

ropipettát, amely a nagy felbontású képalkotást 1 nanoliter-nél jobb folyadékkezelési pontossággal kombinálja. Előnye a kis méret és egyszerű működés. Érzékeny vagy ritka sejteket képes 90%-nál nagyobb hatékonysággal izolálni. Alkalmazható nanoliteres cseppek nyomtatásához, beleértve az egysejtes nyomtatást is.

A jelenleg folyó kutatásaink egyik célja a piezoelektromos mikropipetta alkalmazása a sejttapadás vizsgálatára (5. ábra). A sejtszintű, specifikus fehérjék által biztosított adhézió jobb megértése [3] segíthet az immunológia [4], a rákos betegségek kialakulásának mélyebb megismerésében, és új terápiás célpontok is remélhetők tőle [5]. Ugyanis a sejtek egymáshoz vagy a sejtközötti mátrixhoz való tapadásának erőssége és dinamikája megszabja a sejtek vándorlását a szövetekben, amely kulcsfontosságú a rákos áttétek kialakulásakor. A mikropipettában kialakuló folyadékáramlást fluidikai szimulációkkal [6] modelleztük és kísérletesen mikrogyöngyökkel vizsgáltuk [7]. A folyadékáramlási szimulációk lehetővé teszik a pipettával felszívott sejtre ható erő kiszámolását, és így a sejtheadhézió mérését.

Másik célunk a vérben keringő daganatossejtek izolálása az azt követő molekuláris vizsgálatok céljából. A folyékony sejt/szövet mintavételezés (biopszia) egy új irány a daganatos betegségek diagnosztikájában és monitorozásában, amely a vérben szabadon keringő tumor-DNS (ctDNS) vagy a vérben keringő tumorsejtek (CTC) elemzésén alapul. A ctDNS a vérplazmából különíthető el. A sejtmagos CTC-k sűrűsége a fehérvérsejtek sűrűségének tartományába esik, mivel sűrűbbek a plazmánál és kevésbé sűrűek a vörösvértesteknél. Egy néhány milliliteres vér-

mintából a DNS és RNS molekulák vizsgálatával információt nyerhetünk ki a kezdődő vagy kezelés alatt álló daganatról. A vérben keringő tumorsejtek detektálása és izolálása azonban nehéz feladat, mert sok millió normál fehérvérsejt között kell megtalálni a beteg sejteket. Úgy gondoljuk, hogy módszerünk rövidesen alkalmas lesz erre a feladatra is, amin jelenleg aktívan dolgozunk. Műszerünket világszerte jelenleg ~20 kutatólaboratóriumban használják, köztük az MIT-n Bostonban és a Karolinska Intézetben Stockholmban.

IRODALOM

1. Francz B, Ungai-Salánki R, Sautner É, Horváth R, Szabó B (2020) Subnanoliter precision piezo pipette for single cell isolation and droplet printing. *Microfluidics and Nanofluidics* 24: 12
2. Ungai-Salánki R, Gerecsei T, Fürjes P, Orgován N, Sándor N, Holczer E, Horváth R, Szabó B (2016) Automated single cell isolation from suspension with computer vision. *Scientific Reports* 6: 20375
3. Gerecsei T, Chrenkó P, Kanyó N, Péter B, Bonyár A, Székács I, Szabó B, Horváth R (2021) Dissociation constant of integrin-RGD binding in live cells from automated micropipette and label-free optical data. *Biosensors* 2021 (11): 32
4. Lukácsi S, Gerecsei T, Balázs K, Francz B, Szabó B, Erdei A, Bajtay Z (2020) The differential role of CR3 (CD11b/CD18) and CR4 (CD11c/CD18) in the adherence, migration and podosome formation of human macrophages and dendritic cells under inflammatory conditions. *PLoS One* 15 (5): e0232432
5. Ungai-Salánki R, Haty E, Gerecsei T, Francz B, Béres B, Sztilkovics M, Székács I, Szabó B, Horváth R (2021) Single-cell adhesion strength and contact density drops in the M phase of cancer cells. *Scientific Reports* 11: 18500
6. Salánki R, Hős C, Orgován N, Péter B, Sándor N, Bajtay Z, Erdei A, Horváth R, Szabó B (2014) Single cell adhesion assay using computer controlled micropipette, *PLoS One* 9 (10): e111450
7. Ungai-Salánki R, Csippa B, Gerecsei T, Péter B, Horváth R, Szabó B (2021) Nanonewton scale adhesion force measurements on biotinylated microbeads with a robotic micropipette. *Journal of Colloid and Interface Science* 602: 291-299

CSOPORTOS KERESÉS LABIRINTUSBAN: A TÁRSAKTÓL SZÁRMAZÓ INFORMÁCIÓ ÉS A PATKÁNYCSOPORT VÁLTOZATOS ÖSSZETÉTELÉNEK ELŐNYEI ÉS HÁTRÁNYAI

Nagy Máté^{1,2,3}, Zafeiris Anna^{1,2}, Horicsányi Attila^{1,2}, Kubinyi Enikő^{4,5},
Vásárhelyi Gábor^{1,2}, Vicsek Tamás^{1,2}

¹ ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Budapest

² MTA-ELTE Statisztikus és Biológiai Fizika Kutatócsoport, Budapest

³ MTA-ELTE Lendület Csoportos Viselkedés Kutatócsoport, Budapest

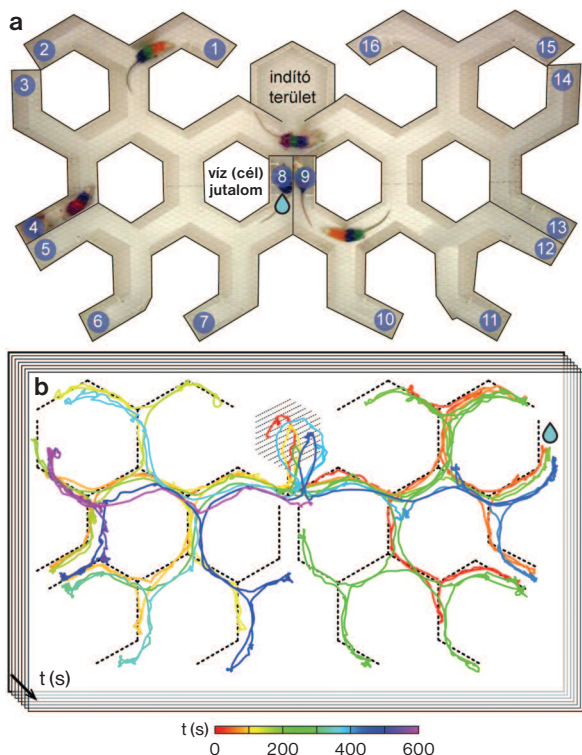
⁴ ELTE Etológia Tanszék, Budapest

⁵ MTA-ELTE Lendület Társállat Kutatócsoport, Budapest

Bevezetés

A túléléshez minden állatnak nélkülözhetetlen a létfontosságú erőforrások, mint például az élelem vagy a víz megtalálása. Ezen erőforrások elhelyezkedése azonban gyakran időben változik, és csak intenzív kereséssel talál-

ható meg. A keresési stratégiákat eddig főleg egyéni szinten vizsgálták, annak ellenére, hogy számos faj csoportban él és „kollektíven” viselkedik, azaz csoportban, társak jelenlétében más viselkedési formák is megjelennek [1–5]. Ez különösen igaz csoportos keresés során. Kiterjedt irodalma van a labirintusos kísérleteknek, melyek segít-



1. ábra. (a) Hierarchikus bináris hálózatként szervezett, ismétlődő Y-elágazásokból álló labirintus. A végpontok (sötétkék pontok; 1-től 16-ig jelölve) a lehetséges jutalomhelyeknek felelnek meg (vízadagoló). Példa kép a videófelvételtől, a színekkel festett patkányokkal egy csoportos próba során (csak a patkányok számára bejárható területet mutatva). A patkányok az „indító területen” kezdik a próbát (középen fent), és a jutalmazott végpontot vízcsepp jelöli (ebben a próbában középen). A falakat 75°-ban megdőntve építettük, hogy felülről egyetlen kamerával teljesen belátható legyen a terület. A patkányokat az egyedi 3 színű vonalkódjuk alapján automatikusan azonosítottuk [10]. (b) Példa egy patkány mozgására egyetlen keresési próbakor. Az időt a sáv színe jelzi (az ismételt látogatások megjelenítéséhez). A szaggatott vonalak az alagút középvonalainak felelnek meg; a sávozott hatszög az indító terület

ségével – többek közt – a navigáció, a memória és a tanulás is vizsgálható. A patkányok (*Rattus norvegicus*) gyakori alanyai ilyen pszichológiai és biológiai tanulmányoknak. Ezek az állatok rendkívül szociálisak [6], a csoportos keresési viselkedésüket korábban mégsem vizsgálták. Ebben a cikkben a [7] tanulmányunkat mutatjuk be röviden – további új kutatási eredményekkel kiegészítve – melyben a patkányok döntéshozatali folyamatait vizsgáltuk, amint egyedül vagy csoportban próbálnak megtalálni valamilyen jutalmat egy labirintusban.

Kísérleti eredmények

Kutatásaink során olyan mechanizmusokat vizsgáltunk, amelyekkel egyének hatékonyan tudnak csoportosan keresni. A különböző „kollektív” mechanizmusok között gyakran nehéz különbséget tenni (és ezt sok tanulmány el is mulasztja). Pedig a pontos megértésük kulcsfontosságú, többek között azért, hogy olyan „bio-inspirált” technoló-

giákat tudjunk fejleszteni, amelyek kiaknázzák a valós szervezetek által alkalmazott, az evolúció során kifejlődött stratégiákat [8].

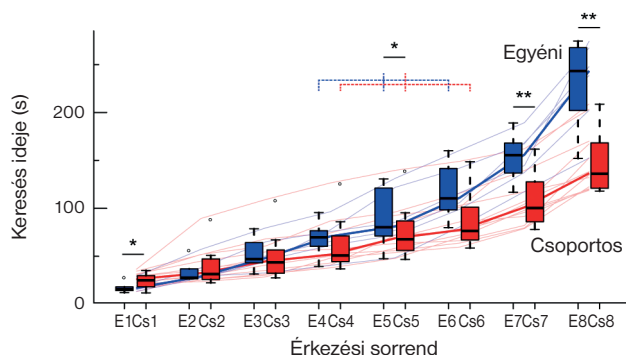
Vándorpatkányok (*Rattus norvegicus*) csoportos navigációs stratégiáit vizsgáltuk labirintusban, automatizált nyomkövetést használva. Ehhez olyan, viszonylag összetett labirintust készítettünk, amely ismétlődő Y-alakú elágazások sorozata, azaz minden egyes elágazás három, szimmetrikusan elhelyezkedő járatból állt össze (1. ábra). A labirintus járatai hierarchikus bináris fa struktúrát alkottak 16 végponttal (ezt szokták Cayley-fának is hívni), ami a legegyszerűbb leképezése egy többszörös választási (döntési) feladatnak. Minden végponton volt egy-egy vízadagoló, de a 16 lehetséges célpont közül minden egyes kísérleti próba során csak egyetlen egy adott jutalmat (vizet). Hogy pontosan melyik, az minden alkalommal véletlenszerűen került kiválasztásra. A keresést végző patkányok enyhén szomszédosak voltak, mivel a kísérletek megkezdése előtt 3–5 órával már nem kaptak inni. A kísérletekben összesen 32 patkány vett részt (16 hím és 16 nőstény). A patkányokat vagy 8 fős, azonos nemű csoportokban vizsgáltuk (ezek a „csoportos próbák”), vagy egyénileg („egyéni próbák”).

Minden kísérleti próba 10 percig tartott, ezután a patkányoknak további 5 perc állt rendelkezésükre, ha az első 10 perc nem volt elegendő. A kísérletek kezdetén a patkányokat egy „indító területre” helyeztük, majd a labirintusba való belépésük után saját fejlesztésű automatizált szoftverrel rögzítettük az egyéni útvonalukat. Először minden patkány egyedül keresett, hogy megszokják a feladatot és a környezetet. Utána az egyéni és csoportos próbákat felváltva végeztük.

Kísérleteink az egyéni problémamegoldó-képességekre és -stratégiákra fókuszáltak, mind egyedüli, mind csoportos környezetben. Eredményeink szerint individuális kereséskor átlagosan 35 másodperccel több időbe telik a víz megtalálása, mint csoportban, ami 32%-os időnövekedést jelent.

A csoportos teljesítmény növekedését okozó mechanizmusok felderítéséhez először a csoport teljes hatékonyságát elemeztük. Azt találtuk, hogy szociális kölcsönhatások nélkül is létrejöhetnek „ál-kollektív” hatások. Ilyen például az, amikor az 1. egyed célba érési ideje csökken a minta méretének növekedésével. Ez azonban egyszerűen annak a következménye, hogy nagyobb csoportban nagyobb a valószínűsége annak, hogy valakinek szerencséje lesz, és véletlenül rátalál a vízre. Vagy, ha egy csoport egyedei hasonlóan reagálnak ugyanarra a környezeti hatásra, akkor az úgy is tűnhet, mintha nem a környezettel, hanem egymással lennének kölcsönhatásban.

Annak érdekében, hogy kiszűrjük az ilyen ál-kollektív hatásokat „virtuális csoportokat” hoztunk létre, amelyekben 8 patkány egyéni keresési pályáit összesítettük, mintha együtt kerestek volna. Az elérési időket a legkisebbtől a legnagyobbig rangsoroltuk, majd összehasonlítottuk a csoportos tesztek azonos rangsorú eredményeivel (2. ábra).



2. ábra. Egyéni keresési idő csoportos és egyéni próbák esetén, érkezési sorrendben. A téglalapok az egyéni (kék) és a csoportos (piros) kísérleti próbák különböző értékeit szemléltetik. A vékony görbék egyedi értékeket, míg a vastagok ezek mediánját mutatják. A jobb láthatóság érdekében a téglalapok oldalra vannak tolvá (a görbékhez képest). A csoportos és az egyéni feltételek a 7. és 8. rangban különböztek (**: $p < 0,01$; kétirányú t-próba). A 4-6. helyezések kombinált adatai is különböztek az egyéni és csoportos próbák között (*: $p < 0,05$)

Hogy minél részletesebb képet kapjunk a csoportteljesítmény növekedéséről – azaz hogy megértsük, mit jelent pontosan, hogy „csoportos kereséskor a patkányok jelentősen gyorsabban találják meg a célpontokat”, beérkezési rangsorokat hasonlítottunk össze, amelyekből az látszott, hogy a későn érkezők nyertek a legtöbbet, azaz csoportos keresés során a 7. és 8. helyen szereplő egyedek találták meg sokkal rövidebb idő alatt a célpontot. Ezzel ellentétben, a leggyorsabban célba érő patkánynál, kicsivel bár, de statisztikailag szignifikánsan nőtt a csoportban való keresés ideje (azaz ő rosszabbul járt; 2. ábra).

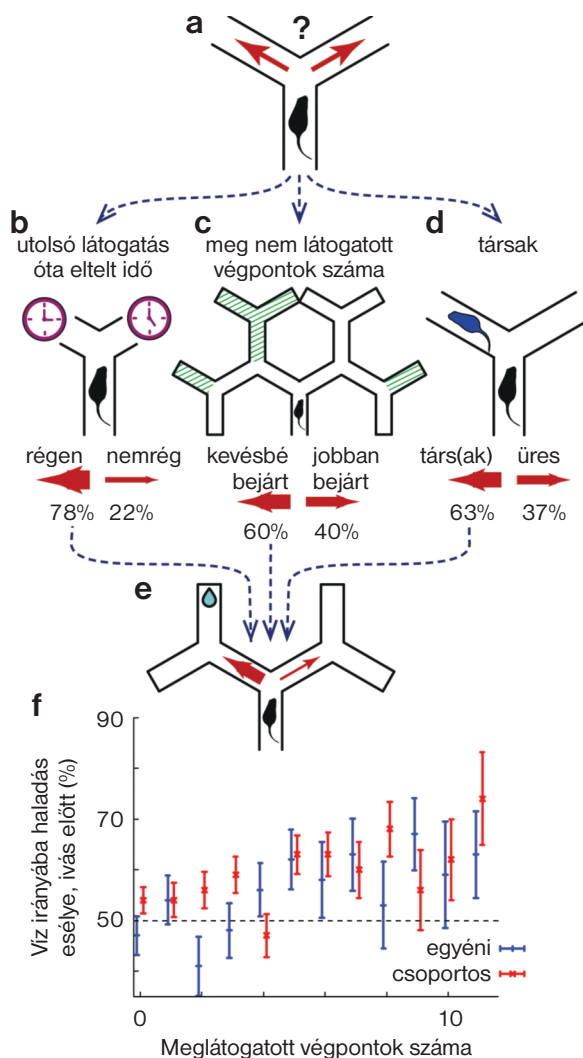
Az összesített adatok azt mutatták, hogy bár az elsőnek megérkező patkány egyéni keresésben gyorsabb volt, a csoportos kereséskor mutatkozó enyhe lemaradást jóval nagyobb mértékben kompenzálta a később érkezők nyeresége. Így nem csak a csoport egészére igaz, hogy átlagosan rövidebb idő alatt értek célba az egyedek, hanem az ismétlődő próbákban minden egyes egyedre is igaz volt, hogy csoportos kereséskor átlagosan hamarabb érték célhoz (mivel általában a beérkezés sorrendje változott). Érdeemes megjegyezni, hogy a csoportteljesítmény annak ellenére hatékonyabb volt, hogy a csoporttagok akadályozhatták egymás útját a labirintus járataiban, és a kereséshez nem kapcsolódó társas kölcsönhatásokat is folytattak (például játsék, egymás tisztogatása).

Ahhoz, hogy megértsük a kollektív kereséskor alkalmazott egyéni döntéshozatalt, és hogy mi okozza a csoportos kereséskor megnövekedett hatékonyságot, a patkányok által az egyes elágazásoknál (hálózati értelemben csomópontoknál) hozott irányválasztást vizsgáltuk részletesen. Az egyes csomópontok szimmetrikus elrendezése miatt az összes csomóponti döntés adatait összevonva elemeztük.

Az elágazásoknál meghozott egyedi döntéseket a következő szempontok szerint elemeztük (mind az egyéni, mind a csoportos próbák esetén): (i) keresési motiváció (korábban már megtalálta-e a vizet és már ivott; nem szom-

jas), (ii) a keresési előzményei függvényében (azaz, hogy a két „előremutató” járat közül melyiket látogatta meg régebben, vagy melyik vezetett a labirintus többet vagy kevesebbet látogatott területei felé). A csoportos próbák esetében (1) a csoporttársak hatását is vizsgáltuk, figyelembe véve a közelben lévő és látható társak jelenlétét, (2) hogy a járatot korábban mások is meglátogatták-e (amikor esetleg szagjelzéseket hagyhattak), vagy (3) hogy a vizsgált egyed találkozott-e olyan társakkal, amelyek már megtalálták a vizet.

Először külön-külön határoztuk meg az egyes tényezők hatását, megvizsgálva, hogy a csomópontoknál az egyéni



3. ábra. Döntéshozatali tényezők. (a) Döntési feladat egy elágazásnál: a patkányoknak két járat közül kellett választaniuk. (b–d) Egyenlőtlen választásokhoz vezető döntési tényezők. Az előnyben részesített járatok azok, amelyeket (b) régebben látogattak meg (ha korábban már egyáltalán meglátogatták), (c) több feltáratlan végponthoz vezetett, és (d) más társa(ka)t tartalmaztak. A nyílak vastagsága megfelel annak valószínűségének, hogy az ivás előtti csoportos próbákban a különböző járatok felé haladnak tovább a patkányok. (e–f) A víz megtalálásának valószínűsége a keresés előrehaladásának függvényében (a meglátogatott végpontok számával mérve), és olyan szimmetrikus döntési pontokra számítva, ahol mindkét lehetőség ugyanannyi végponthoz vezetett

választások aránya (a vizsgált tényezőhöz viszonyítva) eltér-e a véletlenszerű választáskor várható 50%-tól, feltéve, hogy a többi tényező összességében hasonló mértékben befolyásolja mindkét választást.

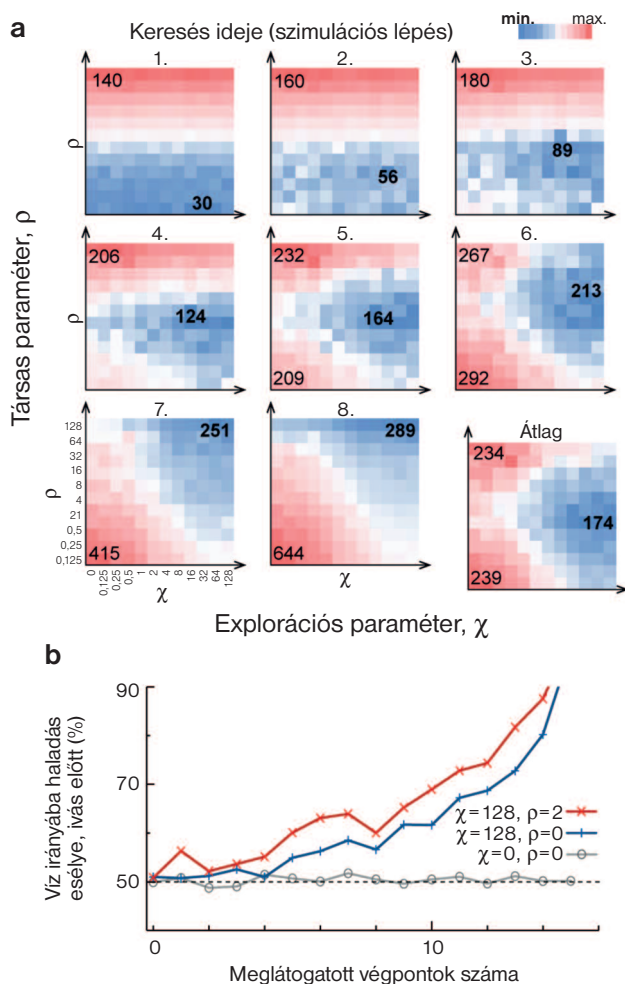
Azt találtuk, hogy a csoportos próbák során, mielőtt a patkány megtalálta volna a vizet, három tényező befolyásolta a legerősebben az elágazásban meghozott döntéseket (3. ábra): a patkányok nagyobb valószínűséggel mentek (1) a régebben (vagy korábban egyáltalán nem) látogatott járat felé (78% szemben 22%-kal), (2) abba az irányba, amely a labirintus kevésbé bejárt részéhez vezet, azaz több, korábban még nem látogatott végponthoz lehet eljutni (60% szemben 40%-kal), és (3) az aktuálisan látható társaik felé (63% szemben 37%-kal). Viszont nem követték gyakrabban azokat az egyedeket, amelyek már megtalálták a vizet, és a mások által korábban bejárt (de aktuálisan üres) járatokat sem látogatták gyakrabban a véletlenszerű választásokhoz képest.

Miután az egyed már megtalálta a vizet (ivás után), a labirintus többi részének felfedezése során az elágazásoknál hozott döntéseket kevésbé befolyásolta, hogy melyik vezetett korábban meg nem látogatott végpontokhoz. A befolyásoló tényezők hasonlóak voltak az egyedül kereső patkányok esetében. Megjegyzendő, hogy a fontossági szempontok változása elsősorban az idő múlásától függött, és csak kevésbé a patkány szomjasságától (azaz, ivott-e már vagy nem).

Az elágazásoknál hozott döntések választási valószínűségeit vizsgálva, nem találtunk nemhez kapcsolódó jelentős különbségeket. Ebből arra következtettünk, hogy a kollektív keresési jellemzők hasonlóak voltak a két nem között, bár ezzel nem zárhattuk ki teljesen az egyéb lehetséges különbségeket a nemek között. A következő kérdés az volt, hogy milyen relatív jelentőségük van az egyes faktoroknak, ha olyan elágazásoknál meghozott döntéseket vizsgálunk csak, ahol két tényező ütközik egymással. A páros összehasonlításokkal hierarchiát állíthattunk fel az irányválasztást befolyásoló különböző tényezők között.

A víz megtalálása előtt a patkányok mind a csoportos, mind az egyéni keresés alkalmával a legnagyobb valószínűséggel abba a járatba fordultak, amely több, korábban még meg nem látogatott végponthoz vezetett. Csoportos kísérletekben a 2. és 3. legbefolyásosabb tényező a társak jelenléte és a járat utolsó bejárásának ideje volt. Így, amikor még mindig vizet kerestek, az új területek felfedezése általában fontosabb volt, mint a csoporttársak követése (a csoportos kísérletben), és szintén nagyobb befolyással bírt, mint az előző látogatások ideje (az egyéni és a csoportos kísérletben).

Miután a patkány már ivott, e tényezők fontossága (és a preferenciák hierarchikus sorrendje) annyiban változott, hogy a még fel nem fedezett területek felkeresése a legkevésbé fontos tényezővé vált mind az egyéni, mind a csoportos próbákban. Az egyedek (csoportos és egyéni próbákban is) továbbra is felfedezték a labirintust, de többször visszatértek a vízforráshoz, gyakrabban, mint a víz nélküli más végpontokhoz. Ez a viselkedés is hozzájá-



4. ábra. Különböző paraméterek hatása a keresés hatékonyságára a szimulációkban. (a) A cél eléréséig eltelt idő (színekódolt) az explorációs χ (x tengely) és társas ρ (y tengely) paraméterek függvényében (míg $\tau = 0$) és az egyes panelek az érkezési sorrend szerint (1–8.) és az átlagot (jobbra lent) jelentik meg. A helyi maximumok és minimumok (vastagon szedve) elhelyezkedése és értéke minden panelen látható. A τ és ρ változtatása is minőségi-leg hasonló eredményeket ad. (b) A víz irányába való haladás valószínűsége a szimulációs modellben a keresés előrehaladásának függvényében (a kísérleti próbáknál leírtak szerint számítva: 3f. ábra). Három paraméterpár ábrázolása látható (mindegyiknél $\tau = 0$): $\chi = 0, \rho = 0$ (szürke), nincs egyéni preferencia (felderítéssel kapcsolatos vagy társas); $\chi = 128, \rho = 0$ (kék), egyéni keresést jelent; és $\chi = 128, \rho = 2$ (piros), csoportos keresést jelent

ruhat a csoportok fokozott keresési teljesítményéhez, mivel az ivóhelyet ismételten felkereső patkányok másokat is a vízhez vonzhatnak.

Szimulációs eredmények

A kísérleteinkben megfigyelt preferenciák hatásának vizsgálatára olyan ágens alapú szimulációkat végeztünk, amelyben patkányok helyett virtuális ágensok („ügynökök”) keresnek. A keresés – bár leegyszerűsített formában, de a lényegi komplexitást megtartva – vizsgálható a kísérleti elrendezéshez hasonló (vagy akár attól eltérő) labirintus-struktúrában. Minden elágazási ponton (ahol az egye-

deknek irányválasztási döntéseket kell hozniuk), az irányválasztás valószínűsége három súlyozási paramétertől függ, amelyek a kísérletben azonosított legbefolyásosabb tényezőket utánozza: (i) társak hatása (ρ), és az egyének keresési előzményei (explorációs faktorok): (ii) a járat utolsó látogatása óta eltelt idő (τ), és (iii) a járaton keresztül elérhető, még meg nem látogatott végpontok száma (χ) (4. ábra).

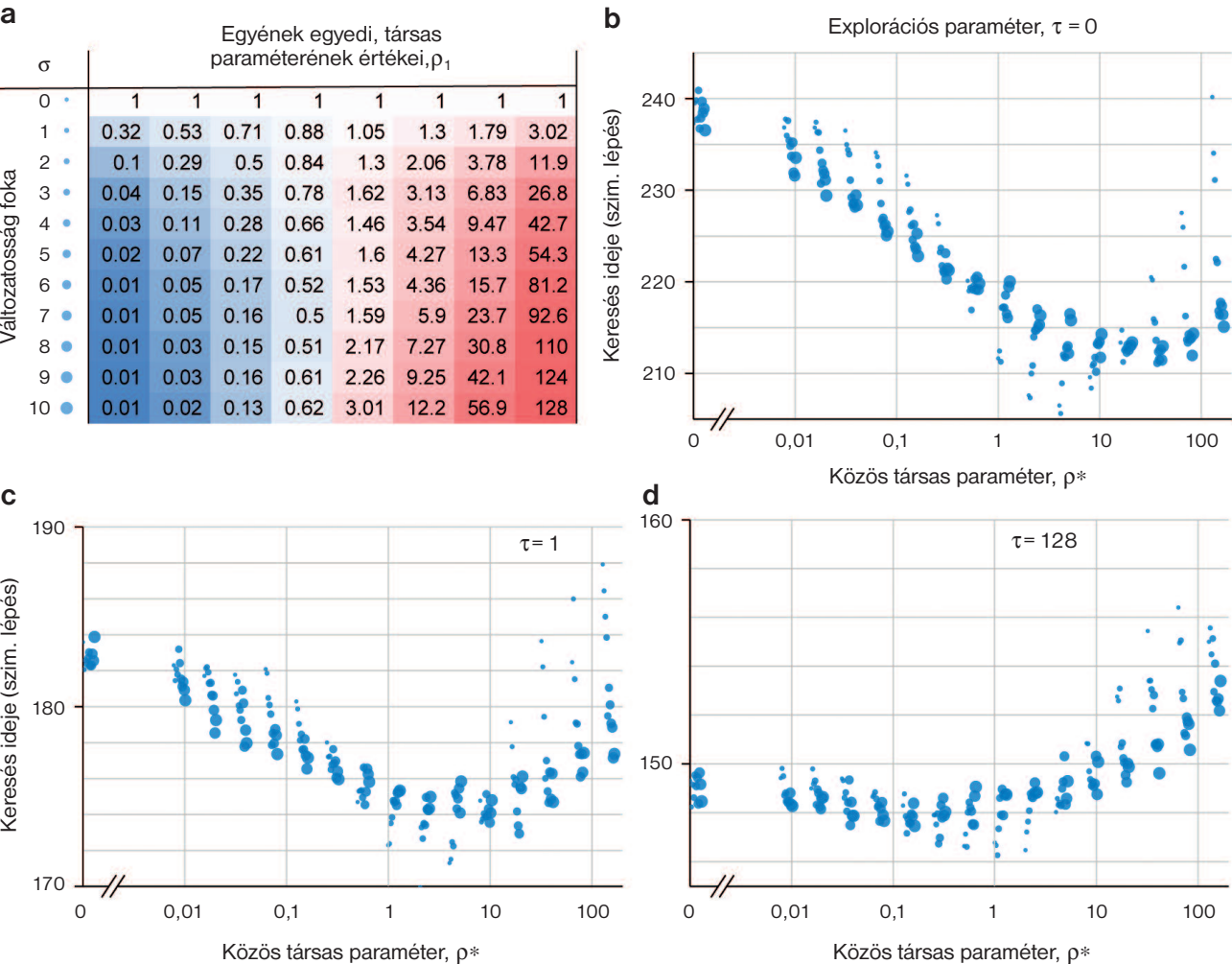
Külön-külön vizsgálva, a fenti preferenciák mindegyike javítja a csoport teljesítményét a véletlenszerű kereséséhez képest. A keresési előzményekkel kapcsolatos két paraméter (τ és χ) magas értékei mellett kevésbé ön-átfedő pályákat járnak be a keresők, ezzel javítva a keresési hatékonyságot, ami az egyéni kereséseknél is érvényesül.

A társak hatása (ρ) összetett, nem monoton módon nyújt további előnyöket: a növelése (egy optimális pontig) az 1. patkánynál megnöveli a célpont eléréséhez szükséges időt, de csökkenti a keresési időt, ha már 3–4 egyed megtalálta a célpontot. Mindkét megállapítás összhangban

van a kísérleti eredményekkel. A társak hatásának (ρ) további növelésével az összhatékonyság már romlik. Szélsőséges esetben, nagyon nagy értékek mellett az összes egyed lényegében csak együtt mozogva járja be a labirintust, ami megegyezik azzal, mintha csak egy egyed, egyedül keresne – így veszítve el a csoportos keresés lehetséges előnyeit.

Ez a megállapítás tovább erősödik, ha a patkányok keresési viselkedésének pontosabb leírásához további paramétereket is bevezetünk a szimulációba. Továbbá, amikor a teljesítményt két paraméter (χ és ρ) változtatása mellett vizsgáljuk, a minimális keresési idő a választási preferencia olyan valószínűségeinek felel meg, amelyek minőségileg hasonlóak a kísérleti adatokhoz (4a. ábra). A szimulációkban a kísérletekhez hasonló eredmény adódott arra, ahogy a keresés előrehaladtával (mind egyéni, mind csoportos kereséskor) folyamatosan nőtt annak valószínűsége, hogy az egyed egy elágazásban a víz felé ment (4b. ábra).

5. ábra. Változatos összetételű csoportok egyedeinek átlagos keresési ideje a szimulációban a csoport összetételének függvényében. (a) A csoport változatos összetételéhez a szimulációban az egyének társas értékeit (ρ_1) logaritmikus skálán különböző szórású (σ) Gauss-görbékkel hoztuk létre. Az oszlopok 8 egyedre mutatják az egyéni társas értékeket, színkóddal kiemelve (kék: alacsony, fehér: közepes, piros: magas). A különböző változatosságú (szórású, σ) csoportot a következő paneleken a körök méretével jelöltük. (b–d) A körök a csoport átlagos keresési idejét jelölik különböző csoportösszetételek esetén, ami a változatosság foka (a körök mérete, kicsivel jobbra tolva a jobb láthatóság kedvéért) és a csoport közös társas paramétere (ρ^* ; az x tengelyen) szerint



Változatos vagy egyöntetű összetételű csoportok hatékonysága

A csoport összetételének hatását olyan szimulációkban vizsgáltuk, amelyekben a társak irányába való elmozdulás valószínűsége egyedenként változott, mégpedig két paraméter szorzataként. Az 1. tényező a csoportra jellemző „közös” társas paraméter (p^*), míg a 2. az egyénre jellemző egyedi faktor (p_i), aminek értékeit logaritmikus skálán generált különböző szórású (σ) Gauss-eloszlásokkal állítottuk elő. A nagyobb szórású eloszlás egyben változatosabb összetételű csoportot eredményez, ezért tekinthetjük a σ értékét a változatoság mértékének is (5a. ábra).

Szimulációs eredményeink szerint (5b–d. ábra) – a korábbiakkal összhangban – az explorációs paraméter növelésével (τ , a régebben vagy még egyáltalán nem bejárt járatot részesítve előnyben) az átlagos keresési idő csökken, mert a pályák egyre inkább önelkerülővé válnak. Mindegyik τ esetén hasonló a közös társas paraméter hatása, és minden egyes változatosági fok mellett van egy jól meghatározott minimuma a görbéknek. A legtöbb esetben a változatoság növelése hatékonyabb keresést eredményez, kivéve az optimális p^* érték környékén, ahol meglepő módon a legjobban a egyöntetű csoportok teljesítenek.

Összefoglalás

A patkányok által használt döntési hierarchia vizsgálata egy szisztematikus keresési tendenciát tárt fel, amely stratégiával a labirintusban a célpontok megtalálásának valószínűsége időben fokozatosan nőtt. Ez a hierarchia előnyben részesíti a korábbi tapasztalatokból való tanulást (vagyis a labirintus még felderítetlen részeinek felfedezését) és a társas információkat (vagyis a csoporttagok felé történő mozgást), hatékonyabbá teszi a csoportot, mintha ugyanannyi egyed külön-külön keresne. A csoport egyedeinek teljesítménye javult, annak ellenére, hogy a köztük történő információátadás lényegében minimális volt (nem tételezünk fel aktív információközlést), és a kölcsönhatá-

sok rövidtávúak voltak (mivel a labirintus természetes járatrendszereket utánzó kialakítása nem tette lehetővé, hogy nagy távolságból láthassák egymást). A „kövess másokat” mechanizmus, ami elkerüli a korábban meglátogatott járatokat, szinergikus előnyöket biztosított a csoportnak. Azonban a szimulációink azt is megerősítették, hogy a legoptimálisabb keresés csak az egyéni felfedező és a társas viselkedés kombinációjával alakul ki, mivel mindkét viselkedés önmagában szuboptimális.

Integrált kísérleti és elméleti megközelítésünk új nézőpontot kínált arról, hogy az egyedek térbeli ismeretei és a társas információk szinergikus hatása hogyan javíthatja a csoport teljesítményét. Az ilyen típusú, természetben előforduló kollektív jelenségek megértése több területen is alkalmazható, beleértve az emberi mobilitás tanulmányozását (például forgalomirányítás, betegségek terjedése). Továbbá, a megfigyeléseink hasznosak lehetnek speciális érzékelőkkel és helyi kommunikációs képességekkel felszerelt autonóm robotcsoportok tervezésekor is, amelyek egy ismeretlen terület kollektív felfedezésére irányulnak [9].

IRODALOM

1. Vicsek T, Zafeiris A (2012) Collective motion. *Physics Reports* 517: 71–140
2. Bhattacharya K, Vicsek T (2014) Collective foraging in heterogeneous landscapes. *Journal of the Royal Society Interface* 11: 20140674
3. Flack A, Nagy M, Fiedler W, Couzin I D, Wikelski M (2018) From local collective behavior to global migratory patterns in white storks. *Science* 360: 911–914
4. Nagy M, Akos Z, Biro D, Vicsek T (2010) Hierarchical group dynamics in pigeon flocks. *Nature* 464: 890–893
5. Simons A M (2004) Many wrongs: the advantage of group navigation. *Trends in Ecology and Evolution* 19: 453–455
6. Calhoun J B (1963) *Ecology and Sociology of the Norway Rat*. US Dept. of Health, Education, and Welfare, Public Health Service
7. Nagy M, Horicsányi A, Kubinyi E, Couzin I D, Vásárhelyi G, Flack A, Vicsek T (2020) Synergistic benefits of group search in rats. *Current Biology* 30: 4733–4738
8. Vásárhelyi G, Virágh C, Somorjai G, Nepusz T, Eiben A E, Vicsek T (2018) Optimized flocking of autonomous drones in confined environments. *Science Robotics* 3: eaat3536
9. Werfel J, Petersen K, Nagpal R (2014) Designing collective behavior in a termite-inspired robot construction team. *Science* 343: 754–758
10. Nagy M, Vásárhelyi G, Pettit B, Roberts-Mariani I, Vicsek T, Biro D (2013) Context-dependent hierarchies in pigeons. *PNAS* 110: 13049–13054

MAGYAR ENGLISH

KAPCSOLAT HÍREK Q

 **ELTE TTK** FIZIKAI ÉS CSILLAGÁSZATI INTÉZET

TANSZÉK KUTATÓCSOPORTOK KÖZÉPISKOLÁSOKNAK HALLGATÓINKNAK MUNKATÁRSAINKNAK

ELTE TTK FIZIKAI ÉS CSILLAGÁSZATI INTÉZET > TANSZÉK > BIOLÓGIAI FIZIKA TANSZÉK

BIOLÓGIAI FIZIKA TANSZÉK

BEMUTAKOZÁS
10 ÉVES A TANSZÉK

MUNKATÁRSÁK
TANSZÉKI SZEMINÁRIUM

KORÁBBI MUNKATÁRSÁK
HELYI OLDALAK

KUTATÁS

**HÍREK,
INFORMÁCIÓK.
KLIKKELJEN RÁ!**

[https://physics.elte.hu/
BIO_home](https://physics.elte.hu/BIO_home)

fizikai szemle

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat internet honlapja: <http://www.elft.hu>, e-postacime: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó: Groma István főtítká, felelős szerkesztő: Igloi Ferenc főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Horváth Imre. Nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., Felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulathoz vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.

Megjelenik havonta (nyáron dupla számmal), egyes szám ára: 1200.- Ft (a dupla számé 2400.- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott) és **HU-ISSN 1588-0540** (online)