

Otporni na vrućinu: prilagodbe mrava roda *Cataglyphis* na ekstremna staništa

Randić, Nina

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:087913>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Nina Randić

**Otporni na vrućinu: prilagodbe mrava roda
Cataglyphis na ekstremna staništa**

Završni rad

Zagreb, 2023.

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Biology

Nina Randić

**Heat resistant: adaptations to extreme
habitats in the ant genus *Cataglyphis***

Bachelor thesis

Zagreb, 2023.

Ovaj završni rad je izrađen u sklopu studijskog programa biologije na Zoologijskom zavodu Biološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Andreje Brigić.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Završni rad

Otporni na vrućinu: prilagodbe mrava roda

Cataglyphis na ekstremna staništa

Nina Randić

Rooseveltov trg 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Termofilni mravi roda *Cataglyphis* nastanjuju pustinje i polupustinje Palearktika koje pripadaju najtoplijim i najsušim staništima na Zemlji. Zahvaljujući brojnim morfološkim i fiziološkim prilagodbama te prilagodbama ponašanja najaktivniji su za vrijeme najtoplijeg dijela dana izbjegavajući time predatore i kompeticiju. Sve vrste su strvinari koji se hrane organizmima uginulim od vrućine. Radilice *Cataglyphis* mrava u potragu za hranom odlaze samostalno, prelazeći velike udaljenosti, a zatim se bez pogreške vraćaju u mravinjak najkraćim mogućim putem zahvaljujući iznimno razvijenom sustavu navigacije. Cilj ovog rada je dati pregled prilagodbi mrava roda *Cataglyphis* na život u suhim i vrućim uvjetima, s naglaskom na traženje hrane i navigaciju.

Ključne riječi: pustinjski mravi, traženje hrane, navigacija

(28 stranica, 12 slika, 0 tablica, 79 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Rad je pohranjen u Središnjoj biološkoj knjižnici

Mentor: izv. prof. dr. sc. Andreja Brigić

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Biology

Bachelor thesis

Heat resistant: adaptations to extreme habitats in the ant genus *Cataglyphis*

Nina Randić

Rooseveltova trg 6, 10000 Zagreb, Croatia

The thermophilic ant genus *Cataglyphis* inhabits the arid and semiarid regions of the Palearctic, which are among the hottest and driest habitats on Earth. Thanks to numerous morphological, physiological and behavioral adaptations, these ants are most active during the hottest part of the day, thus avoiding predators and competition. All species are scavengers and feed on organisms that have died from the heat. *Cataglyphis* workers travel long foraging distances on their own and then return straight back to the nest, without getting lost and by the shortest possible route, thanks to an incredibly developed navigation system. This paper provides an overview of the adaptations of the ant genus *Cataglyphis* to life in dry and hot environments, focusing on foraging and navigation.

Keywords: desert ants, foraging, navigation

(28 pages, 12 figures, 0 tables, 79 references, original in: Croatian)

Thesis is deposited in Central Biological Library.

Mentor: Assoc. Prof. Andreja Brigić, PhD

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. TRAŽENJE HRANE | 2 |
| 2.1. Prehrana | 2 |
| 2.2. Pretraživanje teritorija | 2 |
| 2.3. Različite jedinke primjenjuju različite metode pretraživanja | 3 |
| 2.4. Dnevni i godišnji ritmovi traganja | 4 |
| 2.5. Prednosti ekološke niše „termofilnih strvinara“ | 5 |
| 2.6. Brzina kretanja | 6 |
| 2.6.1. Morfološke promjene u duljini nogu | 7 |
| 2.6.2. Podizanje gastera | 8 |
| 3. NAVIGACIJA | 10 |
| 3.1. Integracija puta | 10 |
| 3.2. Navođenje pomoću okolišnih orijentira | 12 |
| 3.4. Određivanje smjera kretanja | 12 |
| 3.4.1. Položaj Sunca | 12 |
| 3.4.2. Uzorak polarizacijske svjetlosti na nebu | 13 |
| 3.4.3. Relativni značaj različitih kompasa za određivanje smjera kretanja | 14 |
| 3.5. Mjerenje udaljenosti pomoću mjerača koraka i optičkog toka | 17 |
| 4. ZAKLJUČAK | 21 |
| 5. LITERATURA | 22 |
| 6. ŽIVOTOPIS | 28 |

1. UVOD

Mravi (Formicidae) su zadružni kukci i jedni od najuspješnijih organizama na Zemlji (Hölldobler i Wilson 1990). Pripadaju razredu kukaca (Insecta), redu opnokrilaca (Hymenoptera), a opisano je približno 14 000 vrsta u 16 potporodica i 346 rodova (Bolton 2023). Rasprostranjeni su u gotovo svim kopnenim ekosustavima, imaju značajnu ulogu u rahljenju tla i rasprostranjanju sjemenki biljaka te su jedni od vodećih predatora ostalih člankonožaca (Hölldobler i Wilson 1990). Osim velikog ekološkog značaja imaju i iznimnu geografsku rasprostranjenost. Nastanjuju gotovo sve tipove kopnenih staništa, od sjevernog pola do ekvatora (Brian 1978), a kopnene površine bez mrava su Antarktika, Grenland i još nekoliko otoka (Hölldobler i Wilson 1990). Mravi su raznoliki i po svojoj ekologiji: od tribusa Attini koji uzgajaju gljive za hranu u Srednjoj i Južnoj Americi (Bransteter i sur. 2017), mrava ratara koji sakupljaju sjemenke (Azcárate i sur. 2007) do mrava stočara koji uzgajaju biljne uši (Robinson i sur. 2016). Jedan od razloga uspjeha mrava leži u tome što su se prilagodili i specijalizirali za različite ekološke niše (Hölldobler 2016). Jedan od najzanimljivijih primjera specijalizacije kod mrava su pustinjski mravi roda *Cataglyphis* (Förster, 1850) (eng. *desert ants*) koji su razvili niz prilagodbi na suha i vruća staništa.

Rod *Cataglyphis* je otkriven 1850. godine i do danas je opisana 101 vrsta (Bolton 2023). Rasprostranjeni su na pustinjskim i polupustinjskim staništima Palearktika od zapadne Afrike do pustinje Gobi te od razine mora do 3000 metara nadmorske visine (Agosti 1990). Središte rasprostranjenosti roda je Bliski Istok. Za razliku od ostalih pustinjskih organizama koji pokušavaju izbjeći vrućinu, vrste roda *Cataglyphis* su se na nju prilagodile i koriste ju kako bi izbjegli predatore i potencijalne kompetitore. Brojne morfološke i fiziološke prilagodbe, kao i prilagodbe ponašanja, od razine jedinke do kolonije, omogućuju im preživljavanje na ekstremno toplim staništima (Boulay i sur. 2017). Sve vrste su termofilne i hrane se drugim kukcima uginulim od vrućine. Zahvaljujući dugim nogama i nizu drugih prilagodbi mogu trčati po užarenom tlu tijekom najtoplijeg dijela dana kada većina drugih člankonožaca nije aktivna. Za snalaženje u jednoličnim pustinjskim staništima, gdje je prevruće da bi se zadržao feromonski trag, ovi mravi imaju nevjerojatno razvijenu vizualnu i unutarnju navigaciju. U potragu za hranom radilice odlaze samostalno, prelazeći velike udaljenosti do čak 100 m i zatim se bez pogreške vraćaju u mravinjak najkraćim putem (Aron i Wehner 2021). Zbog svega ovoga pustinjski mravi roda *Cataglyphis* su postali modelni organizmi u istraživanju navigacije kukaca, a proučavanje njihove ekologije te morfoloških i fizioloških značajki ključno je za razumijevanje prilagodbi organizama na ekstremno topla staništa (Wehner 2020; Boulay i sur. 2017).

Klimatske promjene u mnogim dijelovima svijeta donose povišenje srednjih temperatura i sušu klimu (tzv. dezertifikacija) (IPCC 2019) zbog čega razumijevanje biologije organizama koji su evoluirali u ekstremnim staništima poprima još veći značaj. Uz to, mravi roda *Cataglyphis* služe kao inspiracija brojnim tehnološkim inovacijama, poput robota *Cataglyphis* čije je pokretanje inspirirano navigacijom ovog roda (Gu i sur. 2018). U ovom ću radu pružiti pregled prilagodbi mrava roda *Cataglyphis*, u literaturi poznatih kao „termalni ratnici“ (Heinrich 1996), na život u suhim i vrućim uvjetima, s naglaskom na traženja hrane i navigaciju.

2. TRAŽENJE HRANE

2.1. Prehrana

Vrste roda *Cataglyphis* su strvinari koji se hrane uginulim člankonošcima, ponajviše kukcima (Cerdá i sur. 1989). Pronađeni organizmi su većinom odrasle jedinke, koje su dosegle spolnu zrelost i razmnožile se pa hranjenje isključivo uginulim organizmima ne narušava biološku ravnotežu resursima siromašnih staništa (Harkness i Wehner 1977). Prehrana ovisi o dostupnosti plijena i o potrebi kolonije za hranom (Bosch i sur. 1987). U prehrani brojnih vrsta poput *Cataglyphis bicolor* (Fabricius, 1793), *C. cursor* (Fonscolombe, 1846) i *C. iberica* (Emery, 1906) dominiraju strvine drugih mrava (Cerdá 1988), koji su najbrojniji kukci ovih staništa (Bosch i sur. 1987; Cerdá 1988). Vrste roda *Cataglyphis* se vrlo rijetko hrane biljnom hranom. Najčešće je riječ o sjemenkama s elaiosomima koje mravima predstavljaju izvrstan izvor hrane jer sadrže bjelančevine i masti. Međutim, vrlo rijetko prikupljaju sjemenke bez elaiosoma i druge dijelove biljaka (Cerdá i sur. 1989). Endemična vrsta *Cataglyphis floricola* (Tinaut, 1993) je jedna od rijetkih vrsta koja prikuplja biljni materijal kao značajan izvor prehrane. Naime, odrasle jedinke i ličinke se hrane laticama vrste *Halimium halimifolium* (L.) Willk koje im služe kao izvor šećera i proteina (Cerdá i sur. 1996). Važnu ulogu u prehrani roda *Cataglyphis* ima i veličina plijena. S obzirom na to da radilice samostalno traže hranu, a pomoć pri nošenju je rijetka, masa plijena je ograničena na ono što jedinka može ponijeti (Cerdá i sur. 1989).

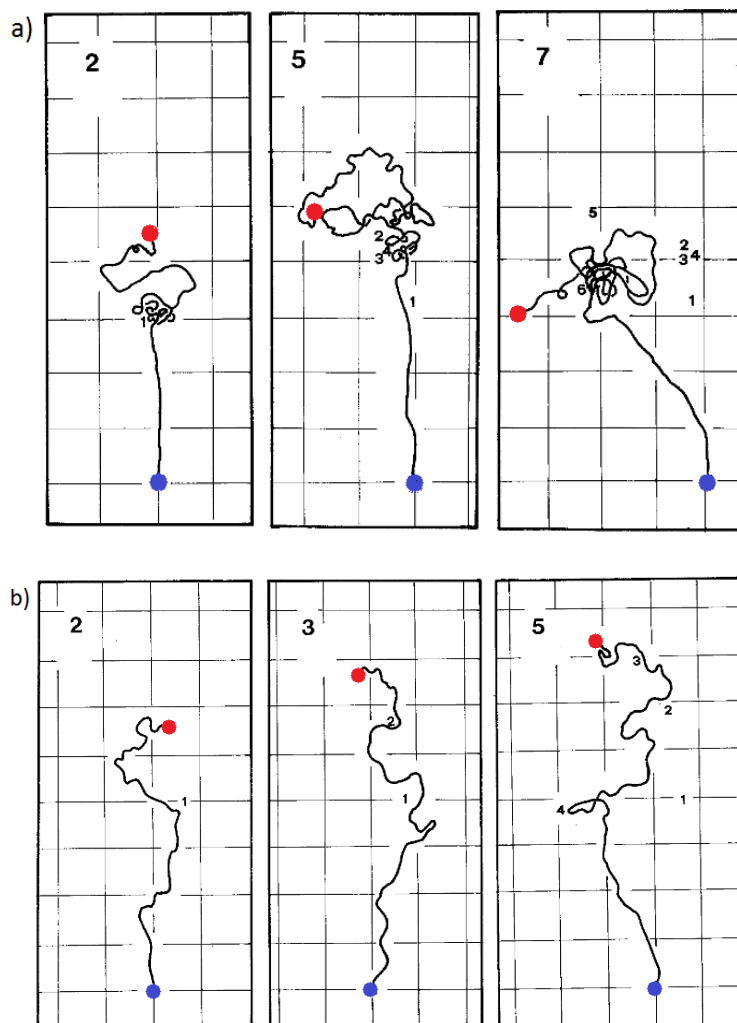
2.2. Pretraživanje teritorija

Pronalazak hrane je najvažnija zadaća u životnom vijeku radilica. Uginuli organizmi su nasumično raspoređeni po staništu pa im organizirano pretraživanje i međusobna komunikacija ne bi bile od koristi (Cerdá i sur. 1989). Stoga iz mravinjaka izlaze pojedinačno, svaka odlazi u određenom smjeru i samostalno traži hranu (Harkness i Wehner 1977). Radilice moraju prijeći velike udaljenosti i potrošiti puno vremena da nađu uginule jedinke, a u mravinjak mogu ponijeti samo jedan organizam. U potragu

odlaze svega nekoliko puta u danu (Schmid-Hempel 1983), a svaka radilica cijeli životni vijek odlazi u istom smjeru i pretražuje samo određeno područje (Harkness i Wehner 1977).

2.3. Različite jedinice primjenjuju različite metode pretraživanja

Kod radilica vrste *Cataglyphis bicolor* pronalazak hrane pri prvom izlasku određuje metodu potrage u sljedećem. Neke radilice u svakom sljedećem izlasku detaljnije pretražuju područje na kojem su prethodno pronašle hranu i dulje se zadržavaju na tom području (Slika 1a) dok druge radilice nemaju ovu strategiju (Slika 1b). Koliko će radilice biti uporne prilikom ponovnog traženja hrane na istom mjestu ovisi o udaljenosti tog mjesta od mravinjaka - što je veća udaljenost od mravinjaka to će biti upornije u potrazi (Schmid-Hempel 1984) odnosno duže će se zadržati kako bi povećale šanse pronalaska (Orians i Pearson 1979). Izvori hrane za ovu vrstu različito su raspoređeni u prostoru. Uginuli mravi i kopneni jednakonošci (Isopoda) su nasumično raspoređeni, dok su bobice vrste *Nitraria retusa* (Forssk.) Asch. koncentrirane na nekoliko mjesta. Radilice koje su uporniji u ponovnom pretraživanju istog lokaliteta su uspješnije u traženju lokalizirane hrane poput bobica. Unatoč tome radilice ne prilagođavaju strategiju ovisno o tome koju hranu traže, već koriste onu strategiju koja je u prvih nekoliko izlazaka bila učinkovitija (Schmid-Hempel 1984). Jedan od mogućih razloga za primjenu različitih strategija traženja hrane kod radilica unutar istog mravinjaka je život u staništu sa siromašnim i nepredvidivim resursima. Kada je hrana nasumično raspoređena, bolje je koristiti različite metode pretrage, nego da svaka jedinka radi isto (Oster i Heinrich 1976; Caraco 1980). Korištenje različitih strategija traganja karakteristično je za zadružne kukce, poput pčela i bumbara, koji na taj način povećavaju učinkovitost traženja hrane (Grant 1950; Heinrich 1976).



Slika 1: Tri putanje kretanja dvije radilice vrste *Cataglyphis bicolor*: a) radilica detaljnije pretražuje područje na kojem je prethodni put našla hranu i dulje se zadržava na njemu, b) radilica ne pretražuje detaljno područje na kojem je prethodni put našla hranu. Plava točka predstavlja mravinjak, a crvena mjesto pronalaska hrane. Brojevi u gornjem lijevom kutu predstavljaju redni broj izlaska iz mravinjaka, a brojevi pokraj puta mjesto pronalaska hrane u prethodnim izlascima i odgovaraju rednom broju tog izlaska (preuzeto i prilagođeno prema: Schmid-Hempel 1984).

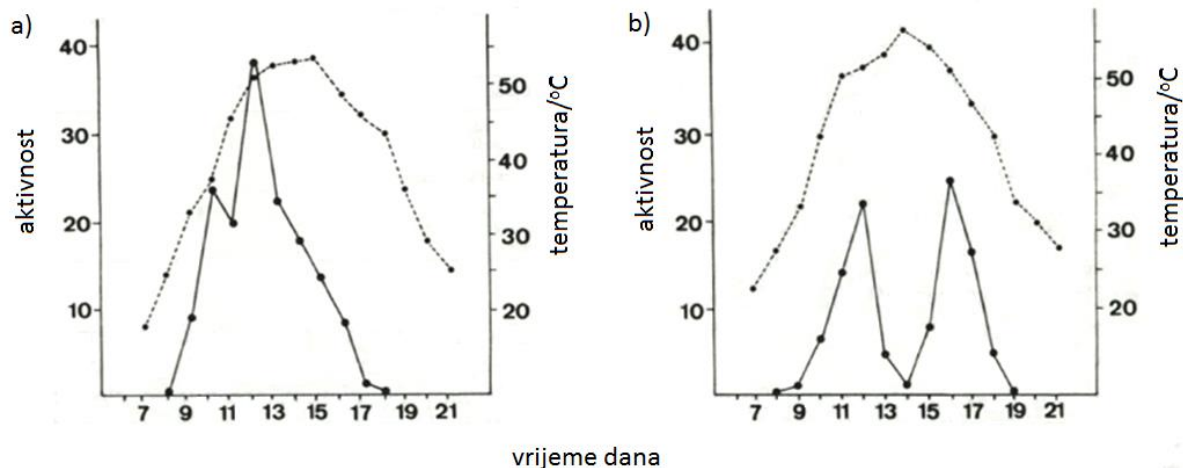
2.4. Dnevni i godišnji ritmovi traganja

Mravi roda *Cataglyphis* traže hranu isključivo u periodu dana kada su temperature tla najviše (Lenoir i sur. 2009). Promjene u aktivnosti mrava prate promjene u temperaturi na dnevnoj i godišnjoj razini (Boulay i sur. 2017). U ljetnim mjesecima najveću aktivnost dosežu jednom (Slika 2a) ili dva puta dnevno (Slika 2b), ovisno o maksimalnoj temperaturi toga dana. S porastom temperature povećava se i njihova aktivnost odnosno broj izlazaka i ulazaka u mravinjak. Međutim, ako temperatura tla dosegne

gornju termalnu granicu, koja za vrstu *Cataglyphis cursor* iznosi 53 °C na površini tla odnosno 48 °C u visini tijela mrava, radilice prekidaju aktivnost i nastavljaju tek kada temperatura padne (Cerdá i sur. 1989).

Radilice pustinjskih mrava ujutro uklanjaju komadiće zemlje i kamenčiće, kojima su zatvorili ulaz mravinjaka, i kreću izlaziti i ulaziti iz njega. Iako zatvaraju otvore tek predvečer, aktivnost pojedine radilice traje samo dva do tri sata (Harkness i Wehner 1977). Za vrijeme najtoplijeg dijela dana nekoliko radilica kratko kruži oko otvora mravinjaka osjećajući vanjsku temperaturu i zatim se vraća u mravinjak. Nakon toga velika količina radilica izlazi iz mravinjaka i u tom trenutku se ostvaruje najveća aktivnost mravinjaka (Wehner i Wehner 2011).

Osim o temperaturi, aktivnost mrava ovisi i o trenutnim energetskeim zahtjevima kolonije, koji ovise o veličini kolonije te prisutnosti ličinki. Ljeti, kada ima najviše ličinki, potreba za hranom je na vrhuncu te se postupno smanjuje do zime kada započinje hibernacija (Cerdá i sur. 1989). Međutim, mravinjak može biti aktivan i po zimi ako se radi o Sahari ili Arapskom poluotoku gdje i u to doba godine temperature mogu prelaziti 40 °C (Wehner 2020).



Slika 2: Dnevna aktivnost mravinjaka vrste *Cataglyphis cursor* (isprekidana linija) u ovisnosti o temperaturi tla mjerenoj na suncu (puna linija): a) 1. srpnja; b) 24. srpnja. Aktivnost mravinjaka predstavlja prosječan broj izlazaka i ulazaka u mravinjak u jednoj minuti (preuzeto i prilagođeno prema: Cerdá i sur. 1989).

2.5. Prednosti ekološke niše „termofilnih strvinara“

Velike temperaturne oscilacije jedan su od najvećih izazova s kojima se suočavaju organizmi koji žive na suhim staništima (Whitford i sur. 1975). U Sahari temperature prelaze 50 °C tijekom ljeta, a

temperaturne razlike, koje se javljaju tijekom dana, najveće su na površini tla (Wehner 2020). Za mrave je svaka promjena temperature izvan raspona 10 – 45°C opasna jer su ektotermni organizmi, čija tjelesna temperatura ovisi o vanjskoj temperaturi. Ipak, radilice roda *Cataglyphis* redovito su aktivne na puno višim temperaturama od ostalih organizama (Cerdá 2001) čime ostvaruju posebnu ekološku nišu „termofilnih strvinara“ (Cerdá i sur. 1989).

Nekoliko je razloga zašto je ekološka niša roda *Cataglyphis* uspješna. Kao prvo, najviše organizama će uginuti od topline i isušivanja za vrijeme najtoplijeg dijela dana pa aktivnost u tom dijelu dana povećava dostupnost hrane. Kao drugo, smanjuje se kompeticija ostalih vrsta mrava. U područjima velike raznolikosti mravljih vrsta, poput Mediterana, mravi koriste različite ekološke niše kako bi izbjegli kompeticiju. Za područje Mediterana značajne su velike temperaturne promjene što znači da pojedine vrste mogu biti aktivne u različitim temperaturnim rasponima (Cerdá i sur. 1998), odnosno da mogu zauzeti različite temperaturne niše. U pravilu, aktivnost mrava unutar ovih termalnih niša ovisi o tome je li dominantna ili subprecedentna vrsta. Dominantne vrste su agresivnije i brojnije (Cerdá 2013) od subprecedentnih vrsta kojima pripada rod *Cataglyphis*. Hranu sakupljaju danju samo u rano proljeće i kasno ljeto, dok su u ljetnim mjesecima aktivne u sumrak i/ili noću (Cerdá i sur. 1998) ograničavajući svoju aktivnost na raspon 20 – 28 °C, daleko od kritičnih temperatura koje bi ih ugrozile (Cerdá 2001). S druge strane, subprecedentne vrste, koje većinom čine vrste roda *Cataglyphis*, su zbog selektivnog pritiska razvile prilagodbe na visoke temperature te hranu traže uvijek po danu (Cerdá i sur. 1998). Temperature pri kojima su najaktivnije iznose 44 – 50 °C i puno su bliže temperaturi na kojoj im se smanjuju motoričke sposobnosti i prijeti im smrt izazvana pregrijavanjem (Cerdá 2001). Termofilni rod *Cataglyphis* je najaktivniji i najučinkovitiji pri najvišim temperaturama. S porastom temperature radilice vrste *Cataglyphis cursor* donose veću količinu plijena u kraćem vremenu iako se apsolutni broj radilica gotovo ne mijenja. Njihova je učinkovitost najveća ako traže hranu u najtoplijem dijelu dana kada ostale vrste nisu prisutne (Cerdá i sur. 1989). Rod *Cataglyphis* time smanjuje kompeticiju među dominantnim vrstama, ali se izlaže riziku letalnih temperatura (Cerdá i sur. 1998). Kada bi tražili hranu pri nižim temperaturama rizik bi bio manji, ali i prinosi (Nonacs i Dill 1988). Stoga ova ekološka niša omogućuje termofilnim mravima roda *Cataglyphis* ostvarivanje maksimalnog energetskeg doprinosa uz minimalnu smrtnost (Cerdá i sur. 1998).

2.6. Brzina kretanja

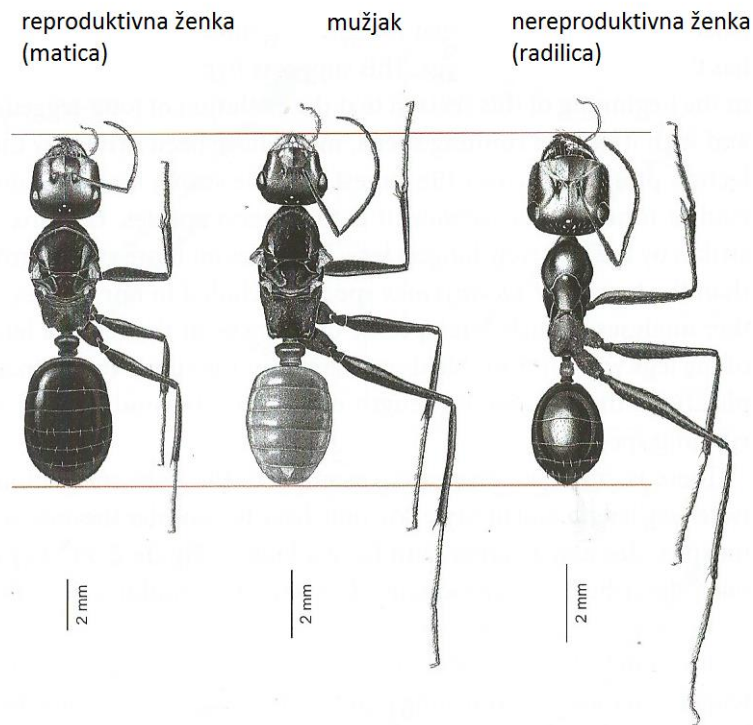
Termofilni pustinjski mravi roda *Cataglyphis* su izuzetno brzi i pokretni. Zabilježeno je da saharski srebrni mrav (*Cataglyphis bombycina* (Roger, 1859)) u potrazi za hranom može doseći brzinu od 1 m/s

što ga čini najbržim mravom na svijetu. Postoji nekoliko razloga zašto bi termofilnim mravima velika brzina bila od koristi u okolišu u kojem žive (Wehner 2020). Što se mrav brže pokreće, hlađenje uzrokovano konvekcijom bit će brže (Sommer i Wehner 2012). Primjerice pri brzini koju postiže saharški srebrni mrav hlađenje konvekcijom je dva puta brže u odnosu na mrava koji miruje (Marsh 1985). Tako radilice mogu tražiti hranu kada temperature prelaze 50 °C i približavaju se njihovoj granici izdržljivosti (Aron i Wehner 2021). Također, suha i otvorena staništa su siromašna plijenom. Zato moraju prijeći velike udaljenosti kako bi pokrili čim veću površinu, a vrijeme provedeno u potrazi mora biti čim kraće što znači da se moraju kretati čim brže (Wehner 2020). Time smanjuju izloženost visokim temperaturama, ali i predatorima poput paukova i guštera (Sommer i Wehner 2012). Kretanje velikom brzinom omogućuju im morfološke prilagodbe koje uključuju dugačke noge, pomičan gaster i tanak trup (Wehner 2020).

2.6.1. Morfološke promjene u duljini nogu

Termofilni mravi roda *Cataglyphis* imaju znatno dulje noge u odnosu na srodne vrste slične duljine tijela koje žive na hladnijim staništima, primjerice rodovi *Formica* i *Messor* (Sommer i Wehner 2012). Dva su selektivna pritiska uvjetovala duge noge u termofilnih vrsta: visoka temperatura tla i pretraživanje čim većeg područja u što kraćem vremenu (Sommer i Wehner 2012; Wehner 2020). Duljina nogu se u termofilnih vrsta povećava sa sjevera prema jugu što predstavlja prilagodbu na visoke temperature (Sommer i Wehner 2012). Osim što im omogućuju da brže trče, duge noge ih štite i od topline tla uzdižući tijelo iznad zemlje. Na udaljenosti od samo 4 mm od površine tla temperatura zraka može se smanjiti u odnosu na temperaturu tla za čak 10 °C (Marsh 1985). Nadalje, duljina nogu je kod mrava roda *Cataglyphis* proporcionalna veličini prostora na kojem pojedina vrsta traži hranu. Vrsta *C. fortis* je srednje veličine u odnosu na manju vrstu *C. albicans* i veću *C. bicolor* (Sommer i Wehner 2012). Međutim, ima najdulje noge jer živi na staništu koje je najsiromašnije plijenom i prelazi najveće udaljenosti u potrazi za njim (Wehner 2020).

Osim što se duljina nogu razlikuje između pojedinih vrsta roda *Cataglyphis*, razlikuje se i unutar vrste. U tom slučaju ovisi o kasti kojoj jedinka pripada. Reproductivne ženke (matice) imaju najkraće noge u odnosu na tijelo (Slika 3) jer feromonima privlače mužjake pa ne prelaze velike udaljenosti. Za razliku od njih mužjaci imaju dulje noge u odnosu na duljinu tijela (Slika 3) jer moraju tražiti ženke za parenje. Nereproduktivne ženke (radilice) moraju prijeći najveće udaljenosti budući da je njihova glavna uloga sakupljanje hrane za cijelu koloniju. Zato imaju najdulje noge u odnosu na tijelo, ali i najtanji trup što je posljedica dugačkih mišića nogu koji su prihvaćeni za njega (Slika 3) (Wehner 2020).



Slika 3: Tri kaste vrste *Cataglyphis fortis*: reproduktivna ženka (kraljica), mužjak i nereproduktivna ženka (radilica; s lijeva na desno). Duljine tijela su izjednačene kako bi se prikazale razlike u duljini nogu u odnosu na tijelo ovisno o kasti (preuzeto i prilagođeno prema: Wehner 2020).

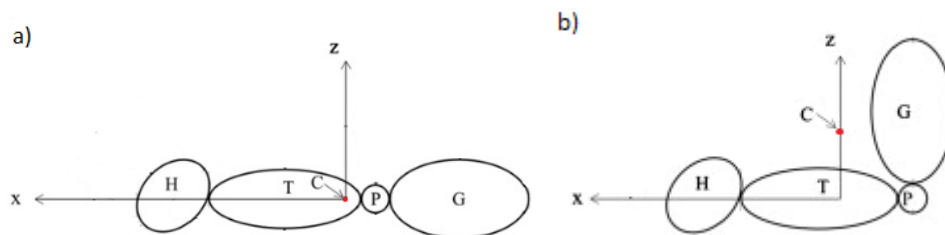
2.6.2. Podizanje gastera

Neke vrste roda *Cataglyphis* mogu podići gaster prema gore za 90° (Slika 4) ili u nekim slučajevima i više od 90° tako da im je vrh gastera usmjeren prema naprijed. Postoje dvije teorije o ulozi podizanja gastera iz horizontalnog u vertikalni položaj (Wehner 2020). Prema prvoj teoriji funkcija ovakvog ponašanja je zaštita vitalnih organa od vrućine jer se time stvara hladnija mikroklima u području gastera, budući da je manja površina gastera izložena direktnom Sunčevom zračenju i da je gaster udaljeniji od zračenja tla. Radilice vrste *Cataglyphis rosenhaueri* (Santschi, 1925) mogu podići gaster za 1 do 2 mm i time smanjiti temperaturu zraka u području gastera za 6°C kada temperatura tla iznosi 50°C odnosno za $6,5^\circ\text{C}$ kada iznosi 55°C . Jedinke ove vrste su relativno male te se pretpostavlja da ovaj mehanizam zamjenjuje duge noge koje su prisutne u mnogih vrsta roda *Cataglyphis* (Cerdá i Retana 2000; Cerdá 2001). Međutim, postoje razlozi zbog kojih neki ovu teoriju smatraju neispravnom. Naime, vitalni organi koje je potrebno zaštititi od topline su glava koja se nalazi na prednjem dijelu tijela i jajnici koji nisu razvijeni jer su radilice nereproduktivne ženke. Osim toga, vrsta *Cataglyphis bombycina*, koja živi na najtoplijim staništima pustinjskih dina, nema mogućnost podizanja gastera, dok neke vrste koje žive u

hladnijim područjima poput Mediterana imaju, primjerice *Cataglyphis noda* (Brullé, 1833) (McMeeking i sur. 2012). Prema drugoj teoriji podizanje gastera mravima omogućuje brže okretanje. Vrste *Cataglyphis fortis* (Forel, 1902) i *C. bicolor* stavljanjem gastera u uspravni položaj pomiču težište tijela prema naprijed i gore čime smanjuju moment tromosti za više od pola (Slika 5 a i b). Smanjenjem momenta tromosti smanjuje se moment sile potreban da se mrav zaokrene oko svoje osi. Zato mravi troše manje energije da se zaokrenu u željenom pravcu i mogu se brže pokretati na zakrivljenim putanjama. To je od iznimne koristi za vrste, poput *C. noda*, koje žive na manje suhim staništima obraslim grmljem ili na poljoprivrednim područjima gdje se moraju brzo kretati po neravnom tlu (Wehner 2020).



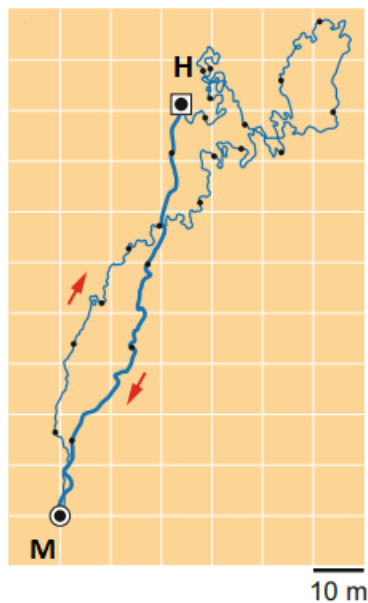
Slika 4: Uzdignuti gaster u radilice vrste *Cataglyphis bicolor* (preuzeto iz: Aron i Wehner 2021).



Slika 5: Težište tijela (C) prikazano na modelu radilice roda *Cataglyphis*: a) kada je gaster postavljen horizontalno; b) kada je gaster postavljen vertikalno. Oznake: H – glava, T – prsa, P – petiolus, G – gaster, x – longitudinalna os tijela, z – vertikalna os tijela (preuzeto i prilagođeno prema: McMeeking i sur. 2012).

3. NAVIGACIJA

Navigacija je jedna od osnovnih vještina svih životinja koje se pokreću. Osim za pronalazak hrane, važna je i za povratak u nastambu ili gnijezdo (Brower 1996). Jednom kada radilice roda *Cataglyphis* pronađu hranu, njihova zadaća nije ispunjena (Harkness i Wehner 1977). Moraju se vratiti do mravinjaka i prijeći udaljenost koja odgovara tisućama duljina njihova tijela (Wehner 2003). Pri tome se ne koriste feromonima kao većina mravljih vrsta (Boulay i sur. 2017) jer bi feromoni prebrzo ishlapili na visokim temperaturama (Ruano 2000). Osim toga, u slučaju da koriste feromone morali bi se vratiti istim putem kojim su došli čime bi bespotrebno trošili energiju. S obzirom na to da traže hranu pri temperaturama koje se približavaju letalnima, ključno je da povratak bude čim brži (Wehner 2020). Zato se ne vraćaju istim krivudavim putem kojim su tražili hranu, već po gotovo ravnoj liniji koja ih vodi direktno do mravinjaka (Slika 6) (Harkness i Wehner 1977). To im omogućuju dvije metode navigacije: integracija puta i navođenje pomoću okolišnih orijentira (Aron i Wehner 2021).

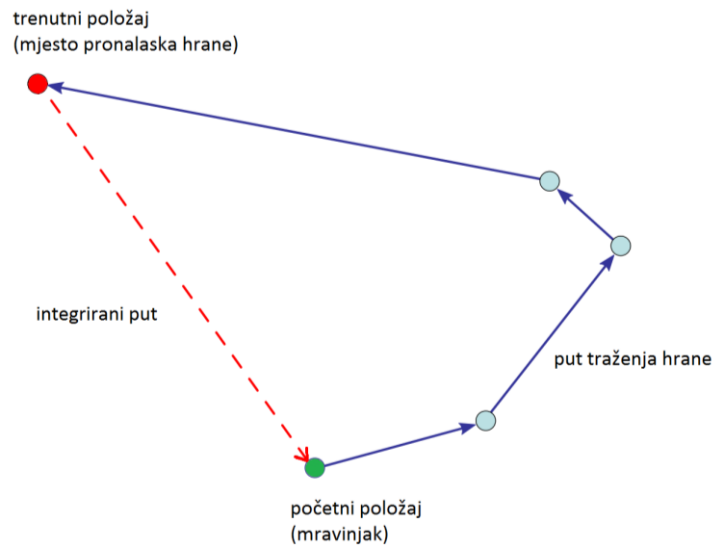


Slika 6: Put traženja hrane (tanka plava linija) i povratka u mravinjak (debeli plava linija). Oznake: M – mravinjak, H – mjesto pronalaska hrane. Crne točke predstavljaju vremenski raspon od jedne minute (preuzeto i prilagođeno prema: Aron i Wehner 2021).

3.1. Integracija puta

Integracija puta je tehnika navigacije kojom se služe mnoge životinje uključujući sisavce, ptice i neke člankonošce - primjerice žohare, pčele i mrave (Wehner 2020). Pustinjski mravi roda *Cataglyphis*

nastanjuju jednolična staništa (Heinze i sur. 2018) zato je bitno da se u navigaciji ne trebaju nužno oslanjati na okolišne orijentire, što im ova metoda omogućuje. Integracija puta se temelji na dvije vrste podataka, smjeru kretanja i prijeđenoj udaljenosti (Wehner 2020). Omogućuje im da u svakom trenutku budu svjesni svog položaja u prostoru u odnosu na početni položaj tj. mravinjak. Svaki put kada radilica promijeni smjer kretanja vodi računa o smjeru kojim se kretala u prethodnom dijelu puta i udaljenosti koju je pritom prešla (Slika 7). Tako na kraju puta zna u kojem smjeru se nalazi mravinjak i koliko je udaljen (Müller i Wehner 1988; Heinze i sur. 2018).



Slika 7: Integracija puta: svaki put kada radilica promijeni smjer (plave točke) prilikom traženja hrane (plave strelice) vodi računa o promjeni smjera i udaljenosti koju je prešla prije nego što je promijenila smjer. To joj omogućuje da u svakom trenutku zna u kojem smjeru i koliko daleko je mravinjak (zelena točka). Kada pronade hranu koristi taj smjer kako bi se vratila u mravinjak (crvena strelica; preuzeto i prilagođeno prema: Path integration 2017).

Mravi roda *Cataglyphis* dobivaju podatke potrebne za integraciju puta na različite načine. Za određivanje smjera kretanja koriste nebeske orijentire, a dva najkorištenija orijentira su položaj Sunca i uzorak polarizacije Sunčeve svjetlosti (Wehner i Duelli 1971; Leubhardt i Ronacher 2014). Osim toga, upotrebljavaju i smjer vjetra (Müller i Wehner 2007) te magnetsko polje Zemlje (Buehlmann i sur. 2012). Podatke o prijeđenoj udaljenosti dobivaju mjeračem koraka (Wittlinger i sur. 2006) i optičkim tokom (Ronacher i Wehner 1995). Upotreba različitih metoda osigurava da je integracija puta moguća u svakom trenutku. To je od osobite važnosti na staništima na kojima je integracija puta jedina dostupna metoda

navigacije kao što su potpuno ravna i jednolična slana jezera sjeverne Afrike koja nastanjuje vrsta *C. fortis* (Lebhardt 2015).

Iako i druge vrste mrava koriste integraciju puta ovaj rod se ističe po nevjerojatnoj preciznosti, brzini i duljini puta koju prelaze (Boulay i sur. 2017). Područje koje pretražuju može imati površinu i do 50 m², međutim, pogreška izračunatog smjera mravinjaka nikad nije veća od 4 % (Wehner 1972). Zato ne čudi činjenica da su pustinski mravi postali modelni organizmi za istraživanje navigacije (Wehner 2020).

3.2. Navođenje pomoću okolišnih orijentira

Preciznost integracije puta se smanjuje s povećanjem udaljenosti pri traženju hrane (Lebhardt 2015). Također, moguće su i pogreške prilikom određivanja smjera i udaljenosti mravinjaka (Aron i Wehner 2021) pa integracija puta često nije dovoljna da radilicu dovede do samog otvora mravinjaka (Boulay i sur. 2017). Zato mravi roda *Cataglyphis* uz integraciju puta koriste i drugu metodu navigacije koja se zasniva na okolišnim orijentirima (Wehner 2020; Aron i Wehner 2021).

Radilice primjećuju i uče različite orijentire u okolišu koji određuju položaj mravinjaka (Knaden i Graham 2016). Pamte panoramu oko otvora mravinjaka kako bi ju kasnije usporedile s onim što vide i vratile se do njega (Wehner 2020). Osim vizualnih obilježja, pamte i mirise (Steck 2009) i strukturu tla (Seidl i Wehner 2006) oko otvora mravinjaka. Jednom kada dođu do kraja integriranog puta koji ih navodi do područja gdje bi se trebao nalaziti mravinjak, koriste ovakve orijentire kako bi što preciznije i brže došli do samog otvora mravinjaka (Aron i Wehner 2021). Zahvaljujući tome što koriste obje strategije, navigacija pustinskih mrava roda *Cataglyphis* vrlo je učinkovita (Lebhardt 2015).

3.4. Određivanje smjera kretanja

Mravi roda *Cataglyphis* najčešće koriste orijentire na nebu kao kompas za određivanje smjera kretanja u navigaciji integracijom puta. Dvije najkorištenije oznake su položaj Sunca i uzorak polarizacijske svjetlosti na nebu stoga ću u nastavku njih detaljnije opisati (Wehner i Duelli 1971; Lebhardt i Ronacher 2014).

3.4.1. Položaj Sunca

Položaj Sunca na nebu je prvi otkriveni kompas u životinjskom svijetu. Otkriven je upravo na mravima (Santschi 1911), a koriste ga i mnoge druge životinje uključujući sisavce i ptice (Lebhardt i Ronacher 2014). Temelji se na određivanju azimuta Sunca (kuta između određene točke primjerice sjevera i promatranog objekta primjerice Sunca mjeren na horizontu u smjeru kazaljke na sat) (Duelli i Wehner 1973). Na temelju azimuta Sunca životinja prati smjer vlastitog kretanja (Grob i sur. 2019;

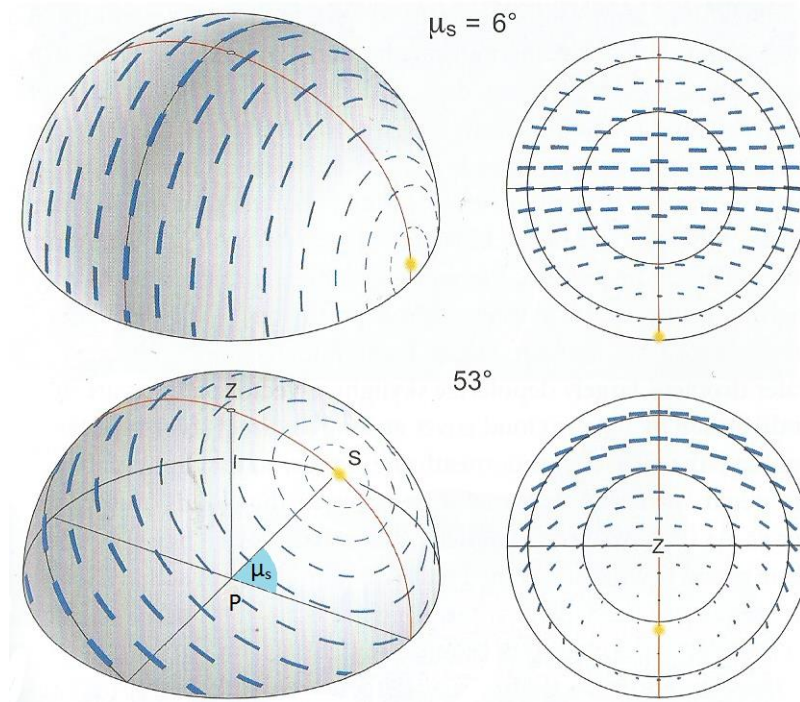
Lebhardt i Ronacher 2014). Međutim, upotreba Sunca kao kompasa nije uvijek moguća jer ono može biti prekriveno oblacima. Tada je potrebno koristiti druge oznake na nebu. Pčele i neke vrste mrava poput roda *Cataglyphis* koriste polarizaciju Sunčeve svjetlosti. Za razliku od Sunca, koje se nalazi u jednoj točki, polarizacija prekriva cijelo nebo pa je ovaj kompas puno otporniji na zasjenjenje oblacima ili drugim objektima (Wehner 2020).

3.4.2. Uzorak polarizacijske svjetlosti na nebu

Sunčeva svjetlost je dio spektra elektromagnetskog zračenja koje Sunce emitira u obliku elektromagnetskih valova. Elektromagnetski valovi se sastoje od električnog i magnetskog polja koja titraju u ravnini okomitoj na smjer širenja vala. Električno polje ima primarnu ulogu u tome što vidimo svjetlost zato će u nastavku biti riječi samo o električnoj komponenti elektromagnetskog vala (Wehner 2020). Svjetlost koja dopire sa Sunca je nepolarizirana što znači da električno polje titra u različitim ravninama pri čemu se niti jedna od njih ne ističe. Međutim, zbog međudjelovanja svjetlosti i različitih tvari kao što su čestice zraka i vode može doći do polarizacije Sunčeve svjetlosti (Mathejczyk i Wernet 2017).

Polarizacija svjetlosti je pojava pri kojoj električno polje ne titra jednako u svim ravninama. Čovjek ne može vidjeti polarizaciju svjetlosti, ali brojni kukci poput pčela i mrava mogu te ju koriste u navigaciji (Frisch 1949). Raspršenjem Sunčeve svjetlosti na česticama zraka nastaje linearno polarizirana svjetlost čije električno polje titra u samo jednoj ravnini (Mathejczyk i Wernet 2017). Električna polja stvaraju koncentrične kružnice oko Sunca koje čine uzorak polarizirane svjetlosti koji se mijenja ovisno o položaju Sunca na nebu. Međutim, postoje dvije značajke tog uzorka koje se nikad ne mijenjaju, a povezane su sa smjerom i jačinom polarizacije. Zahvaljujući njima se uzorak polarizacije može koristiti kao kompas (Rossel i Wehner 1984).

Prvo, na uzorku polarizirane svjetlosti uvijek postoji linija simetrije koja prolazi kroz liniju koja spaja zenit, Sunce i horizont (Sunčev meridijan) (Slika 8). Na toj liniji je svjetlost uvijek polarizirana paralelno s horizontom, a na svim ostalim mjestima se smjer polarizacije mijenja ovisno o položaju Sunca na nebu. Drugo, najjača polarizacija se događa pod kutom od 90° u odnosu na Sunce (Slika 8). Kada je Sunce u zenitu najjače je polarizirana svjetlost na horizontu, a kada je Sunce na horizontu najjače je polarizirana svjetlost koja se nalazi na kružnici koja prolazi zenitom. To znači da će dio neba na kojem se nalazi Sunce uvijek biti manje polarizirano u odnosu na dio neba gdje se ne nalazi (Wehner 2020). Na temelju ovih značajki mravi roda *Cataglyphis* mogu odrediti liniju simetrije uzorka polarizirane svjetlosti na nebu, a time i liniju kroz koju prolazi Sunce (Sunčev meridijan) (Rossel i Wehner 1984; Wehner 2020).



Slika 8: Uzorak polarizacijske svjetlosti prikazan trodimenzionalno (lijevo) i dvodimenzionalno (desno) za dvije različite kutne visine Sunca (μ_s). Plave linije su električna polja polarizirane svjetlosti koja čine koncentrične kružnice oko Sunca. Njihovo usmjerenje i debljina predstavljaju smjer i jačinu polarizacije. Crvena linija predstavlja liniju simetrije uzorka polarizacije u kojoj je svjetlost uvijek polarizirana paralelno s horizontom. Jačina polarizacije se postepeno povećava. Direktna Sunčeva svjetlost je nepolarizirana, a najjača polarizacija se događa pod kutom od 90° u odnosu na Sunce. Dva unutarnja kruga na dvodimenzionalnom prikazu predstavljaju kut elevacije od 30° i 60° . Oznake: S – Sunce, Z – zenit, P – promatrač (preuzeto i prilagođeno prema: Wehner 2020).

Međutim, mravi kao i pčele ne znaju gdje se točno na nebu u svakom trenutku nalaze električna polja polarizirane svjetlosti i kojem se smjeru pružaju (Wehner 2003). Odnosno, oni ne koriste potpuni uzorak polarizacije neba sa svim detaljima, već se oslanjaju na njegov pojednostavljeni prikaz (Fent 1986). On im omogućuje pronalazak smjera čak i u slučaju kada vide samo mali dio neba, ako im je i prilikom traženja hrane i povratka dostupan prikaz polarizacije istog dijela neba (Wehner 2003).

3.4.3. Relativni značaj različitih kompas za određivanje smjera kretanja

U prirodnim uvjetima mravi roda *Cataglyphis* u isto vrijeme mogu koristiti različite pojave u prirodi kao kompas u navigaciji, primjerice položaj Sunca, uzorak polarizacije i vjetar (Müller i Wehner

2007). Međutim, nisu im svi izvori podjednako važni prilikom određivanja smjera kretanja (Wehner 2020).

U većini će se slučajeva mravi roda *Cataglyphis* oslanjati isključivo na polarizacijsku svjetlost (Wehner i Müller 2006; Lehardt i sur. 2012). Upotreba uzorka polarizacije svjetlosti dominira nad unutarnjim podacima o smjeru kretanja tijela dobivenim pomoću proprioceptora koje koriste u integraciji puta. Kada se radilicama vrste *Cataglyphis fortis* eksperimentalno suprotstave podaci dobiveni na temelju uzorka polarizacije i proprioceptora, potpuno ignoriraju proprioceptore i koriste samo polarizaciju svjetlosti (Lehardt i sur. 2012). Naime, oslanjanje na isključivo unutarnje signale o smjeru kretanja, poput proprioceptora, dovelo bi do značajnih pogrešaka u integraciji puta, pogotovo pri prelasku velikih udaljenosti. Zato se rod *Cataglyphis* oslanja na vanjske izvore za određivanje smjera kretanja (Müller i Wehner 2007).

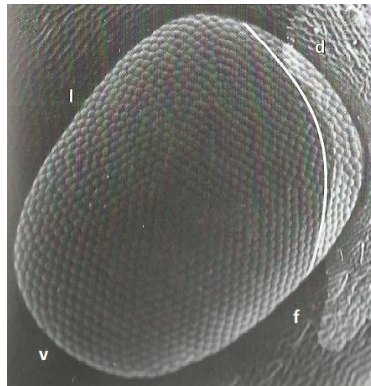
Uzorak polarizacijske svjetlosti ima prednost kao kompas i nad smjerom vjetra. Pustinjski mravi roda *Cataglyphis* koriste smjer vjetra kao kompas samo kada vjetar puše iz istog smjera tijekom duljeg perioda, kao na primjer na obali sjeverne Afrike gdje žive neke vrste ovog roda (Wehner 2020). U slučaju kada im je dostupan uzorak polarizirane svjetlosti ne koriste smjer vjetra, osim ako im se eksperimentalno polarizirana svjetlost ne ukine (Müller i Wehner 2007).

Međutim, vjetar može zamijeniti Sunce kao kompas u slučajevima kada je Sunce visoko na nebu. Naime, što je Sunce više to je manja točnost određivanja azimuta Sunca, a time i točnost određivanja smjera kretanja pa radilice radije biraju vjetar za određivanje smjera (Müller i Wehner 2007). U slučaju da dva kompasa ne pokazuju iste smjerove bilo bi logično očekivati da radilice koriste oba i izračunaju srednji smjer te tako smanje vjerojatnost pogreške (Cheng i sur. 2007). Međutim, to ovdje nije slučaj jer radilice znaju koji kompas je u kojim uvjetima pouzdaniji (Lehardt i Ronacher 2014). Ipak, zabilježeni su i slučajevi u kojima se ne mogu odlučiti (Wehner i Müller 2006).

Mravima roda *Cataglyphis* položaj Sunca i uzorak polarizacijske svjetlosti predstavljaju jednako pouzdane kompase. Iako neki pokusi pokazuju da ako se suprotstave podaci dobiveni ovim kompasima, mravi vrste *Cataglyphis fortis* zanemaruju Sunce i orijentiraju se samo pomoću polarizacijske svjetlosti (Wehner i Müller 2006), drugi pokazuju da Sunce i polarizacijska svjetlost imaju podjednaku ulogu u određivanju smjera integriranog puta (Lehardt i Ronacher 2014). Međutim, to je možda posljedica razlika u eksperimentalnom dizajnu između dva pokusa. U drugom pokusu su mravi izloženi većoj razlici u onome što kompasi pokazuju te je uzorak polarizacije bio umjetno stvoren. Kada se ne mogu odlučiti

koji je kompas pouzdaniji, mravi biraju srednji smjer smanjujući time mogućnost pogreške (Lebhardt i Ronacher 2014).

U prirodnim uvjetima su položaj Sunca i uzorak polarizacijske svjetlosti međusobno povezani (Wehner 1997). Međutim, mravi roda *Cataglyphis* ih percipiraju različitim dijelovima očiju. Za percepciju polarizacijske svjetlosti je zadužen dorzalni rub sastavljenog oka (eng. *dorsal rim area*, DRA) (Slika 9) (Wehner i Rossel 1985). Oba kompasu su dovoljna za praćenje smjera kretanja radilice u slučaju da drugi u potpunosti izostaje. Osim toga, mogu se prisjetiti podataka koje im je svaki od njih pružao čak i kada im više nije dostupan. Kada radilice *C. fortis* eksperimentalno traže hranu i pri tome vide samo uzorak polarizacijske svjetlosti, a pri povratku samo Sunce, točno određuju smjer integriranog puta. Isto vrijedi i u obrnutom smjeru. Radilice se mogu prisjetiti podataka dobivenih bilo kojim kompasom što znači da jedan može zamijeniti drugi kada je potrebno (Lebhardt 2015).



Slika 9: Dorzalni rub (eng. *dorsal rim area*, DRA) sastavljenog desnog oka vrste *Cataglyphis fortis* označen bijelom linijom. d – dorzalni, f – frontalni, l – lateralni i v – ventralni rub oka. Fotografija je snimljena SEM mikroskopom (preuzeto i prilagođeno prema: Wehner 2020).

Pčele i mravi koji pripadaju potporodici Myrmicinae (Lepelletier de Saint-Fargeau, 1835) koriste položaj Sunca kao glavni kompas za određivanje smjera u navigaciji. S druge strane, kod mrava iz potporodice Formicinae (Latreille, 1809) kojima pripada i rod *Cataglyphis* to nije tako (Duelli i Wehner 1973). Pustinjski mravi roda *Cataglyphis* se oslanjaju na uzorak polarizacijske svjetlosti kad god im je dostupan u prirodnim uvjetima. Koristit će ga radije nego položaj Sunca ili smjer vjetera jer je pouzdaniji (Wehner i Müller 2006). Uzorak polarizacijske svjetlosti je mravima roda *Cataglyphis* uvijek dostupan, osim ako većina neba nije prekrivena nekim objektom, na primjer drvećem, što se u pustinjama i polupustinjama u kojima žive rijetko događa (Lebhardt i Ronacher 2014). Kombiniranjem polarizacijske

svjetlosti i ostalih oznaka u krajoliku ovi pustinjski mravi u svakom trenutku mogu odrediti smjer integriranog puta i tako se uspješno vratiti u mravinjak (Wehner 2020).

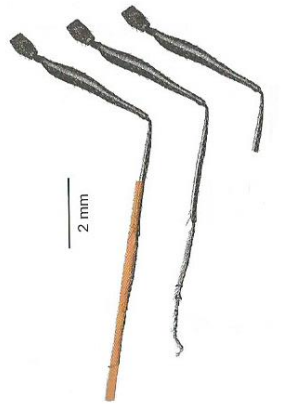
3.5. Mjerenje udaljenosti pomoću mjerača koraka i optičkog toka

Drugi tip podataka potreban za navigaciju pomoću integracije puta, uz smjer kretanja, je i procjena prijeđene udaljenosti (Aron i Wehner 2021). Prijedenu udaljenost mravi roda *Cataglyphis* određuju pomoću mjerača koraka (Wittlinger i sur. 2006) i optičkog toka (Ronacher i Wehner 1995). Obje metode se oslanjaju na podatke dobivene na temelju kretanja tijela, a ne na okolišne orijentire (Wehner 2020).

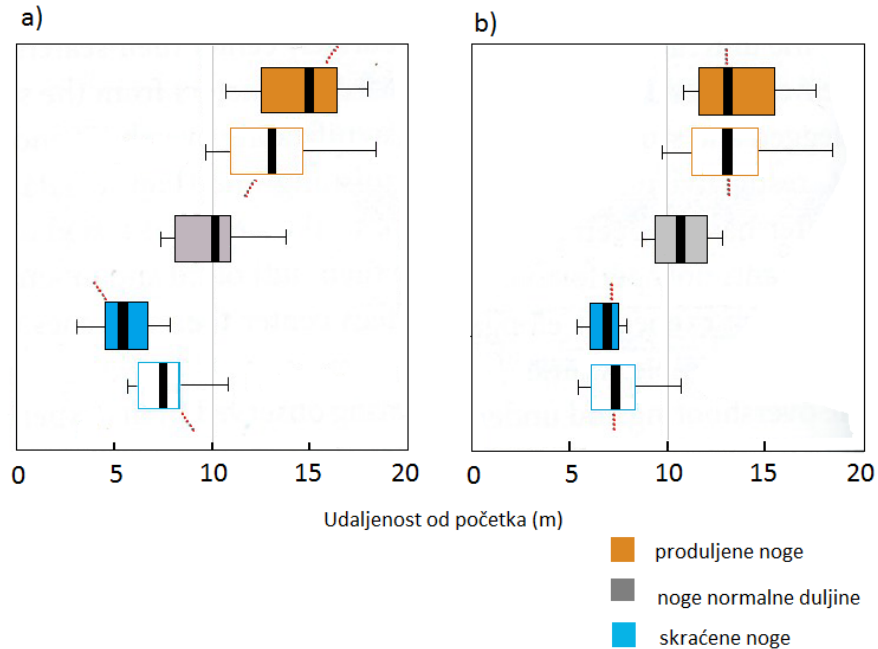
Mjerač koraka se oslanja na podatke dobivene pomoću mehanoreceptora u nogama (Wittlinger i sur. 2006). Mravi roda *Cataglyphis* ne broje prijeđene korake (Franks i sur. 2006), već uzimaju u obzir duljinu svog koraka kada računaju prijeđenu udaljenost. Teorija o mjeracu koraka temelji se na pretpostavci da će mrav, ako mu se eksperimentalno promijeni duljina nogu, a time i duljina koraka, krivo procijeniti duljinu prijeđenog puta (Wittlinger i sur. 2006). Kada se radilicama vrste *C. fortis* eksperimentalno produlje odnosno skrate noge (Slika 10), precjenjuju odnosno podcjenjuju prijeđenu udaljenost (Slika 11a). To se događa samo ako su im noge prilikom traženja hrane uobičajene duljine, a produljene odnosno skraćene tek u trenutku kad se krenu vraćati u mravinjak. Razlog tome je to što su eksperimentalno put iz mravinjaka i u mravinjak jednako dugi pa radilicama u oba smjera treba jednak broj koraka. S duljim nogama će duljina koraka biti veća pa će se zaustaviti prekasno, nakon što su već prošle mravinjak. Situacija će biti obrnuta sa skraćenim nogama. S druge strane, ako su im noge produljene ili skraćene od početka kada krenu tražiti hranu, mogu točno procijeniti udaljenost mravinjaka (Wittlinger i sur. 2006; Wittlinger i sur. 2007; Wehner 2020). Međutim, pogreška, koju rade kada im se umjetno produlje ili skrate noge, veća je od očekivane. Razlog tome je to što uz mjerac koraka koriste i optički tok (Wehner 2020).

Optički tok je prividno kretanje objekata u okolini koje doživljava tijelo u pokretu. On ovisi o brzini tijela u pokretu i njegovoj udaljenosti od ostalih objekata. Primjerice povećamo li svoju brzinu ili udaljenost povećat će se i optički tok (Introduction To Optical Flow 2003). Mravi roda *Cataglyphis* hodaju pri konstantnoj brzini i na istoj udaljenosti od tla pa doživljavaju konstantan optički tok (Ronacher i sur. 2000). Svoju brzinu procjenjuju na temelju brzine tla koje se prividno pomiče, a brzina pomnožena s vremenom daje prijeđeni put (Wehner 2020). Koriste optički tok slike koja se pomiče ispod tijela, ali ne i onoga što im se nalazi sa strane. Razlog tome je to što se bočni objekti, za razliku od tla, ne nalaze uvijek na istoj udaljenosti od mrava (Ronacher i sur. 2000). Ako se optički tok umjetno promijeni, mravi će krivo

procijeniti prijeđenu udaljenost. To se događa ako je optički tok nepromijenjen kada se kreću iz mravinjaka, a promijenjen na povratku. Radilice vrste *C. fortis*, koje se stavi na podlogu koja se pomiče u smjeru njihova kretanja ili obrnuto od njih, procjenjuju ili podcjenjuju prijeđenu udaljenost. Radilica koja se kreće u smjeru podloge, misli da hoda sporije nego što stvarno hoda, zato se zaustavlja prekasno, nakon što je prešla veću udaljenost od one na kojoj se nalazi mravinjak. Obrnuto se događa s radilicom čija se podloga pokreće u suprotnom smjeru od nje (Ronacher i Wehner 1995, Wehner 2020). Osim toga, na optički tok utječe i visina na kojoj se mrav nalazi od podloge (Ronacher i sur. 2000). Radilice s umjetno produljenim nogama su udaljenije od podloge zbog čega je optički tok manji te one procjenjuju prijeđenu udaljenosti i zaustavljaju se prekasno, nakon što već prijeđu mravinjak. Obrnuto se događa s radilicama s umjetno skraćenim nogama. Zato će radilice pogriješiti u procijeni prijeđene udaljenosti više nego što bi se pretpostavilo samo na temelju mjerača koraka. Međutim, ako se radilicama eksperimentalno prekriju oči, griješe koliko i očekujemo jer ne mogu koristiti optički tok (Slika 11b) (Wehner 2020).



Slika 10: Promjene duljine noge radilice vrste *Cataglyphis fortis*: produljena noga, noga normalne duljine i skraćena noga (s lijeva na desno; preuzeto i prilagođeno prema: Wehner 2020).



Slika 11: Udaljenosti na kojima su se radilice vrste *Cataglyphis fortis* zaustavile na povratku u mravinjak s umjetno produljenim ili skraćenim nogama te nogama normalne duljine: a) s otvorenim očima; b) sa zatvorenim očima. Pune brkate kutije predstavljaju eksperimentalne podatke, a prazne predviđene podatke. Crvena točkasta linija govori koliko se eksperimentalni podaci podudaraju s predviđenim. Udaljenost od mravinjaka do mjesta pronalaska hrane je 10 m (preuzeto i prilagođeno prema: Wehner 2020).

Mravi roda *Cataglyphis* koriste mjerač koraka i optički tok neovisno jedan o drugom (Pfeffer i Wittlinger 2016). Radilice mogu točno određivati udaljenosti pomoću mjerača koraka u potpunom mraku, bez mogućnosti upotrebe optičkog toka (Thiélin-Bescond i Beugnon 2005). Isto vrijedi i za obrnut slučaj: radilice koje ne hodaju, nego su nošene, mogu točno određivati udaljenosti na temelju optičkog toka, bez mjerača koraka. Naime, kolonije nekih vrsta roda *Cataglyphis* poput *C. bicolor* koriste više prostorno odvojenih mravinjaka (Pfeffer i Wittlinger 2016), a radilice prenose druge radilice do mravinjaka kako bi rasporedile snage (Cerdá i sur. 1994). Radilica zadužena za prijenos nosi drugu radilicu u čeljustima (Slika 12). Pri tome nošena radilica ne dodiruje tlo i ne koristi mjerač koraka (Wehner 2020). Kada ih se eksperimentalno odvoji na putu iz jednog u drugi mravinjak, nošena radilica može točno izmjeriti prijedenu udaljenost te se vratiti u mravinjak iz kojeg su zajedno krenule (Pfeffer i Wittlinger 2016). Međutim, u prirodnim uvjetima mjerač koraka ima veću ulogu u mjerenju udaljenosti od optičkog toka (Wehner 2020).



Slika 12: Prijenos radilice u drugi mravinjak kod vrste *Cataglyphis bicolor* (preuzeto iz: Pfeffer i Wittlinger 2016).

Leteći kukci poput pčela i osa koriste optički tok kao glavnu metodu za računanje prijeđene udaljenosti (Esch i Burns 1995; Ugolini 1987). Osim toga, koriste ga i za kontrolu letenja (Lecoeur i sur. 2019). Pustinjski mravi roda *Cataglyphis*, za razliku od pčela, hodaju stoga se za određivanje prijeđene udaljenosti najviše oslanjaju na podatke dobivene u kontaktu s tlom odnosno mjerač koraka. Ipak, u manjoj mjeri koriste i optički tok (Ronacher i Wehner 1995). Razlog tome se krije u njihovom evolucijskom podrijetlu. Naime, mravi su najbližiji srodnici skupini Apoidea, u koju spadaju pčele i neke skupine osa (Blaimer 2023). To znači da su se preci mrava koristili optičkim tokom pa ne čudi što i oni imaju tu mogućnost (Wehner 2020).

4. ZAKLJUČAK

Termofilni mravi roda *Cataglyphis* nastanjuju pustinje i polupustinje Palearktika koje pripadaju najtoplijim i najsušim staništima na Zemlji. Zahvaljujući brojnim morfološkim i fiziološkim prilagodbama te prilagodbama ponašanja vrste ovog roda traže hranu za vrijeme najtoplijeg dijela dana izbjegavajući time predatore i potencijalne kompetitore (Boulay i sur. 2017). S obzirom na to da su najaktivniji pri temperaturama koje se približavaju letalnima ključno je da se, nakon što nađu hranu, vrate čim brže u mravinjak što im je omogućeno preciznom navigacijom. Mravi roda *Cataglyphis* kombiniraju integraciju puta i navođenje pomoću okolišnih orijentira čime se u svakom trenutku mogu orijentirati u jednoličnom pustinjskom okolišu (Lebhardt 2015). Znanstvenici istražuju ekologiju i navigaciju pustinjskih mrava roda *Cataglyphis* već više od pola stoljeća (Wehner 2019), a u budućnosti će poznavanje njihove biologije biti od iznimne važnosti za razumijevanje prilagodbi organizama na sve toplija i suša staništa uzrokovana dezertifikacijom (Boulay i sur. 2017). Također, njihova navigacija služi kao izvor inspiracije za brojne tehnološke inovacije (Gu i sur. 2018) stoga će se istraživanja mrava roda *Cataglyphis* zasigurno nastaviti u nadi da će i dalje biti izvor brojnim teoretskim i praktičnim otkrićima.

5. LITERATURA

AntWeb. Version 8.91.2. California Academy of Science. <https://www.antweb.org>. (pristupljeno 14.07.2023.)

Agosti D. (1990): Review and reclassification of *Cataglyphis* (Hymenoptera, Formicidae). J. Nat. Hist. 24: 1457 - 1505. <https://doi.org/10.1080/00222939000770851>

Aron S., Wehner R. (2021): *Cataglyphis*, U: Starr C. K. (ur.) Encyclopedia of Social Insects. Springer International Publishing, Cham, str. 217 - 223. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28102-1_22

Azcárate F. M., Kovacs E., Peco B. (2007): Microclimatic conditions regulate surface activity in harvester ants *Messor barbarus*. J. Insect Behav. 20: 315 - 329. <https://doi.org/10.1007/s10905-007-9074-3>

Blaimer B. B., Santos B. F., Cruaud A., Gates M. W., Kula R. R., Mikó I., Rasplus J. Y., Smith D. R., Talamas E. J., Brady S. G., Buffington M. L. (2023): Key innovations and the diversification of Hymenoptera. Nat. Commun. 14 (1212).

Bolton B. 2023. An online catalogue of the ants of the world. <https://antcat.org> (pristupljeno 15.07.2023.)

Bosch J., Alsina A., Cerdá X., Retana J. (1987): Incidence du cycle biologique et des disponibilités des ressources alimentaires sur le régime trophique d'une fourmi. Vie. Milieu. 37: 237 – 242.

Boulay R., Aron S., Cerdá X., Doums C., Graham P., Hefetz A., Monnin T. (2017): Social life in arid environments: the case study of *Cataglyphis* ants. Annu. Rev. Entomol. 62: 305 - 321. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031616-034941>

Branstetter M. G., Ješovnik A., Sosa-Calvo J., Lloyd M. W., Faircloth B. C., Brady S. G., Schultz T. R. (2017): Dry habitats were crucibles of domestication in the evolution of agriculture in ants. Proc. R. Soc. B. 284: 20170095.

Brian M. V. (1978): Production ecology of ants and termites. Cambridge University Press (International Biological Programme, 13), Cambridge, New York.

Brower L. (1996): Monarch butterfly orientation: missing pieces of a magnificent puzzle. J. Exp. Biol. 199: 93 - 103.

Buehlmann C., Hansson B. S., Knaden M. (2012): Desert ants learn vibration and magnetic landmarks. PloS one 7(3): e33117.

Caraco T. (1980): On foraging time allocation in a stochastic environment. Ecology 61 (1): 119 - 128. <https://doi.org/10.2307/1937162>

Cerdá X. (1988): Food collection by *Cataglyphis iberica* (Em.) (Hymenoptera, Formicidae). Ann. Zool. 41: 515 - 525.

Cerdá X. (2001): Behavioural and physiological traits to thermal stress tolerance in two Spanish desert ants. Etologia 9: 15 - 27.

Cerdá X., Arnan X., Retana J. (2013): Is competition a significant hallmark of ant (Hymenoptera: Formicidae) ecology? *Myrmecol. News* 18: 131- 47.

Cerdá X., Retana J. (2000): Alternative strategies by thermophilic ants to cope with extreme heat: individual versus colony level traits. *Oikos* 89: 155 - 163. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.890117.x>

Cerdá X., Retana J., Bosch J., Alsina A. R. (1989): Daily foraging activity and food collection of the thermophilic ant *Cataglyphis cursor* (Hymenoptera, Formicidae). *Vie. Milieu*. 39 (3/4): 207 - 212.

Cerdá X., Retana J., Carpintero S., Cros S. (1996): An unusual ant diet: *Cataglyphis floricola* feeding on petals. *Insect. Soc.* 43: 101 - 104. <https://doi.org/10.1007/BF01253960>

Cerdá X., Retana J., Cros S. (1998): Critical thermal limits in Mediterranean ant species: trade-off between mortality risk and foraging performance: Heat tolerance of Mediterranean ants. *Funct. Ecol.* 12: 45 - 55. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1998.00160.x>

Cerdá X., Retana J., De Haro A. (1994): Social carrying between nests in polycalic colonies of the monogynous ant *Cataglyphis iberica* (Hymenoptera: Formicidae). *Sociobiology* 23 (3): 215 - 231.

Cheng K., Shettleworth S. J., Huttenlocher J., Rieser J. J. (2007): Bayesian integration of spatial information. *Psychol. Bull.* 133 (4): 625 - 637. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.133.4.625>

Duelli P., Wehner R. (1973): The spectral sensitivity of polarized light orientation in *Cataglyphis bicolor* (Formicidae, Hymenoptera). *J. Comp. Physiol. A.* 86: 37 - 53. <https://doi.org/10.1007/BF00694476>

Esch H. E., Burns J. E. (1995): Honeybees use optic flow to measure the distance of a food source. *Naturwissenschaften* 82: 38 - 40. <https://doi.org/10.1007/BF01167870>

Fent K. (1986): Polarized skylight orientation in the desert ant *Cataglyphis*. *J. Comp. Physiol. A.* 158: 145 - 150. <https://doi.org/10.1007/BF01338557>

Franks N. R., Dornhaus A., Metherell B. G., Nelson B. R., Lanfear S. A. J., Symes W. S. (2006): Not everything that counts can be counted: ants use multiple metrics for a single nest trait. *Proc. R. Soc. B (Lond. Biol. Sci.)* 273: 165 - 169. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3312>

Grant V. (1950): The flower constancy of bees. *Bot. Rev.* 16: 379 - 398.

Grob R., Fleischmann P. N., Rössler W. (2019): Learning to navigate – how desert ants calibrate their compass systems. *Neuroforum* 25: 109 - 120. <https://doi.org/10.1515/nf-2018-0011>

Gu Y., Ohi N., Lassak K., Strader J., Kogan L., Hypes A., Harper S., Hu B., Gramlich M., Kavi R., Watson R., Cheng M., Gross J. (2018): *Cataglyphis*: An autonomous sample return rover. *J. Field Robot.* 35: 248 - 274. <https://doi.org/10.1002/rob.21737>

Harkness R. D., Wehner R. (1977): *Cataglyphis*. *Endeavour*. 1: 115 - 121. [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(77\)90169-7](https://doi.org/10.1016/0160-9327(77)90169-7)

Heinrich B. (1976): The foraging specializations of individual bumblebees. *Ecol. Monogr.* 42: 105 - 128.

Heinrich B. (1996): The thermal warriors: strategies of insect survival. Harvard University Press, London.

Heinze S., Narendra A., Cheung A. (2018): Principles of insect path integration. *Curr. Biol.* 28 (17): R1043 - R1058. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.04.058>

Hölldobler B. (2016): Foreword. U: Stockan J., Robinson E. (ur.) *Wood Ant Ecology and Conservation (Ecology, Biodiversity and Conservation)*. Cambridge University Press, Cambridge, str. xiii - xiv.

Hölldobler B., Wilson E. O. (1990): *The Ants*. Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Mass.

IPCC, 2019: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. U: P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H. O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (ur.). In press.

Introduction To Optical Flow (2003) <https://www.centeye.com/technology/optical-flow/#:~:text=Essentially%2C%20optic%20flow%20is%20the,This%20motion%20is%20optic%20flow.> (pristupljeno 22.08.2023.)

Knaden M., Graham P. (2016): The sensory ecology of ant navigation: from natural environments to neural mechanisms. *Annu. Rev. Entomol.* 61: 63 - 76.

Lebhardt F. (2015): *The desert ant's celestial compass system*. Doktorski rad. Humboldt-Universität zu Berlin, Lebenswissenschaftlichen Fakultät, Berlin

Lebhardt F., Koch J., Ronacher B. (2012): The polarization compass dominates over idiothetic cues in path integration of desert ants. *J. Exp. Biol.* 215: 526 - 535. <https://doi.org/10.1242/jeb.060475>

Lebhardt F., Ronacher B. (2014): Interactions of the polarization and the sun compass in path integration of desert ants. *J. Comp. Physiol. A.* 200: 711 - 720. <https://doi.org/10.1007/s00359-013-0871-1>

Lecoeur J., Dacke M., Floreano D., Baird E. (2019): The role of optic flow pooling in insect flight control in cluttered environments. *Sci. Rep.* 9: 7707. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44187-2>

Lenoir A., Aron S., Cerdá X., Hefetz A. (2009): *Cataglyphis* desert ants: a good model for evolutionary biology in Darwin's anniversary year - A review. *Isr. J. Entomol.* 39: 1 - 32.

Marsh A. C. (1985): Thermal responses and temperature tolerance in a diurnal desert ant, *Ocymyrmex barbiger*. *Physiol. Zool.* 58: 629 - 636.

Mathejczyk T. F., Wernet M. F. (2017): Sensing polarized light in insects. U: Mathejczyk T. F., Wernet M. F. (ur.) *Oxford Research Encyclopedia of Neuroscience*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190264086.013.109>

McMeeking R. M., Arzt E., Wehner R. (2012): *Cataglyphis* desert ants improve their mobility by raising the gaster. J. Theor. Biol. 297: 17 - 25. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2011.12.003>

Müller M., Wehner R. (2007): Wind and sky as compass cues in desert ant navigation. Naturwissenschaften 94: 589 - 594. <https://doi.org/10.1007/s00114-007-0232-4>

Müller M., Wehner R. (1988): Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*. Proc. Natl. Acad. Sci. 85: 5287 - 5290. <https://doi.org/10.1073/pnas.85.14.5287>

Nonacs P., Dill L. M. (1988): Foraging response of the ant *Lasius pallitarsis* to food sources with associated mortality risk. Insect. Soc. 35: 293 - 303.

Oster G. F., Heinrich B. (1976): Why do bumblebees major? A mathematical model. Ecol. Monogr. 46: 129 - 133.

Orians G. H., Pearson N. E. (1979): On the theory of central place foraging. U: Horn D. J., Stairs G. R., Mitchell R. D. (ur.) Analysis of Ecological Systems. Ohio State University Press, Columbus, str 154 - 177.

Path integration. (2017)

https://en.wikipedia.org/wiki/Path_integration#/media/File:Path_integration_diagram.svg
(pristupljeno 18. 08. 2023.)

Pfeffer S. E., Wittlinger M. (2016): Optic flow odometry operates independently of stride integration in carried ants. Science 353: 1155 - 1157. <https://doi.org/10.1126/science.aaf9754>

Robinson E. J. H., Stockan J. A., Iason G. R. (2016): Wood ants and their interaction with other organisms. U: Stockan J. A., Robinson E. J. H. (ur.) Wood Ant Ecology and Conservation. Cambridge University Press, Cambridge, str. 177 - 206. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107261402.009>

Ronacher B., Gallizzi K., Wohlgemuth S., Wehner R. (2000): Lateral optic flow does not influence distance estimation in the desert ant *Cataglyphis fortis*. J. Exp. Biol. 203: 1113 - 1121. <https://doi.org/10.1242/jeb.203.7.1113>

Ronacher B., Wehner R. (1995): Desert ants *Cataglyphis fortis* use self-induced optic flow to measure distances travelled. J. Comp. Physiol. A. 177: 21 - 27. <https://doi.org/10.1007/BF00243395>

Rossel S., Wehner R. (1984): How bees analyse the polarization patterns in the sky: experiments and model. J. Comp. Physiol. A. 154: 607 - 615. <https://doi.org/10.1007/BF01350213>

Ruano F., Tinaut A., Soler J. J. (2000): High surface temperatures select for individual foraging in ants. Behav. Ecol. 11 (4): 396 - 404.

Santschi F. (1911): Observations et remarques critiques sur le mécanisme de l'orientation chez les fourmis. Rev Suisse Zool. 19: 303 - 338.

Schmid-Hempel P. (1983): Foraging ecology and colony structure in two sympatric species of desert ants, *Cataglyphis bicolor* and *Cataglyphis albicans*. Doktorski rad. University of Zürich.

- Schmid-Hempel P. (1984): Individually different foraging methods in the desert ant *Cataglyphis bicolor* (Hymenoptera, Formicidae). Behav. Ecol. Sociobiol. 14: 263 - 271. <https://doi.org/10.1007/BF00299497>
- Seidl T., Wehner R. (2006): Visual and tactile learning of ground structures in desert ants. J. Exp. Biol. 209 (17): 3336 - 3344. <https://doi.org/10.1242/jeb.02364>
- Sommer S., Wehner R. (2012): Leg allometry in ants: Extreme long-leggedness in thermophilic species. Arthropod Struct. Dev. 41: 71 - 77. <https://doi.org/10.1016/j.asd.2011.08.002>
- Steck K., Hansson B., Knaden M. (2009): Smells like home: desert ants, *Cataglyphis fortis*, use olfactory landmarks to pinpoint the nest. Front. Zool. 6 (5). <https://doi.org/10.1186/1742-9994-6-5>
- Thiélin-Bescond M., Beugnon G. (2005): Vision-independent odometry in the ant *Cataglyphis cursor*. Naturwissenschaften 92: 193 - 197. <https://doi.org/10.1007/s00114-005-0609-1>
- Ugolini A. (1987): Visual information acquired during displacement and initial orientation in *Polistes gallicus* (L.) (Hymenoptera, Vespidae). Anim. Behav. 35 (2): 590 - 595. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(87\)80285-3](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(87)80285-3)
- von Frisch K. (1949): Die Polarisation des Himmelslichtes als Faktor der Orientieren bei den Tänzchen der Bienen. Experientia 5: 142 - 148. <https://doi.org/10.1007/BF02174424>
- Wehner R. (1972): Visual orientation performances of desert ants (*Cataglyphis bicolor*) toward astromenotactic directions and horizon landmarks. U: Galler S. R., Schmidt-Koenig K., Jacobs G. J., Belleville R. E. (ur.) Proc. AIBS Symp. Animal orientation and navigation. U.S. Gov. Print, Washington, str. 421 - 436.
- Wehner R. (1997): The ant's celestial compass system: spectral and polarization channels. U: Lehrer M. (ur.) Orientation and communication in arthropods. Birkhäuser, Basel, str. 145 - 185.
- Wehner R. (2003): Desert ant navigation: how miniature brains solve complex tasks. J. Comp. Physiol. A. 189: 579 - 588. <https://doi.org/10.1007/s00359-003-0431-1>
- Wehner R. (2019): The *Cataglyphis* Mahrèsienne: 50 years of *Cataglyphis* research at Mahrès. J. Comp. Physiol. A. 205: 641 - 659. <https://doi.org/10.1007/s00359-019-01333-5>
- Wehner R. (2020): Desert navigator: The journey of the ant. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, London. <https://doi.org/10.4159/9780674247918>
- Wehner R., Duelli P. (1971): The spatial orientation of desert ants, *Cataglyphis bicolor*, before sunrise and after sunset. Experientia 27: 1364 - 1366. <https://doi.org/10.1007/BF02136743>
- Wehner R., Müller M. (2006): The significance of direct sunlight and polarized skylight in the ant's celestial system of navigation. Proc. Natl. Acad. Sci. 103: 12575 - 12579. <https://doi.org/10.1073/pnas.0604430103>

Wehner R., Rossel S. (1985): The bee's celestial compass - a case study in behavioural neurobiology. U: Hölldobler B., Lindauer M. (ur.) Experimental Behavioural Ecology. Fischer, Stuttgart, str. 11 - 53.

Wehner R., Wehner S. (2011): Parallel evolution of thermophilia: daily and seasonal foraging patterns of heat-adapted desert ants: *Cataglyphis* and *Ocymyrmex* species. *Physiol. Entomol.* 36: 271 - 281. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.2011.00795.x>

Whitford W. G., Kay C. A., Schumaker A. M. (1975): Water loss in Chihuahuan desert ants. *Physiol. Zool.* 48: 390 - 39.

Wittlinger M., Wehner R., Wolf H. (2006): The ant odometer: stepping on stilts and stumps. *Sci. New Ser.* 312: 1965 - 1967.

Wittlinger M., Wehner R., Wolf H. (2007): The desert ant odometer: a stride integrator that accounts for stride length and walking speed. *J. Exp. Biol.* 210 (2): 198 - 207. <https://doi.org/10.1242/jeb.02657>

6. ŽIVOTOPIS

Nina Randić je rođena 31. 07. 2001. u Zagrebu gdje je završila Osnovnu školu Matije Gupca i V. gimnaziju. Tijekom srednje škole razvija interes za prirodne znanosti. Usmeno izlaže na znanstvenom i stručnom skupu „Grobnišćina: tragovi, znakovi i smjerokazi“ (Grobnik, 2019.) na temu „Zanimljivosti o mravima i mravinjacima na području Krežala i Malog Platka u grobničkim planinama“. Preddiplomski studij Biologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu upisuje 2020. godine. U zimskom semestru akademske godine 2021./2022. je demonstrator za izvođenje praktikuma iz kolegija „Opća zoologija“. U akademskoj godini 2022./2023. odrađuje praksu na Zoologijskom zavodu Biološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Andreje Brigić. Iste godine odrađuje praksu u Ministarstvu gospodarstva i održivog razvoja, Zavod za zaštitu prirode i okoliša pod mentorstvom dr. sc. Ane Ješovnik gdje sudjeluje na projektu „Cro Buzz Klima“. Sudjeluje u organizaciji radionice „Moj dom je presušio! – Prilagodbe organizama povremenih tekućica“ na Festivalu znanosti, Tehnički muzej Nikola Tesla (2023.). Iste godine sudjeluje na tečaju determinacije divljih oprašivača („Regional Taxonomy Courses for Pollinators“) održanog u CREA – Council for Agricultural Research and Economics (Bologna, Italija) u sklopu europskog projekta SPRING (Strengthening Pollinator Recovery through Indicators and monitoring). Kao članica Udruge studenata biologije – BIUS sudjeluje u istraživačko - edukacijskim projektima „Žumberak 2021“ i „Histrina 2022“.