

# "Fiziološki učinci buke na morske organizme"

---

**Brajović, Karla**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Dubrovnik / Sveučilište u Dubrovniku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:155:512934>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-28**



**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**  
UNIVERSITY OF DUBROVNIK

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Dubrovnik](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU  
ODJEL ZA PRIMIJENJENU EKOLOGIJU  
PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ PRIMIJENJENA EKOLOGIJA MORA

Karla Brajović

Fiziološki učinci buke na morske organizme

ZAVRŠNI RAD

DUBROVNIK, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU  
ODJEL ZA PRIMJENJENU EKOLOGIJU  
PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ PRIMJENJENE EKOLOGIJE MORA

Karla Brajović

Fiziološki učinci buke na morske organizme

ZAVRŠNI RAD

MENTOR:

izv. prof. dr. sc. Tatjana Dobroslavić

DUBROVNIK, rujan 2024.

Ovaj završni rad izrađen je pod stručnim vodstvom izv. prof. dr. sc. Tatjane Dobroslavić, u sklopu prijediplomskog studija Primijenjena ekologija mora na Odjelu za primijenjenu ekologiju Sveučilišta u Dubrovniku.

## SAŽETAK

### **Fiziološki učinci buke na morske organizme**

Buka ima negativan utjecaj na život u moru, te utječe na komunikaciju, orijentaciju, hranjenje, reproduktivno ponašanje i stres kod morskih organizama te može dolaziti od različitih izvora, poput disanja, otkucaja srca, ili aktivnosti probavnog sustava organizama. Antropogena buka uzrokovana brodskim prometom, podvodnim građevinskim radovima i industrijskim aktivnostima, također može izazvati razna oštećenja i traume kod morskih organizama. Morski sisavci koriste zvuk za komunikaciju, navigaciju i lov, a podvodna buka oštećuje njihove sposobnosti. Ribe mogu reagirati na buku promjenama u ponašanju, smanjenom hranidbenom aktivnošću, otežanom migracijom i povećanom ranjivošću na grabežljivce. Morske kornjače također osjećaju negativne posljedice buke, što otežava njihovu orijentaciju. Podvodna buka ne utječe samo na organizme u vodi već i na ptice koje se hrane u blizini vodenih staništa. Cilj ovog rada je opisati kako buka utječe na sluh morskih organizama, štetu uzrokovanu barotraumom te odgovor na stres.

**Ključne riječi:** buka, morski organizmi, oštećenja i traume, barotrauma, stres

## **ABSTRACT**

### **Physiological effects of noise on marine organisms**

Noise has a negative impact on marine life as it affects communication, orientation, feeding, reproductive behaviour and stress of marine organisms and can originate from various sources such as respiration, heartbeat or digestive system activities. Anthropogenic noise caused by ship traffic, underwater construction and industrial activities can also cause various injuries and trauma to marine animals. Marine mammals use sound for communication, navigation and hunting, but underwater noise impairs these abilities. Fish can respond to noise with behavioural changes, reduced feeding activity, interrupted migrations and increased vulnerability to predation. Sea turtles also suffer from the negative effects of noise, which makes it difficult for them to orientate themselves. Underwater noise affects not only aquatic organisms, but also birds that feed near aquatic habitats. The aim of this article is to describe how noise affects the hearing of marine organisms, what damage is caused by barotrauma and how they react to stress.

**Keywords:** noise, marine organisms, injury and trauma, barotrauma, stress

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. UTJECAJ PODVODNE BUKE NA SLUH MORSKIH ORGANIZAMA</b> .....	3
2.1. Utjecaj podvodne buke na sluh beskrležnjaka.....	3
2.2. Utjecaj podvodne buke na sluh riba.....	3
2.3. Utjecaj podvodne buke na sluh morskih kornjača .....	5
2.4. Utjecaj podvodne buke na sluh morskih sisavaca.....	6
2.5. Utjecaj buke na sluh morskih ptica .....	8
<b>3. MEHANIČKI STRES I BAROTRAUMA</b> .....	9
3.1. Barotrauma i mehanički stres kod beskrležnjaka.....	9
3.2. Mehanički stres i barotrauma kod riba.....	11
3.3. Mehanički stres i barotrauma kod morskih kornjača .....	12
3.4. Mehanički stres i barotrauma kod morskih sisavaca.....	13
3.5. Mehanički stres i barotrauma kod morskih ptica .....	14
<b>4. ODGOVOR NA STRES</b> .....	15
4.1. Odgovor na stres kod beskrležnjaka.....	15
4.2. Odgovor na stres kod riba .....	16
4.3. Odgovor na stres kod morskih sisavaca .....	17
4.4. Odgovor na stres kod morskih ptica .....	18
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	19
<b>6. LITERATURA</b> .....	20

## 1. UVOD

Stres u morskom okolišu rezultat je niza čimbenika koji negativno utječu na fiziološku ravnotežu, preživljavanje i reprodukciju morskih organizama. Morski organizmi suočeni su s raznim stresorima koji proizlaze iz prirodnih i antropogenih izvora. Promjene u okolišu, poput povećane razine buke, zagađenja i klimatskih promjena, stvaraju nove izazove koji mogu dovesti do poremećaja u ponašanju, smanjenja imunološke funkcije i reproduktivne sposobnosti i u najgorim slučajevima do uginuća (Solan i Whiteley, 2016).

Podvodna buka predstavlja značajan i rastući okolišni problem koji utječe na morske organizme, često uzrokujući stres, poremećaje u komunikaciji, promjene u obrascima migracije i prehranbenim navikama. Povećana ljudska aktivnost u morima i priobalnim područjima, koja uključuje pomorski promet, građevinske aktivnosti u moru, vojne vježbe, seizmička istraživanja, rezultirala je povećanjem razine podvodne buke (Peng i sur., 2015).

Buku dijelimo na dvije vrste, ambijentalnu i antropogenu. Ambijentalna buka odnosi se na okolišne zvukove, neželjene zvukove koji mogu maskirati druge, važnije zvukove. Izvori ambijentalne buke mogu uključivati vjetar, valove, seizmičku i tektonsku aktivnost vulkana, kišu, biološke zvukove koje proizvode morski organizmi poput sisavaca i riba te zvukove morskog leda i ledenjaka. Antropogeni zvukovi su relativno nova pojava u morskom okolišu, a njihova visoka koncentracija započela je s industrijalizacijom (Richardson i sur., 1995).

Buka proizvedena od strane čovjeka, antropogena buka, maskira zvuk kojeg proizvode druge životinje jer ima identične frekvencije, što uzrokuje smanjenje sposobnosti otkrivanja zvuka (MGOR, 2022). Zvuk je longitudinalni val određene frekvencije koji se prenosi kroz neki medij njegova energija jedna je od najraširenijih oblika antropogene energije. Zvučni valovi nastaju zbog niza promjena tlaka koje dovode do zgušnjavanja ili razrjeđivanja medija kroz koji se šire. Predstavlja akustičnu energiju i može obuhvaćati širok spektar frekvencija. Ljudsko uho registrira frekvencije od 20 do 20.000 Hz. Frekvencije iznad tog raspona, poznate kao ultrazvuk (> 20.000 Hz), previsoke su za ljudsko uho, ali ih mogu čuti šišmiši, psi i morski sisavci. Infrazvuk, s frekvencijama ispod 20 Hz, previše je nizak za ljudski sluh, ali ga mogu registrirati slonovi, neke ptice i kitovi. Svi zvukovi prate isti akustični model "izvor-put-primatelj", pri čemu zvuk prolazi kroz promjene dok putuje od izvora do primatelja koji ga prepoznaje. Zvuk se može podijeliti na



signal i buku s obzirom na primatelja. Signal su zvukovi koji nose biološki važne informacije, poput lokacije predatora ili drugih jedinki iste vrste. Međutim, signale je teško detektirati podvodnim akustičnim sensorima zbog prisutnosti buke, koja se odnosi na zvukove koji nemaju biološku vrijednost (NOAA, 2004).

Morski sisavci, kao što su kitovi i dupini, koriste zvuk za komunikaciju, navigaciju i lov, te su posebno osjetljivi na promjene u akustičnom okruženju. Povećane razine buke mogu ometati njihovu sposobnost da se orijentiraju i komuniciraju, što može dovesti do ozbiljnih posljedica po njihov opstanak. Iako podvodna buka prvenstveno utječe na organizme u vodi, može imati i dalekosežne učinke na ptice koje se hrane u ili blizu vodenih područja. Buka može uzrokovati promjene u obrascima hranjenja i uznemiriti kolonije, što može dovesti do smanjenja preživljavanja mladih ptica (Solan i Whiteley, 2016).

## 2. UTJECAJ PODVODNE BUKE NA SLUH MORSKIH ORGANIZAMA

Podvodna buka može imati značajan utjecaj na sluh morskih organizama te može uzrokovati trajni ili privremeni pomak praga sluha, smanjujući sposobnost životinje za komunikaciju i uočavanje prijetnje te može dovesti do migracije. Buka može maskirati bitne prirodne zvukove u moru, poput zvukova kojim životinje traže partnere ili zvukova koje proizvodi plijen ili predator. Svi navedeni mehanizmi, kao i faktor stresa, distrakcije, konfuzije i panike, mogu utjecati na stopu razmnožavanja, smrtnosti i rasta, što se dugoročno odražava na održivost same populacije. Buka može uzrokovati oticanje, pucanje ili smrt stanica koje su ključne za pretvaranje zvučnih valova u živčane signale (Solan i Whiteley, 2016).

Kod određenih vrsta riba buka od broskog prometa smanjuje osjetljivost i uzrokuje pomicanje praga sluha. Eksperimentalni uređaj za emitiranje buke uzrokuje oštećenja slušnog epitela kod lignji, sipa i hobotnica, pucnjevi iz seizmičkih zračnih topova uzrokuju oštećenja sluha kod dupina i oštećenja statocista kod divovskih lignji (Chao Peng i sur., 2015).

### 2.1. Utjecaj podvodne buke na sluh beskralješnjaka

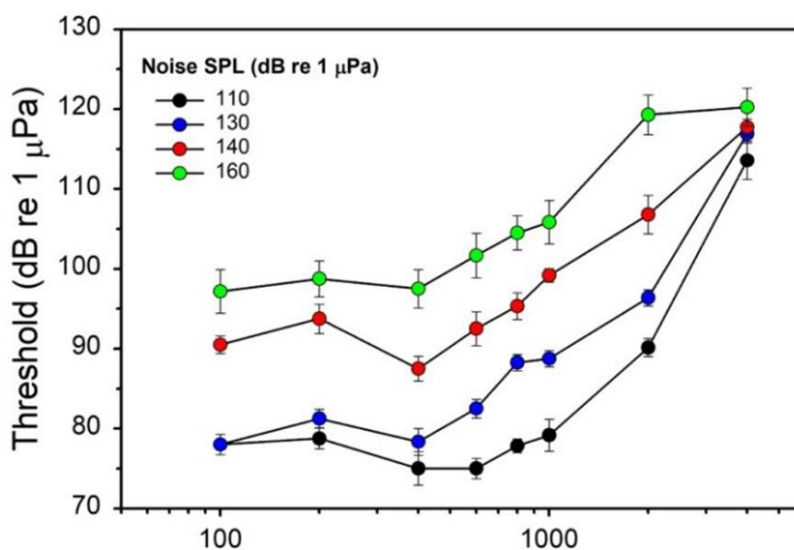
Neki beskralješnjaci, poput određenih vrsta rakova i mekušaca, imaju specijalizirane organe za percepciju vibracija i zvuka. Primjerice, mnogi rakovi koriste mehaničke receptore (kao što su statocisti) za otkrivanje vibracija u vodi. Intenzivna buka može uzrokovati fizičko oštećenje tih receptornih struktura, što dovodi do smanjenja osjetljivosti ili potpune disfunkcije tih organa. Velik broj istraživanja oštećenja sluha proveden je na glavonošcima, primjerice promatranje oštećenja statocista kod divovske lignje uzrokovane bukom seizmičkih istraživanja. U drugim istraživanjima zabilježena su oštećenja unutarnjih mišićnih vlakana i probavnog sustava kod nasukanih jedinki lignji nakon uporabe zračnih topova (Solan i Whiteley, 2016).

### 2.2. Utjecaj podvodne buke na sluh riba

Ribe uglavnom detektiraju sluh kroz dva mehanizma, preko otolita (strukture u unutarnjem uhu koje detektiraju vibracije zvuka i doprinose osjećaju ravnoteže kod riba) i preko sustava kanala bočne pruge (sustav koji detektira niskofrekventne vibracije i promjene tlaka u vodi). Buka može utjecati na sluh riba oštećujući ova dva sustava, ali i oštećujući plivaći mjehur što može dovesti do

privremenog pomaka praga sluha (TTS) ili trajnog pomaka praga sluha (PTS) (Popper i Hastings, 2009; Casper i sur., 2013).

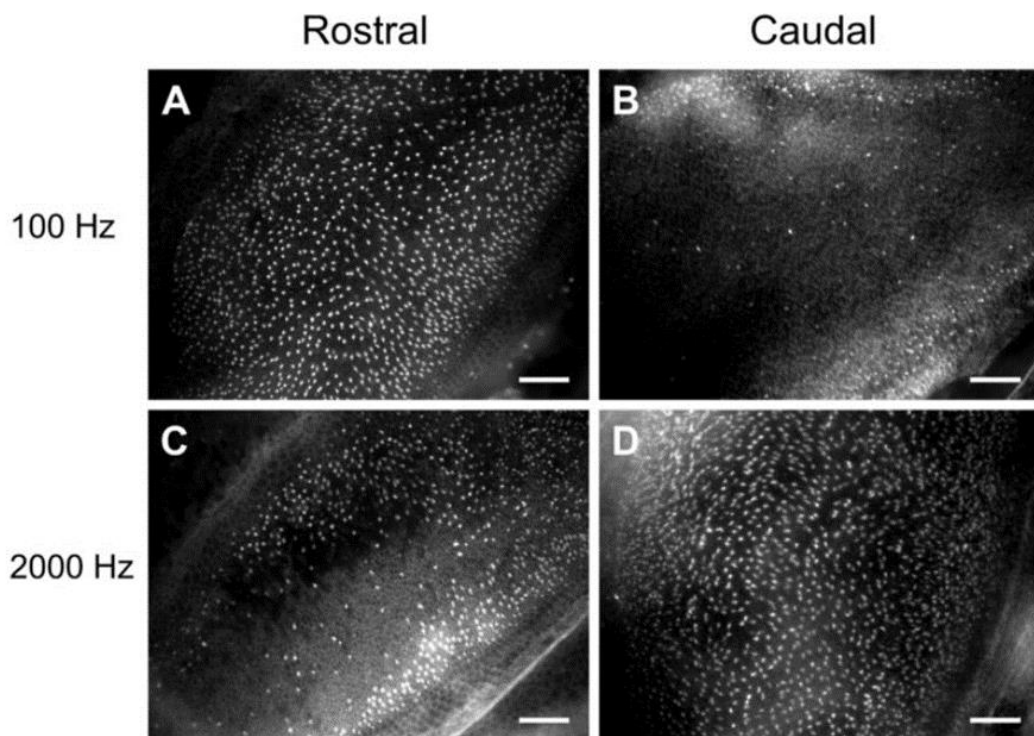
Ribe mogu obnoviti svoj sluh nakon nekog vremena, ali tijekom razdoblja smanjene osjetljivosti mogu biti podložnije predaciji ili manje učinkovite u lovu. Posebno su osjetljivije nedorasle jedinke koje za razliku od odraslih imaju manji broj slušnih stanica. Također, regeneracija je povezana s funkcionalnim oporavkom slušne sposobnosti. Kao posljedica sposobnosti popravka i regeneracije slušnih stanica, vjerojatnost trajnog gubitka sluha (PTS) kod riba smatra se vrlo niskom. Ako dođe do privremenog gubitka sluha (TTS), veličina i trajanje oštećenja sluha ovise o više čimbenika, kao što su frekvencija i intenzitet zvuka te trajanje izloženosti. Ograničeni podaci pokazuju da su neke vrste riba podložne TTS-u. U istraživanju kojeg su provodili Smith i sur. (2004) kod zlatnih ribica se razvio TTS nakon izloženosti bijelom šumu pri 166-170 dB pod vodom tijekom 10 minuta (Slika 1) (Smith i sur; 2004).



Slika 1. Grafički prikaz pri različitim frekvencijama zvuka bijelog šuma kojima su jedinke zlatne ribice bile izložene (Izvor: Smith i sur., 2004)

Kod zlatnih ribica izloženih frekvenciji od 100 Hz primjećuje se znatno veći gubitak osjetnih stanica na kaudalnom kraju epitela nego na rostralnom. Nasuprot tome, kod riba izloženih frekvenciji od 2000 Hz, dolazi do znatno većeg gubitka osjetnih stanica na rostralnom nego na kaudalnom kraju (Slika 2). Vjerojatno je da se frekvencija i razine zvuka potrebne za izazivanje

TTS-a značajno razlikuju ovisno o vrsti. Podaci sugeriraju da su neke vrste s pojačanim sluhom, poput zlatnih ribica i somova, sklonije TTS-u u usporedbi s drugim ribama kao što su lososi i sunčanice (Smith i sur., 2011).



Slika 2. Prikaz oštećenja sakularnog epitela u zlatnih ribica (Izvor: Smith i sur., 2011)

### 2.3. Utjecaj podvodne buke na sluh morskih kornjača

Salas i sur. (2023) proveli su studiju o utjecaju podvodne buke na sluh slatkovodnih kornjača. Kako bi proveli studiju, tim je izveo eksperimente na dvije neugrožene vrste slatkovodnih kornjača. Koristili su minimalno invazivni uređaj, umetnut neposredno ispod kože iznad uha kornjače, kako bi detektirali sićušne neurološke napone koje stvaraju kornjačini slušni sustavi kada čuju zvukove. Metoda brzo mjeri sluh i slična je načinu na koji se neinvazivno mjeri sluh kod ljudskih beba. Prije nego su kornjače izložili glasnoj bijeloj buci (sličnoj zvuku radijske statike), prvo su odredili donji prag sluha kornjača pod vodom i koje tonove (frekvencije) najbolje čuju. Nakon što su kornjače izložili buci, a zatim ih udaljili od buke, istraživači su nastavili mjeriti sluh kornjača oko sat vremena kako bi vidjeli jesu li obnovile svoj kratkoročni sluh pod vodom, a zatim

su ih provjerili dva dana kasnije kako bi vidjeli je li oporavak bio potpun. Iako su kornjače uvijek obnovile sluh, gubitak istog mogao je trajati od oko 20 minuta do više od sat vremena. Međutim, ponekad se sluh nije oporavio do kraja testnog sata, što ukazuje da im je trebalo više vremena za potpuni oporavak od izlaganja buci. Smatra se da raspon frekvencije zvuka koji koriste morske kornjače iznosi 50 Hz – 1200 Hz (Viada i sur., 2008).

#### 2.4. Utjecaj podvodne buke na sluh morskih sisavaca

Osnovni mehanizam detekcije zvuka isti je kod svih sisavaca, bez obzira žive li na kopnu ili u moru. Zvučni valovi se pretvaraju u živčane impulse u unutarnjem uhu, koje mozak interpretira kao zvukove. Izloženost glasnim zvukovima može ometati ovaj proces i uzrokovati oštećenje sluha ili gubitak sluha. Studije privremenih pomaka praga sluha (TTS) provedene su s nekoliko vrsta morskih sisavaca, uključujući dupine s dugim kljunom, beluga kitove, tuljane, morske lavove iz Kalifornije i sjeverne morske slonove. Pragovi sluha ovih jedinki u zatočeništvu određuju se korištenjem metoda ponašanja i/ili metoda odgovora mozga na zvuk (ABR). Istraživanja TTS-a uključuju izlaganje zvukovima različitih frekvencija, intenziteta i trajanja kako bi se utvrdilo izlaganje zvuku koje uzrokuje privremene pomake praga sluha. Studije ponašanja sluha provode se kako bi se odredio raspon frekvencija i koliko dobro životinja može čuti te frekvencije. Najtiši ili najniži nivo pri kojem životinja može čuti zvuk naziva se prag sluha za tu frekvenciju. Ponašajne studije provode se s obučanim životinjama u zatočeništvu. Životinja se obučava da se pomakne na stanicu pod vodom dok se pušta zvuk. Ako životinja čuje zvuk, reagira na određen način, poput pritiskanja lopatice (Slika 3). Ako životinja ne čuje zvuk (ili ako se zvuk ne pušta), ne reagira. Promjenom glasnoće ispitnog signala znanstvenici utvrđuju frekvencije i razine zvuka koje životinja može čuti. Ova mjerenja predstavljaju se kao krivulja praga sluha ([www.dosits.org](http://www.dosits.org)).



Slika 3. Dupin dodiruje lopaticu (Izvor: <https://www.dosits.org>)

Svi morskih sisavci nemaju jednake slušne sposobnosti u smislu apsolutne osjetljivosti na zvuk te raspona frekvencije zvuka koju mogu čuti. Kako bi se bolje izrazile slušne sposobnosti i specifičnosti pojedinih vrsta, one su grupirane u slušne skupine prema frekvenciji zvuka koju koriste i to:

- kitovi niske frekvencije zvuka (kitovi usani): 7 Hz – 35 kHz,
- kitovi srednje frekvencije zvuka (odobalni kitovi zubani: dupini, kljunasti kitovi, ulješure): 150 Hz – 160 kHz,
- kitovi visoke frekvencije zvuka (obalni kitovi zubani: pliskavice, riječni dupini): 275 Hz - 160 kHz,
- perajari - pravi tuljani (Phocidae): 50 Hz – 86 kHz (NOAA, 2018).

Smatra se kako kitovi usani koriste akustičnu komunikaciju u svim bitnim fazama životnog ciklusa uključujući socijalne interakcije, razmnožavanje i odgoj mladunaca te migracije i potrage za hranom (Edds-Walton, 1997). S obzirom na velik raspon frekvencija koje koriste, kitovi niske frekvencije zvuka podložni su utjecaju većine izvora antropogene buke u moru, osim sonara i pingera najviših frekvencija (Hildebrand, 2009.) Kao negativni odgovori u promjeni ponašanja na prisutnost antropogne buke zabilježene su promjene hranidbenih navika, komunikacije, detekcije plijena/predatora i napuštanje staništa. Perajari su osjetljivi na zvuk kako na zraku tako i pod

vodom i time podložni negativnom utjecaju antropogene buke u oba medija. Dokazano je da perajari, pravi tuljani (Phocidae) imaju izraženu akustičnu osjetljivost pod vodom i to pogotovo na zvukove viših frekvencija (Southall i sur., 2000).

## 2.5. Utjecaj buke na sluh morskih ptica

Ptice mogu biti izložene podvodnoj buci tijekom hranjenja i zračnoj buci dok se gnijezde u svojim kolonijama. Do danas, nema zabilježenih studija o utjecaju podvodne buke na sluh morskih ptica. Međutim, postoji mnogo podataka o oštećenju stanica u bazilarnom papilu kopnenih ptica uzrokovanom bukom (Nakagawa i sur., 1997; Hu i sur., 2000). Ptice su sposobne obnavljati stanice svoje pužnice i vestibularnog sustava, te bi stoga mogle biti otpornije na oštećenje sluha od sisavaca (Solan i Whiteley, 2016).

### 3. MEHANIČKI STRES I BAROTRAUMA

Barotrauma označava fizičko oštećenje ili ozljedu uzrokovanu promjenama tlaka. Kod morskih organizama, to se obično odnosi na učinke promjena tlaka u njihovom okruženju, kao što su brzi usponi ili silazi, ali može biti uzrokovana i intenzivnom podvodnim bukom. Impulzivni zvukovi poput industrijskih ili vojnih podvodnih eksplozija te seizmičkih impulsa nastalih geofizičkim istraživanjima mogu izazvati barotraumu i mehanički stres u tkivima zbog visokih razlika u tlaku koje stvaraju brzi zvučni valovi (Casper i sur., 2013). Prema Popper i sur. (2014) postoje dva glavna mehanizma koji uzrokuju barotraumu: (1) stvaranje mjehurića zbog promjena u topivosti plinova u krvi, što može rezultirati plinskim embolijama s rupturom krvnih žila i organskim oštećenjima; (2) kavitacija i rezonancije u prirodno nastalim zračnim mjehurićima i šupljinama, poput mjehurića plivanja, što uzrokuje mehanički stres u okolnim organima i tkivima uz eventualnu rupturu mjehurića plivanja.

Intenzivni zvučni valovi mogu uzrokovati iščašenja ili ruptore kostiju u srednjem uhu i oštećenje tkiva (Klima i sur., 1988; Casper i sur., 2013) zbog mehaničkih sila poput kavitacije i drugih učinaka poput povećanog tlaka cerebrospinalne tekućine (Ketten i sur., 1993). Podvodne detonacije pojačavaju eksplozivni učinak eksploziva. Na primjer, dok slučajne detonacije vatrometa u zraku uzrokuju opekotine, podvodne detonacije uzrokuju traumatske povrede mozga i krvarenje pluća (Nguyen i sur., 2014). Barotrauma se javlja pri visokim razinama primljenog zvuka obično u blizini snažnih izvora zvuka, na udaljenostima ovisnim o razini izvora i prijenosnim svojstvima medija (Solan i Whiteley, 2016).

#### 3.1. Barotrauma i mehanički stres kod bekralješnjaka

Dva netipična masovna nasukavanja, koja su uključivala devet divovskih lignji, bila su povezana sa seizmičkim istraživanjima koja su se odvijala u obližnjim podvodnim kanjonima gdje se ova vrsta koncentrira. Dva primjerka pretrpjela su velika oštećenja više organa, uključujući oštećenja unutarnjih mišićnih vlakana, škrge, jajnika, želuca i probavnog trakta. Ostale lignje su vjerojatno bile dezorijentirane zbog opsežnog oštećenja njihovih statocista. Lignje bez znakova barotraume možda su uginule od gušenja ako su isplivale na površinu dok su bile dezorijentirane (Guerra i sur., 2011).



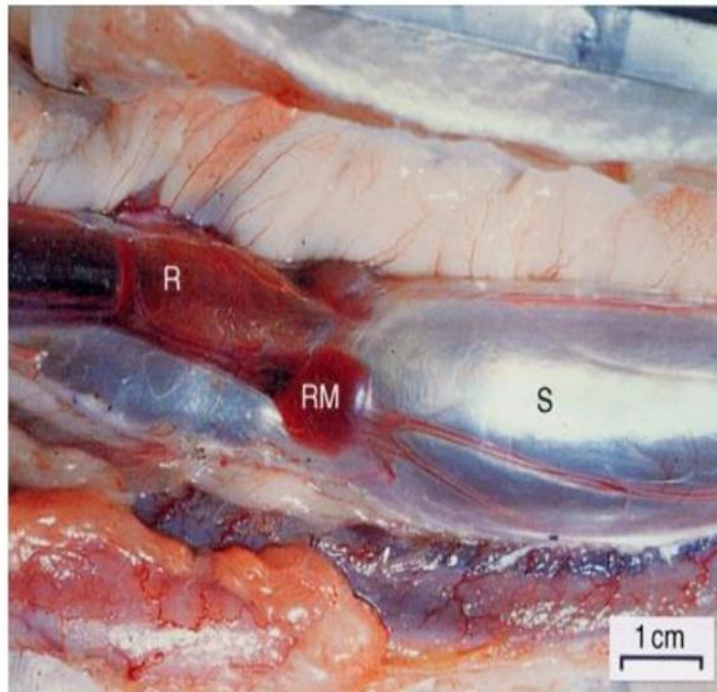
Prelazak iz dubokih, hladnih voda u toplije, pliće vode uzrokovao bi desaturaciju kisika jer hemocijanin, protein koji prenosi kisik kod glavonožaca, ima manji afinitet za kisik na višim temperaturama (Brix i sur., 1994). Oštećenja kružnih i radijalnih mišićnih vlakana plašta kod divovskih lignji mogu biti rezultat složenih obrazaca širenja zvuka i brzine čestica na prijelazima između tkiva s različitim gustoćama i elastičnim svojstvima. Oštećenje plašta primijećeno je kod jedinke koja je pretrpjela najtežu barotraumu (Slika 4), što ukazuje na to da je mogla biti izložena zoni konvergencije seizmičkih zvučnih valova reflektiranih s površine mora/morskog dna ili čak od strmih podvodnih kanjona u području seizmičkog istraživanja. Razlike u stupnju barotraume među različitim jedinkama koje su se nasukale istovremeno, a koje su bile izložene istom seizmičkom istraživanju, ističu izazove u predviđanju štete uzrokovane bukom. U ovom slučaju, neke divovske lignje su pretrpjele izravnu smrtnost zbog barotraume, dok se činilo da je smrt drugih rezultat neizravnih učinaka fizioloških i bihevioralnih reakcija na izloženost buci ([www.nationalgeographic.com](http://www.nationalgeographic.com)).



Slika 4. Uginula divovska lignja s oštećenjima plašta uzrokovanim barotraumom (Izvor: [www.nationalgeographic.com](http://www.nationalgeographic.com))

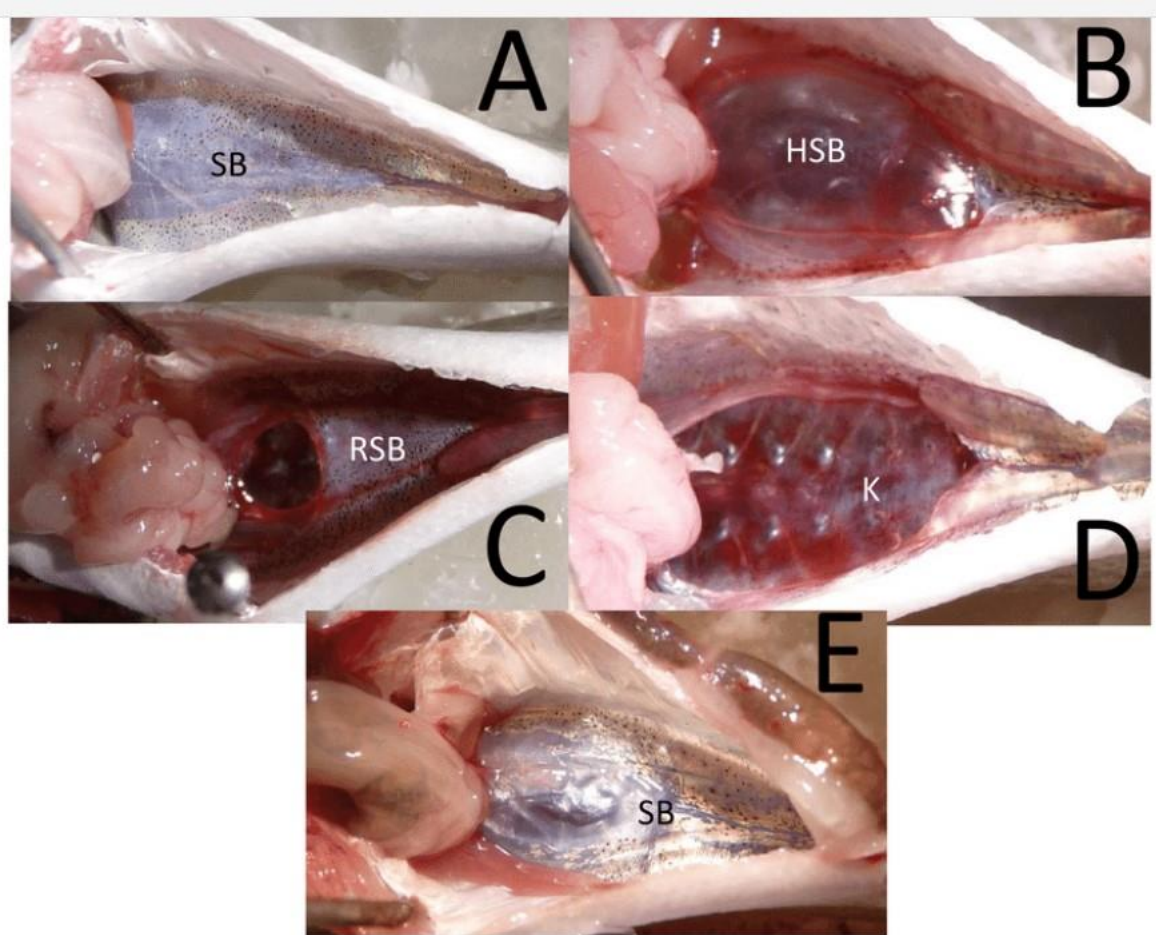
### 3.2. Mehanički stres i barotrauma kod riba

Vrste riba koje su Physostomi (fizostome, zrakovodice) imaju pneumatski kanal koji povezuje plivaći mjehur i jednjak (Slika 5). Ove ribe mogu brzo kontrolirati volumen zraka u plivaćem mjehuru gutanjem ili ispuštanjem zraka. Brza redukcija volumena zraka kao odgovor na izloženost buci vjerojatno je objašnjenje niže razine akustične traume kod fizostomnih vrsta u usporedbi s Physoclisty (fizoklisti, bezzrakovodice) koje nemaju pneumatski kanal (Casper i sur., 2013).



Slika 5. Europska jegulja *Anguilla anguilla*; plivaći mjehur (S) i pneumatski kanal modificiran u resorpcijski dio (R) (Izvor: Pelster, 2011)

Težina akustične traume varira s veličinom unutar iste vrste i izloženosti zvuku. Yelverton i sur. (1973) su otkrili manju smrtnost kod većih riba izloženih podvodnim eksplozijama. Nasuprot tome, Casper i sur. (2013) su otkrili da su kod hibridnih prugastih brancina (*Morone saxatilis* i *Morone chrysops*) izloženih eksplozivnom zvuku manji pojedinci pokazivali niže razine akustične traume u usporedbi s većima (Slika 6). Iako veličina općenito utječe na utjecaj akustične traume, specifične fiziološke karakteristike vrsta, kao što je njihova fizostomnost ili fizoclistoznost, također igraju ključnu ulogu u određivanju oštećenja (Casper i sur., 2013).



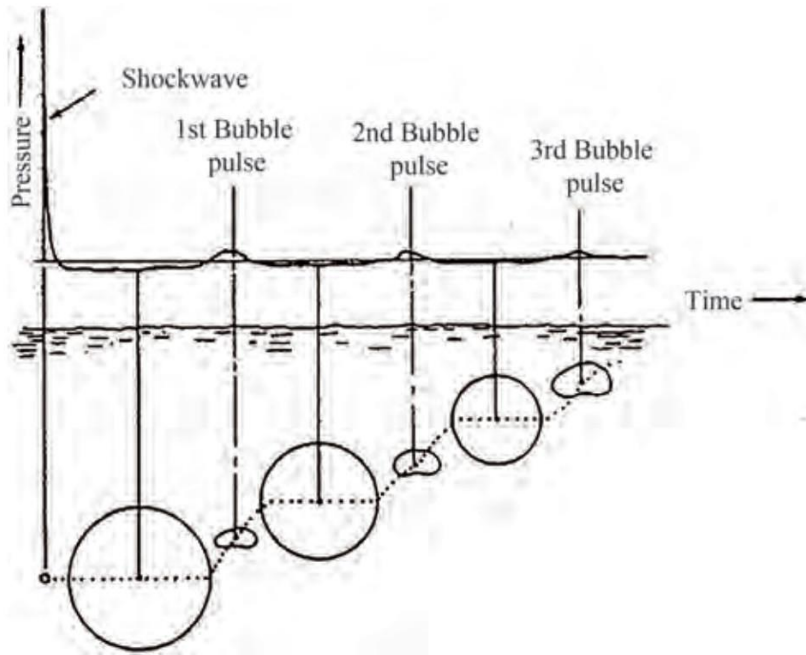
Slika 6. Primjeri ozljeda uzrokovanih barotraumom kod hibridnih prugastih brancina: kontrolna riba s prikazanim zdravim plivaćim mjehurom (A); riba s izbočenjem plivaćeg mjehura (B); riba s ruptiranim plivaćim mjehurom (C); riba s krvarenjem u bubregu (D); riba s potpuno oporavljenim plivaćim mjehurom (E) (Casper i sur., 2013).

### 3.3. Mehanički stres i barotrauma kod morskih kornjača

Smrt i ozljede morskih kornjača dokumentirane su u blizini podvodnih eksplozija (Klima i sur., 1998; Viada i sur., 2008), no ti su utjecaji prvenstveno pripisani barotraumi uzrokovanoj izloženošću visokom energijom udarnog vala koji nastaje eksplozijama. Zbog svoje krute vanjske anatomije, moguće je da su morske kornjače donekle zaštićene od utjecaja impulzivnih zvukova niže energije (Solan i Whiteley, 2016).

### 3.4. Mehanički stres i barotrauma kod morskih sisavaca

Barotrauma je otkrivena kod kitova i dupina izloženih podvodnim eksplozijama tijekom pomorskih vježbi ili industrijskih aktivnosti. Početni udarni val od podvodne eksplozije prati niz pritisnih pulseva povezanih s pulsacijama plinskog mjehura ili kugle nastale eksplozijom (Slika 7) (Geers i Hunter, 2002).



Slika 7. Podvodna eksplozija (Izvor: Geers i Hunter, 2002)

Oštećenja uzrokovana podvodnim eksplozijama mogu se klasificirati kao primarna, sekundarna i tercijarna. Primarna predstavljaju izravne učinke udarnog vala na tjelesna tkiva, sekundarna tjelesne ozljede uzrokovane objektima raznesenima udarnim valom, dok se tercijarna odnose na ozljede uzrokovane bacanjem tijela na nepomične objekte. Ovisno o nekoliko čimbenika, poput udaljenosti od eksplozije ili veličine životinje, ozljede mogu varirati od smrtonosnih do nesmrtonosnih, poput oštećenja dijelova uha kod sisavaca. Svi morski sisavci imaju posebne prilagodbe za zaštitu od promjena tlaka povezanih s ronjenjem. Unatoč tim prilagodbama koje minimiziraju oštećenja uzrokovana promjenama tlaka tijekom tipičnog ronjenja, morski sisavci nisu imuni na eksplozijske ozljede, velikim dijelom zato što pritisci kod eksplozija daleko nadmašuju pritiske pri ronjenju, a udarni valovi traju mnogo kraće od promjena

tlaka tijekom ronjenja, na koje su životinje prilagođene. Svi morski sisavci zadržali su zrakom ispunjene srednje uši. Stoga su, baš kao i kod ljudi te drugih kopnenih sisavaca, uši morskih sisavaca najosjetljivije strukture na eksplozijske ozljede i akustičnu traumu (Solan M., i Whiteley N., 2016).

### 3.5. Mehanički stres i barotrauma kod morskih ptica

Podvodne eksplozije uzrokuju ozbiljna oštećenja kod morskih ptica. U istraživanju Yelverton i sur. (1973) zabilježeni su i subletalni učinci koji su uključivali komu, promjene u disanju i nemogućnost kontrole pokreta. Danil i Leger (2011) zabilježili su veliku smrtnost vrste *Aechmophorus occidentalis* u području gdje su se izvodile vojne vježbe.

## 4. ODGOVOR NA STRES

Kada su izložene glasnoj ili kroničnoj podvodnoj buci, morske životinje pokazuju fiziološke reakcije na stres, uključujući povećanje razine hormona stresa poput kortizola, što može dovesti do potisnutog imunološkog odgovora, smanjenog reproduktivnog uspjeha i inhibicije rasta. Glasna buka također može povećati brzinu otkucaja srca kod morskih sisavaca, što je štetno za njihovo opće zdravlje. Pored fizioloških reakcija, buka izaziva promjene u ponašanju, uključujući promjene u komunikaciji, pri čemu mnoge vrste mijenjaju svoje glasanje kako bi izbjegle prikrivanje zvukova. Životinje mogu izbjegavati područja s visokom razinom buke, što dovodi do premještanja iz ključnih staništa, smanjenja mogućnosti hranjenja i poremećaja migracijskih ruta. Također, podvodna buka može ometati sposobnost grabežljivaca da otkriju plijen, što može smanjiti učinkovitost hranjenja i dugoročno utjecati na preživljavanje i reprodukciju. Produljena ili intenzivna izloženost glasnim zvukovima može uzrokovati gubitak sluha kod morskih životinja, posebno kod vrsta poput dupina i kitova koje se oslanjaju na eholokaciju, dok nagli i intenzivni zvukovi mogu izazvati akustičnu traumu i akutni stres, potencijalno dovodeći do dezorijentacije ili smrti. Dugoročne ekološke posljedice podvodne buke uključuju opadanje populacije zbog kroničnog stresa i premještanje iz područja zagađenih bukom, što može promijeniti distribuciju vrsta i poremetiti dinamiku ekosustava (Solan i Whiteley, 2016).

### 4.1. Odgovor na stres kod beskralješnjaka

Buka može značajno utjecati na reprodukciju, rast i razvoj morskih beskralješnjaka, a ti učinci najvjerojatnije su uzrokovani stresnim odgovorima organizama. Primjerice, istraživanja na škampima pokazala su da izloženost buci nekoliko decibela višoj od normalne u rasponu od 25-400 Hz dovodi do smanjenog unosa hrane i povećane metaboličke aktivnosti, što se očituje kroz povećanu potrošnju kisika i izlučivanje amonijaka. Ovi rezultati sugeriraju da su škampi pod stresom zbog buke trošili više energije, što je dovelo do neravnoteže između unosa i potrošnje energije, rezultirajući smanjenim rastom tijela. Negativan utjecaj bio je posebno izražen kod ženki, koje su pokazale niže stope reprodukcije i manji broj ženki koje nose jaja (Solan i Whiteley, 2016).

Suprotno tome, istraživanje provedeno na ličinkama rakova nije pokazalo značajne razlike u preživljavanju ili vremenu za presvlačenje između kontrolne skupine i skupine izložene buci visokog intenziteta. Ipak, neke vrste rakova, poput *Austrohelice crassa* i *Hemigrapsus crenulatus*,

pokazale su da je potrebno više vremena do metamorfoze kada su bile izložene buci iz plimnih ili morskih vjetroturbina, dok su jedinke izložene zvukovima prirodnog staništa imale skraćeno vrijeme do metamorfoze. Ove razlike u odgovorima mogu biti rezultat različitih eksperimentalnih postavki ili bioloških karakteristika vrsta (Pearson i sur., 1994). Dodatno, istraživanja su pokazala da buka može utjecati na imunološke odgovore kod morskih beskralješnjaka, poput jastoga gdje je izloženost buci uzrokovala promjene u hematološkim i imunološkim parametrima, što ukazuje na to da buka djeluje kao stresor za ove organizme (Solan i Whiteley, 2016).

#### 4.2. Odgovor na stres kod riba

Istraživanje Bannera i Hyatta (1973) pokazalo je povećanu smrtnost jaja i embrija kod vrsta *Cyprinodon variegatus* i *Fundulus similis* izloženih razinama buke povećanim za 15 dB re 1  $\mu$ Pa. Preživjeli mladunci imali su sporije stope rasta. Sličan pad preživljavanja jaja vrste *Engraulis mordax* uočen je nakon izlaganja zračnim topovima (Holliday i sur., 1987). Poteškoće u razdvajanju učinaka zbog barotraume, fiziološkog stresa ili kombinacije oba čimbenika često su prisutne, što je slično ranim eksperimentima Ruckera (1973) koji su pokazali povećanu smrtnost jaja pastrve i lososa izloženih udarnim valovima. Smrtonosni učinci zvuka činili su se ograničenima na embrionalne stadije ovih vrsta. S druge strane, neka istraživanja nisu pokazala učinke na uspjeh izvaljivanja ličinki i njihovo preživljavanje ili njihovu duljinu i masu nakon izlaganja povremenim reprodukcijama zvukova brodova u laboratorijskim uvjetima (Bruintjes i Radford, 2014).

Subletalni učinci stresa uzrokovanog bukom su raznoliki i mogu utjecati na rast i kondiciju. Na primjer, morski konjici izloženi buci u akvariju (123-137 dB re  $\mu$ Pa u usporedbi s 111-120 dB u kontrolnoj skupini) imali su manju masu i lošiju kondiciju od kontrolne skupine. Također morski konjici izloženi buci bili su značajno pogođeni bubrežnim parazitima (Anderson i sur., 2011).

Fewtrell i McCauley (2012) primijetili su znakove anksioznosti kod vrste *Pseudocaranx dentex* izloženih pojedinačnim pucnjevima seizmičkih zračnih topova, pri čemu su se ove reakcije linearno povećavale s razinom izloženosti do 147 dB re  $\mu$ Pa. Ribe su reagirale standardnim ponašanjem protiv predatora, plivajući prema dnu, iako su razine buke bile približno 12 dB više na donjem kraju velikog rezervoara.

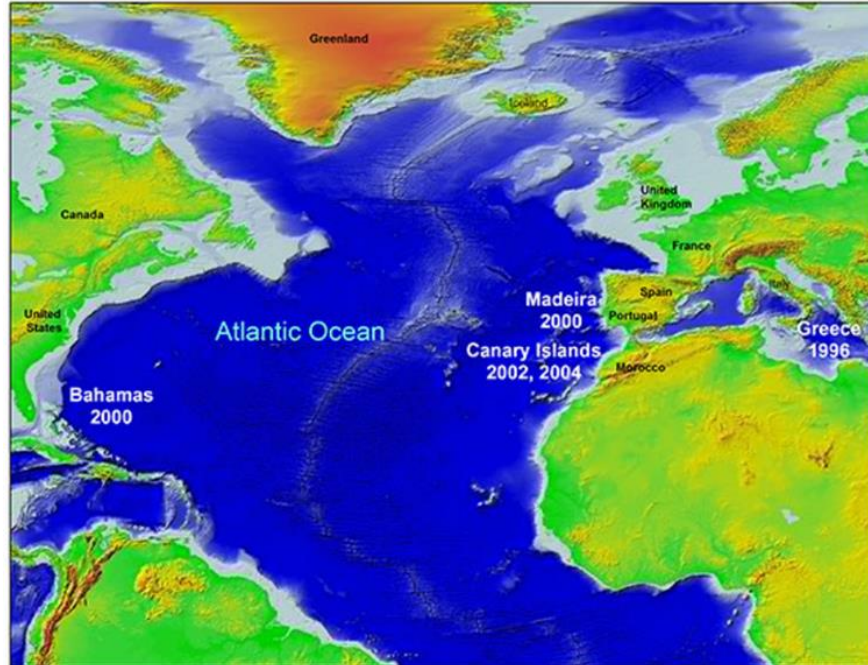
#### 4.3. Odgovor na stres kod morskih sisavaca

Masovna nasukavanja kljunastih kitova su rijetka, sa samo 136 prijavljenih događaja od 1874. do 2004. Od tih događaja, dva su imala prijavljene detalje o korištenju, vremenu i lokaciji sonara u odnosu na masovna nasukavanja. Deset drugih masovnih nasukavanja dogodilo se u istom prostoru i vremenu kada i pomorske aktivnosti koje su mogle uključivati vojni sonar (D'Amico i sur., 2009).

Do 2014. zabilježeno je još pet dodatnih događaja nasukavanja kljunastih kitova povezanih s vojnim sonarom. Svi ti događaji imali su tri dosljedne značajke: (1) mjesta nasukavanja bila su unutar 80 km od konture dubine od 1.000 metara (odnosno, gdje duboka voda dolazi blizu obale); (2) dogodila su se u područjima gdje su prethodno prijavljena masovna nasukavanja kljunastih kitova; i (3) svi su uključivali Cuvierove kljunaste kitove, vrstu koja rijetko masovno nastrada. Iako su ova nasukavanja kljunastih kitova bila blisko povezana s vremenom i lokacijom korištenja vojnih sonara od strane mnogih nacija, još uvijek nije utvrđeno je li zvuk sonara uzrokovao nasukavanja (Ketten, 2014).

U pet dokumentiranih slučajeva (Slika 8) postoji dovoljno informacija o vojnim vježbama i vremenima i lokacijama nasukavanja kako bi se utvrdilo da su vježbe s više brodova opremljenih sonarima doprinijele nasukavanjima. Ti događaji dogodili su se u Grčkoj (1996.), Bahamima (2000.), Madeiri u Portugalu (svibanj 2000.) i Kanarskim otocima (2002. i 2004.). Obdukcije koje su provedene pokazale su slične ozljede, no nijedna od životinja nije imala akustičnu traumu ([www.dosits.org](http://www.dosits.org)).





Slika 8. Pet dokumentiranih slučajeva nasukavanja kljunastih kitova (Izvor: [www.dosits.org](http://www.dosits.org))

#### 4.4. Odgovor na stres kod morskih ptica

Nema studija o reakcijama na podvodnu buku kod morskih ptica, ali postoje zapisi o utjecaju buke iz zraka. Najdrastičniji primjer je uginuće 7000 carskih pingvina, *Aptenodytes patagonicus* od gušenja zbog stampeda (Solan i Whiteley, 2016). Brown (1990) zaključuje da je najvjerojatnije objašnjenje za ovaj događaj bio snažan alarmni odgovor na približavanje velikog zrakoplova koji je letio na niskoj visini (250 m) u blizini kolonije. Većina uginulih pingvina bili su ptići, a u ovom slučaju neposredni učinci i učinci na razini populacije su jasno povezani, iako je buka izazvala stres (reakciju bijega) koji nije bio izravno smrtonosan.

## 5. ZAKLJUČAK

Podvodna buka predstavlja ozbiljan i kompleksan problem s potencijalno dalekosežnim posljedicama za morski ekosustav i njegove stanovnike. Kroz istraživanje utjecaja na različite skupine organizama, uključujući morske sisavce, beskralješnjake, ribe, kornjače i ptice, jasno je da povećane razine buke u moru mogu uzrokovati značajne promjene u ponašanju, fiziologiji i preživljavanju ovih vrsta. Iako su učinci podvodne buke široko dokumentirani, potrebno je dodatno istraživanje kako bi se u potpunosti razumjeli svi aspekti ovog problema. Razumijevanje specifičnih mehanizama i načina na koji buka utječe na različite vrste ključno je za razvijanje učinkovitih mjera očuvanja i politike upravljanja. Implementacija strategija koje uključuju smanjenje buke, promjene u načinu provođenja ljudskih aktivnosti u moru i poboljšanje regulative može pomoći u ublažavanju negativnih posljedica na morski okoliš. S obzirom na sve veću ljudsku prisutnost u oceanskim područjima, ključno je da znanstvenici, donosioci odluka i industrijski akteri surađuju u cilju smanjenja podvodne buke i zaštite osjetljivih morskih ekosustava. Samo kroz integrirani pristup i proaktivne mjere može se osigurati očuvanje zdravlja naših oceana i svih njihovih stanovnika za buduće generacije.

## 6. LITERATURA

- Anderson, P. A., Berzins, I. K., Fogarty, F., Hamlin, H. J., Guillette, L. J. (2011) Sound, stress and seahorses: the consequences of a noisy environment to animal health. *Aquaculture*, 311(1-4), 129-138.
- Banner, A., Hyatt, M. (1973) Effects of noise on eggs and larvae of two estuarine fishes. *Transactions of the American Fisheries Society*, 102(1), 134-136
- Brix, O., Colosimo, A., Giardina, B. (1994) Temperature dependence of oxygen binding to cephalopod haemocyanins: ecological implications. *Physiology of cephalopod molluscs: Lifestyle and performance adaptation*, pp. 149-162.
- Brown, A. (1990) Measuring the effect of aircraft noise on lated jet aircraft noise on heart rate and behaviour of sea birds. *Environment International*, 16, 587-592.
- Bruintjes, R., Radford, A. N. (2014) Chronic playback of boat noise does not impact hatching success or posthatching larval growth and survival in a cichlid fish. *PeerJ*, 2.
- Casper, B. M., Halvorsen, M. B., Matthews, F., Carlson, T. J., Popper, A. N. (2013) Recovery of Barotrauma Injuries Resulting from Exposure to Pile Driving Sound in Two Sizes of Hybrid Striped Bass. *PLoS ONE* 8(9): e73844.
- D'Amico, A., Gisiner, R. C., Ketten, D. R., Hammock, J. A., Johnson, C., Tyack, P. L., Mead, J. (2009) Beaked whale strandings and naval exercises. *Aquatic Mammals*, 35(4), 452-472.
- Edds-Walton, P. L. (1997) Acoustic communication signals of mysticete whales. *The International Journal of Animal Sound and its Recording, Bioacoustics*, 8(1-2), 47-60.
- Fewtrell, J. L., McCauley, R. D. (2012) Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid. *Marine pollution bulletin*, 64(5), 984-993.
- Geers, H., Hunter, K. (2002) An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(4), 1584-1601.
- Guerra, A., Gonzalez, A. F., Pascual, S., Dawe, E. G. (2011) The giant squid *Architeuthis*: an emblematic invertebrate that can represent concern for the conservation of marine biodiversity. *Biological Conservation*, 144(7), 1989-1997.

- Hildebrand, J. A. (2009) Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 5-20.
- Holliday, D. V., Pieper, R. E., Clarke, M. E., Greenlaw, C. F. (1987) The effects of airgun energy releases on the eggs, larvae and adults of the Northern Anchovy. American Petroleum Institute, Washington, DC, 111 pp.
- Hu, B. H., Guo, W., Wang, P. Y., Henderson, D., Jiang, S. C. (2000) Intense noise-induced apoptosis in hair cells of guinea pig cochleae. *Acta Otolaryngol*, 120, 19-24.
- Ketten, D. R., Lien, J., Todd, S. (1993) Blast injury in humpback whale ears: evidence and implications. *Journal of the Acoustical Society of America*, 94(3), 1849-1850.
- Klima, E. F., Gitschlag, G. R., Renaud, M. L. (1998) Impacts of the explosive removal of offshore petroleum platforms on sea turtles and dolphins. *Marine Fisheries Review*, 50(3), 33-42.
- McCauley, R. D., Fewtrell, J., Popper, A. N. (2003) High-intensity anthropogenic sound damages fish ears. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113(1), 631-642.
- Nakagawa, T., Yamane, H., Shibata, S., Takayama, M., Sunami, K., Nakai, Y. (1997) Two modes of auditory hair cell loss following acoustic overstimulation in the avian inner ear. *ORL Journal for Otorhinolaryngology and its related specialities*, 59, 303-310.
- Nguyen, N., Hunt, J. P., Lindfors, D., Griffenstein, P. (2014) Aerial fireworks can turn deadly underwater: magnified blast causes severe pulmonary contusion. *Injury Extra*, 45, 32-34.
- O'Hara, J., Wilcox, J. R. (1990) Avoidance responses of loggerhead turtles, *Caretta caretta*, to low-frequency sound. *Copeia*, 1990, 564-567.
- Pearson, W. H., Skalski, J. R., Sulkin, S. D., Malme, C. I. (1994) Effects of seismic energy releases on the survival and development of zoeal larvae of Dungeness crab (*Cancer magister*). *Marine Environmental Research*, 38(2), 93-113.
- Pelster, B. (2011) Swimbladder Function in the European Eel *Anguilla anguilla*. *Fishes* 8(3).
- Peng C., Xinguo Z., Liu, G. (2015) Noise in the Sea and Its Impacts on Marine Organisms. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12(10), 12304-12323.
- Popper, A. N., Hastings. M. C. (2009). The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. *Journal of Fish Biology*, 75(3), 455-489.

- Richardson, W. J., Greene, C. R., Malme, C. I., Thompson, D. H. (1995). *Marine Mammals and Noise*, 576 pp.
- Rucker, R. S. (1973) Effect of sonic boom on fish. DTIC report, Bureau of Sport, Fisheries and Wildlife, Seattle, WA, Western Fish Disease Lab, 72 pp.
- Salas, A. K., Capuano, A. M., Harms, C. A., Piniak, W. E. D., Mooney, T. A. (2023) Temporary noise-induced underwater hearing loss in an aquatic turtle (*Trachemys scripta elegans*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154(2), 1003-1017.
- Smith, M. E. (2004) Noise-induced stress response and hearing loss in goldfish (*Carassius auratus*). *Journal of Experimental Biology*, 207(3), 427-435.
- Solan, M., Whitley, N. M. (2016) *Stressors in the Marine Environment: Physiological and ecological responses; societal implications*. Oxford University Press, 356 pp.
- Southall, B., Schusterman, R., Kastak, D. (2000) Masking in three pinnipeds: Underwater, low-frequency critical ratios. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108, 1322-1326.
- Viada, S. T., Hammer, R. A., Racca, R., Hannay, D., Thompson, M. J., Balcom, B. J., Phillips, N.W. (2008) Review of potential impacts to sea turtles from underwater explosive removal of offshore structures. *Environmental Impact Assessment Review*, 28, 267-285.
- Yelverton, J. T., Richmond, D. R., Fletcher, E. R., Jones, R. K. (1973) Safe distances from underwater explosions for mammals and birds. Report by the Lovelace Foundation for Medical Education and Research, Albuquerque, NM, for Defense Nuclear Agency, Washington, DC. Technical Report No. 3114 T., 72 pp.

#### MREŽNI IZVORI:

- Ministarstvo Gospodarstva i Održivog Razvoja (MGOR) - Smjernice za sagledavanje i ublažavanje utjecaja antropogene buke na morske sisavce i morske kornjače u postupcima procjene utjecaja na okoliš, postupcima strateške procjene utjecaja na okoliš strategija, planova i programa i ocjene prihvatljivosti za ekološku mrežu: [https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/uploads/specificni-dokumenti/dokumenti/Smjernice\\_buka\\_MINGOR\\_2022.pdf](https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/uploads/specificni-dokumenti/dokumenti/Smjernice_buka_MINGOR_2022.pdf) (Pristupljeno: 18.09.2024)

- National Geographic: <https://www.nationalgeographic.com/animals/article/110503-giant-squid-octopus-sonar-acoustic-tests-science-whales-sound> (pristupljeno 20.08.2024)
- <https://dabrownstein.com/2015/02/20/deep-blue-openings-in-our-sound-filled-world/> (pristupljeno 20.08.2024)
- <https://dosits.org/animals/effects-of-sound/potential-effects-of-sound-on-marine-mammals/strandings/> (pristupljeno 21.08.2024)
- <https://dosits.org/animals/advanced-topics-animals/blast-injury> (pristupljeno 21.08.2024)
- NOAA: [www.noaa.gov](http://www.noaa.gov) (pristupljeno 22.8.2024)

## **IZJAVA**

S punom odgovornošću izjavljujem da sam završni rad izradila samostalno, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentorice izv. prof. dr. sc. Tatjane Dobroslavić.

---

Karla Brajović