

# Značaj i primjena gljiva (Opisthokonta: Fungi) u strategijama zaštite okoliša

---

Levar, Roko

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:217:683572>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Biološki odsjek

Roko Levar

**Značaj i primjena gljiva  
(Opisthokonta: Fungi)  
u strategijama zaštite okoliša**

Završni rad

Zagreb, 2024.

University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Biology

Roko Levar

**The significance i the application of Fungi  
(Opisthokonta) in environmental protection  
strategies**

Bachelor thesis

Zagreb, 2024.

Ovaj završni rad izrađen je u sklopu Prijediplomskog sveučilišnog studija biologije na Zoologijskom zavodu Biološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, pod mentorstvom doc. dr. sc. Josipa Skeje.

# TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Biološki odsjek

Završni rad

## Značaj i primjena gljiva (Opisthokonta: Fungi) u strategijama zaštite okoliša

Roko Levar

Rooseveltov trg 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Gljive su ključni organizmi zbog nezamjenjivih ekoloških uloga u prirodnim sustavima. Kao globalno rasprostranjeni razlagači organske tvari ili simbionti s drugim organizmima važna su odrednica biogeokemijskih ciklusa na Zemlji. Presudne su za poimanje evolucijskih događaja u kolonizaciji i uspostavi kopnenih staništa. Njihova iznimna raznolikost, mogućnost razgradnje i pohrane složenih organskih tvari u tlu čini ih temeljnim organizmima za održavanje zdravlja tog staništa. Razumijevanje njihove uloge u ekosustavu pruža mogućnosti za rješavanje globalnih ekoloških izazova. Gljive mogu imati primjenu u uklanjanju zagađujućih čestica iz okoliša, povećanju kapaciteta tla za pohranu ugljikovih spojeva iz atmosfere te u obnovi staništa uspostavljanjem stabilnih i raznolikih ekosustava. Iako su od velike važnosti, često su zanemarene u znanstvenim istraživanjima i strategijama zaštite okoliša. Povećanje svijesti i broja mikoloških istraživanja pruža prijeko potrebne uvide za konzervaciju ugroženih vrsta gljiva. Osim toga to doprinosi stvaranju globalnih strategija za učinkovitu borbu protiv ekoloških izazova tijekom presudnih desetljeća 21. vijeka.

Ključne riječi: funga, klimatske promjene, mikoriza, konzervacija, bioraznolikost, uklanjanje ugljika, politika

(35 stranica, 5 slika, 157 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Rad je pohranjen u Središnjoj biološkoj knjižnici

Mentor: doc. dr. sc. Josip Skejo

## BASIC DOCUMENTATION CARD

---

University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Biology

Bachelor thesis

# The significance i the application of Fungi (Opisthokonta) in environmental protection strategies

Roko Levar

Rooseveltovej trg 6, 10000 Zagreb, Croatia

Fungi are key organisms due to their irreplaceable ecological roles in natural systems. As globally widespread decomposers of organic matter or symbionts with other organisms, they are crucial determinants of biogeochemical cycles on Earth. They are essential for understanding evolutionary events in the colonization i establishment of terrestrial habitats. Their exceptional diversity, ability to break down i store complex organic substances in the soil, makes them fundamental organisms for maintaining the health of these habitats. Understanding their role in the ecosystem offers opportunities for addressing global ecological challenges. Fungi can be applied in removing pollutants from the environment, increasing the soil's capacity to store carbon compounds from the atmosphere, i restoration by establishing stable i diverse ecosystems. Despite their importance, they are often overlooked in scientific research i environmental protection strategies. Increasing awareness i mycological research provides much-needed insights for the conservation of endangered fungal species. Furthermore, this contributes to the development of global strategies to effectively combat ecological challenges during the crucial decades of the 21st century.

Keywords: funga, climate change, mycorrhiza, conservation, biodiversity, carbon capture, policy

(35 pages, 5 figures, 157 references, original in: Croatian)

This is deposited in Central Biological Library.

Mentor: doc. dr. sc. Josip Skejo

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. OPĆI ZNAČAJ GLJIVA .....	2
2.1. POVIJEST GLJIVA KAO ZANEMARENE SKUPINE .....	2
2.2. POSTANAK I EVOLUCIJSKA POVIJEST GLJIVA .....	4
2.3. ZNAČAJKE, RAZNOLIKOST I RASPROSTRANJENOST GLJIVA .....	5
3. ULOGA GLJIVA U OKOLIŠU .....	8
3.1. VAŽNOST GLJIVA ZA STANIŠTA I NJHOVU STABILNOST (LOKALNO) .....	8
3.2. VAŽNOST GLJIVA ZA EKOSUSTAVE (GLOBALNO) .....	10
4. PRIMJENA GLJIVA U RJEŠAVANJU EKOLOŠKIH IZAZOVA .....	11
4.1. UKLANJANJE UGLJIKA .....	11
4.1.1. Potencijal mikorize u pohrani ugljika .....	11
4.1.2. Usporedba tehnologije hvatanja i skladištenja ugljika s pohranom ugljika u miceliju .....	12
4.2. OBNOVA STANIŠTA .....	14
4.3. REMEDIJACIJA (RAZGRADNJA ŠTETNIH TVARI) .....	14
4.3.1. Razgradnja kemikalija, teških metala i otrovnih spojeva .....	14
4.3.2. Razgradnja plastike .....	16
4.4. ALTERNATIVNI MATERIJALI OD GLJIVA .....	16
5. UGROŽENOST GLJIVA .....	17
5.1. TRENUTNO STANJE .....	17
5.2. UNIŠTAVANJE I GUBITAK STANIŠTA .....	18
5.3. KLIMATSKE PROMJENE .....	19
5.4. INDUSTRIJSKA POLJOPRIVREDA .....	19
5.4.1. Moderni uzgoj hrane .....	19
5.4.2. Fertilizatori .....	19
5.4.3. Fungicidi .....	20
5.4.4. Orađivanje tla .....	20
5.5. OSTALE PRIJETNJE .....	21
5.5.1. Prekomjerno i neprimjereno sakupljanje gljiva .....	21
5.5.2. Invazivne vrste .....	22
6. ZAŠTITA I LEGISLATIVA .....	22
6.1. Temelj i počeci pravne zaštite gljiva u svijetu .....	22
6.2. Zaštita gljiva u Hrvatskoj .....	24
6.3. Legislativa, strategije za zaštitu okoliša i pregled mjera koje uključuju mikološka rješenja na međunarodnoj razini ..	24
6.4. Inicijative, organizacije i individualne akcije .....	26
6.5. Prijedlozi i rasprava .....	27
7. ZAKLJUČAK .....	28
8. ŽIVOTOPIS .....	29
11. LITERATURA .....	29

## KRATICE I POKRATE

eng. - engleski

NASA - Nacionalna aeronautička i svemirska administracija

NCS – prirodna rješenja za klimatske promjene (eng. *natural climate solutions*)

Mb – megabaza

OCP – put oksalat-karbonata (eng. *oxalate-carbonate pathway*)

CSS – tehnologija hvatanja i skladištenja ugljika (eng. *carbon capture i storage*)

CS – tehnologija hvatanja ugljika (eng. *carbon capture*)

AMF – arbuskularne mikorizne gljive (eng. *arbuscular mycorrhizal fungi*)

PAH-ovi - policiklički aromatski ugljikovodici (eng. *polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs*)

IUCN - Međunarodna unija za očuvanje prirode

UNESCO – organizacija Ujedinjenih naroda (eng. *United Nations Educational, Scientific. i Cultural Organization*)

CR – kategorija kritično ugroženih vrsta

EN – kategorija ugroženih vrsta

VU – kategorija osjetljivih vrsta

NT – kategorija gotovo ugroženih vrsta

DD – kategorija nedovoljno poznatih vrsta

DNA – deoksiribonukleinska kiselina

FAO – Organizacija za prehranu i poljoprivredu

FFF – 3F Inicijativa ili *Flora Fauna Funga*

SPUN - *Society for Protection of Underground Networks*

IMA – Međunarodno mikološko društvo (*International Mycological Association*)



# 1. UVOD

Gubitak bioraznolikosti, onečišćenje okoliša, zagrijavanje atmosfere i klimatske promjene izvanredna su stanja izazvana ljudskom aktivnošću koja nadilaze nacionalne granice. Međunarodni odgovor na jedan od globalnih izazova je Pariški sporazum (Tollefson i Weiss 2015). Na Konferenciji Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama 2015. godine usvojilo ga je 196 stranaka s ciljem postizanja klimatske neutralnosti. Od njegova stupanja na snagu 2016. godine sve su države potpisnice pravno obvezane zadržati globalno zagrijavanje značajno ispod 2 °C te poduzeti sve mjere kojima bi se porast temperature ograničio na 1,5 °C u odnosu na predindustrijsko razdoblje. Za postizanje zadanog cilja do kraja stoljeća emisije stakleničkih plinova moraju se smanjiti najmanje za 43 % do 2030. godine (Delbeke i Vis 2019)

Unatoč tome, odvojenim mjerenjima europskog svemirskog programa *Copernicus* i Nacionalne aeronautičke i svemirske administracije (NASA), 2023. godina potvrđena je kao najtoplija od početka mjerenja temperature (Esper i sur. 2024). Organizacija Berkeley Earth (2024) izmjerila je porast prosječne globalne temperature od 1,54 °C čime je prvi put probijeno ograničenje dogovoreno Pariškim sporazumom. Početkom rujna 2024. godine to je potvrdila i europska Služba za klimatske promjene s prosječnom godišnjom globalnom temperaturom od 1,64 °C u posljednjih 12 mjeseci (Copernicus 2024). Iste je godine zabilježena rekordna emisija ugljikova dioksida (CO<sub>2</sub>) od 35,8 ± 0,3 Gt ispuštenih u atmosferu (Liu i sur. 2024). Plin s tristo puta snažnijim učinkom staklenika u zemljinoj atmosferi od ugljikova dioksida je dušikov oksid (Tian i sur. 2020). Oba poremećaja opisana su konceptom planetarnih granica (Richardson i sur. 2023). Prema zadnjem ažuriranju okvira otkriveno je prekoračenje njih šest od ukupno devet. Od toga dvije probijene granice upravo su povezane sa zagađenjem dušikovim spojevima i emisijama fosilnih goriva. Osim ostalih oblika zagađenja i uništavanja zemljine površine, granica probijena u najvećoj mjeri povezana je s gubitkom bioraznolikosti (Richardson i sur. 2023). Stopa raspada integriteta živog svijeta mjerena brojem izumrlih vrsta često je opisana kao šesto masovno izumiranje uzrokovano antropogenim utjecajem. Ovakva stanja sugeriraju da je biosfera daleko izvan sigurnog prostora i uvjeta za život većine vrsta na Zemlji (Rockström i sur. 2009). Daljnjim probijanjem planetarnih granica bez primjene strategija zaštite okoliša povezana je sa značajnom znanstvenom neizvjesnosti o funkcioniranju prirodnih sustava, sigurnosti i opstanku ključnih vrsta (Richardson i sur. 2023).

Napori za očuvanje ugroženih vrsta u najvećoj su mjeri usmjereni na floru i faunu. Time je zanemareno i gotovo izostavljeno cjelokupno carstvo koje obuhvaća gljive (Pasailiuk 2022). Odnos prema očuvanju gljiva i odluke o uključivanju vrsta stavljenih pod zaštitu isprepleteni su s problemom emisija

stakleničkih plinova, gubitkom bioraznolikosti i ostalih probijenih planetarnih granica (Hawkins i sur. 2023; Mueller i sur., 2022). Upravo se razumijevanje procesa u koje su gljive uključene na globalnoj i lokalnoj razini nameće kao prirodno rješenje za ublažavanje klimatskih promjena (eng. „*natural climate solutions*“, NCS). Osim toga imaju potencijal pri rješavanju ostalih izazova poput zagađenja okoliša i gubitka bioraznolikosti (Ellis i sur. 2024; Hawkins i sur. 2023). Međutim, prepoznatost postojanja gljiva, njihove uloge i važnosti u ekosustavima, načina primjene i rješenja za globalne izazove još uvijek nije dovoljna. Na to ukazuje izostanak gljiva iz međunarodnih konvencija za zaštitu prirode (Pasailiuk 2022). Stoga je važno istražiti temeljne uloge gljiva u okolišu, ukazati na nedostatak postojanja legislativa za zaštitu gljiva te potaknuti mikološka istraživanja. Tome slijedi propisivanje i provođenje globalnih politika koje uključuju njihovu zaštitu i primjenu za rješavanje izazova na međunarodnoj razini (Yarzabal Rodríguez i sur. 2024).

## 2. OPĆI ZNAČAJ GLJIVA

### 2.1. POVIJEST GLJIVA KAO ZANEMARENE SKUPINE

Gljive nije jednostavno uočiti iako dijele dugu zajedničku povijest s ljudima. Primjenu su pronašle već u najranijim civilizacijama. Spore gljiva koje su pronađene u zubnom kamencu predstavnika kulture Magdalenien u pećini El Mirón na području današnje Španjolske sugeriraju da su se koristile za prehranu tijekom paleolitika (Power i sur. 2015). Do danas je poznato da su gljive imale primjenu u tradicionalnoj azijskoj medicini dugi niz stoljeća (Mapook i sur. 2022). Starogrčki putopisac Pausanija u svojem djelu *Opis Grčke* spominje da je Perzej osnovao grad na mjestu gdje mu je pala gljiva. Odlučio je da će zbog toga lokalitetu koji datira iz drugog tisućljeća prije nove ere dati ime Mikena (Pausanius 2. st. n. e.). Antičke grčke i rimske civilizacije te domorodačko stanovništvo Gvatemale i Meksika smatrali su da gljive rastu na mjestu udara groma (Sesli i Tüzen, 1999). To se mišljenje zadržalo tijekom srednjeg vijeka koji mračno je doba za proučavanje gljiva. Tada se smatralo da otrovne gljive nastaju na mjestu po kojem hodaju gmazovi, a vještice su koristile ergot gljivu s raži kao sredstvo za pobačaj (Molitoris 1978). Ipak, suvremenim istraživanjima pokazalo se da električna stimulacija zaista promovira rast plodišta, odnosno sporišta gljiva (Takaki 2022). Tijekom 18. stoljeća postojali su istraživači koji su smatrali da zvijezde padalice povlače gljive iz tla (Carteret i Hamonou-Mahieu 2010). To razdoblje početak je klasifikacije i tada su gljive svrstane pod carstvo biljaka (Zhang i sur. 2017). Švedski botaničar i otac taksonomije, Carl Linnaeus, izjavio je da su gljive kaos i sramota za klasifikaciju kao disciplinu (Kowallik i Martin 2021). Izazovi u taksonomiji su koji su ga odbijali od gljiva bilo je to što za njih nije vrijedila dvostruka nomenklatura. Jedan od razloga za to je različitost u morfologiji gljiva tijekom spolne i nespolne faze te mogućim izostankom jedne od njih. Puno je istih vrsta zbog toga opisano kao različitih (Kowallik i Martin 2021). Smatra se da je otkrićem spora i objavom djela *Nova planraturum genera* talijanskog prirodoslovca Piera Antonija Michelija počeo ubrzani razvoj mikologije

kako zasebne grane u biologiji (Carteret i Hamonou-Mahieu 2010). Glavni interes za istraživanje gljiva bio je vezan uz botaniku. Fitopatologija začetak je i područje istraživanja znanstvenika Heinricha Antona de Baryja koji se danas smatra ocem mikologije (Drews 2000). Ipak, taksonomska neovisnost gljiva kao carstva živog svijeta prihvaćena je tek krajem sedamdesetih godina 20. stoljeća (Whittaker 1969). U tom trenutku evolucijsko stablo još uvijek nije bilo ispravno zbog toga što su u carstvo Fungi uvršteni taksoni za koje danas znamo da nemaju istog zajedničkog pretka kao gljive (Adl i sur. 2019). Nov udarac mikologija kao moderna znanost doživjela je upravo u vrijeme kada su prepoznate kao carstvo. Počeo se razvijati hipi-pokret i kriminalizacija psihoaktivnih gljiva koje su i danas česta asocijacija kada se spomene naziv ovog carstva (Sproul 2021). Nad gljivama je ostavljena je stigma, gađenje i moralna panika, a za dio mikologije to je značilo usporavanje i gubitak financiranja za daljnja istraživanja. Tek su se 2016. godine ponovno počeli pojavljivati znanstveni radovi o utjecaju psihoaktivnih supstanci na liječenje psihičkih stanja u ljudi (Carhart-Harris i Goodwin 2017).

Tumačenja zanemarenosti gljiva tijekom prošlosti su različita. U usporedbi s biljkama i životinjama, većina je vrsta gljiva nevidljiva golim okom. Čak su i makroskopske gljive teško uočljive bez ciljanog traženja. Osim toga, puno ih je teže trajno sačuvati od ostalih skupina organizama (Li i sur. 2016). Vjerojatan razlog zanemarenosti tijekom dugog razdoblja je nepostojanje i nedostupnost tehnologije koja bi mogla otkriti dosege ovog carstva. Bez obzira na to koliko smo tijekom povijesti bili slijepi prema gljivama, njihovu je sveprisutnost nemoguće zanemariti. Neizostavni su sastojak u prehrambenoj industriji za proizvodnju pekarskih proizvoda, alkoholnih pića, čokolade i sireva. Imale su brojne učinke i na povijesne događaje. Penicilin se danas slavi kao jedan od najvećih medicinskih izuma. Njegova proizvodnja utjecala je na omjer snaga tijekom Drugog svjetskog rata (Christensen 2021). Masovni pomor vodozemaca zaraženih gljivama iz skupine Chytridiomycota smatra se najvećim gubitkom bioraznolikosti zbog istog uzročnika bolesti u povijesti (Stokstad 2019).

Gljive su jedno od najslabije istraženih carstava živog svijeta. Do sada je opisano otprilike 150 tisuća vrsta gljiva (Gautam i sur. 2022). Konzervativnim procjenama iz 2017. godine smatra se da ih u stvarnosti postoji od 15 do 25 puta više. Točan broj vrsta gljiva predviđen je između 2.2 i 3.8 milijuna. To znači da je oko 94 % vrsta još uvijek neotkriveno (Hawksworth i Lücking 2017). Kada bismo nove vrste opisivali trenutnom stopom trebalo bi otprilike jedno tisućljeće da se opiše cijelo carstvo (State of the World's Plants i Fungi 2023). Dvije godine kasnije objavljen je rad koji procjenjuje raznolikost gljiva na otprilike 12 milijuna vrsta (Wu i sur. 2019). Bez obzira na stvarni broj važno je skrenuti pozornost na povijesnu neuravnoteženost pri istraživanju gljiva u odnosu na druge skupine. Cilj toga je ukazati na vitalnu ulogu gljiva u svim ekosustavima, popularizirati mikologiju, ubrzati otkrivanje i opisivanje novih vrsta s ciljem zaštite najugroženijih te predstaviti široku lepezu rješenja za globalne probleme 21. stoljeća koje gljive nude.

## 2.2. POSTANAK I EVOLUCIJSKA POVIJEST GLJIVA

Etimologija izraza Opisthokonta dolazi od starogrčkih riječi „*opísthios*“ što znači stražnji i „*kontós*“ koji se prevodi kao bič (eng. „*flagellum*“). Naziv je to za supergrupu višestaničnih organizama koji kao zajedničku pojavnu karakteristiku imaju pojedinačni bič na stražnjem dijelu stanice. Primjer je bič u spermalnim stanicama većine životinja ili spora hitridnih gljiva koji služi za pokretanje unaprijed. U većini se taksona bič izgubio naknadnom evolucijom (Spiegel 2016). U skupinu Opisthokonta ubrajamo klad Holozoa koji obuhvaća carstvo Animalia, te Holomycota u koji su svrstane prave gljive, Fungi (Carr i sur. 2023). Zajednički predak svih današnjih gljiva od ostatka živog svijeta odvojio se prije otprilike 1,5 milijuna godina u prekambriju (Wang i sur. 1999). Bili su to većinom morski višestanični organizmi građeni od račvastih nitastih struktura (Naranjo-Ortiz i Gabaldón 2019). Prve gljive kolonizirale su kopno prije otprilike 500 milijuna godina u vrijeme kambrijske eksplozije života (Brundrett 2002). Najstariji fosilni nalaz koji potvrđuje postojanje gljivolikog organizma pronađen je u današnjoj Kini (Gan i sur. 2021). Kopno je u tom razdoblju bilo surovo, sačinjeno od stijena bez biljaka i životinja. Vulkanske aktivnosti bile su česta pojava popraćena visokom razinom ugljikovih spojeva u atmosferi (Beraldi-Campesi 2013, McKenzie i sur. 2014). Razgradnjom stijena gljive su crpile nutrijente i počele stvarati tlo zajedno s bakterijama (Boer i sur. 2005, Huang i sur. 2024). Prvi koraci k stvaranju tla omogućili su koloniziranje ranih biljaka na kopno 30 milijuna godina nakon gljiva (Kenrick i Crane 1997, Field i sur. 2019). Biljke su prednost za prelazak na kopno imale zbog povezivanja svojih prvih korijenskih oblika s nitastim strukturama gljiva (Boer i sur. 2005). Takav simbiotski odnos naziva se mikoriza i zadržao se u većini biljaka do danas. Nakon gljiva, biljke su sljedeće koje su preuzele dominaciju na kopnu u devonu (Kenrick i Crane 1997). Uslijed samostalnog stvaranja energije fotosintezom za koju je potreban ugljikov dioksid, koncentracija tog plina u atmosferi se smanjila (Le Hir i sur. 2011). Te su biljke bile građene od složenih ugljikovih spojeva poput lignina. U to vrijeme gljive još uvijek nisu razvile mogućnost razgradnje lignina prema jednoj od teorija (Floudas i sur. 2012). Taloženjem biljnog materijala kroz dugo razdoblje geološke prošlosti bez lignolitičke aktivnosti gljiva, nastala su fosilna goriva u obliku nafte i ugljena pohranjena u zemljinoj kori. Skupina znanstvenika smatra da fosilna goriva ne bi postojala da su gljive u tom razdoblju imale enzime za razgradnju drva. Međutim, za to još uvijek ne postoji suglasnost (Nelsen i sur. 2016). Iako su životinje zadnje kolonizirale kopno, posljedica njihova rasprostranjenja omogućena je stvaranjem po njih stabilnih uvjeta u okolišu koje su pokrenule gljive. One su zbog svog načina života preživjele sva masovna izumiranja do danas. Fosilnim nalazima utvrđena je dominacija gljiva nakon takvih događaja (Rampino i Eshet 2018).

## 2.3. ZNAČAJKE, RAZNOLIKOST I RASPROSTRANJENOST GLJIVA

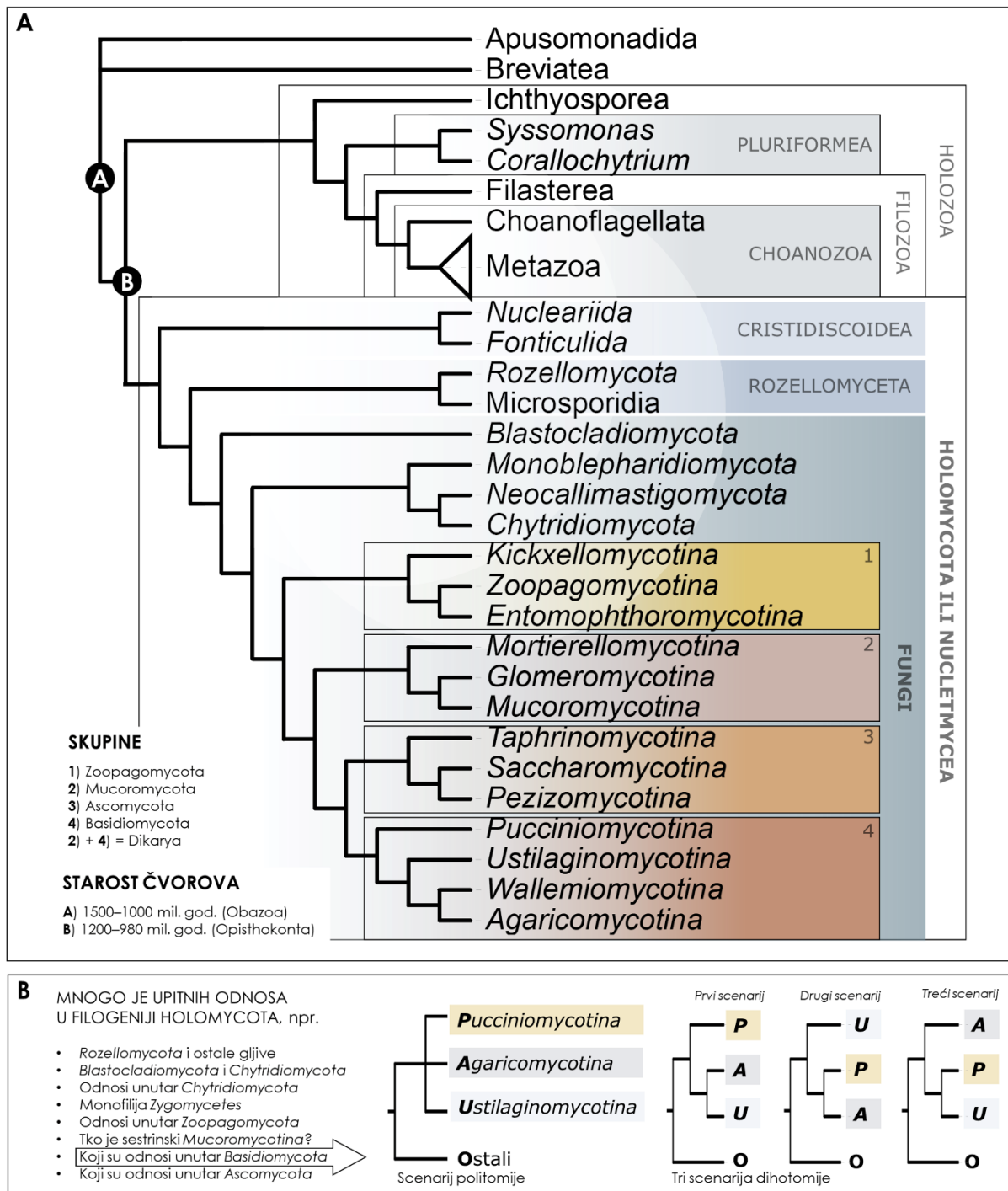
Prva asocijacija na gljive obično su njihova makroskopska tijela za razmnožavanje. Međutim, one su mnogo više od samog plodišta ili sporokarpa. Gljive su još i micelij, hife, kvasci, plijesni, rđe, snijeti, sklerocij, simbionti u lišajevima ili u drugim oblicima (Stajich i sur. 2009). Zbog botaničkog korijena „*plod-*“ u riječima plodište ili plodno tijelo, u ovom se radu za reproduktivni organ gljive predlaže i koristi naziv sporište kao ispravniji mikološki termin na hrvatskom jeziku. Većina tih organa s kojima se susrećemo spada u ljudima najpristupačniji odjeljak Dykaria. On se dijeli na dva koljena, gljive mješinarke, Ascomycota, i stapčarke, Basidiomycota (Slika 1).



**Slika 1.** Raznolikost makroskopskih oblika sporišta unutar koljena stapčarki (Basidiomycota). Vrste odozgo slijeva: *Picipes badius*, *Coprinellus micaceus*, *Bolbitius titubans*, *Tubaria furfuracea*, *Lentinus tigrinus*, *Trametes versicolor*, *Neolentinus cyathiformis*, *Psilocybe semilanceata*, *Stereum complicatum*.

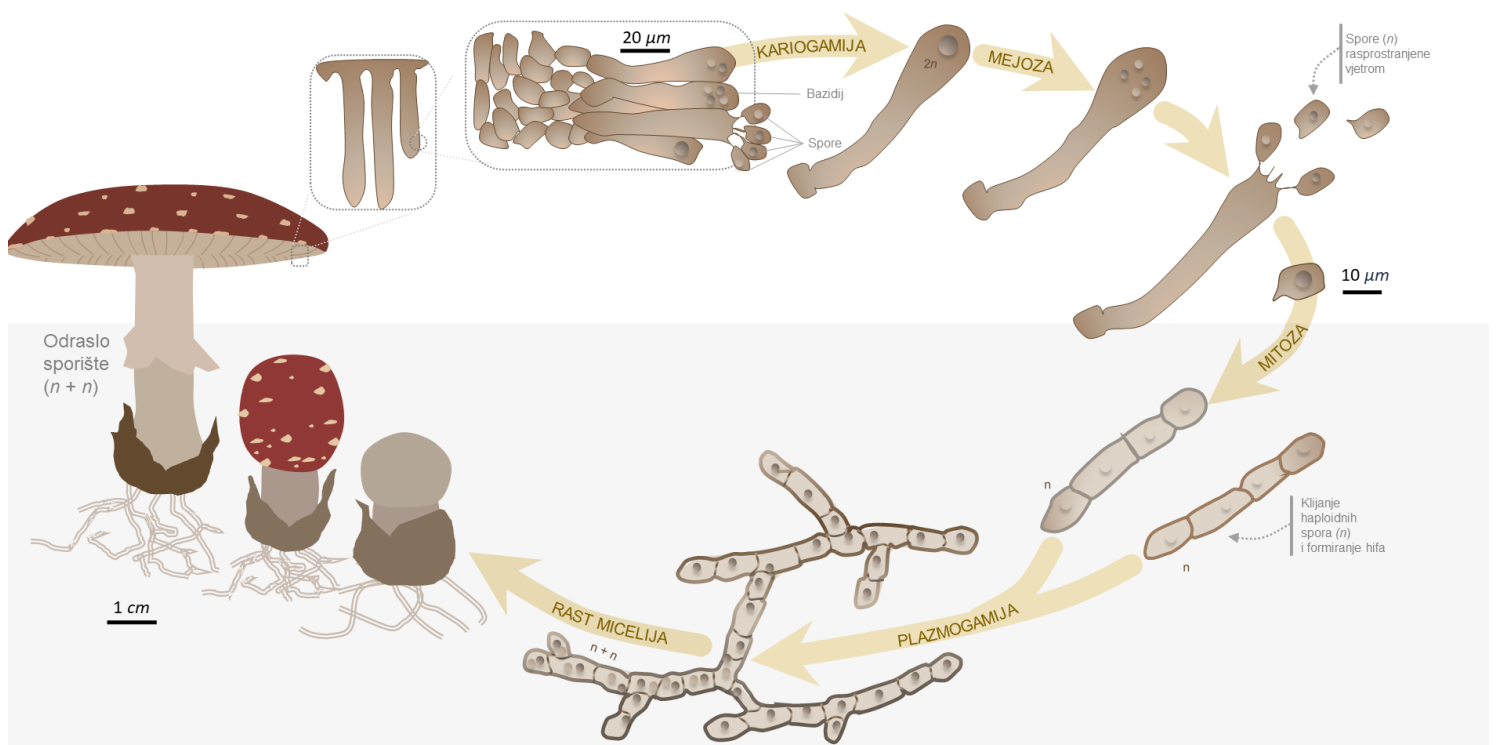
Determinirao Roko Levar uz pomoć volontera iz Sam Mitchel herbarija gljiva, Botanički vrt Denver, Kolorado, Sjedinjene Američke Države. Uslikano analognim fotoaparatom *Mamiya RZ67* na filmu srednjeg formata *Kodak Portra 400*. Autori fotografija Rafael Bertó Cuerda i Roko Levar.

U carstvu gljiva postoji najmanje 11 odjeljaka od kojih su 7 koljena, 4 potkoljena i polifiletska skupina Zygomycota. Unutar svake od tih skupina postoji velika raznolikost (Slika 2).



**Slika 2. A.** Pregled filogenetske raznolikosti gljiva (Fungi) i njihovih najbližih srodnika (Holomycota ili Nucleotmycea). Prikazane su više taksonomske skupine unutar eukariotske supergrupe Obazoa (Opisthokonta, Apusozoa i Breviatea). Referentno stablo konstruirano je prema Adlu i sur. (2019), Brownu i sur. (2013), Cavalier-Smithu (2013), Dohrmannu i Wörheideu (2017), Hibbetu i sur. (2007), Kissu i sur. (2019), Liju i sur. (2021), i Spatafori i sur. (2016). **B.** Otvorena pitanja u evolucijskoj biologiji gljiva prema Liju i sur. te četiri jednako moguće topologije kao odgovori na pitanje "Koji su odnosi unutar Basidiomycota?". Prilagođeno iz Skeje (2022).

Genom gljiva pohranjen je u staničnoj jezgri okruženom membranom u obliku kromatina. Opisana karakteristika čini ih eukariotima (Hawksworth i Lücking 2017). Za razliku od biljaka, genomi gljiva relativno su kratki, od otprilike 10 do 170 Mb (Mohanta i Bae 2015). Tjelesna organizacija gljiva najčešće se dijeli na jednostanične kvasce ili višestanični micelij. To je razgranata mreža hifa koja se smatra tijelom gljive. Međutim, mogući pojavni oblici gljiva puno su raznolikiji od toga (Gostinčar i sur. 2022). Stanična stijenka ove skupine organizama građena je od hitina, hitozana i glukana (Bowman i Free 2006). Za razliku od kolesterola prisutnog u životinjskim staničnim membranama, gljive imaju ergosterol (Heitman i sur. 2017). Osim organela koje posjeduju i drugi eukarioti, posebna stanična tijela gljiva su Woroninovo tjelešće karakteristično za gljive mješinarke te Spitzenkörper. To je set gusto poslaganih sekretornih vezikula prvi vrhu hifa. (Heitman i sur. 2017) Apsorptivni su heterotrofi jer ne mogu samostalno sintetizirati hranu pa energiju dobivaju razgradnjom organske tvari iz okoliša. Prije apsorpiranja hranjivih čestica u organizam ispuštaju probavne enzime van stanica (El-Gendi i sur. 2021). Heterotrofan način života doveo je do različitih životnih strategija. Za razliku od životinja koje unose hranu u tijelo, gljive su saprotrofi čije tijelo raste kroz hranu koju probavljaju. Hranjive tvari gljive mogu dobiti i ulaskom u simbiotske odnose s drugim vrstama. Prehrana parazitskih gljiva temelji se na apsorpciji hranjivih tvari s tijela domaćina. Većinom parazitiraju na biljkama, životinjama ili drugim makroskopskim gljivama. Spolno razmnožavanje gljiva stapčarki prikazano je na Slici 3., a osim toga biti i nespolno (pupanjem) ili fragmentacijom micelija što ovisi o skupini gljiva (Heitman i sur. 2017).



**Slika 3.** Životni ciklus gljiva stapčarki (Basidiomycota)

Prilagođeno prema *Cape Town Exotic Mushrooms - The life cycle of mushrooms* (pristupljeno 10. kolovoza 2024.)

Gljive su široko rasprostranjenije na svim kopnenim staništima. Njihova brojnost smanjuje se s udaljenošću od ekvatora (Tedersoo i sur. 2014). Mogu preživjeti u pustinjama, na Antartici, u hidrotermalnim izvorima dubokih oceana te u svemirskim postajama (Onofri i sur. 2015, Keeler i sur. 2021, Nikitin 2023).

### 3. ULOGA GLJIVA U OKOLIŠU

#### 3.1. VAŽNOST GLJIVA ZA STANIŠTA I NJIHOVU STABILNOST (LOKALNO)

Gljive su temelj ključnih procesa u okolišu. Najočitije ekološke uloge gljiva su razlaganje organske tvari uz transformaciju spojeva, parazitizam na biljkama ili životinjama te stvaranje mikoriznih zajednica s algama ili cijanobakterijama (El Mountassir i sur. 2018). Još od početka koloniziranja kopna gljive imaju važnu ulogu u razgradnji anorganskih spojeva i stvaranju tla. Trošenje stijena složen je skup bioloških, kemijskih i fizičkih procesa koji doprinose pedogenezi i kruženju minerala (Robertson i Paul 2000). Gljive su direktno ili indirektno uključene u sva tri biogeokemijska mehanizama. Lihenizirane, slobodno živuće ili mikorizne gljive izravno doprinose biomehaničkom trošenju mineralnih stijena. Bušenjem mikroperforacija i raspadom površine stijena na manje čestice uslijed penetracije hifa, povećava se kemijska reaktivnost minerala (Buscot 2023, Grąz 2024). Sintezom i otpuštanjem liganda, organskih kiselina ili drugih oksidansa i reducensa, gljive kemijski utječu na raspad stijena. Primjer je oksalna ili etan-dikarboksilna kiselina (Grąz 2024). To je strukturno najjednostavnija dikarboksilna kiselina. Jedna je od najjačih organskih kiselina i često je detektirani sekundarni metabolit među spojevima koje gljive izlučuju u izvanstanični prostor (Gadd 1999, Grąz 2024). Biosinteza oksalne kiseline odvija se katabolizmom glukoze preko Krebsova ciklusa do oksaloacetata. Hidrolizom oksaloacetata nastaju oksalat i acetat koji se katalizira oksaloacetazom u citosolu (Gadd 1999). Sinteza oksalata može se provoditi i kao dio glioksilatnog ciklusa oksidacijom glioksilata. Uz prisutnost ugljikova dioksida oksalat se može metaboličkim putem mineralizirati u karbonate kao dio puta oksalat-karbonata, OCP (Syed i sur. 2020). Ulazak oksalata u taj metabolički put predstavlja važnu ulogu u pedogenezi i skladištenju ugljikovih spojeva (Syed i sur. 2020). Reakcijom oksalne kiseline s kalcijem bogatim spojevima dolazi do kemijskog trošenja stijena pri čemu nastaju kalcijevi oksalati koji se relativno teško otapaju i skladište u tlu (Verrecchia i sur. 2006). Oksalotrofne bakterije u suradnji s gljivama razgrađuju kalcijeve oksalate što dovodi do lokalnog povećanja pH u reakcijskom sustavu. Uvjeti povišenog pH pomiču kemijsku ravnotežu na stranu produkata što pridonosi nastanku kalcijeva karbonata. Njegovo stvaranje ključna je karika u formiranju tla i nastanku sekundarnih karbonatnih spojeva.



Nastali spojevi stabiliziraju strukturu tla i povećavaju sposobnost zadržavanja vode i u njoj otopljenih nutrijenata. Osim za formiranje tla, biotičkim trošenjem stijena gljive dolaze do suštinskih minerala poput kalija, fosfora, kalcija ili drugih elemenata u tragovima. Primjer za to su siderofori. To su male molekule s velikim afinitetom za keliranje željeza koje gljive izlučuju u izvanstanični prostor. To je posebno važno za željezove (III) ione koji su biološki nedostupni ili u uvjetima gdje je izvor željezovih iona rijedak (Gadd 1999, Verrecchia i sur. 2006, Syed i sur. 2020). Gljive time postaju važan izvor minerala u staništu potrebnih za druge organizme (Graż 2024).

Sljedeća važna komponenta tla su organski spojevi. Izvor organskih spojeva u tlu su ostaci uginulih organizama. Parazitske gljive ubrzavaju proces vraćanja nutrijenata u tlo usmrćivanjem domaćina. Na taj način gljive mogu kontrolirati kruženje nutrijenata (Hawkins i sur. 2023). Saprotofne gljive razgrađuju složenu mrtvu organsku tvar na jednostavnije spojeve. Djeluju kao primarni, sekundarni i tercijarni razlagači (Grinhut i sur. 2007). Uloga primarnih razlagača je sinteza enzima koji započinju razgradnju najstroženijih organskih spojeva poput lipida, proteinskih polimera i ugljikohidrata. Važno je istaknuti ulogu gljiva u razgradnji spojeva od kojih je građen biljni materijal. Celuloza, hemiceluloza, škrob i lignin složeni su te široko zastupljeni polisaharidi (Niego i sur. 2023). Prema sposobnosti razgradnje komponenti drva gljive se mogu podijeliti u dvije skupine. Gljive smeđe trulosti (eng. „*brown rot fungi*“) mogu razgraditi celulozu, hemicelulozu i druge polisaharide (Chai i sur. 2022). Celulaze i hidrosilni slobodni radikali odgovorni su za njihovu uspješnu razgradnju. Ipak, za razgradnju lignina potreban je poseban enzimski sustav koji u gljiva smeđe trulosti ne postoji. Moguća je samo modifikacija lignina poput oksidacije bočnih ogranaka, oksidativne demetilacije ili depolimerizacije. Zbog nemogućnosti razgradnje lignina gljive smeđe trulosti prepoznatljive su po stvaranju lomljivih heksaedara smeđe ili crveno-smeđe boje u drvu (Chai i sur. 2022). Sposobnost razgradnje lignina ima heterogena skupina gljiva bijele trulosti (eng. „*white rot fungi*“) (Silva i sur. 2023). Ova skupina smatra se najznačajnijim organizmima za razgradnju lignina u prirodi. U njih spadaju različite vrste gljiva iz evolucijske linije Dykaria za razliku od gljiva smeđe trulosti. U tu skupinu većinom spadaju gljive iz koljena Basidiomycota. Za enzimsku razgradnju lignina odgovorni su lignolitički izvanstanični enzimi koji imaju jaku oksidativnu aktivnost i nisku specifičnost prema supstratu. Najčešće to su lakaze, lignin peroksidaze, mangan peroksidaze te druge oksidoreduktaze i oksidaze koje gljive bijele trulosti izlučuju u okoliš. Neke gljive bijele trulosti, poput roda *Trametes* sp., uz lignin mogu uspješno razgraditi celulozu i hemicelulozu (Pulingam i sur. 2022, Reshmy i sur. 2022, Silva i sur. 202br. 3).

Gljive imaju vitalnu ulogu u preživljavanju većine biljaka, smanjuju im biotički stres, poboljšavaju imunitet ili opskrbljuju nutrijentima (Niskanen i sur. 2023). Zajednice između gljiva i biljaka mogu biti endofitske, filosferne ili rizosferne od čega je najistaknutija mikoriza. Simbiotski odnos s korijenom vaskularnih biljaka star otprilike 450 milijuna godina održao se do danas u većini biljnih svojiti (Cairney 2000). Količina zapisa iz geološke prošlosti o takvom obliku interakcije je oskudna (Strullu-Derrien i

sur. 2018). Međutim, poznato je da 85 % recentnih vrsta biljaka sudjeluje u razmjeni nutrijenata s gljivama (Rimington i sur. 2020). Pirozynski i Malloch (1975) postavili su hipotezu da evolucija današnjih kopnenih biljaka ne bi ni bila moguća bez mikoriznog mutualističkog odnosa.

Koristeći se dostupnim nutrijentima iz tla, gljive izrastaju u micelij, gustu mrežu cjevastih stanica koje koloniziraju tkiva svojih biljnih partnera. Mikoriza označava simbiotski oblik udruženja između korijena biljke te gljive iz tla. Otkrivena su četiri tipa mikoriznih odnosa s obzirom na način međudjelovanja između simbionata. Najveći udio biljaka sa 72 % sudjeluje u arbuskularnoj mikorizi, 10 % čine orhideje u mikorizi, 2.0 % su ektomikorizne biljke, a 1.5 % biljaka pripada erikoidno-mikoriznom tipu. Tek 8 % svih biljnih vrsta u potpunosti ne razmjenjuje nutrijente s gljivama, a 7 % ih fakultativno sudjeluje u arbuskularnoj mikorizi (Brundrett i Tedersoo, 2018).

Iz stanica domaćina koje mogu fotosintetizirati, gljive obično preuzimaju ugljikove spojeve u obliku šećera, alkohola i aminokiselina (Tedersoo i sur. 2020). Stanice korijena opskrbljene su zauzvrat dušikom i fosforom koji su esencijalni elementi za biljni metabolizam (Strullu-Derrien i sur. 2018). Osim razmjene tvari, mreže hifa imaju važnu ulogu u transportu i pohrani. Rast u obliku micelija omogućava transport te preraspodjelu organskih spojeva i minerala u tlu. Fosfor iz fosforom bogatog tla preusmjerava se kroz micelij prema tkivu korijena domaćina gdje ga nedostaje (van't Padje i sur. 2021). S obzirom na to da je ova biološka razmjena dvostrana, ogranci istog micelija primaju različitu količinu ugljikovih atoma od različitih biljnih partnera u mikorizi. Na taj način gljive strateški dovode mineralne tvari uz korijen određenih domaćina diskriminirajući druge partnere. Najisplativiju razmjenu vrše upravo preusmjeravanjem suviška minerala prema tkivu onih biljaka koje zauzvrat nude više ugljikohidrata (Kiers i sur. 2011). Primarnom razgradnjom, jednostavni organski spojevi i detritus ulaskom u micelij postaju dostupni drugim organizmima. Time se u tlu stvara složena hranidbena mreža. Zbog prinosa organske tvari o kojoj ovise brojni protisti, bakterije i mikrofauna, gljive pozitivno utječu na bioraznolikost tla (Frąc i sur. 2018). Procjenjuje se da je otprilike 60% svih vrsta na Zemlji živi u tlu (Anthony i sur. 2023). Tlo je zbog toga stanište s najvećom bioraznolikošću na Zemlji. Micelij gljiva pomaže i stabilnosti tla, sprečava eroziju i ispiranje staništa (Zhang i sur. 2020).

### 3.2. VAŽNOST GLJIVA ZA EKOSUSTAVE (GLOBALNO)

Iz primarnih uloga gljiva u razgradnji tvari može se naslutiti da gljive imaju važnu ulogu u procesima kruženja elemenata u prirodi. Kao razlagači organske tvari, najistaknutija je uloga gljiva u biogeokemijskom ciklusu ugljika (Grąz 2024). Jedno od najvećih rezervoara ugljika na zemlji je tlo (Batoool i sur. 2024). Ugrubo 75 % terestričkog ugljika pohranjeno je ispod zemlje (Hawkins i sur. 2023). Biomatom gljive su najzastupljeniji organizmi ovog staništa (He i sur. 2020). Koristeći se dostupnim

nutrijentima iz tla izrastaju u micelij čije hife mogu kolonizirati tkiva svojih biljnih partnera. Oko 92 posto recentnih vrsta kopnenih biljaka u mikoriznoj je interakciji s barem jednom vrstom gljiva (B. Wang i Qiu, 2006). Mikorizne gljive nalaze se na pragu ulaska ugljikovih spojeva u hranidbene mreže tog staništa te služe kao krajnji odvodni kanali i spremnici ugljika. Biljke fotosintezom stvaraju glukozu u kojoj ugljik ima velik udio u molekulskoj masi. Ključni početni spojevi u složenom nizu fotosintetskih reakcija su voda i atmosferski ugljikov dioksid do kojeg biljke dolaze preko puči na površini lista. S obzirom na to da su biljke nepokretni organizmi, dostupnost vode i esencijalnih elemenata za njihov metabolizam je ograničena. Stanice korijena mogu samostalno crpiti vodu i otopljene mineralne tvari iz tla. Međutim, učinkovitost primanja potrebnih elemenata pospješena je simbiotskim odnosom korijena biljke i gljive (Wahab i sur. 2023). Mikorizne gljive dodatno opskrbljuju biljke vodom i esencijalnim elementima iz tla. Najvažniji element koji gljive dopremaju je fosfor. Zauzvrat gljive primaju složene ugljikohidrate poput šećera i lipida potrebne za rast i razvoj ogranaka hifa (Wahab i sur. 2023). Organskim spojevima koje primaju gljive koriste se i drugi organizmi u tlu koje koriste za rast i razvoj. Ugibanjem organizama i razlaganjem organskih tvari u oksičnim uvjetima kao nusprodukt nastaje plinoviti ugljikov dioksid. Njegovim vraćanjem u atmosferu zatvara se kruženje ugljika prisutno u svakom ekosustavu (Kirchman 2018).

Globalni utjecaj gljiva na ekosustave značajan je u regulaciji vremenskih prilika i oborina. Makroskopske gljive u prosjeku ispuste 50 megatona spora u atmosferu godišnje. To ih čini najzastupljenijim živućim česticama u zraku. Nakupljanjem spora kao netopljivih čestica u oblacima povećava se gustoća smjese. Nakon prelaska kritičnog praga, spore su okidač za formiranje kapljica kiše koja pozitivno utječe na rast gljiva u tlu (Hassett i sur. 2015).

## 4. PRIMJENA GLJIVA U RJEŠAVANJU EKOLOŠKIH IZAZOVA

### 4.1. UKLANJANJE UGLJIKA

#### 4.1.1. Potencijal mikorize u pohrani ugljika

Na globalnoj je razini procijenjeno da 13,12 Gt ugljikova dioksida kojim se koriste kopnene biljke barem privremeno uđe u podzemni sustav kroz micelij mikoriznih gljiva. Taj iznos odgovara količini od 36 % ugljikova dioksida koji se trenutno ispušta u atmosferu na godišnjoj razini. Ektomikorizne gljive godišnje primaju ekvivalent od otprilike 9,07 Gt ugljikova dioksida godišnje. Za razliku od njih, arbuskularne mikorizne gljive primaju manji iznos od 3,39 Gt. Međutim, globalno su arbuskularne mikorizne zajednice puno češći tip mikorize. Ostatak od 0,12 Gt izdvaja se na ektomikorizni tip. Uzevši u obzir da je tlo jedno od najvećih rezervoara ugljika na Zemlji, mikorizne gljive mogu imati ulogu u snižavanju koncentracije ugljikova dioksida u atmosferi i limitiranje globalnog zagrijavanja uzrokovanog učinkom staklenika. Proučavanjem obrazaca protoka tvari kroz

micelije različitih vrsta gljiva, dobivamo uvid u još nedovoljno istražen potencijal mikoriznih udruženja za skladištenje ugljika. Zbog malog broja provedenih eksperimenata u prirodnom staništu, raste potreba za terenskim istraživanjima i globalnim kartiranjem mikoriznih tipova s ciljem očuvanja ekosustava koji su ključni za pohranu ugljika (Hawkins i sur. 2023).

#### 4.1.2. Usporedba tehnologije hvatanja i skladištenja ugljika s pohranom ugljika u miceliju

Ideja za razvijanje tehnologija hvatanja i skladištenja ugljika (eng. „*carbon capture i storage*“, CSS) potaknuta je s ciljem ublažavanja posljedica klimatskih promjena. To je proces u kojem se molekule ugljikova dioksida hvataju u različitim fazama industrijskog pogona, u elektranama ili direktno iz zraka (Bandilla 2020). U slučaju elektrana to može biti prije izgaranja, poslije izgaranja ili tijekom izgaranja goriva s kisikom (eng. „*oxy-fuel*“ izgaranje) (Ngu 2024). Cilj je ekstrahirani fosilni plin iz atmosfere pohraniti i trajno zadržati u podzemlju. To se odvija u tri koraka. Prvi je hvatanje odnosno odvajanje plinova iz elektrane (eng. „*carbon capture*, CC), zatim transport uhvaćenog ugljikova dioksida i naposljetku pohrana. Zbog toga što se CSS tehnologija koristi uz kontinuiranu upotrebu i emisije stakleničkih plinova smatra se prijelaznom tehnologijom. Nedostatak ovih pogona je to što je za uspješno hvatanje i kasniju pohranu velikih količina ugljikova dioksida potrebno uložiti otprilike dodatnih 30 % energije potrebne za rad elektrane. Da bi se ograničilo globalno zagrijavanje potrebno je pohraniti veliku količinu ugljikova dioksida. Stoga je radi lakšeg razumijevanja razvijen koncept klinova (eng. „*wedges*“). Svaki klin predstavlja smanjenje emitiranog ugljikova dioksida od 25 Gt u razdoblju od 50 godina. Dostizanje jednog klina podrazumijeva da se sve emisije iz otprilike 800 elektrana na ugljen uspješno uhvate i pohrane u podzemlje (Bandilla 2020). Trenutnim CCS tehnologijama moguće je uhvatiti otprilike 85-95 % proizvedenog ugljikova dioksida u elektrani (Wilberforce i sur. 2021). Do 2020. godine postojalo je ukupno pet CCS industrijskih pogona u cijelome svijetu i nijedna od njih nije bila vezana za elektrane na fosilna goriva. Drugih šest postojećih pogona za hvatanje ugljika koji su vezani uz elektrane na ugljen ili naftu za cilj imaju obogaćivanje naftnih derivata umjesto skladištenja ugljikovih spojeva. Zajednička godišnja stopa hvatanja ugljika u svih pet postojećih CSS pogona iznosila je 6.5 Mt (Bandilla 2020). Na globalnoj razini zaključno s 2023. godinom 43 CSS postrojenja je u pogonu, 190 njih je u fazama rana razvoja, a novih 32 je u procesu izgradnje. Trenutno CSS postrojenja u svijetu hvataju 0,12 % globalnih godišnjih emisija. (Statista 2024). Unatoč tome što je vidljiv porast broja CSS pogona, trošak za njihov pogon razlikuje se ovisno o primijenjenim tehnologijama, lokaciji i učinkovitosti, a može biti između 20 i 100 milijuna eura godišnje (Rubin i sur. 2015).

Europska je komisija 6. veljače 2024. godine usvojila strategiju industrijskog upravljanja ugljikom (COM/2024/62). Tim dokumentom definirani su koraci koje je potrebno poduzeti za uspješno uklanjanje ugljika iz atmosfere. Prema njoj predloženo je skladištenje od najmanje 50 Mt ugljika godišnje do 2030. godine te ukupno 450 Mt do 2050. godine uz ulaganje od 3,3 milijardi eura. Za zaustavljanje globalnog zagrijavanja ispod 3 °C potrebno je uhvatiti 10 klinova odnosno 250 Gt (250000 Mt) ugljikova dioksida. Prema tim podacima do 2050. godine Europska unija bi CSS tehnologijama uhvatila i pohranila 0,18 % ugljika od potrebnog (Bandilla 2020). Udio globalnih emisija ugljikova dioksida koje su zemlje Europske unije od 1850. do 2020. godine ispustile iznosi 18 % ili 80 Gt CO<sub>2</sub>. (Friedlingstein i sur. 2022) Unatoč tome što postoji veliki razmjer između emisija CO<sub>2</sub> u povijesti te količine koji se planira pohraniti u Europskoj uniji CSS tehnologijom, važno je napomenuti da je ovaj izračun izveden s ciljem ograničavanja zagrijavanja ispod 3 °C. Europska se komisija kao potpisnica Pariškog sporazuma zajedničkim naporima obvezala zaustaviti globalno zagrijavanje na 1.5 °C. Ta temperaturna granica je upola manja i podrazumijeva još veće napore. Iako ovo nije jedini način skladištenja ugljika, postojeće strategije daleko su od ambicioznih za postizanje pravno obvezujućih ciljeva Unije dok god se bilježi porast globalnih emisija.

Svi CSS pogoni u svijetu trenutno pohranjuju 0,12 % globalnih godišnjih emisija, a istovremeno mikorizne gljive 36 % (Hawkins i sur. 2023, Ian Tiseo 2024). Nasuprot tehnologiji koja je izumljena i usavršavana u zadnjih nekoliko desetljeća, mikorizna zajednica između gljiva i biljaka koja doprema ugljikove spojeve u tlo evoluirala je tijekom 400 milijuna godina. Autori koji proučavaju mikorizne gljive kao skladište ugljika u tlu tvrde da prve podatke o njihovom učinku treba tumačiti s oprezom. Međutim navode da su i procjene koje su uzete i objavljene u radu s 13,12 Gt ugljika koji prođe micelijem vrlo konzervativne (Hawkins i sur. 2023). Iako je potrebno ispitati trajnost pohrane i troškove zaštite, postaje jasno da je nemoguće zanemariti gljive ako se govori o strategijama smanjenja ugljikova dioksida iz atmosfere. U skladu s time važno je nastaviti široka mikološka istraživanja na globalnoj razini. Za to je potrebno ulaganje dodatnih sredstava i aktivo zalaganje za potencijalna rješenja koje gljive nude.

## 4.2. OBNOVA STANIŠTA

Globalne politike za zaštitu okoliša u fokus stavljaju ekološku obnovu. Konvencija Ujedinjenih naroda za Biološku raznolikost kao jedan od svojih 20 ciljeva postavlja obnovu najmanje 15 % degradiranog okoliša u svijetu (Asmelash i sur. 2016). Ekološka obnova definirana je kao proces kojim se potpomaže oporaviti oštećen, uništen ili degradiran ekosustav. Cilj obnove je vratiti pripadajuće vrijednosti koje su svojstvene tom ekosustavu što uključuje i pružanje dobra ljudima (Shilky i sur. 2024). Najveći potencijal u obnovi staništa imaju arbuskularne mikorizne gljive (AMF) zbog svojeg širokog spektra funkcija ekosustava, globalne rasprostranjenosti te različitih vrsta biljaka s kojima su u zajednici. Povezivanjem korijenskih stanica biljaka s vanjskim hifalnim produženjima arbuskularnih mikoriznih gljiva površina za apsorpciju nutrijenata može se povećati od 100 do 1000 puta. Ta osobina može biti od vitalnog značaja za preživljavanje mladih biljaka nakon klijanja te osnivanja biljnih zajednica pogotovo u staništima s uvjetima abiotičkog ili biotičkog stresa. Biljkama se preko arbuskula u stanicama korijena povećava dovod esencijalnih nutrijenata, a povezane hife u tlu učvršćuju strukturu tla i smanjuju gubitak vode. Sve to za posljedicu stvara otpornost biljaka na dodatne ekološke stresove, pospešuje njihov rast i razvoj, smanjuje potreba za gnojivima, povećava reproduktivni uspjeh, prinos te ekološki fitness. U skladu s time, arbuskularne mikorizne gljive imaju značajan utjecaj u sukcesiji, stvaranja biljnih zajednica te ekološkoj obnovi staništa. Primjena arbuskularnih mikoriznih gljiva prije svega može se pronaći u obnovi poljoprivrednih zemljišta gdje je tlo degradirano, područja zahvaćenog krčenjem šuma, opožarenog područja, rudnika te urbanih područja (Stamets 2005, Asmelash i sur. 2016).

## 4.3. REMEDIJACIJA (RAZGRADNJA ŠTETNIH TVARI)

### 4.3.1. Razgradnja kemikalija, teških metala i otrovnih spojeva

Osim gubitka bioraznolikosti i klimatskih promjena, treći veliki čimbenik koji negativno utječe na uravnoteženost ekosustava i zdravlje ljudi je zagađenje okoliša. Izvori i odredišta zagađenja mogu biti različiti. Najčešće se radi o zagađenoj vodi i tlima zbog doticaja s neadekvatno zbrinjavanjem otpadnim vodama iz kućanstava te industrijskih pogona. Izvor zagađenja mogu biti i poljoprivredna postrojenja zbog štetnih praksi koje se primjenjuju. Devedesetih godina prošlog stoljeća procijenjeno je da je 22 milijuna hektara površine zagađeno, a u međuvremenu se porast industrijalizacije i urbanizacije još više ubrzao. O tome koliko je ovo značajan problem govori podatak da je zagađenje okoliša uzrok 16 % smrtnih slučajeva godišnje na svjetskoj razini. Za rješavanje ovog problema razvijeno je nekoliko kemijskih i fizičkih metoda za pročišćavanje štetnih kemikalija. Međutim, korištene metode su skupe, stvaraju štetne nusprodukte te učinkovitost nije zadovoljavajuća posebno prema visokotoksičnim spojevima u malim koncentracijama (Akhtar i Mannan, 2020).

Ispiativa, ekološki prihvatljiva i prirodna alternativa sa značajnim učinkom u otklanjanju štetnih čestica iz okoliša je mikoremedijacija. Dio je biotehnološkog procesa bioremedijacije kojim se koriste živi organizmi za uklanjanje štetnih čestica iz tla, zraka ili vodenog okoliša (Alexander i Loehr, 1992). Zbog svoje iznimne i raznolike enzimске moći, brzog i gustog rasta hifa te široke ekološke valencije prema temperaturi, pH i salinitetu staništa u kojima preživljavaju, gljive su idealna skupina organizama za razgradnju različitih štetnih spojeva iz prirode. Dodatne karakteristike gljiva koje su korisne u remedijaciji je velik omjer površine naspram volumena zbog cjevastog oblika hifa što pogoduje boljoj apsorpciji. Neke gljive otporne su na teške metale te imaju sposobnost keliranja metalnih iona u proteinske strukture (Akhtar i Mannan, 2020).

Ispitivanja učinkovitosti gljiva u otklanjanju štetnih spojeva koja su do sad provedena usmjerena su najčešće na policikličke aromatske ugljikovodike (PAH-ove), teške metale, otpadne vode iz poljoprivrednih postrojenja, otpadne spojeve kemijskih i farmaceutskih industrija i neke vrste plastike. Policiklički aromatski ugljikovodici spojevi su koji u okoliš mogu doći prirodnim putem ili ljudskom djelatnošću. Pri tome najčešći izvor ovih spojeva je ispuštanje tijekom nepotpunog izgaranja drva, ugljena, nafte i naftnih derivata. Karakteristika svih spojeva je više stopljenih benzenskih prstenova jedan do drugoga. Primjer takvog spoja je piren. Doticaj policikličkih aromatskih spojeva s ljudskim organizmom oslabljuje imunitet, uzrokuje smetnje pri disanju, alergije i rak kože ili pluća. S obzirom na to da se ovi spojevi teško razgrađuju u okolišu dolaze u hranidbene mreže i dodatno narušavaju zdravlje organizama. Već spomenuti enzimski set gljiva koji se sintetizira za razgradnju lignina može razgraditi i benzenske prstenove u ovim spojevima. Lakaze, lignin peroksidaze i mangan peroksidaze nespecifični su enzimi prema supstratu i mogu na sebe vezati benzenske prstenove koji su inače i dio složene strukture lignina. Oksidacijom PAH-ova, lignolitički enzimi kataliziraju nastanak cikličkog alkohola kvinona koji se kasnijom metabolizmom može razgraditi do linearnih spojeva.

Postoji nekoliko vrsta gljiva koje u potpunosti mogu razgraditi ove aromatske spojeve do ugljikova dioksida. Za poboljšano izlučivanje lignolitičkih enzima gljive je moguće podvrgnuti stanju bez dušika i ugljika u okolini koji su inače nužni za njihov normalan rast (Akhtar i Mannan, 2020). Primjena razgradnje PAH-ova u prirodi pronađena je u oporavku okoliša koje je pogođeno izlivanjem nafte. U tom slučaju koristile su se bukovače, vrsta *Pterotus ostreatus* (Stamets 2005).

Prisutnost teških metala može biti limitirajući faktor za sintezu enzima za razgradnju PAH-ova zbog svoje toksičnosti prema gljivama bijele trulosti. Najčešće prisutni metali su srebro, kadmij, živa, arsen, krom, bakar i nikal. Antropogenim aktivnostima dolaze u okoliš iz tekstila, bojila, pesticida, elektroničkog otpada, prezervativa, rudarenja ili drugih izvora. Osim što zbog svojih kancerogenih i mutagenih svojstava nakupljanjem u organizmu predstavljaju opasnost za zdravlje, teški metali štetno djeluju i na okoliš. Mogu smanjiti prinos biljaka, fotosintetsku aktivnost te u potpunosti usmrtniti

zajednice vodenih organizama. Za njihovo uklanjanje iz okoliša korištene metode često su neučinkovite, zahtijevaju visoku količinu energije, skupe su i mogu promijeniti sastav tla. Nekoliko vrsta gljiva poput rodova *Fusarium*, *Aspergillus* i *Plerotus* koje se prirodno nalaze u okolišu, ne samo da pokazuju visoku otpornost na različite vrste teških metala, već njihovim apsorpiranjem mogu ukloniti teške metale iz tla poboljšati rast i prinos biljaka. Preostali ograničavajući čimbenik je razvijanje strategije koja će nakon remedijacije otkloniti gljive i nakupljene teške metale u njima (Asmelash i sur. 2016).

#### 4.3.2. Razgradnja plastike

Primjena mikoremedijacije ispitana je i za uklanjanje farmaceutskog otpada, antibiotika, deterdženata, boja i plastike. Godišnja proizvodnja plastičnih proizvoda premašuje 300 milijuna tona godišnje. Iako je njena proizvodnja jeftina te ima primjenu u širokom aspektu ljudskih aktivnosti, njen najveći nedostatak je spora razgradnja. Posljedica toga je prekomjerno nakupljanje plastičnog otpada u okolišu. To je problem koji zahtijeva razvijanje učinkovitih strategija za ubrzavanje njezine prirodne razgradnje. Još jednom gljive pokazuju obećavajuću primjenu za rješavanje globalnog problema zagađenja plastikom. Trenutno je zabilježeno više od 200 vrsta različitih gljiva unutar 11 razreda koje imaju sposobnost razgradnje 19 različitih vrsta plastike. Plastika je otporna na razgradnju zbog hidrofobnog karaktera, velike molekulske mase te strukture koja se sastoji od dugih polimernih lanaca. Iako postoji nekoliko metoda razgradnje plastike kao što su kemijska, termalna ili svjetlosna razgradnja, većina za posljedicu ima dodatne štetne učinke kao što je otpuštanje teških metala. Metoda s najmanje štetnih učinaka na okoliš je biološka razgradnja gljivama. Za široku primjenu potrebna su istraživanja o sigurnim načinima razgradnje plastike pomoću gljiva u velikim razmjerima (Ekanayaka i sur. 2022).

### 4.4. ALTERNATIVNI MATERIJALI OD GLJIVA

Tijekom studijskog putovanja u travnju 2024. godine posjetio sam selo Korond (Corund) u Rumunjskoj. To mjesto u Transilvaniji jedino je na cijelome svijetu gdje još otprilike šest obitelji ručno izrađuje proizvode od bukove gube (*Fomes fomentarius*). Osim jedne, sve osobe koje su obučene za ovaj zanat starije su od pedeset godina. Najmlađa osoba koja se bavi ovim zanimanjem ima 35 godina i jedina je koja govori engleski. Susretom s tom osobom pokazan mi je i objašnjen cijeli proces obrade te povijest zanata. Radi poštivanja osoba koje ovu tradiciju drže živom detaljni koraci obrade bit će izostavljeni. Proces započinje potragom za sporištima po Karpatima u radijusu do 400 kilometara od sela. Cilj je pronaći sporišta idealne kakvoće, veličine i starosti isključivo s kore breze. Osim toga potrebno je da stabla rastu na povoljnoj ekspoziciji planine (*Betula* sp.). Prilikom sakupljanja koriste se ručno izrađeni alati i velika pletena torba. Nakon povratka u selo gljive je potrebno pripremiti u četiri koraka bez upotrebe bilo kakvih kemijskih dodataka ili štetnih spojeva. Nakon otprilike dva tjedna,



pripremljena gljiva obrađuje se guljenjem nepotrebnih dijelova srpom. Cilj je ostaviti što veći dio trame basidiokarpa. Udarcima drvenim batom dobiveni se proizvod može učiniti rastezljivim. Ručnim pokretima rastezanja rubova dobije se konačni tanki savitljivi sloj gljive koji ima teksturu baršuna. Naziv za ovaj tekstil je *amadou* i to je ekološki prihvatljiv, kompostabilan i prirodan proizvod bez štetnih spojeva. Od njega se daljnjom obradom izrađuju odjevni predmeti ili presvlači namještaj. Ovaj materijal može pronaći primjenu u tekstilnoj modnoj industriji koja je jedan od najvećih zagađivača. Zbog izuzetno malog broja osoba koje su vješte u ovu zanatu hitno ga treba zaštititi pod UNESCO-vu nematerijalnu kulturnu baštinu.

Osim tekstila, postoji mnogo biomaterijala na bazi gljiva koji imaju različite primjene. Na primjer to su alternativa za polistiren, kožu, građevinski materijal umjesto cigle, proizvodi za smanjenje buke i drugi (Hyde i sur. 2019).

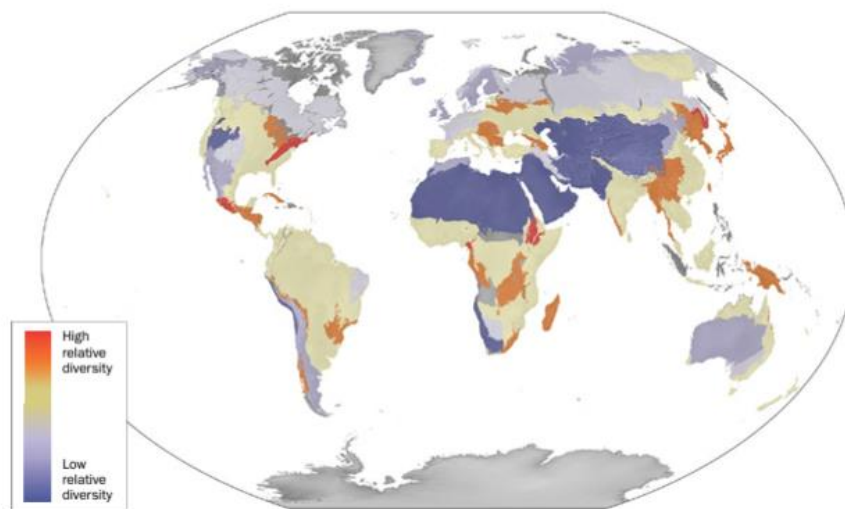
## 5. UGROŽENOST GLJIVA

### 5.1. TRENUTNO STANJE

Globalni trend ispitivanja ugroženosti vrsta unutar poznatih skupina kralježnjaka prati se desetljećima. Za razliku od toga za većinu vrsta gljiva, ali i biljaka, ispitivanja rizika od izumiranja nedostaju (Nic Lughadha i sur. 2020). Takva se ispitivanja temelje na propisanim obrascima koje uzimaju u obzir trenutnu veličinu populacije, trend njezina porasta ili opadanja i mnogo drugih parametara. Spomenuta veličina i trend populacije u mikološkim ispitivanjima teško je procijeniti uz vrlo malo dostupnih podataka. Na osnovu ispitanih kriterija vrste se svrstavaju u kategorije ugroženosti, a prema njima sastavljaju crvene liste (State of the World's Plants i Fungi 2023). Trenutno je ugroženost ispitana za 794 vrsta gljiva. Na Crvenoj listi u visokorizičnim kategorijama nalazi se 328 vrsta gljiva što uključuje kategorije kritično ugroženih (CR), ugroženih (EN) te osjetljivih (VU) vrsta (IUCN 2024). Do danas je opisano oko 150 tisuća vrsta gljiva, a u bazi podataka MycoBank do 29. veljače 2024. navedeno je nešto više od 400 tisuća vrsta (Hyde 2022; MycoBank 2024). Trenutačno znanje o ugroženosti gljiva gotovo je nepostojeće. Samo 0,4 % opisanih vrsta gljiva prošlo je proces procjene ugroženosti (State of the World's Plants i Fungi 2023). Nedostatkom tog znanja dovodi se u pitanje zaštite najugroženijih zajednica gljiva i biljaka. Posljedica toga je nemogućnost predlaganja adekvatnih konzervacijskih politika i moguća znanstvena pristranost. To posebno predstavlja problem zbog mogućeg gubitka kritičnih vrsta gljiva koje su važne za rješavanje globalnih ekoloških problema. Bez obzira, manjak podataka nije opravdanje da se gljive ne zaštiti od izumiranja i spriječe ekološke posljedice koje iz toga proizlaze (Mueller i sur. 2022). Razvoj tehnologija budi obećanje u ubrzanju novih saznanja o gljivama. Primjenom metagenomike i metabarkodiranja kao relativno jeftinih metoda brzo se može iščitati velika količina podataka. DNA sekvence okolišnih uzoraka obogaćuju razumijevanje o ekologiji, rasprostranjenosti, raznolikosti te evoluciji gljiva. Uz to postiže se brže

ažuriranje taksonomije, klasifikacije i filogenije gljiva. To potvrđuju i podaci porasta broja prihvaćenih taksona u posljednjih nekoliko godina (Niskanen i sur. 2023).

Glavne prijetnje ugroženim vrstama gljiva su uništavanje i gubitak staništa, industrijska poljoprivreda, klimatske promjene te zagađenje okoliša. Između svih prijetnji postoji i međuovisnost koja dodatno negativno utječe na očuvanje bioraznolikosti (Nic Lughadha i sur. 2020). U situaciji kada postoji malo podataka važno je ustanoviti svjetska žarišta raznolikosti gljiva te usmjeriti napore na njihovo očuvanje (Slika 4).



Adapted from Niskanen et al. (2023)

**Slika 4.** Prosječna taksonomska raznolikost gljiva na globalnoj razini. Važno je uočiti da označeno područje relativno visoke raznolikosti zahvaća i dio teritorija Republike Hrvatske. Taj podatak izuzetno je važan za kreiranje i provođenje strategija za zaštitu gljiva na nacionalnoj razini.

Izvor: <https://www.kew.org/science/state-of-the-worlds-plants-and-fungi> (pristupljeno 25. kolovoza 2024.)

## 5.2. UNIŠTAVANJE I GUBITAK STANIŠTA

Prema podacima IUCN-a, najčešći razlog ugroženosti u 211 dokumentiranih slučajeva povezanih s gubitkom staništa gljiva su razvoj urbanih sredina izgradnjom stambenih i komercijalnih prostora (Nic Lughadha i sur. 2020). Gubitak staništa osim urbanog razvoja očituje se i u krčenju šuma, proširenju poljoprivrednih posjeda te rudarenju. Sve to smanjuje efektivnu veličinu populacije gljiva i biljaka što ove skupine dovodi pred rub izumiranja. Pri tome se treba uzeti u obzir obligatni trofički odnos između nekih mikoriznih gljiva i biljaka. Izumiranje jednog simbionta može predstavljati ugroženost za drugog (Nic Lughadha i sur. 2020).

### 5.3. KLIMATSKE PROMJENE

Jedan od primjera utjecaja klimatskih promjena na gljive prikazan je usporedbom podataka u Alpama. Pojavnost reproduktivnih tijela brojnih gljiva 2010. godine bila je na značajno višoj nadmorskoj visini u odnosu na 1960. godinu (Diez i sur. 2020). Klimatske promjene mijenjaju i biljne zajednice te smanjuju njihov areal posebno u vrhovima planinskih lanaca i borealnim područjima (Nic Lughadha i sur. 2020). Uslijed klimatskih promjena zabilježene su i fenološke promjene gljiva. Godišnji raspon pojave reproduktivnih tijela makroskopskih gljiva se produljuje, zbog ekstremnih vremenskih prilika postaje nepredvidljiv te se pomiče pri kraju kalendarske godine (Kauserud i sur. 2012). Na osnovu klimatskih projekcija očekuju se češća sušna razdoblja s većim intenzitetom. Suše su okarakterizirane kao produljena stanja oskudna vodom zbog manjka oborina, povećane insolacije i temperature. Iako postoje gljive otporne na sušu koje mogu pomoći preživljavanju biljkama u stresnim uvjetima, kao organizmi koji žive pri površini tla voda je ključan čimbenik za opstanak gljiva (Vicente-Serrano i sur. 2020). Spore mogu preživjeti sušna razdoblja i proklijati u ponovnom doticaju s vodom, ali zajednicu organizama koja zbog posljedica suše umre u tlu teško je ponovno uspostaviti. To ima i velik socioekonomski utjecaj i može potaknuti glad u regijama svijeta podložnim sušama (Nic Lughadha i sur. 2020). Pojava kiselih kiša također negativno utječe na gljive koje ne mogu tolerirati takve uvjete, a najviše su pogođeni lišajevi. Smanjenjem pH usporava se stopa razgradnje organskih tvari u vodenim i kopnenim staništima (Singh i Agrawal, 2008).

### 5.4. INDUSTRIJSKA POLJOPRIVREDA

#### 5.4.1. Moderni uzgoj hrane

U uvjetima klimatskih promjena, narušene bioraznolikosti i nestabilnih socioekonomskih prilika proizvodnja dovoljne količine hrane jedan je od glavnih izazova koje navodi svjetska Organizacija za prehranu i poljoprivredu (FAO). Za dostizanje cilja dovoljno proizvedene hrane u regijama svijeta, poljoprivreda potaknuta povećanjem dobiti ovisna je o raznim industrijskim metodama. Primjena kemijskih i anorganskih gnojiva, pesticida i mehanička obrada tla poznate su prakse za koje se smatra da povećavaju urod usjeva. Međutim, prinos glavnih usjeva u svijetu unatoč porastu ljudske populacije opada (Kuila i Ghosh 2022).

#### 5.4.2. Fertilizatori

Jedna od osnovnih karakteristika biljaka je nepokretnost (Sultanbawa i Sultanbawa 2023). Samostalno mogu sintetizirati hranjive tvari za preživljavanje, ali im je dobavljanje potrebnih nutrijenata relativno ograničeno. Osnovne mineralne tvari koje potrebne biljkama za rast su fosfor, dušik i kalij. Za optimalan uzgoj i prinos koriste se sintetički proizvedena mineralna gnojiva. Ona kompenziraju potrebu iskorištavanja postojećih minerala u tlu koje u normalnim uvjetima gljive crpe i dopremaju do korijena

biljke. Zbog suviška esencijalnih tvari za rast biljke, narušava se razmjena nutrijenata i ovisnost biljaka o mikoriznim gljiva koje imaju ulogu bioloških fertilizatora. Zauzvrat gljive od biljaka ne dobivaju visokoenergetske spojeve nastale fotosintezom što uništava njihov rast u tlu. Radi prehrane životinja u mesnoj industriji s ciljem postizanja brzog i visokog prinosa usjeva, doza gnojiva koja se doprema u tlo konvencionalnim praksama puno je viša nego što je potrebno biljkama za rast. Obično im je potrebno upola manje gnojiva od onoliko koliko dospije u tlo. U njihovu suvišku dolazi do zagađenja tla te procjeđivanja otrovnih spojeva u izvore pitke vode. Time se uništava mikrobiom iz čega proizlazi gubitak lokalne bioraznolikosti i narušeno zdravlje ljudi. Na puno većoj skali, prekomjerna primjena gnojiva u svijetu uništava kruženje elemenata u prirodi. Pritom su najrelevantniji biogeokemijski ciklusi ugljika i dušika (Kuila i Ghosh, 2022). Pri povećanoj količini dušikovih gnojiva, mikrobnom aktivnošću u tlu u procesima nitrifikacije i denitrifikacije formira se dušikov oksid (Freny 1997). Plin je to koji ima 300 puta jači učinak staklenika od ugljikova dioksida (Tian i sur. 2020). Osim toga se dušikov oksid formira i izgaranjem biomase. Spaljivanje biljnih ostataka nakon sjetve upravo je jedna od praksi koja se koristi za uklanjanje poljoprivrednog otpada. U rješavanju svih ovih problema ponovno potencijal ima primjena mikoriznih gljiva. Regenerativnim poljoprivrednim praksama uz primjenu mikoriznih gljiva kao prirodnih gnojiva mogu se obnoviti svojstva tla, zajednice organizama u njemu i ekosustav općenito. Zbog svog relativno brzog rasta u velikim količinama i visoke nutritivne vrijednosti gljive se mogu koristiti kao prijelazno rješenje uzgojem na poljoprivrednim ostacima. Time se biomasa razgrađuje prirodnim putem bez štetnih nusprodukata, dio nutrijenata vraća se u tlo, a usto se potiče prehrana na bazi gljiva koja može riješiti problem gladi u nekim regijama svijeta (Kuila i Ghosh, 2022).

#### 5.4.3. Fungicidi

Riječ fungicid dolazi od latinske riječi *fungi* i sufixa „-cid“ što znači ubojica. Osim što ubijaju fitopatogene vrste gljiva, fungicidi uništavaju i druge organizme prisutne u tlu koji su korisni biljkama. To su sve vrste mikoriznih gljiva. Primjena fungicida u industrijskoj poljoprivredi smanjuje broj živih hifa u i arbuskula, grananje i sjedinjavanje hifa u tlu te skraćuje korijen biljaka (Sukarno i sur. 1993). Nasuprot tome neke gljive mogu djelovati kao biokontrola i same spriječiti dolazak patogena zbog svoje antimikrobne aktivnosti. Primjena takvih gljiva umjesto fungicida još uvijek nije dovoljno prepoznata (Kuila i Ghosh, 2022).

#### 5.4.4. Obradivanje tla

Obradivanje površine tla sastavni je dio modernog uzgoja prehrambenih biljnih vrsta. Primjenjuje se radi učinkovitije razgradnje usitnjenih organskih ostataka usjeva, pripreme za sjetvu, sprječavanje korova ili za dodavanje sintetičkih gnojiva. Upotrebom mehaničkih strojeva za oranje

mijenjaju se biološka, kemijska i fizička svojstva tla (Kabir 2005). Hife gljiva gusto su isprepletene u njegovih prvih površinskih 15 centimetara. Zamijećeno je se da su jednom gramu tla nalazi 50 metara hifa arbuskularnih mikoriznih gljiva. Propagule su dijelovi živih hifa te spore koje mogu osigurati preživljavanje gljiva uspostavom obligatnog simbiotskog odnosa s biljkama. Fragmenti hifa puno su brži u stvaranju arbuskula u stanicama korijena za razliku od spora. Oranjem se fizički uništavaju mreže micelija što otežava ponovnu uspostavu mikoriznih odnosa između korijena biljke i gljiva. To za posljedicu ima smanjenu opskrbu fosforom kojeg gljive dopremaju u korijen biljaka. Kolonizacija korijenskih stanica usporena je i sa sjetvom usjeva u sljedećoj sezoni jer je preživljavanje hifa u umjereno toplim krajevima u periodu od jeseni do proljeća otežano zbog niskih temperatura. Neobrađivanje površine povećava gustoću hifa što tlo čini stabilnijim i doprinosi boljem prinosu biljaka. Sadnjom mikotrofnih pokrovnih usjeva preko zime poput maslačaka dodatno se poboljšava urod u idućoj sezoni (Kabir 2005).

## 5.5. OSTALE PRIJETNJE

### 5.5.1 Prekomjerno i neprimjereno sakupljanje gljiva

Najčešće zamijećene gljive u prirodi zapravo su sporokarpi iz koljena Basidiomycota i Ascomycota. To su organi s kojih se razvijaju i rasprostiru haploidne spore. Razvitak divljih sporišta u većine vrsta ima različit, ali relativno kratak vijek. Trajanje sporišta može biti od nekoliko sati do otprilike mjesec dana. Njihovo pojavljivanje u sezoni može biti samo jedanput, nekoliko puta ili ponekad potpuno izostati. Zbog toga što je razvitak sporišta način za nastavak spolnog razmnožavanja gljiva, njihovo prekomjerno uklanjanje onemogućuje dovršetak životnog ciklusa i razvoja novih generacija. Posebno negativno može utjecati sakupljanje mladih sporišta gljiva u stadiju prije sazrijevanja spora i početka njihova rasprostiranja. Neodgovarajuće branje gljiva poput čupanja sporišta bez upotrebe oštrog predmeta ili iskapanjem može se oštetiti micelij i okolno stanište. Uklanjanje starih i mrtvih gljiva također dovodi do slučaja da veliki broj još uvijek zrelih spora ne dospije do tla (Hrvatsko Mikološko Društvo 2024).

Najpoznatiji primjer ugroženosti iz svijeta zbog prekomjernog branja je entomopatogena gljiva *Ophiocordyceps sinensis*. Ona raste iz tijela gusjenica zakopanih u tlu tibetanskih visoravni. Koristi se u tradicionalnoj kineskoj i nepalskoj medicini, a vrijednost jednog kilograma može sezati od nekoliko desetaka do stotinu tisuća eura (State of the World's Plants i Fungi 2023, Olsvik 2024). Primjer poznatih jestivih gljiva koje su ugrožene zbog prekomjernog branja u Hrvatskoj su prstasta smrčkovica (*Verpa conica*), blagva (*Amanita cesarea*) te Fechtnerov vrganj (*Boletus fechtneri*) (Tkalčec i sur. 2008).

### 5.5.2 Invazivne vrste

Dodatan biotički stres gljivama kao i u slučaju životinja i biljaka mogu predstavljati invazivne strane vrste. Prijevozom i uspostavom plantaža bora prenose se i nenativne vrste mikoriznih gljiva. Takve gljive zamjenjuju populaciju autohtone vrste *Amanita fuligineosisca* koja je obligatni biotrof u Središnjoj Americi (Mueller i sur. 2022).

## 6. ZAŠTITA I LEGISLATIVA

### 6.1. Temelj i počeci pravne zaštite gljiva u svijetu

Gljive su dugo vremena bile izostavljene iz globalnih legislativa za zaštitu prirode. Do 2015. godine gotovo nijedna vrsta gljive nije navedena kao ugrožena na Crvenoj listi IUCN-a (Mueller i sur. 2022). Zajedno sa svojim kolegama Mueller je zaslužan za pokretanje prve crvene liste gljiva 2013. godine. Tada su kao ugrožene vrste dodana dva lišaja i gastronomski važna vrsta *Pleurotus nebrodensis* s obronaka sjeverne Sicilije (Gibbens 2021). Iako nisu obvezujuće, crvene liste mogu poslužiti kao osnova za pravnu zaštitu zbog toga što predstavljaju najbolje dostupno znanje o položaju i trendu ugroženosti vrste (State of the World's Plants i Fungi 2023). Na nacionalnim razinama Crvene se liste gljiva koriste za identifikaciju staništa s prioritetima očuvanja, izradu akcijskih planova te legislativa. Također služe kao vodič za upravljanje prirodnim površinama (State of the World's Plants i Fungi 2023, Tkalčec i sur. 2008). Jedan od postojećih primjera uspješnih napora za konzervaciju gljiva iz svijeta je Zaklada za gljive (eng. „*Fungi Foundation*“) koju je pokrenula poznata terenska mikologinja Giuliana Furci. To je prva neprofitna organizacija za očuvanje gljiva u svijetu. Na inicijativu Zaklade za gljive, 2010. godine Čile je postao prva država u svijetu koja je uključila gljive u reformi Zakona o općim osnovama zaštite okoliša, br. 19.300 (Fungi Foundation 2024). Vlasti nekoliko država svijeta poput Sjedinjenih Američkih Država, Australije i Novog Zelanda počinju prepoznavati njihovu važnost uključujući ih u strategije očuvanja okoliša (State of the World's Plants i Fungi 2023). Novi Zeland ujedno je i prva država u svijetu koja je ilustraciju gljive uvrstila na fizički novac svoje valute. Na novčanici od 50 dolara nalazi se karizmatično plavo sporište native vrste gljive iz koljena stapčarki, *Entoloma hochstetteri*. (Pouliot, osobna komunikacija 17. kolovoza 2024.)



Slika 5. Poštanske marke koje prikazuju sporišta gljiva iz Abhazije, Albanije, Azerbajdžana, Bjelorusije, Farskih otoka, Finske, Gruzije, Indonezije, Konga, Sejšela, Makedonije, Moldavije, Rumunjske, Sovjetskog Saveza i Tadžikistana. Pri dnu fotografije prikazana novčanica od 50 novozelandskih dolara s vrstom *Entoloma hochstetteri*. Fotografije marki preuzete su sa stranice *Wikimedia Commons* te sve imaju javnu domenu dijeljenja, a izvorni prikaz novčanice preuzet je sa stranice [Reserve Bank of New Zealand](https://www.reservebankofnewzealand.govt.nz/) (pristupljeno 12. rujna 2024.)

## 6.2. Zaštita gljiva u Hrvatskoj

Postojeći akti koji uređuju zaštitu gljiva u Hrvatskoj su Zakon o zaštiti prirode (Narodne novine br. 80/2013) te Pravilnik o zaštiti gljiva (Narodne novine br. 34/2002) koji je prestao vrijediti nakon što je objavljen Pravilnik o proglašavanju divljih svojti zaštićenim i strogo zaštićenim (Narodne novine br. 99/2009). Prema datumu objave ovih akata vidljivo je da je Republika Hrvatska imala legislativu za zaštitu gljiva u obliku pravilnika vezanih u zakon ranije od Republike Čile! Zaštićene vrste gljiva i lišajeva u Hrvatskoj navedene su na dvama odvojenim Crvenim popisima. Analizom podataka o bioraznolikosti gljiva do 2008. godine na popis je dodano 349 strogo zaštićenih vrsta. Od toga 55 vrsta svrstano je u kategoriju kritično ugroženih (CR), 77 je ugroženih (EN), 119 osjetljivih (VU), 35 gotovo ugroženih (NT) i 63 nedovoljno poznatih (DD) (Tkalčec i sur. 2005). Prvim Pravilnikom o zaštiti gljiva navedeno je 130 vrsta zaštićenih gljiva., međutim od stupanja Pravilnika br. 99/09 svih 349 vrsta koje se nalaze na Crvenom popisu smatraju se zaštićenima.

Uz Crveni popis publicirana je Crvena knjiga gljiva koja uključuje obradu svih vrsta osim onih iz kategorije gotovo ugroženih (Tkalčec i sur. 2008). Zakonom o zaštiti prirode strogo je zabranjeno bilo kakvo diranje ili izuzimanje strogo zaštićenih vrsta gljiva iz prirode. To uključuje branje, sakupljanje, iskopavanje, uništavanje, rezanje, oštećivanje i sve slične radnje u njihovom prirodnom području rasprostranjenosti. Osim toga zabranjeno je držanje, prijevoz i prodaja strogo zaštićenih vrsta gljiva. Novčana kazna koja je propisana za nepoštivanje Zakona o zaštiti strogo zaštićenih vrsta gljiva iznosi od 25 do 200 tisuća kuna (trenutno otprilike 3 do 27 tisuća eura). Ograničenja postoje i za nezaštićene vrste gljiva. Za osobne potrebe moguće je dnevno sakupiti najviše 2 kilograma nadzemnih i 0,1 kilogram podzemnih sporišta nezaštićenih vrsta gljiva (NN 80/2013).

## 6.3. Legislativa, strategije za zaštitu okoliša i pregled mjera koje uključuju mikološka rješenja na međunarodnoj razini

Carstvo gljiva do 2022. nije usvojeno ni u jednoj međunarodnoj konvenciji o zaštiti okoliša pa tako ni u Konvenciji o biološkoj raznolikosti Ujedinjenih naroda (Pasailiuk 2022).

Europski zeleni plan kreiran je kao odgovor je na globalne prijetnje zbog posljedica uništavanja okoliša i klimatskih promjena. Cilj je postići klimatsku neutralnost na kontinentu. To podrazumijeva svodenje neto emisija stakleničkih plinova na nultu razinu zaključno s 2050. godinom (Delbeke 2024). Ciljevi ovog plana prevedeni su u „Europski zakon o klimi“ pod nazivom Uredba (EU) 2021/1119. Na razini Europske unije propisuje se nekoliko vrsta pravnih akata. Najmanje fleksibilna i obvezujuća vrsta akta koji se može propisati je uredba. Stavke uredbe moraju se u cijelosti primjenjivati u svim državama



članicama. Za razliku od direktiva zemlje članice ne mogu samostalno propisati zakone kojima će odrediti načine za postizanje zadanih ciljeva. Dana 18. kolovoza 2024. godine stupio je na snagu novi Zakon o obnovi prirode, Uredba (EU) 2024/1991. U tom se aktu gljive spominju samo jednom i to u definiciji ekosustava gdje stoji da je to “dinamična cjelina zajednica biljaka, životinja, gljiva i mikroorganizama i njihova neživog okoliša koji međusobno djeluju kao funkcionalna jedinica te uključuje stanišne tipove, staništa vrsta i populacije vrsta“. Ovom je uredbom propisana Obnova poljoprivrednih ekosustava (Članak 11.), Obnova šumskih ekosustava (Članak 12.) te Sadnja tri milijarde dodatnih stabala (Članak 13.). Kao mjere pokazatelja obnove i povećanja bioraznolikosti države članice moraju izradom nacionalnih akcijskih planova i znanstvenim istraživanjima pokrijeti trend obnove do 2030. godine i svakih šest godina nakon dok se ne postignu propisane razine. Obnova šumskog ekosustava zahtijeva zadovoljavajuće razine „stojećeg mrtvog drva, ležećeg mrtvog drva, udio šuma raznodobne strukture, povezanost šuma, zalihe organskog ugljika, udio šuma u kojima prevladavaju zavičajne vrste drveća i raznolikost vrta drveća“. Obnova poljoprivrednih ekosustava propisuje „mjerjenje indeksa populacije travnjačkih leptira, zalihe organskog ugljika u mineralnim tlima zemljišta pod usjevima te udio poljoprivrednog zemljišta s obilježjima krajobraza velike raznolikosti“. Mrtvo drvo važno je, ali samo jedno od supstrata na kojem raste gljive. Nijedna odrednica ovih dvaju članaka jasno ne propisuje i uzima u obzir praćenje raznolikosti gljiva koje su vitalni dio šumskog i poljoprivrednog ekosustava. Člankom 13. s ciljem smanjenja utjecaja klimatskih promjena izostavljene su gljive kao ključna poveznica u programima masovne sadnje stabala. Sve postojeće vrste stabala na Zemlji sudjeluju u mikoriznom odnosu s gljivama uz nekolicinu slučajeva koje se smatraju iznimkama (Watts i Evans 1999). Jedino se uspostavljanjem mikoriznih odnosa može osigurati da će posađena stabla doista opstati i rezultirati skladištenjem ugljikovih spojeva u tlu što je cilj ovog plana. Manifestom *Misija tlo* kojeg je 2023. godine objavila Europska komisija prepoznata je važnost zaštite tla, ali ne i gljiva kao ključnih organizama tog ekosustava (European Commission 2023).

Europska komisija 24. veljače 2024. godine pozdravila je privremeni dogovor za Prijedlog Uredbe Europskog parlamenta i Vijeća o uspostavljanju okvira Unije za certifikaciju uklanjanja ugljika (COM/2022/672). Cilj ove uredbe je ispunjavanje obveza Pariškog sporazuma korištenjem metoda uklanjanja ugljika bez dodatnih onečišćenja i narušavanja bioraznolikosti. Potencijal i moguća primjena mikoriznih gljiva nije prepoznata i navedena u ovom pravnom aktu.

Natura 2000 najveća je koordinirana ekološka mreža za zaštitu prirode svijetu. Ona pokriva područja najugroženijih vrsta i staništa na europskom kontinentu te je regulirana pravnim okvirom dviju direktiva. To su Direktiva o pticama (Direktiva 2009/147/EC) te Direktiva o staništima (Direktiva 92/43/EEC). Od preko 3000 vrsta koje su propisane da su od značaja za zajednicu i kojima je potrebna stroga zaštita, nijedna vrsta ne spada u carstvo gljiva.

U svibnju 2024. godine na snagu je stupio još jedan pravni akt u Europskoj uniji. To je Direktiva o zaštiti okoliša putem kaznenog prava (Direktiva 2024/1203). Kaznenim djelom između ostalog smatra se znatna šteta koja se učini za kvalitetu tla ili ekosustava u čiju su definiciju uključene i gljive. Europska unija postala je prvo međunarodno tijelo na svijetu koje kažnjava najveće slučajeve uništenja okoliša što se može usporediti s ekocidom. Znanstvenim istraživanjima može se ustanoviti jesu li prakse koje se primjenjuju u industrijskoj poljoprivredi od značajnog negativnog utjecaja na sastav tla i zajednicu gljiva. U potvrdnom slučaju u skladu s ovom direktivom trebale bi biti zatvorski i novčano kažnjive. Republika Hrvatska u roku od dvije godine mora uvrstiti odrednice ove direktive u svoj zakon.

## 6.4. Inicijative, organizacije i individualne akcije

U trenucima kada manjka zakonska regulativa za zaštitu gljiva velik doprinos popularizaciji ovog carstva imaju inicijative, individualne akcije i popularna kultura. Slavni znanstveno-popularni časopis *National Geographic* u travnju 2024. godine po prvi je puta od više od 300 godina postojanja na naslovnicu časopisa uvrstio gljivu (April Issue 2024). Takvi primjeri pokreću zajednice entuzijasta koji svojim angažmanom mogu značajno doprinijeti znanosti. Projekti građana-znanstvenika (eng. „citizen-scientists“) korištenjem besplatnih i široko dostupnih aplikacija poput *iNaturalist* te *Mushroom Observer* pomažu znanstvenicima u određivanju rasprostranjenosti, zastupljenosti gljiva na nekom području i njihovoj ekologiji. Nakon identifikacije svi se podaci kasnije se mogu iskoristiti kao podloga za ispitivanje ugroženosti vrsta.

S ciljem mikološki inkluzivnog i znanstveno ispravnog pristupa u konzervaciji makroskopskih divljih vrsta, 2018. godine prvi put predložen je odgovarajući termin za carstvo gljiva. Kao dodatak bioti uz floru i faunu, predložen je termin funga (Kuhar i sur. 2018). Inicijativa FFF okuplja mikologe koji rade na stvaranju okvira za uključivanje gljiva u konzervacijske politike u svijetu (*Flora Fauna Funga 2024*). Zakonske promjene uključivanja gljiva u pravne akte i strategije zaštite okoliša u stvarnom vremenu mogu se pratiti putem alata „*Conservation tracker*“ koju je razvila Zaklada za gljive (Fungi Foundation 2024).

SPUN (*Society for Protection of Underground Networks*) organizacija je koja se bavi kartiranjem bioraznolikosti mikoriznih mreža u svijetu te se zalaže za njihovo očuvanje. Terenskim naporom lokalnih znanstvenika u svijetu, na osnovu sekvenciranih uzoraka tla te uz pomoću algoritama predviđaju se žarišta mikorizne bioraznolikosti. Rezultati ovih kartiranja mogu postati podloga za konzervaciju mikoriznih gljiva. Osim toga hipoteza je da mogu pružiti uvid u stanje ekosustava i rano predviđanje njihova kolapsa ubrzanom nestankom mikoriznih mreža što ubrzava klimatske promjene (SPUN 2024).

Veliku ulogu u popularizaciji gljiva i edukaciji javnosti o njihovoj važnosti mogu imati i edukacijski centri te parkovi prirode kao turistička atrakcija. Dva takva primjera dolaze iz Hrvatske. Park prirode Papuk i prvi hrvatski UNESCO geopark prema dosadašnjim istraživanjima broji preko 100 vrsta gljiva. U sklopu projekta „Geo priče UNESCO geoparka“ gljive će postati dio budućeg postava koji će poslužiti u edukaciji o ovom zanemarenom carstvu (PP Papuk 2024). Najveći postav liofiliziranih sporišta gljiva u svijetu nalazi se na glavnome trgu u glavnome gradu Republike Hrvatske. Na inicijativu prof. dr. sc. Romana Bošca tijekom više desetljeća sakupljeno je i priređeno preko 1600 eksponata gljiva. Procesom liofilizacije (eng. *freeze-drying*) sporišta gljiva ostaju u svojem izvornom obliku, boji i veličini. Zbirka i stalni izložbeni prostor osnovani su u veljači 2013. godine pod nazivom Edukativni centar „Svijet gljiva prof. dr. sc. Romano Božac“, poznatiji pod nazivom „Muzej gljiva“. (Priroda Grada Zagreba 2024). Prema dostupnim mrežnim izvorima, trenutno ne postoji nijedno mjesto na svijetu u kojem se izložena sporišta različitih vrsta gljiva istovremeno mogu usporediti u neposrednoj blizini i svojem izvornom stanju. Takva zbirka predstavlja neprocjenjivu vrijednost za edukaciju budućih generacija mikologa te za hrvatsku, europsku i svjetsku znanost i kulturu. Bez postojanja takvih mjesta u gradovima, vidljivost gljiva kao već dovoljno skrivene skupine organizama dodatno se smanjuje. Zbog spomenute važnosti kao mjesta za edukaciju te svih ranije navedenih važnosti gljiva u ekosustavima, takvu se zbirku također treba zaštititi kao međunarodno dobro.

## 6.5. Prijedlozi i rasprava

U travnju 2024. godine sudjelovao sam u Europskom tjednu mladih u Europskom parlamentu u Briselu. Javio sam se za riječ na sesiji organiziranoj od strane Glavnog ravnateljstva Europske komisije za klimatsku akciju (DG CLIMA) na kojoj je bio prisutan glavni ravnatelj i bivši savjetnik predsjednice Europske komisije za Europski zeleni plan uz druge donositelje odluka. Time sam pokrenuo raspravu o potencijalu gljiva za rješavanje klimatskih i ekoloških problema. Manjak prepoznatosti i razumijevanja ove teme među političarima učvrstio je moju predanost mikologiji što je dijelom potaknulo i pisanje ovog rada. Osim što postoji hitna potreba za financiranjem mikoloških istraživanja i zaštitom gljiva, važno je primjenu gljiva jasno usvojiti u zakonodavne akte kao rješenje za ekološke i klimatske izazove u 21. stoljeću. Pri tome treba biti oprezan, izbjegavati znanstvenu pristranost uslijed ograničenog broja podataka i istraživanja te pripaziti na način komunikacije kada govorimo o zaštiti gljiva. Ne smije se zaboraviti da su gljive iznimno raznolika i heterogena skupina. Kada se govori o carstvu gljiva ne govori se isključivo o sporištima gljiva odjeljka Dykaria. Primjerice, arbuskularne mikorizne gljive imaju izniman globalni ekološki i ekonomski značaj. One spadaju u skupinu Glomeromycota te su u mikoriznom odnosu s preko 70 posto biljaka, Međutim, one ne razvijaju sporišta. Zanemarivanje njihove zaštite i svih drugih taksona gljiva može i dalje dovesti do negativnih posljedica na okoliš.

Ako se osoba želi baviti mikologijom, jedini studij koji treba upisati je biologija. U razgovoru s kolegama s drugih fakulteta bioloških usmjerenja u svijetu mikologija je nerijetko izostavljen predmet iz kurikuluma. Prema dostupnim internetskim izvorima trenutno u svijetu ne postoji niti jedan jedinstveni studij eksperimentalne mikologije na diplomskoj razini. Vrijeme je da se počne razmišljati o novim odvojenim modulima na studiju biologije koji uključuju predmete za produbljivanje praktičnih i teorijskih znanja iz ovog područja. U tome mogu pomoći programi Europske unije kao što je međunarodni program razmjene Erasmus Mundus. Suradnjom stručnjaka s različitih svjetskih sveučilišta može se postići stvaranje prvog združenog eksperimentalnog studija mikologije na svijetu. To je najbrži način stvaranja stručnjaka u ovoj grani znanosti te publiciranja znanstvenih radova koji popunjavanju nedostatke znanja za hitno rješavanje globalnih izazova.

Neki od primjera i načina čuvanja bioraznolikosti u urbanim sredinama može se postići da se u gradskim parkovima ne uklanja mrtvo drvo koje je važno stanište za neke vrste gljiva. S obzirom na to da većina današnjeg stanovništva živi u gradovima, takva mjesta mogu postati žarište edukacije novih naraštaja o ulozi gljiva u ekosustavu. Zbog prisutnosti parkova u gradovima i neposredne blizine logistički je jednostavno u njima organizirati škole u prirodi.

## 7. ZAKLJUČAK

Gljive su posteljica ekosustava. Njegov su neizostavan, nerazdvojan i nedvojbeno važan dio. Imale su odlučujuću ulogu u evolucijskoj povijesti i razvoju života na Zemlji. Unatoč svojoj širokoj primjeni mikologija je i dalje zanemarena megaznanost (Rambold i sur. 2013). Utjecaj sustava u kojem živimo već je ostavio nepovratne posljedice na velik dio živog svijeta uključujući gljive i ljude. Posizanje ciljeva Pariškog sporazuma na osnovu današnjih strategija je upitno, ali svakim porastom zagrijavanja biosfera postaje još ugroženija (Meinshausen i sur. 2022). S trenutnim politikama na globalnoj razini klimatski modeli predviđaju zaustavljanje globalnog zagrijavanja između 2,2 °C i 3,4 °C bez prekida porasta temperature nakon 2100. godine (Climate Action Tracker 2024.). Za jasnije razumijevanje posljedica i vodič za kreiranje politika stvoren je model koji mjeri razinu zagađenja u broju izgubljenih ljudskih života (Pearce i Parncutt, 2023). Prekomjerne emisije stakleničkih plinova samo su jedan od problema koji uzrokuje način na koji živi čovječanstvo. Ako je dobrobit živog svijeta prioritet, samo uz ispravne, složne i velike globalne napore na različitim poljima mogu se postići zadani ciljevi. Jedno od toga je izglasavanje ispravnih politika i strategija. Bez uključivanja gljiva u strategije zaštite okoliša, procjene i modele postoji velika neizvjesnost i nedostatak u znanju. Gljive nisu jedine koje mogu pomoći pri postizanju klimatskih i ekoloških ciljeva i nisu samostalno rješenje dok god zagađenje ekosustava nastavlja rasti. Ako se gljive ne uključe u konzervaciju, konzervacija drugih

organizama poput njihovih simbiotskih partnera može biti uzaludna. Gljive su preživjele sva izumiranja do sada. Bez obzira kakve politike čovječanstvo provede u narednih nekoliko ključnih desetljeća, gljive će i dalje imati odlučujuću ulogu u razvoju događaja i rebalansu života na zemlji. Jedna od većih prijetnja gljivama i nama samima nisu samo smak integriteta živog svijeta već manjak informiranosti o njihovoj važnosti i načinima na koje ih možemo primijeniti. Kao ni klimatski i ekološki izazovi, gljive sa svojim globalno raširenim mrežama micelija također ne poznaju nacionalne granice. Krajnji je trenutak da zaštitimo gljive te ih prepoznamo kao rješenje, a ne kao prijetnju (Hyde i sur. 2024). To se može postići razvojem istraživanja, edukacijom i uzimanjem gljiva u obzir tijekom izrade nacionalnih, regionalnih i međunarodnih strategija i konvencija za zaštitu okoliša.

## 8. ŽIVOTOPIS

Nakon završetka osnovne škole upisujem smjer prirodoslovne gimnazije u Prirodoslovnoj školi Vladimira Preloga u Zagrebu. Tijekom srednjoškolskog obrazovanja sudjelovao sam u nekoliko natjecanja i međunarodnih projekata. Pobjedom svog tima na natječaju *Euroscola* predstavljao sam svoju školu i Hrvatsku na simulaciji plenarne sjednice Europskog parlamenta u Strasbourgu. Sudjelovao sam u *Erasmus+* razmjeni u Švedskoj. Na natjecanju-izložbi iz likovne kulture 2019. godine pod temom „Ekologija“, dodijeljena mi je nagrada Grada Zagreba za osvojeno treće mjesto i predlaganje rada na državnu razinu. Po završetku gimnazije upisujem prijediplomski sveučilišni studij biologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu. Tijekom studija bio sam voditelj Sekcije za gljive u Udruzi studenata biologije BIUS te studentski predstavnik u vijeću Biološkog odsjeka. Završio sam EGAT program financiran od Zelene europske fondacije te sudjelovao u pokretanju inicijativa za zaštitu okoliša na nacionalnoj razini. Proveo sam semestar na studentskoj razmjeni na Odsjeku funkcionalne i evolucijske ekologije Sveučilišta u Beču. Na poziv Europske komisije izabran sam za predstavnika Zelene rute u okviru *DiscoverEU* projekta tijekom kojeg sam između ekoloških inicijativa na kontinentu popularizirao i gljive. Dobitnik sam *Lincoff* studentske stipendije 2024. godine za sudjelovanje na najstarijem američkom festivalu gljiva, Telluride Mushroom Festival u Koloradu. Tom prilikom imao sam čast slušati izlaganja i osobno upoznati svjetski prepoznate mikologinje i mikologe.

## 11. LITERATURA

- Adl, S.M., Bass, D., Lane, C.E., Lukeš, J. i sur. 2019. Revisions to the Classification, Nomenclature, i Diversity of Eukaryotes. *Journal of Eukaryotic Microbiology* 66, 4–119.
- Akhtar, N., Mannan, M.A. 2020. Mycoremediation: Expunging environmental pollutants. *Biotechnology Reports* 26, e00452.
- Alexander, M., Loehr, R.C. 1992. Bioremediation Review. *Science* 258, 874–874.
- Anthony, M.A., Bender, S.F., van der Heijden, M.G.A. 2023. Enumerating soil biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120.

- Antonelli, A., Fry, C., Smith, R.J i sur. 2023. State of the World's Plants i Fungi 2023. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Asmelash, F., Bekele, T., Birhane, E. 2016. The Potential Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Restoration of Degraded Lands. *Frontiers in Microbiology* 7.
- Bandilla, K.W. (2020): Carbon Capture i Storage U: Future Energy, Elsevier, str. 669–692.
- Batool, M., Cihacek, L.J., Alghamdi, R.S. 2024. Soil Inorganic Carbon Formation i the Sequestration of Secondary Carbonates in Global Carbon Pools. A Review. *Soil Systems* 8, 15.
- Beraldi-Campesi, H. 2013. Early life on land i the first terrestrial ecosystems. *Ecological Processes* 2, 1.
- Berkeley Earth (2024) <https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2023/> (pristupljeno 21. 7. 2024.)
- Boer, W. de, Folman, L.B., Summerbell, R.C., Boddy, L. 2005. Living in a fungal world: impact of fungi on soil bacterial niche development. *FEMS Microbiology Reviews* 29, 795–811.
- Bowman, S.M., Free, S.J. 2006. The structure i synthesis of the fungal cell wall. *BioEssays* 28, 799–808.
- Brown, M.W. i sur. 2013. Phylogenomics demonstrates that breviate flagellates are related to opisthokonts i apusomonads. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280, 1769, 20131755.
- Brundrett, M.C., Tedersoo, L. 2018. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses i global host plant diversity. *New Phytologist* 220, 1108–1115.
- Brundrett, M.C. 2002. Coevolution of roots i mycorrhizas of land plants. *New Phytologist* 154, 275–304.
- Buscot, F. 2023. Fungi including mycorrhizal fungi. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 49–60. Elsevier.
- Cairney, J.W.G. 2000. Evolution of mycorrhiza systems. *Naturwissenschaften* 87, 467–475.
- Carhart-Harris, R.L., Goodwin, G.M. 2017. The Therapeutic Potential of Psychedelic Drugs: Past, Present, i Future. *Neuropsychopharmacology* 42, 2105–2113.
- Carr, M., Hopkins, K., Ginger, M.L. (2023): The Protistan Origins of Animals i Fungi. U: Pöggeler, S., James, T. (ur.) *Evolution of Fungi i Fungal-Like Organisms. The Mycota*, vol. 14. Springer, str. 3-38
- Carteret, X., Hamonou-Mahieu, A. (2010): Mycological illustration (16th-18th century). U: Les dessins de Champignons de Claude Aubriet, Publications scientifiques du Muséum., str. 45–56
- Cavalier-Smith, T. 2013. Early evolution of eukaryote feeding modes, cell structural diversity, i classification of the protozoan phyla Loukzoa, Sulcozoa, i Choanozoa. *European Journal of Protistology*, 49(2), 115-178.
- Chai, Y., Bai, M., Chen, A., Peng, L., Shao, J., Luo, S., Deng, Y., Yan, B., Peng, C. 2022. Valorization of waste biomass through fungal technology: Advances, challenges, i prospects. *Industrial Crops i Products* 188, 115608.
- Christensen, S.B. 2021. Drugs That Changed Society: History i Current Status of the Early Antibiotics: Salvarsan, Sulfonamides, i  $\beta$ -Lactams. *Molecules* 26, 6057.
- Climate Action Tracker (2024) <https://climateactiontracker.org/> (pristupljeno 30. 7. 2024)
- COM/2024/62 (2024): Komunikacija Komisije Europskom parlamentu, Vijeću, Europskom gospodarskom socijalnom odboru i odboru regija, Prema ambicioznom industrijskom upravljanju ugljikom u EU-u
- COM/2022/672 (2022): Prijedlog Uredbe Europskog parlamenta i Vijeća o uspostavljanju okvira Unije za certifikaciju uklanjanja ugljika
- Copernicus Climate Change Service (2024) Summer 2024 – Hottest on record globally i for Europe <https://climate.copernicus.eu/copernicus-summer-2024-hottest-record-globally-and-europe> (pristupljeno 11. 9. 2024.)
- Delbeke, J., Vis, P. (2019): *Towards a Climate-Neutral Europe*,: London, Routledge.
- Delbeke, J. (2024): *Delivering a Climate Neutral Europe*,: London, Routledge.
- Diez, J., Kausarud, H., Andrew, C., Heegaard, E., Krisai-Greilhuber, I., Senn-Irlet, B., Høiland, K., Egli, S., Büntgen, U. 2020. Altitudinal upwards shifts in fungal fruiting in the Alps. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 287, 20192348.
- Direktiva 2009/147/EZ (2009): Direktiva Europskog parlamenta i Vijeća od 30. studenoga 2009. o očuvanju divljih ptica
- Direktiva 2024/1203 (2024) Europskog parlamenta i Vijeća od 11. travnja 2024. o zaštiti okoliša putem kaznenog prava i zamjeni direktiva 2008/99/EZ i 2009/123/EZ
- Direktiva 92/43/EEZ (1992): Direktiva Vijeća 92/43/EEZ od 21. svibnja 1992. o očuvanju prirodnih staništa i divlje faune i flore

- Dohrmann, M., & Wörheide, G. 2017. Dating early animal evolution using phylogenomic data. *Scientific reports*, 7(1), 3599.
- Drews, G. 2000. The roots of microbiology i the influence of Ferdinand Cohn on microbiology of the 19th century. *FEMS Microbiology Reviews* 24, 225–249.
- Ekanayaka, A.H., Tibpromma, S., Dai, D., Xu, R., Suwannarach, N., Stephenson, S.L., Dao, C., Karunaratna, S.C. 2022. A Review of the Fungi That Degrade Plastic. *Journal of Fungi* 8, 772.
- El-Gendi, H., Saleh, A.K., Badierah, R., Redwan, E.M., El-Maradny, Y.A., El-Fakharany, E.M. 2021. A Comprehensive Insight into Fungal Enzymes: Structure, Classification, i Their Role in Mankind’s Challenges. *Journal of Fungi* 8, 23.
- El Mountassir, G., Minto, J.M., van Paassen, L.A., Salifu, E., Lunn, R.J. 2018: Applications of Microbial Processes in Geotechnical Engineering. 39–91.
- Ellis, P.W., Page, A.M., Wood, S., Fargione, J., Masuda, Y.J., Carrasco Denney, V., Moore, C., Kroeger, T., Griscom, B., Sanderman, J., Atleo, T., Cortez, R., Leavitt, S., Cook-Patton, S.C. 2024. The principles of natural climate solutions. *Nature Communications* 15, 547.
- Esper, J., Torbenson, M., Büntgen, U. 2024. 2023 summer warmth unparalleled over the past 2,000 years. *Nature* 631, 94–97.
- European Commission (2023) Directorate-General for Research i Innovation, *Mission soil manifesto*, Publications Office of the European Union, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/97>
- Field, K.J., Bidartondo, M.I., Rimington, W.R., Hoysted, G.A., Beerling, DavidJ., Cameron, D.D., Duckett, J.G., Leake, J.R., Pressel, S. 2019. Functional complementarity of ancient plant–fungal mutualisms: contrasting nitrogen, phosphorus i carbon exchanges between Mucoromycotina i Glomeromycotina fungal symbionts of liverworts. *New Phytologist* 223, 908–921.
- Flora Fauna Funga (2024) <https://faunafloarafunga.org/> pristupljeno (30. 8. 2024.)
- Floudas, D., Binder, M., Riley, R. i sur. 2012. The Paleozoic Origin of Enzymatic Lignin Decomposition Reconstructed from 31 Fungal Genomes. *Science* 336, 1715–1719.
- Fraç, M., Hannula, S.E., Bełka, M., Jędryczka, M. 2018. Fungal Biodiversity i Their Role in Soil Health. *Frontiers in Microbiology* 9.
- Freney, J.R. 1997. Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49, 1–6.
- Friedlingstein, P., Jones, M.W., O’Sullivan, M., i sur. 2022. Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science Data* 14, 1917–2005.
- Fungi Foundation (2024) <https://www.ffungi.org/> (pristupljeno 30. 8. 2024.)
- Gadd, G.M. 1999. Fungal Production of Citric i Oxalic Acid: Importance in Metal Speciation, Physiology i Biogeochemical Processes. 47–92.
- Gan, T., Luo, T., Pang, K., Zhou, C., Zhou, G., Wan, B., Li, G., Yi, Q., Czaja, A.D., Xiao, S. 2021. Cryptic terrestrial fungus-like fossils of the early Ediacaran Period. *Nature Communications* 12, 641.
- Gautam, A.K., Verma, R.K., Avasthi, S., Sushma, Bohra, Y., Devadatha, B., Niranjana, M., Suwannarach, N. 2022. Current Insight into Traditional i Modern Methods in Fungal Diversity Estimates. *Journal of Fungi* 8, 226.
- Gostinčar, C., Zalar, P., Gunde-Cimerman, N. 2022. No need for speed: slow development of fungi in extreme environments. *Fungal Biology Reviews* 39, 1–14.
- Grąż, M. 2024. Role of oxalic acid in fungal i bacterial metabolism i its biotechnological potential. *World Journal of Microbiology i Biotechnology* 40, 178.
- Grinhut, T., Hadar, Y., Chen, Y. 2007. Degradation i transformation of humic substances by saprotrophic fungi: processes i mechanisms. *Fungal Biology Reviews* 21, 179–189.
- Hassett, M.O., Fischer, M.W.F., Money, N.P. 2015. Mushrooms as Rainmakers: How Spores Act as Nuclei for Raindrops. *PLOS ONE* 10, e0140407.
- Hawkins, H.-J., Cargill, R.I.M., Van Nuland, M.E., Hagen, S.C., Field, K.J., Sheldrake, M., Soudzilovskaia, N.A., Kiers, E.T. 2023. Mycorrhizal mycelium as a global carbon pool. *Current Biology* 33, R560–R573.

- Hawksworth, D.L., Lücking, R. 2017. Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species. *Microbiology Spectrum* 5.
- He, L., Mazza Rodrigues, J.L., Soudzilovskaia, N.A., Barceló, M., Olsson, P.A., Song, C., Tedersoo, L., Yuan, Fenghui, Yuan, Fengming, Lipson, D.A., Xu, X. 2020. Global biogeography of fungal i bacterial biomass carbon in topsoil. *Soil Biology i Biochemistry* 151, 108024.
- Heitman, J., Howlett, B., Crous, P. W., Stukenbrock, E., James, T., & Gow, N. A. R. (Eds.) (2017): *The Fungal Kingdom*. American Society for Microbiology. SAD
- Hibbett, D.S. i sur. 2007. A higher-level phylogenetic classification of the Fungi. *Mycological research*, 111(5), 509-547.
- Hrvatsko mikološko društvo (2024) <https://mycolsoc.hr/ugrozenost-i-zastita-gljiva-u-hrvatskoj/> (pristupljeno 28. 8. 2024.)
- Huang, T., Carrizo, D., Sánchez-García, L., Hu, Q., Anglés, A., Gómez-Ortiz, D., Yu, L.-L., Fernández-Remolar, D.C. 2024. The Molecular Profile of Soil Microbial Communities Inhabiting a Cambrian Host Rock. *Microorganisms* 12, 513.
- Hyde, K.D., Xu, J., Rapior, S. i sur. 2019: The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. *Fungal Diversity* 97, 1–136.
- Hyde, K.D., Baldrian, P., Chen, Y. i sur. 2024: Current trends, limitations i future research in the fungi? *Fungal Diversity* 125, 1–71.
- Hyde, K.D. 2022: The numbers of fungi. *Fungal Diversity* 114, 1–1.
- IUCN (2024) The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2024-1. <https://www.iucnredlist.org>. (pristupljeno 30. 8. 2024.)
- Kabir, Z. 2005. Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. *Canadian Journal of Plant Science* 85, 23–29.
- Kausrud, H., Heegaard, E., Büntgen, U. i sur. 2012. Warming-induced shift in European mushroom fruiting phenology. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, 14488–14493.
- Keeler, E., Burgaud, G., Teske, A., Beaudoin, D., Mehiri, M., Dayras, M., Cassand, J., Edgcomb, V. 2021. Deep-sea hydrothermal vent sediments reveal diverse fungi with antibacterial activities. *FEMS Microbiology Ecology* 97.
- Kenrick, P., Crane, P.R. 1997. The origin i early evolution of plants on land. *Nature* 389, 33–39.
- Kiers, E.T., Duhamel, M., Beesetty, Y., Mensah, J.A., Franken, O., Verbruggen, E., Fellbaum, C.R., Kowalchuk, G.A., Hart, M.M., Bago, A., Palmer, T.M., West, S.A., Vandenkoornhuysse, P., Jansa, J., Bücking, H. 2011. Reciprocal Rewards Stabilize Cooperation in the Mycorrhizal Symbiosis. *Science* 333, 880–882.
- Kirchman, D.L. (2018): Degradation of organic matter. *Processes in Microbial Ecology*, 113–132. Oxford University Press, Oxford.
- Kiss, E. i sur. 2019. Comparative genomics reveals the origin of fungal hyphae i multicellularity. *Nature communications*, 10(1), 4080.
- Kowallik, K. V., Martin, W.F. 2021. The origin of symbiogenesis: An annotated English translation of Mereschkowsky's 1910 paper on the theory of two plasma lineages. *Biosystems* 199, 104281.
- Kuhar, F., Furci, G., Drechsler-Santos, E.R., Pfister, D.H. 2018. Delimitation of Funga as a valid term for the diversity of fungal communities: the Fauna, Flora & Funga proposal (FF&F). *IMA Fungus* 9, A71–A74.
- Kuila, D., Ghosh, S. 2022. Aspects, problems i utilization of Arbuscular Mycorrhizal (AM) application as bio-fertilizer in sustainable agriculture. *Current Research in Microbial Sciences* 3, 100107.
- Le Hir, G., Donnadieu, Y., Goddérés, Y., Meyer-Berthaud, B., Ramstein, G., Blakey, R.C. 2011. The climate change caused by the land plant invasion in the Devonian. *Earth i Planetary Science Letters* 310, 203–212.
- Li, Y. i sur. 2021. A genome-scale phylogeny of the kingdom Fungi. *Current Biology*, 31(8), 1653-1665.
- Li, D.-W., Castañeda-Ruiz, R.F., LaMondia, J. (2016): Evolution of Fungi i Update on Ethnomycology. U: De-Wei Li (ur.) *Biology of Microfungi*, Springer, str. 237–266.
- Liu, Z., Deng, Z., Davis, S.J., Ciais, P. 2024. Global carbon emissions in 2023. *Nature Reviews Earth & Environment* 5, 253–254.
- Mapook, A., Hyde, K.D., Hassan, K. i sur. 2022. Ten decadal advances in fungal biology leading towards human well-being.: *Fungal Diversity* 116, 547–614.



- McKenzie, N.R., Hughes, N.C., Gill, B.C., Myrow, P.M. 2014. Plate tectonic influences on Neoproterozoic–early Paleozoic climate i animal evolution. *Geology* 42, 127–130.
- Meinshausen, M., Lewis, J., McGlade, C., Gütschow, J., Nicholls, Z., Burdon, R., Cozzi, L., Hackmann, B. 2022. Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 °C. *Nature* 604, 304–309.
- Mohanta, T.K., Bae, H. 2015. The diversity of fungal genome. *Biological Procedures Online* 17, 8.
- Molitoris, H.-P. 1978. Pilze als Heilpflanzen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft.: *Microbiology Forum* 1, 11–18.
- MycoBank (2024) <https://www.mycobank.org/Stats%20page> (pristupljeno 30. 8. 2024.)
- Mueller, G.M., Cunha, K.M., May, T.W. i sur. 2022. What Do the First 597 Global Fungal Red List Assessments Tell Us about the Threat Status of Fungi? *Diversity* 14, 736.
- Naranjo-Ortiz, M.A., Gabaldón, T. 2019. Fungal evolution: major ecological adaptations i evolutionary transitions, *Biological Reviews* 94, 1443–1476.
- Narodne novine 34/2002 (2002): Pravilnik o zaštiti gljiva (Fungi)
- Narodne novine 80/2013 (2013): Zakon o zaštiti prirode
- Narodne novine 99/2003 (2009): Pravilnik o proglašavanju divljih svojti zaštićenim i strogo zaštićenim
- National Geographic (2021) Fungi are key to our survival. Are we doing enough to protect them?, <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/fungi-are-key-to-survival-are-we-doing-enough-to-protect-them>. (pristupljeno 30. 8. 2024.)
- National Geographic (2024) The fungus in “The Last of Us” is real—and it’s very, very expensive, <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/tibet-china-zombie-fungus-cordyceps-trade> (pristupljeno 28. 8. 2024.)
- National Geographic (2024) April 2024 Issue <https://www.nationalgeographic.com/magazine/issue/april-2024> (pristupljeno 30. 8. 2024.)
- Nelsen, M.P., DiMichele, W.A., Peters, S.E., Boyce, C.K. 2016. Delayed fungal evolution did not cause the Paleozoic peak in coal production. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 2442–2447.
- Ngu, L.H. 2024. Carbon Capture Technologies. U: Martin A. Abraham (ur.) *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, Elsevier, str. 358–377.
- Nic Lughadha, E., Bachman, S.P., Leão, T.C.C. i sur. 2020. Extinction risk i threats to plants i fungi. *Plants, People, Planet* 2, 389–408.
- Niego, A.G.T., Rapior, S., Thongklang, N., Raspé, O., Hyde, K.D., Mortimer, P. 2023. Reviewing the contributions of macrofungi to forest ecosystem processes i services. *Fungal Biology Reviews* 44, 100294.
- Nikitin, D.A. 2023. Ecological Characteristics of Antarctic Fungi. *Doklady Biological Sciences* 508, 32–54.
- Niskanen, T., Lücking, R., Dahlberg, A. i sur. 2023. Pushing the Frontiers of Biodiversity Research: Unveiling the Global Diversity, Distribution, i Conservation of Fungi. *Annual Review of Environment i Resources* 48, 149–176.
- Onofri, S., de Vera, J.-P., Zucconi, L., Selbmann, L., Scalzi, G., Venkateswaran, K.J., Rabbow, E., de la Torre, R., Horneck, G. 2015. Survival of Antarctic Cryptoendolithic Fungi in Simulated Martian Conditions On Board the International Space Station. *Astrobiology* 15, 1052–1059.
- Pasailiuk, M. 2022. World biota conservation vs fungal conservation practice. *Current Research in Environmental & Applied Mycology* 12, 268–284.
- Pausianius 2.16.3 (2024) <https://www.theoi.com/Text/Pausanias1A.html> (pristupljeno 30. 8. 2024.)
- Pearce, J.M., Parncutt, R. 2023. Quantifying Global Greenhouse Gas Emissions in Human Deaths to Guide Energy Policy. *Energies* 16, 6074.
- Pirozynski, K.A., Malloch, D.W. 1975. The origin of land plants: A matter of mycotrophism. *Biosystems* 6, 3 153–164
- Pouliot, A. (2024) osobna komunikacija 17. 8. 2024.
- Power, R.C., Salazar-García, D.C., Straus, L.G., González Morales, M.R., Henry, A.G. 2015. Microremains from El Mirón Cave human dental calculus suggest a mixed plant–animal subsistence economy during the Magdalenian in Northern Iberia. *Journal of Archaeological Science* 60, 39–46.
- PP Papuk (2024) <https://www.pp-papuk.hr/gljive-kao-dio-postava-u-buducem-geo-info-centru/> (pristupljeno 31. 8. 2024.)

- Priroda Grada Zagreba (2024) <https://park-maksimir.hr/edukativni-centar-bogatstvo-svijeta-gljiva/> (pristupljeno 31. 8. 2024.)
- Pulingam, T., Lakshmanan, M., Chuah, J.-A., Surendran, A., Zainab-L, I., Foroozandeh, P., Uke, A., Kosugi, A., Sudesh, K. 2022. Oil palm trunk waste: Environmental impacts i management strategies. *Industrial Crops i Products* 189, 115827.
- Rambold, G., Stadler, M., Begerow, D. 2013. Mycology should be recognized as a field in biology at eye level with other major disciplines – a memorandum. *Mycological Progress* 12, 455–463.
- Rampino, M.R., Eshet, Y. 2018. The fungal i acritarch events as time markers for the latest Permian mass extinction: An update. *Geoscience Frontiers* 9, 147–154.
- Reshmy, R., Athiyaman Balakumaran, P., Divakar, K., Philip, E., Madhavan, A., Pugazhendhi, A., Sirohi, R., Binod, P., Kumar Awasthi, M., Sindhu, R. 2022. Microbial valorization of lignin: Prospects i challenges. *Bioresource Technology* 344, 126240.
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W. i sur. 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances* 9.
- Rimington, W.R., Duckett, J.G., Field, K.J., Bidartondo, M.I., Pressel, S. 2020. The distribution i evolution of fungal symbioses in ancient lineages of land plants. *Mycorrhiza* 30, 23–49.
- Robertson, G.P., Paul, E.A. (2000): *Decomposition i Soil Organic Matter Dynamics*. U: Osvaldo E. S. (ur.) *Methods in Ecosystem Science*, New York, NY, Springer New York, str. 104–116..
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. i sur. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475.
- Rubin, E.S., Davison, J.E., Herzog, H.J. 2015. The cost of CO<sub>2</sub> capture i storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40, 378–400.
- Sesli, E., Tüzen, M. 1999. Levels of trace elements in the fruiting bodies of macrofungi growing in the East Black Sea region of Turkey. *Food Chemistry* 65, 453–460.
- Shilky, Ekka, P., Upreti, M., Kumar, A., Saikia, P. 2024. Nature-based solutions i ecological urban planning i design for the sustainable urban environments U: Amit Kumar (ur.) *Earth Observation in Urban Monitoring*, Elsevier, str. 339–358.
- Silva, A., Ticona, A., Lopes, F., Gouveia, F., Silveira, M., Oliveira, J., Garcia, L., Noronha, E., Vale, H. 2023. Characterization of White- i Brown-Rot Fungi Applied to the Decay of Caatinga Biome Wood (*Swartzia pisonema* Harms) from Brazil. *Current Research in Environmental & Applied Mycology* 13, 104–122.
- Skejo, J. 2022. Reconstruction of the Last Eukaryotic Common Ancestor by cladistic i phylogenetic approach. Doctoral dissertation. University of Zagreb, Faculty of Science, Zagreb. 146 pp.
- Singh, A., Agrawal, M. 2008. Acid rain i its ecological consequences. *Journal of environmental biology* 29, 15–24.
- Spatafora, J.W. i sur. 2016. A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia*, 108(5), 1028-1046.
- Spiegel, F.W. 2016. Unikonts, Evolution i Diversification of (with Emphasis on Fungal-Like Forms) U: Kliman R. M. (ur.) *Encyclopedia of Evolutionary Biology*, Elsevier, str. 325–332.
- Sproul, C., 2021. “Don’t Kill My Buzz, Man!” – Explaining the Criminalization of Psychedelic Drugs. *Oregon Undergraduate Research Journal* 19.
- SPUN (2024) <https://www.spun.earth/> (pristupljeno 31. 8. 2024.)
- Stajich, J.E., Berbee, M.L., Blackwell, M., Hibbett, D.S., James, T.Y., Spatafora, J.W., Taylor, J.W. 2009. The Fungi. *Current Biology* 19, R840–R845.
- Stamets, P. (2005): *Mycelium Running: How Mushrooms Can Help Save The World*, Ten Speed Press, Berkeley, California.
- Statista (2024) <https://www.statista.com/topics/4101/carbon-capture-and-storage/#topicOverview> pristupljeno (30.8. 2024).
- Stokstad, E. 2019. This fungus has wiped out more species than any other disease. *Science*.
- Strullu-Derrien, C., Selosse, M., Kenrick, P., Martin, F.M. 2018. The origin i evolution of mycorrhizal symbioses: from palaeomycology to phylogenomics. *New Phytologist* 220, 1012–1030.
- Sukarno, N., Smith, S.E., Scott, E.S. 1993. The effect of fungicides on vesicular–arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist* 125, 139–147.

- Sultanbawa, F., Sultanbawa, Y. 2023. Mineral nutrient-rich plants – Do they occur?: Applied Food Research 3, 100347.
- Syed, S., Buddolla, V., Lian, B. 2020. Oxalate Carbonate Pathway—Conversion i Fixation of Soil Carbon—A Potential Scenario for Sustainability. *Frontiers in Plant Science* 11.
- Takaki, K. 2022. Promotion of Reproductive Growth of Mushroom Using Electrical Stimuli. *Agritech: Innovative Agriculture Using Microwaves i Plasmas*, 247–271. Singapore, Springer Singapore.
- Tedersoo, L., Bahram, M., Põlme, S. i sur. 2014. Global diversity i geography of soil fungi. *Science* 346.
- Tedersoo, L., Anslan, S., Bahram, M. i sur. 2020. Regional-Scale In-Depth Analysis of Soil Fungal Diversity Reveals Strong pH i Plant Species Effects in Northern Europe. *Frontiers in Microbiology* 11.
- Tian, H., Xu, R., Canadell, J.G., i sur. 2020. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources i sinks. *Nature* 586, 248–256.
- Tkalčec, Z., Mešić, A., Matočec, N., Kušan, I. (2008): Crvena knjiga gljiva Hrvatske. Ministarstvo kulture, Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb, Republika Hrvatska.
- Tkalčec, Z., Mešić, A., Matočec, N. (2005): Crveni popis gljiva Hrvatske.
- Tollefson, J., Weiss, K.R. 2015. Nations approve historic global climate accord. *Nature* 528, 315–316.
- Uredba (EU) 2021/1119 Europskog parlamenta i Vijeća od 30. lipnja 2021. o uspostavi okvira za postizanje klimatske neutralnosti i o izmjeni uredaba (EZ) br. 401/2009 i (EU) 2018/1999 („Europski zakon o klimi”)
- Uredba (EU) 2024/1991 Europskog parlamenta i Vijeća od 24. lipnja 2024. o obnovi prirode i izmjeni Uredbe (EU) 2022/869 (Tekst značajan za EGP)
- van’t Padje, A., Werner, G.D.A., Kiers, E.T. 2021. Mycorrhizal fungi control phosphorus value in trade symbiosis with host roots when exposed to abrupt ‘crashes’ i ‘booms’ of resource availability.: *New Phytologist* 229, 2933–2944.
- Verrecchia, E.P., Braissant, O., Cailleau, G. 2006. The oxalate–carbonate pathway in soil carbon storage: the role of fungi i oxalotrophic bacteria. U: Gadd, G. M. (ur.) *Fungi in Biogeochemical Cycles*, Cambridge University Press., Cambridge, str. 289–310.
- Vicente-Serrano, S.M., Quiring, S.M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S., Domínguez-Castro, F. 2020. A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? *Earth-Science Reviews* 201, 102953.
- Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, C., Reddy, S.P.P. 2023. Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Regulating Growth, Enhancing Productivity, i Potentially Influencing Ecosystems under Abiotic i Biotic Stresses. *Plants* 12, 3102.
- Wang, B., Qiu, Y.-L. 2006. Phylogenetic distribution i evolution of mycorrhizas in land plants. U: Colpaert J. (ur.) *Mycorrhiza* 16, str. 299–363.
- Wang, D.Y.-C., Kumar, S., Hedges, S.B. 1999. Divergence time estimates for the early history of animal phyla i the origin of plants, animals i fungi. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 266, 163–171.
- Watt M., Evans J. R., Proteoid Roots. *Physiology i Development, Plant Physiology*, Volume 121, Issue 2, October 1999, Pages 317–323
- Whittaker, R.H. 1969. New Concepts of Kingdoms of Organisms. *Science* 163, 150–160.
- Wilberforce, T., Olabi, A.G., Sayed, E.T., Elsaid, K., Abdelkareem, M.A. 2021. Progress in carbon capture technologies. *Science of The Total Environment* 761, 143203.
- Wu, B., Hussain, M., Zhang, W., Stadler, M., Liu, X., Xiang, M. 2019. Current insights into fungal species diversity i perspective on naming the environmental DNA sequences of fungi. *Mycology* 10, 127–140.
- Yarzabal Rodríguez, L.A., Álvarez Gutiérrez, P.E., Gunde-Cimerman, N., Ciancas Jiménez, J.C., Gutiérrez-Cepeda, A., Ocaña, A.M.F., Batista-García, R.A. 2024. Exploring extremophilic fungi in soil mycobiome for sustainable agriculture amid global change. *Nature Communications* 15, 6951.
- Zhang, N., Luo, J., Bhattacharya, D. (2017): *Advances in Fungal Phylogenomics i Their Impact on Fungal Systematics*. U: Kumar D. (ur.) *Advances in Genetics*, Cardiff University, Cardiff, UK, str. 309–328.
- Zhang, X., Fan, X., Han, C., Wang, C., Yu, X. (Bill) 2020. Improving Soil Surface Erosion Resistance by Fungal Mycelium. U: Hambleton J. P (ur.) *Geo-Congress 2020*. Reston, VA, American Society of Civil Engineers, str. 523–531