

Utjecaj klimatskih promjena na kukce

Lazar, Dora

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:217:069551>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Dora Lazar

Utjecaj klimatskih promjena na kukce

Završni rad

Zagreb, 2022.

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Biology

Dora Lazar

Impact of climate change on insects

Bachelor thesis

Zagreb, 2022.

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

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Završni rad

Utjecaj klimatskih promjena na kukce

Dora Lazar

Rooseveltov trg 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Klimatske promjene su trajne promjene stanja atmosfere koje imaju direktan učinak na abiotičke čimbenike kao što su temperatura, količina padalina, vlažnost zraka i tako dalje. Navedene promjene povećavaju učestalost poremećaja u krajoliku, primjerice požara. Promjene abiotičkih čimbenika i sve češći poremećaji u krajoliku zajedno utječu na terestričke i slatkovodne ekosustave. Značajan dio ekosustava čine kukci koji će iskusiti brojne promjene poput: fenoloških promjena, promjena u voltinizmu, širenja areala, promjena u ponašanju, promjena u interakcijama s drugim organizmima te mnoge druge. Opisane su promjene u interakcijama kukaca i biljaka te izmjene odnosa unutar istih i između različitih trofičkih razina hranidbene mreže.

Ključne riječi: abiotički čimbenici, fenologija kukaca, promjena areala, interakcije kukaca i biljaka, odnosi unutar hranidbene mreže

(19 stranica, 4 slike, 0 tablica, 31 literaturni navod, jezik izvornika: hrvatski)

Rad je pohranjen u Središnjoj biološkoj knjižnici

Mentor: doc. dr. sc. Andreja Brigić

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Biology

Bachelor thesis

Impact of climate change on insects

Dora Lazar

Rooseveltova trg 6, 10000 Zagreb, Croatia

Climate changes are permanent changes in the state of the atmosphere that have a direct effect on abiotic factors such as temperature, precipitation, air humidity and so on. The mentioned changes increase the frequency of natural disturbances, for example fires. Changes in abiotic factors and more frequent natural disturbances affect terrestrial and freshwater ecosystems. A significant part of the ecosystem is made up of insects, which will experience numerous changes such as: phenological changes, changes in voltinism, range expansion, changes in behavior, changes in interactions with other organisms, and many others. Changes in the interactions between insects and plants are described, as well as changes in relationships within and between different trophic levels of the food web.

Keywords: abiotic factors, insect phenology, change in distribution range, plant-insect interactions, food web interactions

(19 pages, 4 figures, 0 tables, 31 references, original in: croatian)

Thesis is deposited in Central Biological Library.

Mentor: doc. dr. sc. Andreja Brigić

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Utjecaj klimatskih promjena na fenologiju vrsta	2
2.1. Promjene areala i staništa	6
3. Interakcije s biljkama pri promjeni klime.....	9
4. Promjene u višim trofičkim razinama hranidbene mreže	11
5. Utjecaj klime na slatkovodne ekosustave.....	13
6. Zaključak.....	15
LITERATURA.....	16
ŽIVOTOPIS.....	19

1. Uvod

Klimatske promjene su dugotrajne promjene atmosfere u pogledu temperature, oborina, vlažnosti zraka te učestalosti poremećaja u krajoliku (poput požara, poplava i slično). Poremećaji se mogu događati na lokalnoj, ali i na globalnoj razini. Navedeni događaji su normalna pojava, no zbog ljudske aktivnosti sam proces klimatskih promjena znatno se ubrzao (Khazalah i Gopalan 2019). Zahvaljujući procesima poput sagorijevanja fosilnih goriva i ugljena, procjenjuje se porast globalne temperature za 4°C do kraja stoljeća. Ova promjena, kao i mnoge druge, utjecat će na sve ekosustave na Zemlji pa tako i na sve prisutne organizme (Thuiller 2007).

Kukci (Insecta) čine više od polovine svih poznatih vrsta na planetu, a nalaze se na svim kontinentima. Iznimno su raznolika skupina što je rezultat niza čimbenika, poput geoloških zbivanja tijekom prošlosti, okolišnih prilika, koevolucije s biljkama u trajanju više od 400 milijuna godina, itd. Kukci u ekosustavu zauzimaju brojne ekološke niše, te su iznimno značajni uslijed njihova položaja u hranidbenim mrežama i njihove uloge u pružanju usluga ekosustava. Razgradnja organske tvari i kruženje nutrijenata, oprašivanje biljaka, proizvodnja meda i svile, izvor hrane za kralježnjake te regulacija sastava i strukture biljnih i životinjskih zajednica – samo su neke su od njihovih funkcija. Uslijed niza svojstava, poput jednostavnog uzgoja u laboratoriju i kratkog generacijskog vremena, neke se vrste koriste kao modelni organizmi u znanstvenim istraživanjima, a najpoznatija među njima je vinska mušica (*Drosophila melanogaster* Linnaeus, 1758) (Gullan i Cranston 2014).

U posljednjih pedesetak godina brojna znanstvena istraživanja ukazuju na smanjenje raznolikosti i biomase kukaca (Hallmann i sur. 2017, Sánchez-Bayo i Wyckhuys 2019). Kukci su ektotermni organizmi pa globalno zatopljenje itekako utječe na njihov rast, rasprostranjenost, voltinizam i još mnogo toga. Temperaturni ekstremi, pa i klimatski ekstremi općenito, postali su sve dugotrajniji, češći i ozbiljniji. Temperatura regulira niz procesa poput metabolizma, disanja te posljedično kretanja, ponašanja i preživljavanja (Harvey i sur. 2020). Porast temperature utječe na skraćivanje razvojnog ciklusa, stoga je kod nekih vrsta zabilježena pojava bi- ili multi- voltinizma. Primjerice bivoltinizam je zabilježen kod sljedećih europskih vrsta leptira: gorušičin bijelac (*Leptidea sinapis* Linnaeus, 1758), *Plagodis dolabraria* (Linnaeus, 1767), *Hypena proboscidalis* (Linnaeus, 1758) i *Lithosia quadra* (Linnaeus, 1758) (Altermatt

2010). Povišena temperatura također utječe na pomicanje i širenje areala kukaca, pa je kod vrsta kontinentalna riđa (*Polygonia c-album* Linnaeus, 1758) i obični mrki plavac (*Aricia agestis* Denis & Schiffermüller, 1775) evidentiran pomak areala prema sjeveru (Rafferty 2017). Mnogi se kukci nisu do sada susreli s tako naglim promjenama te se smatra da će zasigurno utjecati na njihovo preživljavanje. Uzevši u obzir sve navedeno, u ovome će radu biti objašnjen utjecaj klimatskih promjena na biologiju i ekologiju pojedinih skupina i vrsta kukaca te na interakcije među vrstama.

2. Utjecaj klimatskih promjena na fenologiju vrsta

Klimatske promjene mogu dovesti do pomaka u fenološkim fazama, točnije do promjene brzine razvoja, vremena dormancije, migracije i reprodukcije vrsta. Zbog povoljnih temperaturnih uvjeta može doći do češće reprodukcije i bržeg razvoja, odnosno do povećanja stope voltinizma tj. broja generacija godišnje (Kellermann i van Heerwaarden 2019). Kod lisne uši *Acyrtosiphon pisum* (Harris, 1776) povišene temperature skraćuju fenološki ciklus te populacija brže raste. Smatra se da je odgovor analogan kod ostalih vrsta lisnih uši što će rezultirati povećanjem štete na biljkama (Joschinski i sur. 2015). Istraživanje iz južnog Brazila pokazuje kako broj godišnjih generacija vrste *Spodoptera eridania* (Stoll, 1781) raste od 2,9 do 9,2 generacije u sve toplijim dijelovima regije (Sampaio i sur. 2021). Iako se tako može kod nekih vrsta ubrzati trenutni rast populacije, neku od generacija može neočekivano zahvatiti toplinski stres koji će dovesti do izumiranja, upravo zahvaljujući pomaknutoj dijapauzi (Kellermann i van Heerwaarden 2019).

Važno je istaknuti kako različiti razvojni stadiji kukaca različito podnose promjene temperature. Primjerice, povišena temperatura uzrokovat će povećanje smrtnosti jajašaca i razvoj manjih jedinki, ličinačkih i odraslih stadija. Nadalje, uslijed povišenja temperature životni vijek odraslih jedinki može biti skraćen, te iste imaju manji reproduktivni potencijal. Najugroženijima se smatraju univoltine vrste s kratkim periodom razmnožavanja ili općenito s kratkim životnim ciklusom, poput leptira zorica (*Anthocharis cardamines* Linnaeus, 1758) (Harvey i sur. 2020).

Osim promjene u temperaturi, klimatske promjene uključuju i promjene u padalinama. Predviđa se veća varijabilnost padalina, odnosno da će periodi između oborina biti duži te da će količina padalina koja padne u kraćem periodu biti ekstremnija što će rezultirati poplavama.

Vrlo su važni mehanizmi kojima će kukci savladavati isušivanje i vlagu jer će o njima ovisiti preživljavanje vrste. Većina modela, čija je zadaća predvidjeti odgovore kukaca, koristi podatke o temperaturnoj osjetljivosti, otpornosti na stres i fenološke podatke. Međutim, postavlja se pitanje koliko su takvi modeli točni zato što ne uključuju druge važne čimbenike poput oborina ili prilagodbi na novonastale uvjete. Stoga je potrebno provesti daljnja istraživanja i razviti kompleksne modele koji će obuhvatiti niz značajnih čimbenika iz kojih će potom proizaći sveobuhvatan pogled na biologiju i ekologiju kukaca (Kellermann i van Heerwaarden 2019).

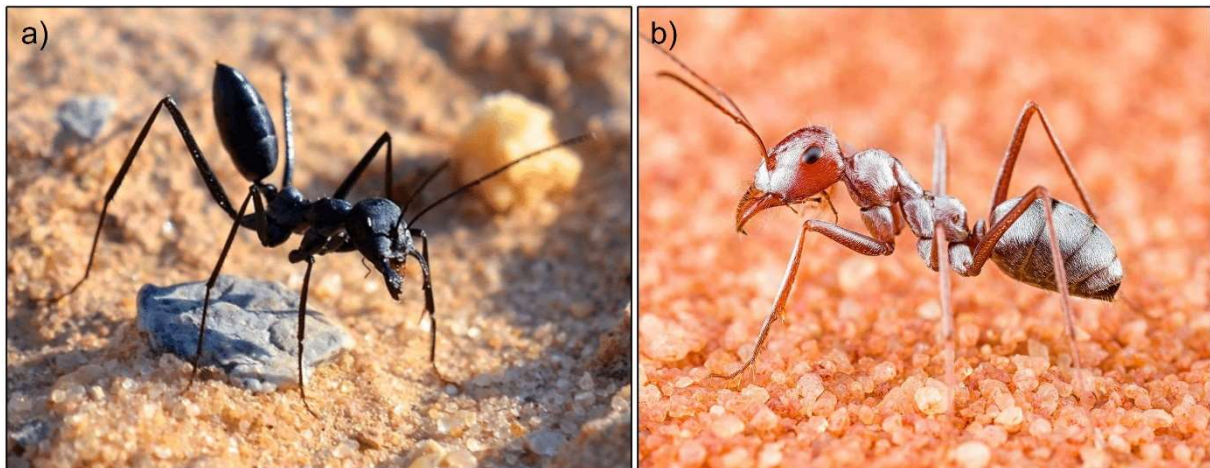
Klimatske promjene također dovode i do promjena u godišnjim dobima. Primjerice, zimi dolazi do porasta prosječne i minimalne temperature, prijevremenog otapanja snježnog pokrivača, smanjenja temperature tla te pojave promjenjivih i ekstremnih zimskih uvjeta. Kukci posjeduju razne metaboličke mehanizme za aklimatizaciju na zimske uvjete, poput sinteze spojeva i proteina toplinskog stresa. Međutim, višestruki događaji varijabilnih temperatura mogu kod kukaca uzrokovati gubitak energije i sveukupnog fitnesa, a u konačnici oštećenje tkiva i smrt. Posljedice će se razlikovati od vrste do vrste, primjerice vrste prilagođene toplijim okolišima mogu nadoknaditi energiju hranjenjem nakon zime, dok one aktivne zimi mogu čak profitirati toplijim uvjetima. Pretpostavlja se da će najugroženije biti one vrste čiji stadiji nemaju mogućnost hranjenja u proljeće. Neke vrste, kojima su zimski uvjeti nužni za životni ciklus, će pomaknuti svoj areal, dok će druge iskusiti pomake fenoloških faza (Marshall i sur. 2020). U posljednjih 30 godina opaženo je povećanje areala borovog četnjaka (*Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiffermüller, 1775) u više nadmorske visine u Alpama. Gusjenice se tijekom zime hrane noću pa su sve toplije noći u nižim područjima potaknule postupnu migraciju u viša područja. Povećana temperatura skraćuje trajanje dijapauze, pa je kod vrste *Sarcophaga crassipalpis* (Macquart, 1839) primijećeno da povećanje od 11°C skraćuje dijapauzu na pola (sa 118 na 57 dana). Pretpostavlja se da je razlog tomu ubrzano trošenje uskladištenih rezervi zbog bržeg metabolizma (Bale i Hayward 2010).

Socijalni (zadružni) kukci u nekome dijelu života žive u skupinama s pripadnicima svoje vrste (Menzel i Feldmeyer 2021). Razlikujemo eusocijalne i subsocijalne kukce koji se razlikuju po socijalnim navikama. Termiti, mravi te neke vrste pčela i osa predstavnici su eusocijalnih kukaca, dok u subsocijalne kukce pripadaju žohari, kornjaši, resokrilci, polukrilci i mnogi drugi (Gullan i Cranston 2014). Važnu ulogu u kopnenim ekosustavima imaju mravi jer provode

bioturbaciju tla, rasprostranjuju sjemenke (mirmekohorija) te strukturiraju hranidbene mreže beskraljčnjaka (Parr i Bishop 2022).

Lokacija kolonije eusocijalnih kukaca je stalna te će na nju utjecati svaka promjena u mikroklimatskim uvjetima (zbog nemogućnosti promjene mjesta). Iako su jedinke pokretne (ili čak leteće) te mogu nakratko izbjeći nepogodne uvjete, u konačnici se moraju vratiti na mjesto kolonije. Kompleksna struktura kolonije omogućuje povoljan protok zraka te regulaciju temperature i vlažnosti (Menzel i Feldmeyer 2021). Unutar istoga područja kukci mogu prilagoditi položaj kolonije kako bi mikrostanište odgovaralo njihovim zahtjevima, odnosno vrste koje grade gnijezda u zemlji su osjetljivije na temperaturne promjene od onih koje grade nadzemna gnijezda (Perez i Aron 2020). Za neletače je posebno opasno razdoblje suše jer ne mogu odletjeti do izvora vode (Menzel i Feldmeyer 2021).

Toplinski najizloženiji članovi kolonije su radnici u potrazi za hranom koji pritom traže hladnija područja poput sjene ili povišenih lokacija. Kod zadružnih kukaca korelacija veličine tijela i temperaturne tolerancije (Bergmannovo pravilo) nije uvijek dosljedna kao što je kod nekih drugih skupina životinja. Postoji nekoliko vrsta mrava koje su se prilagodile na ekstremne temperaturne uvjete. Naime, moguće ih je pronaći u pustinjama gdje su aktivni danju za razliku od većine ostalih pustinjskih životinja, koje su većinom aktivne noću ili u sumrak., a njihove prilagodbe im omogućuju funkcioniranje na temperaturama iznad 50°C. Nekoliko rodova pustinjskih mrava (*Cataglyphis*, *Ocymyrmex*, *Melophorus*, *Pogonomyrmex* itd.) razvilo je duže noge naspram veličine tijela (slika 1). Takva prilagodba omogućava im brže kretanje po vrućem tlu te odmaknutije tijelo od vrlo zagrijane podloge. Još jedna značajna prilagodba su dlačice (slika 1b) koje mogu biti gusto poredane pa reflektirati svjetlost (odbijanje topline) ili zadržavati toplinu tijela kod letećih kukaca (npr. rod *Bombus*). Nadalje, neki mravi (poput vrste *Leptothorax acervorum* Fabricius, 1793) nastanjuju područja tundre pa im tjelesne funkcije ostaju aktivne i pri niskim temperaturama. Također, zabilježeno je smanjenje donje kritične toplinske granice kod kukaca na višim nadmorskim visinama. Uslijed ljudske aktivnosti postoji razlika u temperaturi okoliša urbanih i ruralnih područja, stoga su kukci koji obitavaju u urbanim područjima prilagođeniji na povišene temperature (Perez i Aron 2020).

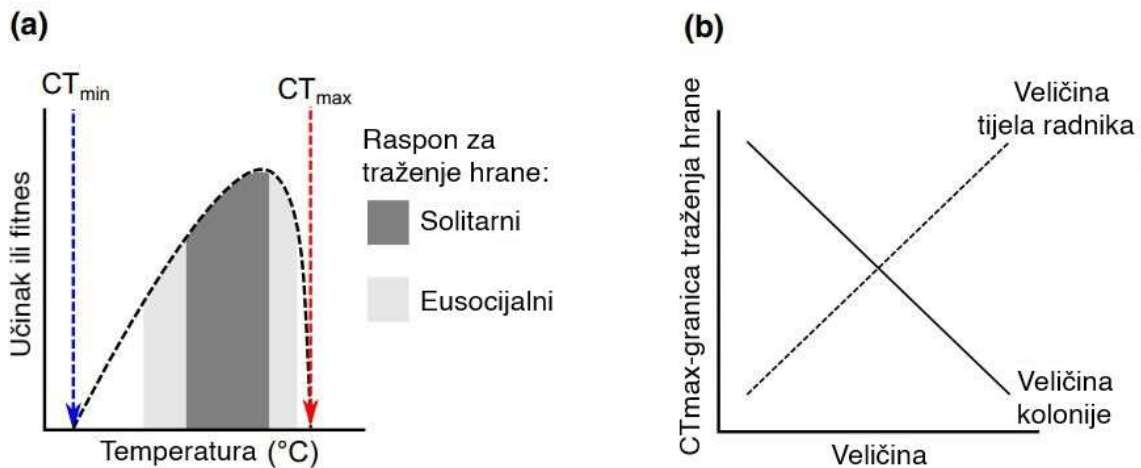


Slika 1. Prilagodbe pustinskih mrava roda *Cataglyphis* na visoke temperature. Crni mrav (a) je *Cataglyphis holgerseni* (Collingwood & Agosti, 1996) s izrazito dugim nogama. Srebrnkasta boja od refleksije svjetlosti na mnogobrojnim dlačicama odlikuje vrstu *Cataglyphis bombycina* (Roger, 1859) (preuzeto i prilagođeno prema: Perez i Aron 2020, ANTonio Photography 2022).

Temperaturnu toleranciju kukaca opisuje krivulja toplinskog učinka (eng. *thermal performance curve*), gdje su važne kritične toplinske granice (CT_{min} i CT_{max}) pri kojima se doseže letalna temperatura. Ove granice dobivene su mjerenjima značajki koje utječu na fitnes neke vrste, poput primjerice plodnosti, vijabilnosti i brzine metabolizma (Kellermann i van Heerwaarden 2019). Upravo će o značajkama pojedine vrste ovisiti njen odgovor na temperaturne promjene u okolišu. Zabilježeno je da mravi s nižim CT_{min} obitavaju u hladnijim područjima, a oni s višim CT_{max} u toplijim. Moguće je da će temperaturna tolerancija odrediti koje će vrste uspjevati u budućem okolišu (Parr i Bishop 2022).

Prednost socijalnih kukaca nad solitarnima je to što se svi zadaci kolonije obavljaju paralelno te se u slučaju potrebe radnici mogu prebaciti s jedne na drugu funkciju. Za usporedbu, solitarni kukac mora samostalno sagraditi skrovište, skupiti hranu te brinuti o mladima (Parr i Bishop 2022). Ukoliko se dogodi nestašica hrane, socijalni kukci su u mogućnosti smanjiti veličinu kolonije te tako privremeno preživjeti bez gubitka cijele populacije (Menzel i Feldmeyer 2021). Kolonija je uravnotežen sustav koji vrlo dobro regulira uvjete unutar gnijezda. Kao što je prije spomenuto, mravi imaju aktivne i pasivne metode termoregulacije mravinjaka pa se pretpostavlja da će se mnoge vrste brzo prilagoditi. Nadalje, radnici su zamjenjivi to jest gubitak jedinke neće uzrokovati krah kolonije nego će drugi radnik zauzeti njegovo mjesto što je kod solitarnih kukaca nemoguće. Iz tih razloga se smatra da

zadružni kukci imaju potencijal za traženjem hrane na temperaturama bliskim CT_{max} što bi moglo utjecati na odnos veličine kolonije i veličine tijela jedinki (slika 2). Navedene prednosti mogle bi u budućnosti prevagnuti na stranu socijalnih kukaca i doprinijeti njihovoj nadmoći (Parr i Bishop 2022).



Slika 2. Prikaz predviđene temperaturne tolerancije kod eusocijalnih i solitarnih kukaca. Na grafu (a) naznačene su kritične toplinske granice (plavo i crveno), krivulja toplinskog učinka (isprekidana crna linija) i temperaturni raspon za traženje hrane koji je kod eusocijalnih kukaca veći i bliži CT_{max} . Drugi graf (b) prikazuje kako su veličina tijela radnika i veličina kolonije povezane s rizikom na koji su socijalni kukci spremni. Dok je na x-osi označena veličina, y-os opisuje razliku između gornje toplinske granice (CT_{max}) i najveće temperature pri kojoj pronalaze hranu. Primjerice, male jedinke će tražiti hranu na temperaturama bliskim CT_{max} zato što im mala veličina tijela omogućuje lakšu termoregulaciju. Slično je kod velikih kolonija koje si to mogu dopustiti zbog velike brojnosti i zamjenjivosti radnika (preuzeto i prilagođeno prema: Parr i Bishop 2022).

2.1. Promjene areala i staništa

Jedno od odgovora na klimatske promjene je migracija u povoljnija mikrostaništa, kao što su drugi dijelovi na biljci ili čak zakopavanje u tlu. Budućnost kukaca unutar zajednice ovisit će o prilagodabama i sposobnostima pojedinih vrsta za preživljavanjem (Harvey i sur. 2020). Također su zabilježene mnoge promjene u rasprostranjenosti kukaca te ih se može svesti na migracije prema hladnijim područjima odnosno prema polovima ili prema većim nadmorskim

visinama. Neki kukci nisu u mogućnosti migrirati zbog geografske ograničenosti njihovih staništa pa će se naći u velikoj opasnosti pred rastućim temperaturama (González-Tokman i sur. 2020). Na Apeninima je leptir planinski pjegavac (*Lasiommata petropolitana* Fabricius, 1787) postao vrlo ugrožen zbog trenutnih klimatskih promjena (Bonifacino i sur. 2022).

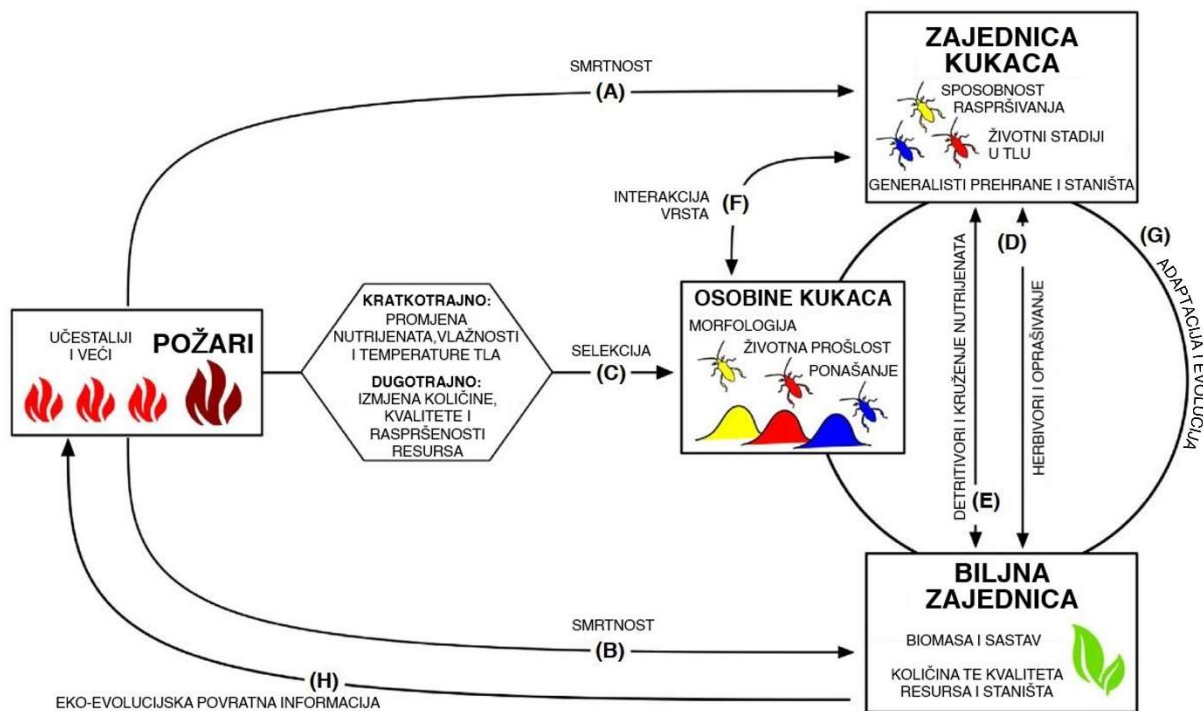
Pri nadmorskim visinama od 2 000 do 4 000 metara dolazi do naglih promjena u abiotičkim čimbenicima. Pretpostavlja se da će zagrijavanje navesti kukce na migracije prema sve većim nadmorskim visinama, što je zabilježeno kod leptira: obični mrki plavac (*Aricia agestis* Denis & Schiffermüller, 1775), bjelokrili planinski okaš (*Erebia ligea* Linnaeus, 1758) te bumbara *Bombus alpinus* (Linnaeus, 1758) (Shah i sur. 2020, Konvicka i sur. 2003, Inouye 2020). Naime, drugi čimbenici, poput količine kisika u zraku, mogli bi biti limitirajući te onemogućiti daljnje vertikalne migracije i u konačnici dovesti do izumiranja. Primjer takve vrste je leptir *Parnassius smintheus* (E. Doubleday, 1847) čije su populacije u Stjenjaku postale izolirane (Inouye 2020). Zahvaljujući postojanju mnogobrojnih mikrostaništa, kopneni kukci (iako proživljavaju velike raspone temperature) mogu pronaći klimatski odgovarajuće stanište za razliku od slatkovodnih kukaca istoga područja (Shah i sur. 2020).

Temperatura utječe na brzinu razvoja, metabolizam i učinak socijalnih kukaca. Kako bi ubrzali rast mladih, mravi na dnevnoj bazi prenose svoje leglo u toplije dijelove mravinjaka. Uz to imaju sposobnost sezonski promijeniti lokaciju mravinjaka kako bi mikroklima bila povoljnija. S povećanjem temperature okoliša, mravi će se ovim mehanizmima prilagoditi novonastalim uvjetima. Zajednice mrava u toplijim krajevima odlikuje veliko bogatstvo vrsta te velika brojnost. Upravo će promjena rasporeda diuralnih i nokturalnih aktivnosti dovesti do kompeticije za povoljne geografske i ekološke resurse kolonija to jest do smanjenja fitnesa nekih vrsta mrava. Globalno zatopljenje doprinijet će povećanju bioraznolikosti mrava u do sada nedostupnim područjima, no vrlo je vjerojatno da će topli krajevi današnjice (tropski pojas) postati prevrući što će potaknuti migracije i smanjiti bioraznolikost (Parr i Bishop 2022).

Hematofagni kukci (komarci, stjenice, pješčane mušice) često su vektori raznih bolesti opasnih za životinje, ali i ljude. Povećana temperatura doprinosi povećanju reprodukcije ovih kukaca, što rezultira većom potražnjom krvi odnosno većim brojem napada na ljude. Isto tako temperatura utječe i na patogene koji su uzročnici bolesti poput malarije, denga groznice, Chagasove bolesti, lišmanioze itd. Povećan broj patogena i samih vektora povećava vjerojatnost infekcije domaćina. Iako su navedene bolesti većinom tropske, zahvaljujući

globalnom zatopljenju to se počelo mijenjati. Naime, navedeni kukci pomiču svoj areal prema umjerenom pojasu gdje se bilježi sve veći broj zaraženih ljudi. Stjenice (Triatominae) koje prenose uzročnika Chagasove bolesti *Trypanosoma cruzi* (Chagas, 1909) ne podnose temperature iznad 34°C pa migriraju u područja s umjerenijom klimom koja postaju sve toplija, a gdje su ljudi podložniji infekciji jer još nisu bili izloženi tom patogenu (González-Tokman i sur. 2020). Modeli predviđaju širenje komarca malaričara *Anopheles stephensi* (Liston, 1901) duž Afrike i Mediterana te komaraca *Aedes aegypti* (Linnaeus, 1762) i *A. albopictus* (Skuse, 1895) uzročnika denga groznice u Africi i jugoistočnoj Aziji (Colón-González i sur. 2021).

Požar je normalni prirodni poremećaj, no prilikom čestih i dugotrajnih suša postaju sve učestaliji. Stoga utječu na temperaturu, vlažnost i nutrijente u tlu te na brojnost i bogatstvo dostupnih resursa i prisutnih vrsta (slika 3). Mnogi kukci imaju prilagodbe koje im omogućuju preživljavanje požara, a neki čak napreduju nakon požara pa lakše pronalaze partnera ili se šire na novodostupna staništa. Upravo to širenje omogućava oporavak opožarenih područja, no frekventni i veliki požari usporavaju oporavak ekosustava. Zajednice biljaka i kukaca usko su povezane pa brzina regeneracije ovisi o međusobnim interakcijama. Kvaliteta tla i biljnih zajednica nakon požara važni su čimbenici za detritivorne kukce jer utječu na njihovu raznolikost te brzinu oporavka tijekom sljedećih desetljeća. Herbivorni kukci koji imaju raznoliku prehranu (primjerice skakavci) prvi će nastaniti zahvaćena područja, dok će se populacije kukaca sa specijaliziranom prehranom puno sporije oporavljati. Analogno je kod predatorskih i parazitoidnih kukaca, gdje se predatori često hrane raznim vrstama kukaca, dok su parazitoidi vrlo specijalizirani za određene vrste domadara. Požari čine selekcijski pritisak te su pokretači adaptivnih i evolucijskih događaja. Neke su vrste razvile prilagodbe na vatru pa tako nalazimo ticala osjetljiva na dim kod strizibuba (Cerambycidae) te osjetila infracrvenog zračenja kod kornjaša vrste *Melanophila acuminata* De Geer, 1774 (Koltz i sur. 2018).



Slika 3. Prikaz kompleksnosti ekoloških i evolucijskih učinaka požara na biljke i kukce. Smrtnost (A,B) je neposredna posljedica ovakvog poremećaja, dok je niz kratkotrajnih i dugotrajnih učinaka odgovorno za selekciju (C). Interakcije biljaka i kukaca opisane su mnogim procesima poput oprašivanja i kruženja tvari (D, E i F). Obje se zajednice prilagođavaju i evoluiraju u danim uvjetima (G) što u budućnosti može utjecati na mehanizam požara (H) (preuzeto i prilagođeno prema: Koltz i sur. 2018).

3. Interakcije s biljkama pri promjeni klime

Klimatske promjene zasigurno će utjecati i na šumske ekosustave. Sve češće pojave požara, suša i izbijanja velikog broja kukaca povećavaju smrtnost drveća, a time se smanjuje primarna produkcija te vezanje CO₂ što pogoršava stanje atmosfere (Pureswaran i sur. 2018). Olujno nevrijeme oslabljuje drveće što ih čini podložnijima napadu potkornjaka (Scolytidae) (Jactel i sur. 2019). U zadnjih nekoliko godina, epidemije kukaca postale su učestalije i veće pa su se populacije proširile na više nadmorske visine i veće geografske širine. Uz to dolazi i do širenja alohtonih i invazivnih vrsta na dosad nezahvaćena područja. Takvom širenju doprinose ljudi upotrebom raznih prijevoznih sredstava. S obzirom na blage zime, kukci su u mogućnosti hraniti se duže i tako proširiti svoj areal. Neke vrste kukaca, koje se trenutno primarno hrane

jednom vrstom stabala, moći će prilagoditi svoju ishranu na neku drugu vrstu drveća ukoliko migriraju na nova područja ili dođe do fenoloških pomaka s prvotnom biljnom vrstom. Upravo ta druga biljna vrsta može pretrpjeti znatnu štetu jer ne posjeduje zaštitne mehanizme prema novoj vrsti herbivora. Primjerice, povećanje temperature poboljšava fitnes nekih kornjaša (Coleoptera) koji tijekom migracija mogu uzrokovati masovan pomor drveća. Visoke ljetne temperature mogu utjecati na zaštitne mehanizme drveća odnosno otpornost na herbivorne životinje. Navedene promjene mogu pogodovati kukcima ili mogu narušiti njihove međuodnose s biljkama. Istraživanja pokazuju da kukcima u umjerenim i borealnim klimama više odgovara zatopljenje nego kukcima tropskih područja. Stoga će šume u umjerenim i borealnim klimama iskusiti veće gubitke zbog povećane aktivnosti i povišene brojnosti kukaca. To uključuje povećano uništavanje lišća, smanjeni rast, smanjenje geografske raširenosti, povećanu osjetljivost na vatru te u konačnici povećani mortalitet biljaka (Pureswaran i sur. 2018).

Neki kukci koji imaju dijapauzu nemaju skraćeno generacijsko vrijeme ni povećan broj potomaka, štoviše opaženo je smanjenje veličine tijela, slabije raseljavanje i povećana smrtnost jedinki. Primjerice kukci u umjerenim klimama koji zime preživljavaju pomoću dijapauze, vrlo će vjerojatno iskusiti kasniji početak i/ili raniji završetak dijapauze. Prerani kraj dijapauze u proljeće ne mora biti jednak kao u biljaka te može rezultirati nedostatkom životnog prostora i hrane za kukce (Marshall i sur. 2020). Opaženo je da se jajašca malog mrazovca (*Operophtera brumata* Linnaeus, 1758) izlegu prije nego što propupa hrast lužnjak (*Quercus robur* L.) čijim se lišćem hrane gusjenice ovog leptira. Ovakav pomak u interakciji ne utječe samo na spomenute organizme, već i na populacije velikih sjenica (*Parus major* Linnaeus, 1758) kojima su gusjenice potrebne kako bi prehranile svoje mlade (van Asch i sur. 2007).

Povišena koncentracija CO₂ u zraku može kod biljaka rezultirati pomaknutim omjerom ugljika i dušika u metabolizmu, to jest smanjenom nutritivnom vrijednosti biljnog materijala. Uzevši da se metabolizam kukaca već ubrzao zbog zatopljenja, ovo će dodatno povećati količinu biljnog materijala kojeg će herbivorni kukci konzumirati i tako smanjiti fotosintetsku biomasu. Teško je odrediti kako jedan abiotički čimbenik utječe na šumski ekosustav, naime postoji puno značajnih varijabli koje treba uzeti u obzir pa su i rezultirajući odgovori biljaka i kukaca raznoliki te izrazito kompleksni (Jactel i sur. 2019).

Kao što je već spomenuto u prošlim poglavljima, planinski ekosustavi doživljavaju najveće promjene pod utjecajem klimatskih promjena. Veće temperature brže će otopiti snježni pokrivač pa se pretpostavlja da će vegetacijska sezona biti duža te čak sušna sredinom ljeta. Opaženo je smanjenje brojnosti mahovina i lišajeva u korist vaskularnih biljaka te je sve više površina s grmljem i drvećem. Promjenama u trenutnim odnosima biljaka i oprašivača na planinama doprinose migracije kukaca s nižih nadmorskih visina na više. Neke vrste bumbara, pčela, mrava, muha, dnevnih i noćnih leptira specijalizirane su za život na visokim područjima te su važni oprašivači. Biljna morfologija i fenologija određuju koja će vrsta kukca moći oprašiti cvjetove. Toplije vrijeme ukazuje na sve raniji rast i cvjetanje biljaka ovog područja. Izdizanje grmlja i drveća može izolirati populacije oprašivača te ih dovesti pred izumiranje. Prostorno odvajanje i vremenska (fenološka) neusklađenost biljaka i prijeko potrebnih oprašivača dovest će do smanjene oplodnje te sazrijevanja manjeg broja sjemenki. Kukci će različito odgovarati na promjene, potencijalno će doći do migracija, a samim time i promjene biljnog sastava staništa (izvora hrane). Stoga će se stvarati nove interakcije između zajednica biljaka i kukaca, dok će neke postojeće interakcije nestati (Inouye 2020).

4. Promjene u višim trofičkim razinama hranidbene mreže

Dva su mehanizma koji utječu na strukturu hranidbenih mreža, a to su „bottom-up“ i „top-down“ kontrola. „Bottom-up“ je kontrola koja govori da primarni proizvođači (izvori hrane) oblikuju sve više trofičke razine. Dok je „top-down“ regulacija kojom organizmi viših trofičkih razina utječu na razine ispod vlastite. Bez sumnje se može reći da će klimatske promjene imati učinak na različite trofičke razine te ekosustave općenito (Chidawanyika i sur. 2019).

Povećana temperatura utječe na imunitet domadara, naime otkriveno je da neke vrste lisnih uši postanu osjetljivije na napad parazitoida, ali otpornije na gljivične uzročnike bolesti. Ekstremne temperaturne situacije utječu na brzinu razvoja, raznolikost i brojnost domadara, što rezultira napadom parazitoida na brojnije i fizički veće vrste domadara (Thierry i sur. 2019). Uz to temperaturni ekstremi imaju negativan učinak na ponašanje, razvoj, veličinu populacije i širenje predatora. Također djeluju i na parazitoide, točnije na njihov let te posljedično mogućnost pronalaska domadara i polaganje jaja (Harvey i sur. 2020). Istraživanja pokazuju

da su temperaturno najosjetljivije više trofičke razine, na primjer parazitoidi često imaju niže optimalne temperature od njihovih domadara. Pri visokim ili niskim temperaturama dolazi do promjene u mobilnosti, plodnosti i duljini života parazitoida, a može doći i do nepovratnog oštećenja stanica te ugibanja (Chidawanyika i sur. 2019).

Krivulja toplinskog učinka razlikuje se među skupinama kukaca te pri zagrijavanju atmosfere može rezultirati fenološkim nepoklapanjima (Chidawanyika i sur. 2019). Neusklađenost može biti između biljaka i oprašivača, plijena i predatora te domadara i parazita. Toplije zime potaknut će kukce na promjene u započinjanju, trajanju i završavanju dijapauze. Ukoliko dođe do nesinkronizirane aktivnosti domaćina i parazita, veći su izgledi za preživljavanje onih parazita koji nisu usko vezani za jednu vrstu domadara. Parazitoidi su tijekom dijapauze najviše izloženi klimatskim promjenama jer se nalaze u tlu ili u nepokretnom domaćinu. Međutim zapaženo je da su neke vrste parazitoida sposobne potaknuti svoje domaćine na prezimljavanje u njima odgovarajućim mikrostaništima te tako izbjeći razlike u fenologiji i letalne uvjete. Smatra se da će se domadari brže prilagoditi novim uvjetima, u usporedbi s parazitima, te da će to dodatno doprinijeti nekoordinaciji (Tougeron i sur. 2020).

Pretpostavlja se da će se u potrazi za adekvatnim staništem promijeniti areal parazitoida, međutim nije prikupljeno dovoljno dokaza za potkrepljivanje takvih tvrdnji. Domaćini možda neće ujednačeno migrirati s parazitima pa se postavlja pitanje opstanka mnogih vrsta kukaca (Chidawanyika i sur. 2019). Ukoliko se parazitoidi generalisti uspiju proširiti na više nadmorske visine i prilagoditi ondašnjim vrstama kao novim domadarima, to bi moglo biti pogubno za endemske vrste toga područja koje ne mogu migrirati. Isto tako pridošle vrste mogu uspostaviti kompeticijske odnose i znatno smanjiti brojnost prisutnih vrsta (Shah i sur. 2020).

Unutar trofičke razine može doći do povećane kompeticije između različitih vrsta na temelju promjena abiotičkih čimbenika toga staništa. Dodavši interakcije sa svim drugim trofičkim razinama, dobiva se vrlo kompleksna hranidbena mreža za koju se pretpostavlja da će ostati stabilna usprkos promjenama unutar i između pojedinačnih trofičkih razina (Thierry i sur. 2019). U mutualističkom odnosu mrava i lisnih uši, lisne uši stvaraju mednu rosu koju mravi konzumiraju, dok mravi štite uši od napada predatora. Pretpostavlja se da će s povećanjem temperature mravi postati agresivniji i stvarati veće kolonije, a lisne uši proizvoditi više medne rose. Ipak se pri ekstremnim abiotičkim uvjetima (vrlo visokim

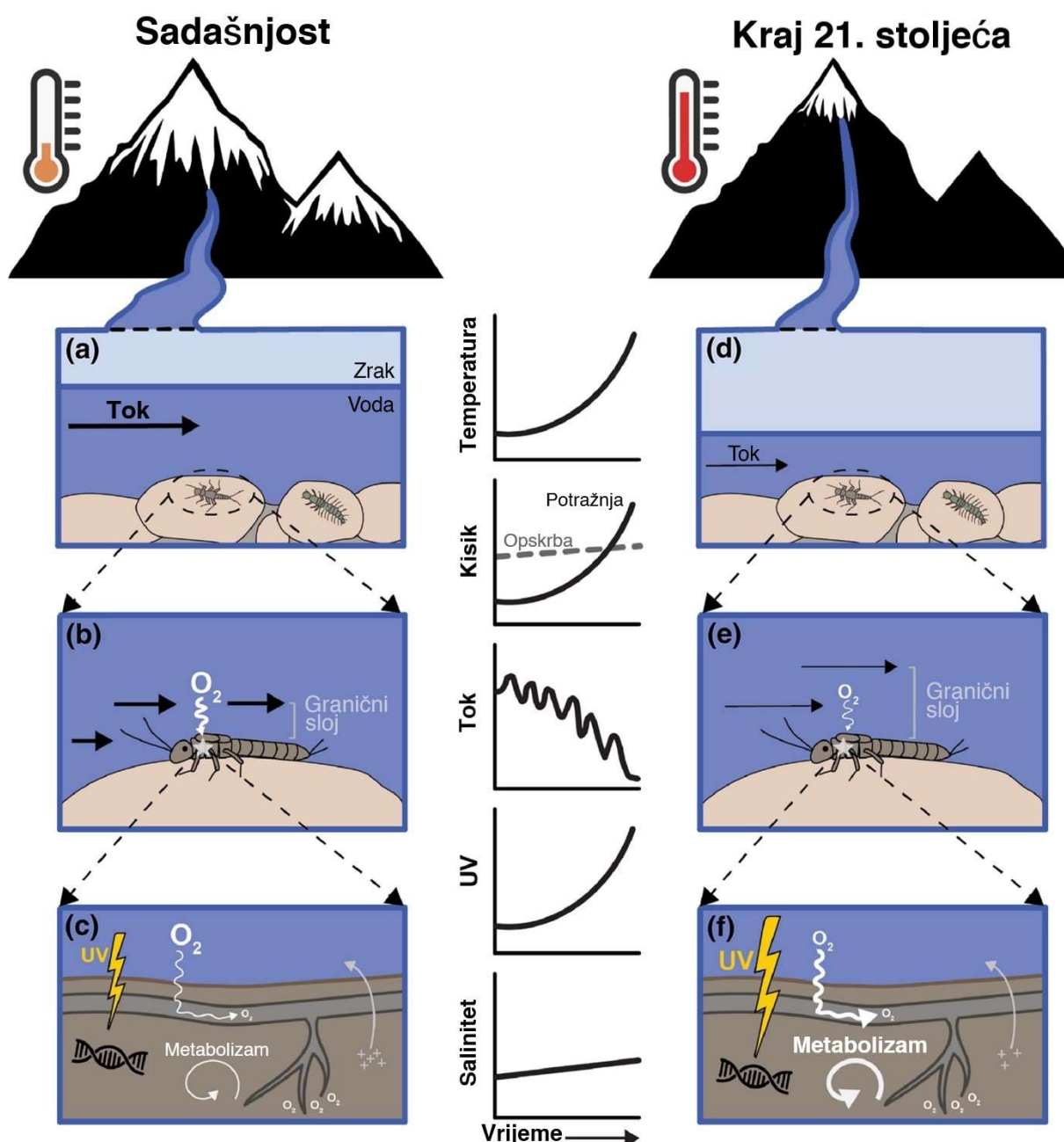
temperaturama) očekuje se raspad ovog odnosa. Mravi predacijom i kompeticijom reguliraju zajednice kukaca te se predviđa da će sve više socijalnih kukaca tako djelovati u umjerenim klimama kada se dosele tropske vrste (Parr i Bishop 2022).

Kao što je spomenuto, neke će biljke promijeniti sastav nutrijenata što će direktno utjecati na herbivorne kukce, ali i na parazite koji se njima prehranjuju. Ukoliko herbivorni kukci ostanu manje veličine zbog nedostatka nutrijenata, postoji šansa da se parazitoidni kukci neće uspjeti razviti u tako malenim domaćinima. Sve to dovodi do smanjene učinkovitosti parazitizma i lošije kontrole nižih trofičkih razine pa može doći do umnožavanja broja kukaca štetnih za usjeve i biljke općenito (Chidawanyika i sur. 2019).

5. Utjecaj klime na slatkovodne ekosustave

Velika bioraznolikost vodenih kukaca nalazi se u potocima iznad 2 000 m nadmorske visine. Smatra se da su vodeni kukci dobri pokazatelji kvalitete vode jer su jedni od najosjetljivijih skupina kukaca. Potoke opisuju kompleksni životni uvjeti poput dugotrajnog pokrivača snijega i leda, jakog UV zračenja, male količine kisika te izoliranosti. Usporedno s globalnim promjenama mijenjaju se i navedeni uvjeti (slika 4), pa tako pada manje snijega koji se brže otapa te utječe na protok i svojstva vode (Birrell i sur. 2020).

U početku se predviđa veća brzina toka zbog sve toplijeg vremena te otapanja snijega i ledenjaka, no kasnije će se tok usporiti zbog manje količine dostupnog snijega i leda. Tijekom ubrzanog odleđivanja smanjit će se koncentracija iona u vodi te uzrokovati osmoregulatorne poteškoće i povećane gubitke energije i kisika. Promjene brzine toka potencijalan su razlog za migracije kukaca duž toka, ali i mogući uzrok gubitka staništa te izumiranja brojnih vrsta. Viša temperatura vode rezultirat će većom potražnjom kisika (zbog ubrzanijeg metabolizma), no količina dostupnog kisika neće se znatno povećati što može dovesti do hipoksije. Nasuprot, pri nižim temperaturama i sporijem protoku voda je viskozija te je granični sloj veći što smanjuje opskrbu organizama kisikom. Kraće trajanje snježnog pokrivača dovodi do povećanog izlaganja kukaca UV zračenju, međutim neki kukci se štite pigmentima poput melanina ili pronalaze zaklonjena mikrostaništa. Opstanak pojedinih vrsta ovisit će o njihovoj gornjoj temperaturnoj granici preživljavanja, brzini razvoja te trenutku prijelaza iz juvenilnih (vodenih) u odrasle (kopnene) stadije (Birrell i sur. 2020).



Slika 4. Usporedba abiotičkih čimbenika i rezultirajućih fizioloških stanja kod vodenih kukaca današnjice i krajem 21. stoljeća. Potoci su brze, duboke i hladne tekućice (a), što omogućuje dobru topljivost kisika te tanak granični sloj (b). Metabolizam je spor pa je potrošnja kisika mala. Štetno UV zračenje blokirano je dubokom vodom i snijegom. Salinitet okolne vode je nizak pa je pojačana osmoregulacija (c). Na temelju temperaturnih promjena pretpostavlja se zagrijavanje vode, usporenje toka i smanjenje dubine (d). Toplija i sporija voda smanjit će topljivost kisika te povećati granični sloj (e). Ubrzani metabolizam trošit će više kisika, povećat će se izloženost UV zračenju te će se smanjiti osmoregulacija jer će usporeniji tok povisiti salinitet vode (f) (preuzeto i prilagođeno prema: Birrell i sur. 2020).

Vodeni kukci viših nadmorskih visina podnose veći raspon temperatura u odnosu na vodene kukce nižih nadmorskih visina, što ukazuje na ovisnost njihovog odgovora o značajkama samih vrsta. Predviđa se manja stopa preživljavanja vodenih kukaca jer toleriraju uzak raspon temperatura, ne podnose smanjenje količine otopljenog kisika te vrlo teško migriraju. Čak i vrste koje imaju leteće odrasle stadije neće nužno migrirati na nova područja zbog različitih uvjeta u kojima žive juvenilni i odrasli stadiji (odrasli stadij može pronaći povoljno kopneno mikrostanište) (Shah i sur. 2020). Vrlo je teško pretpostaviti kako će svi ovi čimbenici zajedno utjecati na organizme te hoće li se oni uspjeti prilagoditi nabrojenim promjenama u vrlo kratkom vremenu.

6. Zaključak

Svakodnevno svjedočimo naglim promjenama klimatskih čimbenika čije su posljedice puno dalekosežnije za ektotermne organizme u usporedbi s endotermnim životinjama. Kukci su vrlo raširena i raznolika skupina životinja koja ima izniman značaj u ekosustavu. Pod najvećim utjecajem klimatskih promjena su tropske vrste koje će vrlo vjerojatno migrirati u područja umjerene klime. Najbolje istražen aspekt klimatskih promjena je temperatura, no to nije jedina komponenta koja djeluje na organizme. Nužno je provesti još mnogo istraživanja kako na terenu tako i u laboratoriju. Iz prikupljenih podataka potrebno je razviti nove modele koji će obrađivati više informacija te davati točnija predviđanja o sposobnostima kukaca i mogućnosti njihove prilagodbe na klimatske promjene. Omnivorni kukci i kukci koji podnose širi raspon životnih uvjeta brže će se adaptirati promjenama u okolišu. Život u koloniji ima mnoge prednosti pa se zato očekuje sve veća dominacija socijalnih kukaca. Nezaobilazan je značaj primarnih proizvođača na zajednice kukaca pa bi se buduća istraživanja trebala više posvetiti njihovom međuodnosu. Hranidbena mreža obuhvaća velik broj članova i interakcija, stoga je teško procijeniti kako će ona točno izgledati. Nedvojbeno je da će mnoge interakcije i vrste nestati, ali zasigurno će nastati nove. Kukci posjeduju razne mehanizme kojima će pokušati izbjeći i/ili se prilagoditi novonastalim uvjetima. Upravo iz tog razloga, unatoč ne baš optimističnim predviđanjima budućnosti našeg planeta, postoji nada da će brojne vrste kukaca i dalje opstati.

LITERATURA

- Altermatt F. (2010): Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths. *Proceedings of the Royal Society B* 277(1685): 1281–1287.
- ANTONIO Photography (2022) <https://ant-photo.eu/galeria/zdjecia-mrowek/cataglyphis-bombycina/> (pristupljeno 19. 9. 2022.).
- van Asch M., van Tienderen P. H., Holleman L. J. M., Visser M. E. (2007): Predicting adaptation of phenology in response to climate change, an insect herbivore example. *Global Change Biology* 13(8): 1596–1604.
- Bale J. S., Hayward S. A. L. (2010): Insect overwintering in a changing climate. *Journal of Experimental Biology* 213(6): 980–994.
- Birrell J. H., Shah A. A., Hotaling S., Giersch J. J., Williamson C. E., Jacobsen D., Woods H. A. (2020): Insects in high-elevation streams: Life in extreme environments imperiled by climate change. *Global Change Biology* 26(12): 6667–6684.
- Bonifacino M., Pasquali L., Sistri G., Menchetti M., Santini L., Corbella C., Bonelli S., Balletto E., Vila R., Dinca V. E., Dapporto L. (2022): Climate change may cause the extinction of the butterfly *Lasiommata petropolitana* in the Apennines.
- Chidawanyika F., Mudavanhu P., Nyamukondiwa C. (2019): Global climate change as a driver of bottom-up and top-down factors in agricultural landscapes and the fate of host-parasitoid interactions. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7(80).
- Colón-González F. J., Sewe M. O., Tompkins A. M., Sjödin H., Casallas A., Rocklöv J., Caminade C., Lowe R. (2021): Projecting the risk of mosquito-borne diseases in a warmer and more populated world: a multi-model, multi-scenario intercomparison modelling study. *The Lancet. Planetary Health* 5(7): 404–414.
- González-Tokman D., Córdoba-Aguilar A., Dáttilo W., Lira-Noriega A., Sánchez-Guillén R. A., Villalobos F. (2020): Insect responses to heat: physiological mechanisms, evolution and ecological implications in a warming world. *Biological Reviews* 95(3): 802–821.
- Gullan P. J., Cranston P. S. (2014): *The insects : an outline of entomology* (Fifth edition). Chichester, West Sussex, UK, Wiley Blackwell, str. 4–9,323.

- Hallmann C. A., Sorg M., Jongejans E., Siepel H., Hofland N., Schwan H., Stenmans W., Müller A., Sumser H., Hörren T., Goulson D., de Kroon H. (2017): More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE* 12(10).
- Harvey J. A., Heinen R., Gols R., Thakur M. P. (2020): Climate change-mediated temperature extremes and insects: From outbreaks to breakdowns. *Global Change Biology* 26(12): 6685–6701.
- Inouye D. W. (2020): Effects of climate change on alpine plants and their pollinators. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1469(1): 26–37.
- Jactel H., Koricheva J., Castagneyrol B. (2019): Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science* 35: 103–108.
- Joschinski J., Hovestadt T., Krauss J. (2015): Coping with shorter days: do phenology shifts constrain aphid fitness?. *PeerJ* 3:e1103.
- Kellermann V., van Heerwaarden B. (2019): Terrestrial insects and climate change: adaptive responses in key traits. *Physiological Entomology* 44(2): 99–115.
- Khazalah M., Gopalan B. (2019): Climate change—Causes, impacts, mitigation: a review. *Lecture Notes in Civil Engineering* 9: 715–721.
- Koltz A. M., Burkle L. A., Pressler Y., Dell J. E., Vidal M. C., Richards L. A., Murphy S. M. (2018): Global change and the importance of fire for the ecology and evolution of insects. *Current Opinion in Insect Science* 29: 110–116.
- Konvicka M., Maradova M., Benes J., Fric Z., Kepka P., Maradovat M., Benest J., Fric Z., Kepkatt P. (2003): Uphill Shifts in Distribution of Butterflies in the Czech Republic: Effects of Changing Climate Detected on a Regional Scale. *Global Ecology and Biogeography* 12(5):403–410.
- Marshall K. E., Gotthard K., Williams C. M. (2020): Evolutionary impacts of winter climate change on insects. *Current Opinion in Insect Science* 41: 54–62.
- Menzel F., Feldmeyer B. (2021): How does climate change affect social insects? *Current Opinion in Insect Science* 46: 10–15.

- Parr C. L., Bishop T. R. (2022): The response of ants to climate change. *Global Change Biology* 28(10): 3188–3205.
- Perez R., Aron S. (2020): Adaptations to thermal stress in social insects: recent advances and future directions. *Biological Reviews* 95(6): 1535–1553.
- Pureswaran D. S., Roques A., Battisti A. (2018): Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports* 4(2): 35–50.
- Rafferty N. E. (2017): Effects of global change on insect pollinators: multiple drivers lead to novel communities. *Current Opinion in Insect Science* 23:22–27.
- Sampaio F., Krechemer F. S., Marchioro C. A. (2021): The hotter the better? Climate change and voltinism of *Spodoptera eridania* estimated with different methods. *Journal of Thermal Biology* 98.
- Sánchez-Bayo F., Wyckhuys K. A. G. (2019): Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation* 232: 8–27.
- Shah A. A., Dillon M. E., Hotaling S., Woods H. A. (2020): High elevation insect communities face shifting ecological and evolutionary landscapes. *Current Opinion in Insect Science* 41: 1–6.
- Thierry M., Hrčák J., Lewis O. T. (2019): Mechanisms structuring host–parasitoid networks in a global warming context: a review. *Ecological Entomology* 44(5): 581–592.
- Thuiller W. (2007): Biodiversity: Climate change and the ecologist. *Nature* 448: 550–552.
- Tougeron K., Brodeur J., le Lann C., van Baaren J. (2020): How climate change affects the seasonal ecology of insect parasitoids. *Ecological Entomology* 45(2): 167–181.

ŽIVOTOPIS

Dora Lazar rođena je 16.2.2000. u Zagrebu. Završila je Osnovnu školu Eugena Kumičića u Velikoj Gorici te je u 8. razredu osvojila 2. mjesto na državnom natjecanju iz Biologije. Pohađala je informatički smjer u V. gimnaziji u Zagrebu. Preddiplomski studij Biologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu upisala je 2019. godine.