunk termodinamikai modelleként. A bal felső sarokbeli hordót valódi zebrabőrrel vontuk be, míg a jobb középsőt változó szélességű fehér-fekete marhabőr-csíkokból összevarrt kültakaróval [6, 7]

nyel megvilágított, vízszintes, hengeres felületek fölötti légáramlásokat Schlieren-optikával vizsgáltunk [8]. Azt tapasztaltuk, hogy a fehér csíkok fölött nem alakultak ki leszálló légáramlatok (2B–E ábra). A csíkoknak a föléáramlások keletkezése elősegítésében és oldal irányú elsodródása gátlásában megnyilvánuló hatása a felület fölött 1–2 cm-nél magasabban már elhanyagolható volt. Noha szélcsendben föléáramlások keletkeznek a közel vízszintes napsütötte zebracsíkok fölött, ezeket már a leggyöngébb szelek is elfújják (2F–H ábra), továbbá a zebra saját mozgásakor föllépő relatív légmozgások is szétzilálják [8]. Mindezt cáfolja a zebracsíkok fölött napsütésben formálódó periodikus légörvénnyek hiedelmét.

ben cáfoltuk [6, 7]. A gazdatestet vízzel töltött fémhordókkal modelleztük, amelyeket lovak, szarvasmarhák és egy zebra fekete, barna, szürke és fehér, homogén, illetve csíkos bőreivel borítottunk (1. ábra). E hordókat nyáron nappal folyamatosan érte a nap- és égfény, mialatt vízálló automata hőmérőkkel 5 percenként mértük a maghőmérsékletüket. Azt találtuk [6, 7], hogy a csíkos hordók és az átlagszürkeségükhöz hasonló egyszínű hordók maghőmérsékletei között soha sem volt szignifikáns különbség. Ezért tehát a csíkos kültakaró nem tartja hidegebben a zebratestet, mint a csíkok átlagszürkeségének megfelelő homogén színű. Minderről a Fizikai Szemlében már részletesen írtunk [7].

Napsütésben nincs hűtő légörvénysor a zebracsíkok fölött

Egy másik elterjedt hipotézis szerint, a napsütötte zebracsíkok fölött hűtő légörvénysor alakul ki: a fekete csíkok fölött fölszálló meleg légáramlatok keletkeznek, a fehérek fölött pedig leszálló hűvösebbek (2A ábra). Ezt laboratóriumban ellenőriztük. Eltérő csíkosságú valódi/mesterséges, sima/szörös szarvasmarha-, ló- és zebrabőrökkel borított, erős fehér fény-



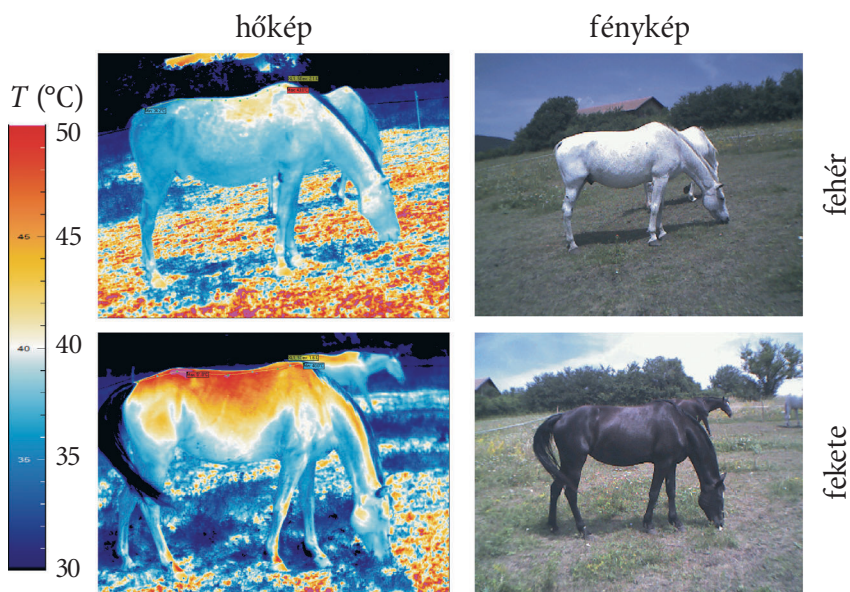
2. ábra. (A) A zebratestnél korábban feltételezett konvektív légörvények. (B) A Schlieren-optika szerinti valódi légáramlási viszonyok a zebratest körül. (C–H) Erős fehér fényfelülről megvilágított, csíkos, sima, hengeres tesztfelületekről fölszálló, Schlieren-optikával láthatóvá tett légáramlások, amikor a henger vízszintes hossz tengelye merőleges (C, D, F–H), illetve párhuzamos (E) a Schlieren-berendezés fénynyalábjával, és a görbült csíkok merőlegesek (C, F–H), illetve párhuzamosak (D, E) a hossz tengelyhez képest. Az F ábrán egy enyhe vízszintes szellő fújta a fény útjával párhuzamosan, a fényképezőgéptől a tesztfelület irányába, míg a G és H ábrán szélcsendben egy lepkemakett mozgott föl-le (G), illetve jobbra-balra (H) [8]

A vérszívó bögölyök napsütötte, sötét gazdákat kedvelnek

A haszonállatok (főleg lovak és szarvasmarhák) tartói által régóta közismert, hogy a vért szívni akaró nőtény bögölyök a sötét gazdákat kedvelik a világosakkal szemben, és jellemzően csak napsütésben támadnak, valamint zömében a napsütötte gazdákra szállnak az árnyékosakkal szemben. A bögölyök e melegpreferenciáját terepkísérletben mi is igazoltuk: Egy jeges vízzel teli hideg és egy légtöltött meleg fekete műanyag hordó bögölyökre kifejtett vonzását hasonlítottuk össze [9]. Hőkamerával, képpalkotó polariméterrel és Schlieren-optikával mértük e hordók és kicsinyített modelljeik termális és optikai sajátosságait. A hideg és meleg hordó árnyékos és napos oldalain számoltuk a bögölylandolásokat, valamint mértük a rovarok e felülrészeken eltöltött idejeit. Kimutattuk, hogy a bögölynőtények a napsütötte, meleg, fényes, fekete céltárgyakat kedvelik az azonos optikai jellemzőjű árnyékos/napos hidegebbekkel szemben. E rovarok már a leszállásuk előtt is érzékelik a felület melletti/fölötti légrétegnek a T felületi hőmérséklettel pozitívan korreláló hőmérsékletét, aminek alapján leszállnak (ha T kedvező), vagy tovább röpködnek (ha T túl alacsony/magas). Mindez alátámasztja azon hipotézisünket, hogy a vért szívni szándékozó nőtény bögölyök részben azért preferálják a melegebb testfelszíni gazdaállatokat, mivel melegebb (de még nem túl forró) mikroklímában a szárnyizmaik gyorsabb működésének köszönhetően hirtelen elröppenéssel kerülhetnek el a gazdának a fájdalmas vérszívásuk által kiváltott veszélyes parazitaűző ellenreakcióit [9].

Miért szeretnek vért szívni a bögölyök a melegebb testfelszíni állatokon?

Az előző fejezet végén említett hipotézisünket egy másik terepkísérletben is teszteltük. Olyan nőtény bögölyök menekülési sikerét mértük a felszíni hőmérséklet függvényében, amelyek



3. ábra. Napsütötte fehér és fekete lovak hőképei és fényképei [10]

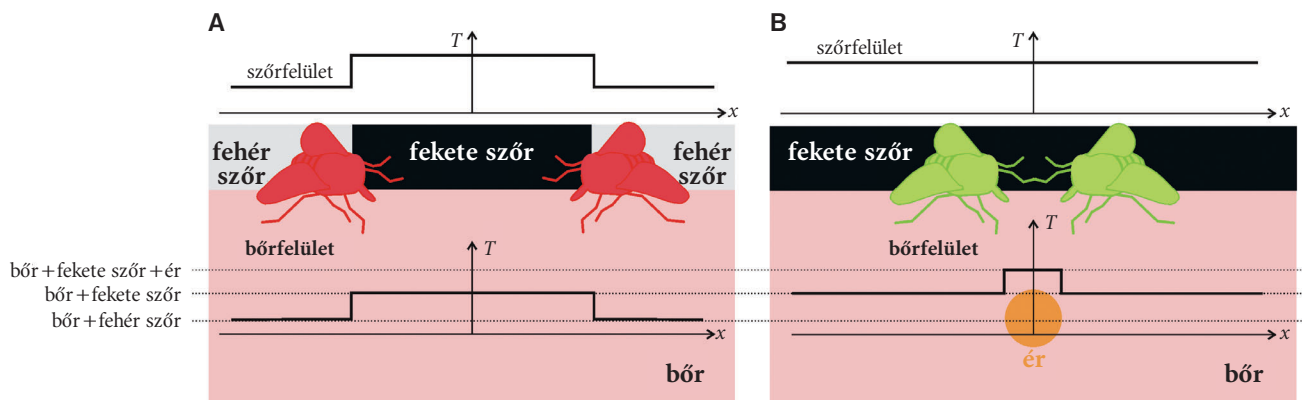
egy napsütötte levegővel vagy jeges vízzel teli fekete hordóra szálltak le [10]. A leszállt bögölyöket megpróbáltuk mechanikusan elkapni, számoltuk a sikeres és sikertelen elkapásokat, majd mértük a leszállás helyének hőmérsékletét. Továbbá, különböző színű lovak testfelszíni hőmérsékleteloszlását mértük hőkamerával napos és felhős időben (3. ábra). Azt kaptuk [10], hogy a lovak testfelszínére jellemző hőmérséklettartományban a bögölyök menekülési sikere a csökkenő felszíni hőmérséklettel csökken. Ez magyarázza, hogy e rovarok miért szeretnek vért szívni melegebb gazdaállatokon. Mivel minél sötétebb egy napsütötte gazda, annál melegebb a felülete, ezen eredményünk egyben azt is magyarázza, hogy a nőtény bögölyök napsütésben miért részesítik előnyben a sötét gazdákat a világosakkal szemben, továbbá miért támadnak túlnyomórészt napsütésben. A nőtény bögölyök általában ezért nem követik az előlük menekülő gazdaállatokat az erdők és istállók árnyékába.

A zebracsíkok szerepének új termofiziológiai magyarázata

A zebracsíkok szerepének számos magyarázata közül kísérletileg az a legalaposabban igazolt, hogy a csíkos kültakaró a gazdaállatot védi a vérszí-

vó cecelegyektől és bögölyöktől. Nemrég a zebracsíkok bögölytaszító hatásának új magyarázatával álltunk elő [11], amit terepkísérletekkel támasztottunk alá [11, 12].

A környezetünkél kissé melegebb vérerek fölötti bőrfelszín hőmérséklet-grádeinseit nehéz megkülönböztetni a napsütötte zebrabőr melegebb fekete és hidegebb fehér csíkjainak határvonalainál fellépő hőmérséklet-grádiensektől. E sok csíkhataránál kialakuló hőmérséklet-grádiensek – amelyek alatt nincsenek mindig erek – jelentősen lecsökkentik annak esélyét, hogy egy napsütötte zebrára szálló nőtény bögöly hőérzékeléssel vérszívásra alkalmas eret találjon. Márpedig a nőtény bögölyök zömében napsütésben támadják gazdaállataikat [9], aminek okát is tisztáztuk [10]. Ezért, ha egy bögöly hőérzékeléssel próbál megtalálni egy bőrfelület alatt húzóerő eret, akkor a meleg-hideg csíkok határainál kialakuló hőmérséklet-grádienseket érzékelve ott is sikertelenül próbálkozik fájdalmas harapással vért szívni, ahol nincs is ér (4A ábra). Ez azonnal kiváltja a zebra bögölyre veszélyes parazitaűző ellenreakcióit, amelyek elűzik a bögölyt, aminek újra és újra próbálkoznia kell, amíg végre eret talál, de ekkor ismét elűzetik. Így többször kell próbálkoznia, hogy elegendő vért szívhasson a megtermékenyült petéi érleléséhez. Az egyszínű gazda-



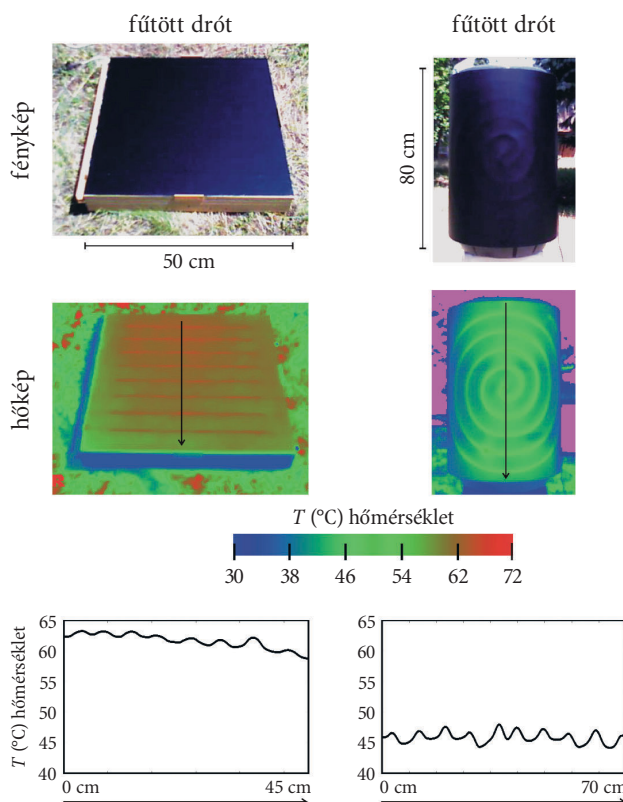
4. ábra. Egy gazdaállat napsütötte kültakaróján vérszívási céllal eret kereső nőtény bogolyök hőérzékelésen alapuló érdetekciójának két esete: (A) fehér-fekete csíkos kültakaró bőr felület alatti ér nélkül, (B) homogén fekete kültakaró egy bőr felület alatti érrel (narancssárga kör). A $T(x)$ görbék kvalitatíve mutatják a szőr- és bőr felület T hőmérsékletének változását az x tengely mentén, ami keresztezi a szomszédos fehér és fekete szőr csíkok határvonalait az A alábbián. A vízszintes pontozott vonalak 3 jellemző hőmérséklet-értéket mutatnak emelkedő sorrendben: érmentes fehér szőrös bőr < érmentes fekete szőrös bőr < ér fölötti fekete szőrös bőr. A zöld bogolyök egy ér fölötti bőr felület hőmérsékletnövekedései (pozitív hőmérséklet-grádiensei) által kiváltott sikeres vérszívási próbálkozás helyeit jelzik, míg a piros bogolyök szomszédos fehér és fekete szőr csíkok határvonalai alatti bőr felület hőmérsékletnövekedései előidézte sikertelen vérszívási próbálkozás helyeit mutatják. A bogolyök feje a pozitív hőmérséklet-grádiens felé fordul. Az erek, szőrrétegek és bogolyök méretei/vastagságai nem méretarányosak [11]

állatok testfelületén nincsenek a hőérzékelésen alapuló érdetekciót zavaró hőmérséklet-grádiensek, ezért rajtuk könnyebben és gyorsabban találják meg a rájuk szállt bogolyök a bőr alatti véreket (4B ábra). Így a bogolyöknek nem érdemes csíkos kültakarójú gazdaállatokon vérszívással próbálkozniuk, s emiatt kerülnek a csíkos gazdaállatok. E hipotézisünket négy terep kísérletben ellenőriztük [11, 12].

E kísérletekben a nőtény bogolyököt olyan sötét csaltárgyak (szürke hordó [11], fekete teszt felületek [12]) vontatták, amelyek felületén vékony fekete csíkok vagy a felület alatt futó drótok utánózták a gazdaállat bőre alatti melegebb véreket a hőérzékeléssel eret kereső bogolyök számára. A szürke hordó napsütötte felén a fekete csíkok kissé melegebbek voltak a szürke felületrészeknél, míg az árnyékos oldalán a csíkok és a szürke területek hőmérséklete gyakorlatilag egyforma volt. A drótok csak akkor voltak melegebbek a környezetükénél, amikor áram folyt bennük (5. ábra), máskülönben mechanikailag és/vagy optikailag észrevétlenek maradtak, fűtetlen állapotukban pedig termálisan is fölismertethetetlenek voltak. Mértük a szürke hordó napos és árnyékos oldalán, illetve a fűtött és fűtetlen drótos fekete felületeken mászkáló nőtény bogolyöknek a szürke és fekete, illetve a drót fölötti

és drótmentes felületrészekben eltöltött átlagos relatív idejeit, amelyeket összevetettünk e részek felületarányával.

Azt találtuk [11], hogy a szürke hordó napos felén a bogolyök 2,8-szer (statisztikailag szignifikánsan) több átlagos relatív időt (19,6%) tartózkod-



5. ábra. A terep kísérletekben alkalmazott vízszintes, fekete, sík teszt felület és függőleges tengelyű, fekete hengerfelület fényképe, hőképe és a T ($^{\circ}\text{C}$) felületi hőmérséklet hőképen húzódo fekete nyíl menti változása, amikor a felület alatti drótok fűtöttek voltak [12]. A hőképeken és a T hőmérsékletgörbéken jól látszanak a fűtött meleg drótok, amelyek fűtetlen állapotukban nem voltak kivehetőek

tak a szürke felületeknél melegebb fekete csíkokon, mint a csíkok felületaránya (7%). Ellenben, a hordó árnyékos oldalán a szürke (93,6%) és fekete (6,4%) részeken töltött átlagos relatív idők nem tértek el statisztikailag szignifikánsan a szürke (93%) és fekete (7%) felületarányoktól. Ez arra utal, hogy a fekete csíkokat a vérereket kereső bögölyök nem a csíkok feketesége és/vagy sötétsége és/vagy nagyobb polarizációfoka miatt kedvelték, hanem a kissé nagyobb hőmérsékletük okán [11].

Amikor a földön nyugvó drótos fekete tesztfelület vízszintes volt [12], akkor a rajta mászkáló nőtény és hím bögölyök a drótos felületrészeket nem részesítették előnyben a drótmentes részekhez képest még akkor sem, amikor a drótok fűtve voltak. A drótos részek fölött eltöltött átlagos relatív idejük (fűtött drót: 6,84%, fűtetlen drót: 5,6%) nem tért el statisztikailag szignifikánsan a drótos részek felületarányától (6%). Ekkor a bögölyök nem ereket kerestek a vízszintes tesztfelület alatt (a hímek eleve nem szívnek vért, s így nem is kutatnak erek után), hanem vizet próbáltak találni, persze hiába. Emiatt csak a felületarányuknak megfelelő mértékben tartózkodtak a tesztfelület azon részein, amelyek alatt fűtött vagy fűtetlen drót húzódott [12]. A hím és nőtény bögölyök e jellegzetes vízkereső viselkedését korábbi terepkísérleteinkből jól ismerjük, amelyekben kimutattuk [13], hogy a földre helyezett, nagy polarizációfokú, vízszintesen poláros fényt visszaverő, sötét, sima felületekre a szomszagos bögölyök rászállnak, előtte tipikus felületérintgető (vízpróbálgató) ide-oda, főleg röpködéssorozatát végezve, mert az így polarizáló felületeket optikailag víznek hiszik.

A ferde/függőleges fekete tesztfelületek fűtött drótos részein a nőtény bögölyök 3,4/4,2-szer (statisztikailag szignifikánsan) több átlagos relatív időt töltöttek, mint a drótos részek felületaránya (6%/4%) [12]. Fűtetlen drót esetén viszont a drótos részekben eltöltött átlagos relatív idők (6,79%/4,56%) nem tértek el statisztikailag szignifikánsan a drótos részek felületarányaitól (6%/4%). Az utóbbiak

szerint a fűtött drótok fölötti felületrészeket a nagyobb hőmérsékletük miatt (5. ábra) kedvelték a vérereket kereső nőtény bögölyök, más érzékek híján. Mindezen eredmények alátámasztják a zebracsíkok bögölyök általi elkerülésére adott új termofiziológiai magyarázatunkat [11, 12].

Összegzés

A főnti terepkísérletekkel tehát megcáfoltuk a zebracsíkok föltételezett hűtő hatását. Bizonyítottuk, hogy a zebrák csíkjai fölött napsütésben nem alakul ki olyan légörvénysor, ami egy elterjedt hipotézis szerint hűti a zebrákat. Kimutattuk, hogy a nőtény bögölyök vérszívásra a napsütötte sötét (meleg), csillogó (erősen fénypolarizáló) gazdaállatokat részesítik előnyben. Kiderítettük, hogy a bögölyök azért szeretik megtámadni a melegebb kültakarójú gazdaállatokat, mert a gazdák vérszívás okozta fájdalma által váltott ellenreakciói elől e parazita legyek könnyebben tudnak elmenekülni, mint a hűvösebb testfelszínű állatokról. Végül kísérletileg igazoltuk a zebracsíkok szerepéről föllállított azon magyarázatunkat, hogy a csíkos kültakarójú állatokra azért nem szállnak a vért szívni szándékozó bögölyök, mert napsütésben a sok fehér és fekete csík határvonalainál kialakuló hőmérséklet-grádiensek megzavarják azt, hogy a bögölyök hőérzékeléssel találják meg a testfelszín alatt húzódó vérereket. A zebracsíkok lehetséges biológiai szerepeinek témakörében nyitva maradt még jónéhány hipotézis, amelyek kísérleti tesztelése a jövő kutatóira vár.

Köszönetnyilvánítás: Kutatásunkat a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal „Zebracsíkok termofiziológiai vizsgálata: új magyarázat a zebracsíkok szerepére” című, NKFIH K-123930 számú, 60 hónap (2017–2022) futamidejű pályázata támogatta.

IRODALOM

[1] Blahó M, Horváth G, Hegedűs R, Kriska Gy, Gerics B, Farkas R, Åkesson S (2010) A lovak fehérségének egy nem várt előnye: A leginkább „bögölyálló” ló depolarizáló fehér szőrű, a fekete ló pedig szenved a polarizáló szőrért. *Fizikai Szemle* 60: 145–155 + címlap

- [2] Szörényi T, Pereszlényi Á, Horváth G, Barta A, Gerics B, Hegedűs R, Åkesson S (2018) Miért kell polarizációérzékelés a gazdaállat-kereséshez? A bögölyök – vizuális környezetük sötét foltjai közül – polarizáció segítségével választják ki a napsütötte sötét gazdaállatokat. *Fizikai Szemle* 68: 164–171
- [3] Egri Á, Blahó M, Kriska G, Farkas R, Gyurkovszky M, Åkesson S, Horváth G (2012) Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes. *Journal of Experimental Biology* 215: 736–745 (doi: 10.1242/jeb.065540)
- [4] Blahó M, Egri Á, Száz D, Kriska G, Åkesson S, Horváth G (2013) Stripes disrupt odour attractiveness to biting horseflies: Battle between ammonia, CO₂, and colour pattern for dominance in the sensory systems of host-seeking tabanids. *Physiology and Behavior* 119 (2013): 168–174 (doi: 10.1016/j.physbeh.2013.06.013)
- [5] Horváth G, Pereszlényi Á, Åkesson S, Kriska G (2019) Striped bodypainting protects against horseflies. *Royal Society Open Science* 6: 181325 (doi: 10.1098/rsos.181325)
- [6] Horváth G, Pereszlényi Á, Száz D, Barta A, Jánosi I M, Gerics B, Åkesson S (2018) Experimental evidence that stripes do not cool zebras. *Scientific Reports* 8: 9351 (doi: 10.1038/s41598-018-27637-1)
- [7] Horváth G, Pereszlényi Á, Száz D, Barta A, Jánosi I M, Gerics B, Åkesson S (2019) Zebracsíkok feltételezett hűtő hatásának kísérleti cáfolata. *Fizikai Szemle* 1.+2. rész 69: 117–121+147–154
- [8] Pereszlényi Á, Száz D, Jánosi I M, Horváth G (2021) A new argument against cooling by convective air eddies formed above sunlit zebra stripes. *Scientific Reports* 11: 15797 (doi: 10.1038/s41598-021-95105-4)
- [9] Horváth G, Pereszlényi Á, Tóth T, Polgár S, Jánosi I M (2019) Attractiveness of thermally different, uniformly black targets to horseflies: *Tabanus tergustinus* prefers sunlit warm shiny dark targets. *Royal Society Open Science* 6: 191119 (doi: 10.1098/rsos.191119)
- [10] Horváth G, Pereszlényi Á, Egri Á, Tóth T, Jánosi I M (2020) Why do biting horseflies prefer warmer hosts? Tabanids can escape easier from warmer targets. *Public Library of Science One* 15: e0233038 (doi: 10.1371/journal.pone.0233038)
- [11] Takács P, Száz D, Vincze M, Sliz-Balogh J, Horváth G (2022) Sunlit zebra stripes may confuse the thermal perception of blood vessels causing the visual unattractiveness of zebras to horseflies. *Scientific Reports* 12: 10871 (doi: 10.1038/s41598-022-14619-7)
- [12] Száz D, Takács P, Egri Á, Horváth G (2023) Blood-seeking horseflies prefer vessel-mimicking targets: experimental corroboration of a new explanation of the visual unattractiveness of zebras to tabanids. *International Journal for Parasitology* 53: 1–11 (doi: 10.1016/j.ijpara.2022.10.001)
- [13] Horváth G, Egri Á, Blahó M (2014) Linearly polarized light as a guiding cue for water detection and host finding in tabanid flies. pp. 525–559. In: Horváth G. (editor) (2014) *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg