

Osjetilni sustavi kod hrskavičnjača : građa, funkcija i ekološki značaj

Amižić, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad (sveučilišni)

2025

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:371235>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2026-09-08**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Faculty of Science in Split / Digitalni repozitorij Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Splitu](#)



Dabar

SVEUČILIŠTE U SPLITU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET

Lucija Amižić

**OSJETILNI SUSTAVI KOD HRSKAVIČNJAČA:
GRAĐA, FUNKCIJA I EKOLOŠKI ZNAČAJ**

Završni rad

Split, 2025.

Ovaj rad, izrađen u sklopu kurikuluma studijskog programa Biologija, pod vodstvom doc. dr. sc. Antonele Sovulj predan je na ocjenu Odjelu za biologiju Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Splitu radi stjecanja zvanja prvostupnice biologije (univ. bacc. biol.).

Temeljna dokumentacijska kartica

Završni rad

Sveučilište u Splitu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Odjel za biologiju

Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

OSJETILNI SUSTAVI KOD HRSKAVIČNJAČA: GRAĐA, FUNKCIJA I EKOLOŠKI ZNAČAJ

Lucija Amižić

SAŽETAK

Specijalizirani osjetilni organi hrskavičnjača, uključujući vid, sluh, mehanorecepciju, kemorecepciju i elektrorecepciju, omogućili su im preživljavanje i ekološku dominaciju više od 400 milijuna godina. Svaki sustav ima specifičnu funkciju: vid je prilagođen različitim svjetlosnim uvjetima, kemoreceptori detektiraju mirisne i okusne molekule, unutarnje uho sudjeluje u percepciji zvuka i ravnoteži, neuromasti prate mehaničke podražaje, a Lorenzijeve ampule omogućuju elektrorecepciju. Integracija ovih sustava stvara složenu mrežu koja hrskavičnjačama omogućuje učinkovito lovljenje plijena, izbjegavanje predatora i prostornu orijentaciju, čime osiguravaju vlastiti opstanak i održavanje ravnoteže ekosustava.

Ključne riječi: hrskavičnjače, Chondrichthyes, osjetilni sustavi, evolucija

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu

Rad sadrži: 18 stranica, 8 slika, 24 literaturna navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku.

Mentor: doc. dr. sc. Antonela Sovulj, Prirodoslovno-matematički fakultet Split

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Antonela Sovulj, prof. dr. sc. Biljana Apostolska, doc. dr. sc. Nives Kević

Rad prihvaćen: rujan, 2025.

Basic documentation card

Thesis

University of Split
Faculty of Science
Department of Biology
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Sensory Systems in Chondrichthyes: Structure, Function, and Ecological Significance

Lucija Amižić

ABSTRACT

Specialized sensory organs of cartilaginous fishes, including vision, hearing, mechanoreception, chemoreception, and electroreception, have enabled their survival and ecological dominance for over 400 million years. Each system has a specific function: vision is adapted to different light conditions, chemoreceptors detect odor and taste molecules, the inner ear contributes to sound perception and balance, neuromasts monitor mechanical stimuli, and the ampullae of Lorenzini enable electroreception. The integration of these systems forms a complex network that allows cartilaginous fishes to efficiently hunt prey, avoid predators, and navigate their environment, thereby ensuring their survival and playing a key role in maintaining ecosystem balance.

Key words: cartilaginous fish, Chondrichthyes, sensory systems, evolution

Thesis deposited in library of Faculty of science, University of Split

Thesis consists of: 18 pages, 8 graphic figures, 24 references. Original language: Croatian.

Supervisor: Ph.D. Antonela Sovulj, Assistant Professor

Reviewers: Ph.D. Antonela Sovulj, Assistant Professor, Ph.D. Biljana Apostolska, Full Professor, Ph.D. Nives Kević, Assistant Professor

Thesis accept: September, 2025.

IZJAVA

kojom izjavljujem s punom materijalnom i moralnom odgovornošću da sam završni rad s naslovom OSJETILNI SUSTAVI KOD HRSKAVIČNJAČA: GRAĐA, FUNKCIJA I EKOLOŠKI ZNAČAJ izradila samostalno pod voditeljstvom doc. dr. sc. Antonele Sovulj. U radu sam primijenila metodologiju znanstveno istraživačkog rada i koristila literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrizirajući navela u završnom radu na uobičajen, standardan način citirala sam i povezala s fusnotama s korištenim bibliografskim jedinicama. Rad je pisan u duhu hrvatskog jezika.

Studentica

Lucija Amižić

1. UVOD.....	1
1.1 Sistematika hrskavičnjača.....	1
1.2. Biološke i ekološke karakteristike hrskavičnjača	3
1.2. Cilj rada	4
2. RAZRADA TEME.....	5
2.1. Osjetilo vida	5
2.2. Osjetilo njuha	8
2.3. Osjetilo okusa	10
2.4. Osjetilo sluha	10
2.5. Mehanorecepcija	12
2.6. Elektrorecepcija	13
3. ZAKLJUČAK	15
4. LITERATURA	16

1. UVOD

Hrskavičnjače (Chondrichthyes) su morske ribe kojima pripadaju razredi Elasmobranchii, prečnouste i Holocephali, cjeloglavke (Van der Laan, 2019). Specifičnost hrskavičnjača je skelet koji je većinom ili u potpunosti građen od hrskavice. U ekološkom smislu hrskavičnjače su važni predatori i ključ održavanja ravnoteže u morskim ekosustavima. Imaju značajnu ulogu u održavanju brojnosti vrsta u ekosustavu koje su niže u hranidbenom lancu, služe kao pokazatelji zdravlja oceana uklanjajući slabije jedinke te održavajući ravnotežu s konkurentima osiguravaju raznolikost vrsta (Motivarash, 2020).

Tijekom evolucije ove životinje su razvile pojedina osjetila odnosno osjetilne sustave koji im omogućavaju prednost u potrazi plijena, izbjegavanju predatora, međusobnoj komunikaciji i navigaciji. Osjetilni sustavi hrskavičnjača su osjetilo vida, osjetilo sluha, mehanosenzorna osjetila, elektrolepcijska te njušna osjetila koja su određena njihovim položajem u ekološkim nišama koje zauzimaju u morskim ekosustavima.

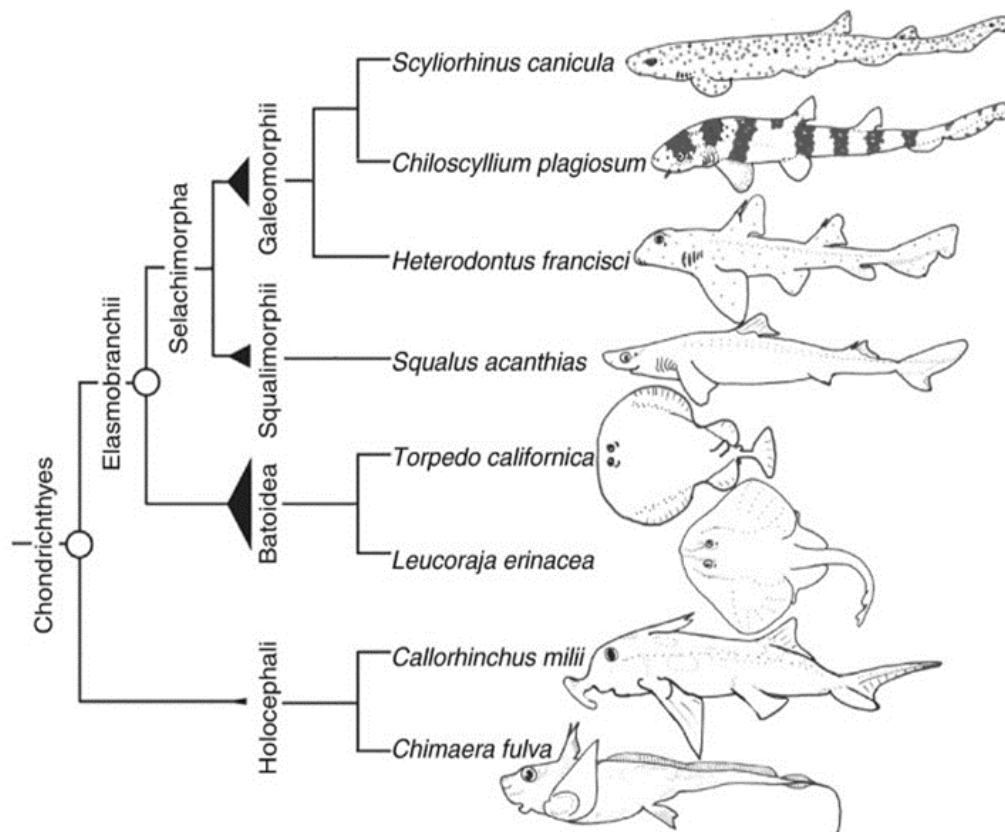
1.1 Sistematika hrskavičnjača

Hrskavičnjače, Chondrichthyes, obuhvaćaju oko 790 različitih vrsta podijeljenih u razrede Elasmobranchii odnosno prečnouste i Holocephali, odnosno cjeloglavke (Van der Laan, 2019) (Slika 1). Cjeloglavke obuhvaćaju dva izumrla reda Iniopterygia i Helodontida te jedan živući red Chimaeriformes odnosno himere s tri porodice: Callorhynchidae (slonovske ribe, *Callorhynchus*), Chimaeridae (prave himere, rodovi *Chimaera* i *Hydrolagus*) i Rhinochimaeridae (dugonose himere, rodovi *Rhinochimaera*, *Harriotta*, *Neoharriotta*).

Prečnouste obuhvaćaju podrazred Selachii odnosno morske pse i podrazred Batoidea odnosno raže. Nekoć su ovom razredu pripadale i danas izumrle slatkovodne vrste iz reda Xenacanthiformes (Gayford i Jambura, 2025). Glavni redovi prečnousta su: Hexanchiformes, šesteroškržni i sedmeroškržni morski psi, rodovi *Hexanchus*, *Heptranchias*, Squaliformes, dubokomorske vrste (*Squalus*, *Etmopterus*), Echinorhiniformes, ježopsi (*Echinorhinus*), Pristiophoriformes, pilonosci (*Pristiophorus*), Squatiniformes, predstavnici su sklatovi (*Squatina*), Heterodontiformes, (*Heterodontus*), Orectolobiformes, Lamniformes kojem pripadaju mako

morski psi te velika bijela psina i Carcharhiniformes, najbrojnija skupina morskih pasa (tigrasti morski psi, plavi psi, mlatovi). Uz dva živa podrazreda postoji još veliki broj izumrlih od kojih je jedan (*Xenacanthiformes*) živio u slatkim vodama.

Podrazred Batoidea ima šest redova i to: red Torpediniformes – električne raže, porodice: Torpedinidae (*Torpedo*) i Narcinidae (*Narcine*), red Pristiformes – pilani, Porodice: Pristidae (*Pristis*), red Rhiniformes – ražolike, porodice: Rhinidae (*Rhina*), red Rhinobatiformes – ražopsi, porodice: Rhinobatidae (*Rhinobatos*), Trygonorrhinidae (*Zapteryx*, *Pseudobatos*), red Rajiformes – prave raže, porodice: Rajidae (*Raja*, *Dipturus*), Arhynchobatidae (*Bathyraja*, *Rhinoraja*), red Myliobatiformes – bjelice, lisice, mantre, porodice: Dasyatidae (*Dasyatis*), Myliobatidae (*Aetobatus*, *Myliobatis*), Mobulidae (*Manta*, *Mobula*) i Gymnuridae (*Gymnura*) (Nelson et al. 2016).



Slika 1. Shematski prikaz sistematske podjele hrskavičnjača, Chondrichthyes (Izvor: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-93560-7_4)

1.2. Biološke i ekološke karakteristike hrskavičnjača

Potporni sustav hrskavičnjača građen je u potpunosti ili većinom od hrskavice. Kralježnica je podijeljena na repni i trupni dio, a nepokretna glava je stopljena s prvim kralješkom. Mišićni sustav proteže se sa svake strane duž tijela u dva mišićna snopa koji su podijeljeni na mio mere mioseptama. Koža hrskavičnjača prekrivena je plakoidnim ljusakama građenih od dentina što omogućava manju masu tijela i pokretljivost te smanjivanje trenja i zaštitu od nametnika. Plakoidne ljuske se spuštaju s površine kože u usnu šupljinu i sudjeluju u obnavljanju zubi tijekom života. U ustima zubi su poredani u nekoliko redova te se nadomještaju tijekom života (Young, 1981).

Probavni sustav se sastoji od usne šupljine s mnogobrojnim zubima, ždrijela i jednjaka na koji se nadovezuje želudac te tanko i debelo crijevo koje završava u nečisnici. Površinu crijeva povećava spiralni zalistak, a probavnom sustavu pridruženi su jetra, gušterača i slezena. Dišni sustav hrskavičnjača sastoji se od pet do sedam parova škržnih otvora koji se otvaraju direktno na površini tijela te spirakulum, zakržljali škržni otvor. Hrskavičnjače nemaju plivajući mjehur, a regulaciju u plivanju im osigurava jetra obogaćena uljem i mala težina kostura. Srce je dvodijelno venskog tipa, a arterije i vene grade zatvoreni krvotok (Young, 1981).

Srce se nalazi ispred oplećja zatvoreno u preikardu te ima jedan centar automacije u venskom zatonu i Kivijeovim protocima. Iz prednjeg dijela klijetke izlazi aortin čunj, a u njemu su redovi malih zalistaka. Iako su koštunjače evolucijski mlađe ribe, njihov je mozak slabije razvijen nego mozak hrskavičnih riba. Razlika se očituje u tome što se kod hrskavičnjača u pokrovu prednjeg mozga (paliu) nalaze živčane stanice, a kod riba koštunjača u pokrovu mozga su samo epitelne stanice.

Osjetilni organi služe za pronalaženje hrane, orijentaciju i otkrivanje opasnosti. Kopulatorni organi mužjaka omogućuju unutrašnju oplodnju hrskavičnih riba, a vrste mogu biti oviparne, odnosno polažu jaja, ovoviviparne kojima se jaja razvijaju unutar tijela ženke ili viviparne koje rađaju žive mlade. Kod morskih pasa prisutna je i pojava uterinog kanibalizma. Kod vrsta koje nose jaja gornji dijelovi jajovoda su prošireni u lupinske žlijezde (nidamentalni organi). Ove žlijezde stvaraju kožaste ovoje oko jaja (Young, 1981).

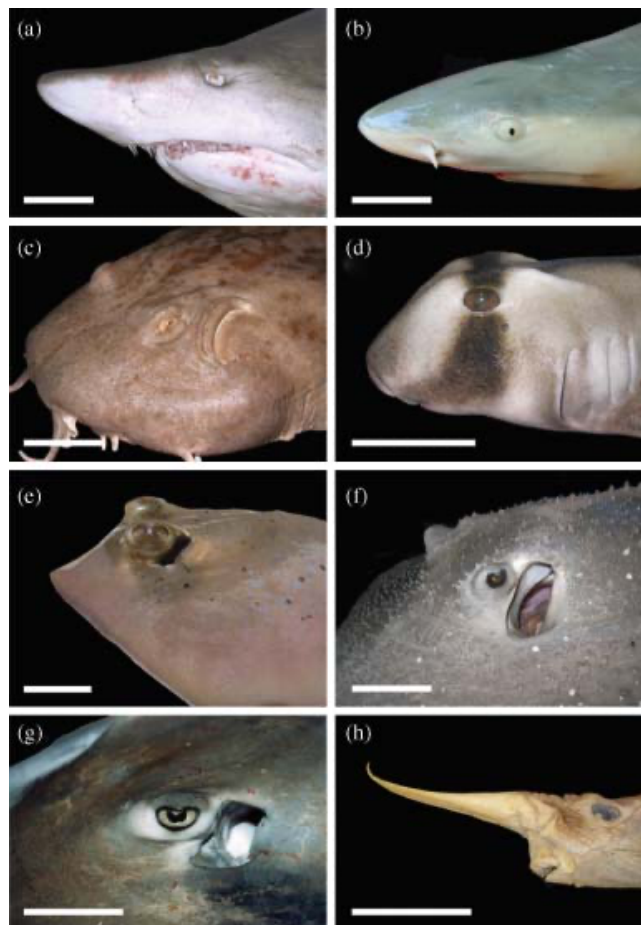
1.2. Cilj rada

Cilj ovog završnog rada je bio istražiti osjetilne sustave hrskavičnjača te objasniti anatomiju i morfologiju osjetilnih organa kao i fiziološke procese koji se odvijaju u njima te ulogu ovih sustava u načinu života ove skupine životinja. Također je cilj istaknuti i evolucijske prilagodbe hrskavičnjača na ekološke uvjete u morskom ekosustavu.

2. RAZRADA TEME

2.1. Osjetilo vida

Oči morskih pasa smještene su postranično na glavi, osim kod bentoskih vrsta poput rodova *Orectolobus* i *Squatina* kod kojih se oči nalaze više dorzalno (Slika 2). Oči kod raža položene su na leđnoj strani glave, a kod raža koje nisu toliko vezane za bentos, poput pripadnika porodica *Myliobatidae*, *Rhinopteridae* i *Mobulidae*, oči su smještene više sa strane (Hueter, 2004).



Slika 2. Fotografije dorzolateralne strane glave vrsta: (a) *Carcharias taurus*, (b) *Negaprion acutidens*, (c) *Orectolobus hutchinsi*, (d) *Heterodontus portusjacksoni*, (e) *Neotrygon kuhlii*, (f) *Urogymnus asperrimus*, (g) *Himantura fai* i (h) *Rhinochimaera atlanti*. (Izvor: https://www.researchgate.net/publication/224004053_Vision_in_elasmobranchs_and_their_relatives_21st_century_advances/figures)

Razlike u položaju očiju predstavljaju prilagodbe na pelagički, odnosno bentoski način života. U svih pripadnika hrskavičnjača oči su smještene nasuprot jedno drugom, što im omogućuje gotovo 360° vidnog polja. Osobito veliko vidno polje imaju morski psi koji plivaju valovitim lateralnim pokretima tijela. Ograničeni pokreti očiju zabilježeni su kod nekih vrsta, prvenstveno kako bi se kompenzirali pokreti tijela tijekom plivanja i stabiliziralo vidno polje (Harris, 1965).

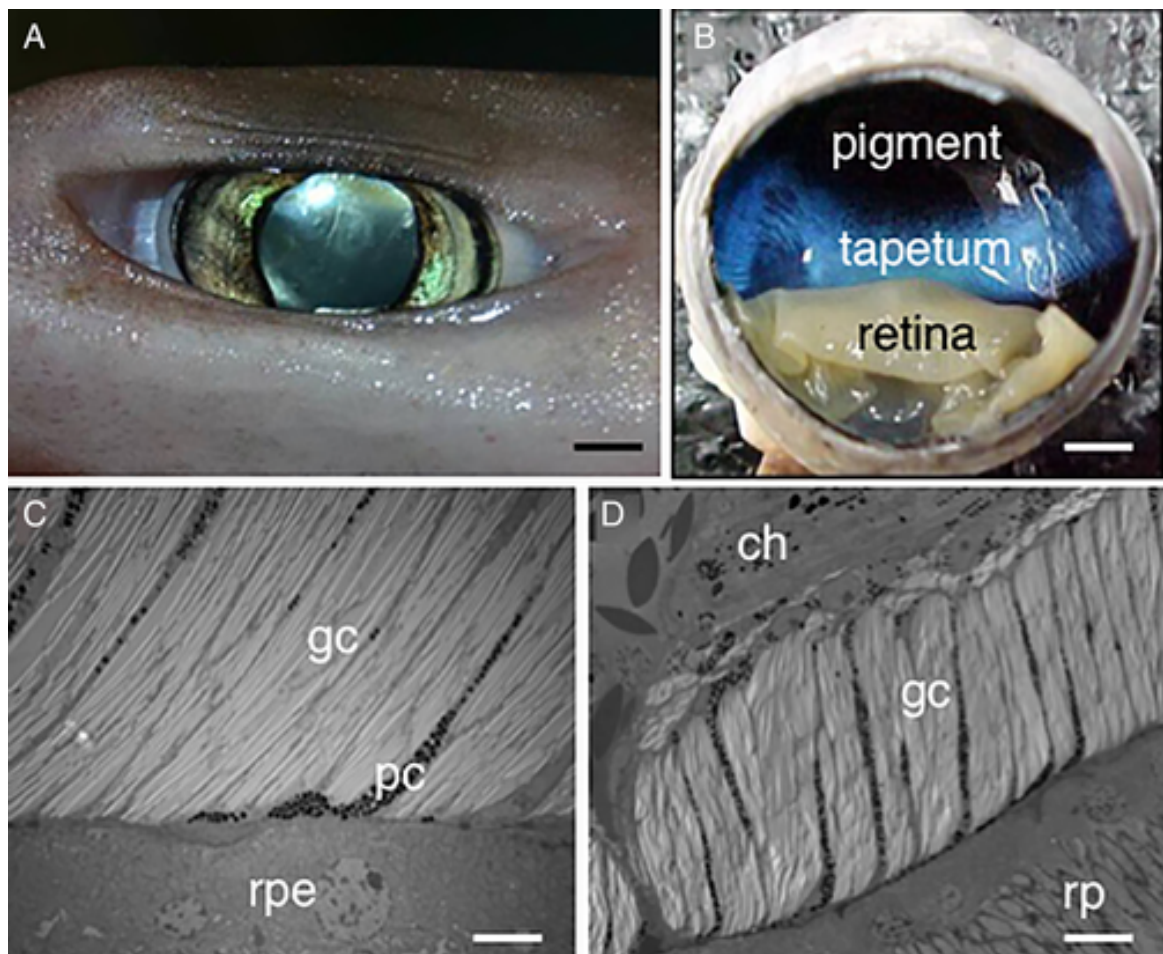
Na mrežnici hrskavičnjača nalazi se slijepa točka odnosno područje bez fotoreceptora na mjestu izlaska vidnog živca. Njihova sposobnost obrade vizualnih informacija u mozgu omogućuje im učinkovitu nadoknadu tog nedostatka. Binokularno preklapanje je kod većine pripadnika ove skupine ograničeno zbog lateralno postavljenih očiju. Međutim, kod predatorskih vrsta, koje ovise o preciznoj procjeni udaljenosti plijena, prisutno je usko frontalno područje binokularnog vida. Ovakav vidni sustav odražava ravnotežu između potrebe za širokim vidnim poljem i sposobnosti preciznog prostornog opažanja, ovisno o ekološkim potrebama pojedinih vrsta. Vid morskog psa dobro je razvijen i složeniji nego kod većine riba (Gilbert, 1963), a posjeduje duple mrežnice koje sadrže i štapičaste i čunjičaste fotoreceptore (Gruber i Cohen, 1985), što upućuje na visoke vizualne sposobnosti i mogućnost percepcije boja.

Sve pridružene strukture oka, odnosno svi dijelovi koji pomažu u zaštiti, pokretanju i funkciji oka, ali nisu same očne jabučice, odnosno očna pomagala (adnexa oculi) su dobro razvijena i složenija nego kod većine koštunjača, iako gornji i donji kapci kod većine vrsta nisu pokretni niti u potpunosti prekrivaju očnu jabučicu (Gilbert, 1963).

Kapci kao pokretni kožni poklopci kod većine hrskavičnjača nisu razvijeni, jer nisu potrebni u vodenom okolišu gdje se oko ne isušuje. Međutim, bentoski morski psi, poput pripadnika porodice Orectolobidae, posjeduju pokretljive kapke koji štite oko tijekom ukopavanja u sediment. Neke vrste morskih pasa, osobito one iz porodica Carcharhinidae i Sphyrnidae, posjeduju treći kapak, odnosno treptajuću (niktitacijsku) membranu, koja se može izvući iz donjeg nosnog kuta oka i prekriti njegov izloženi dio (Gilbert, 1963).

Membrana ima zaštitnu ulogu, sprječavajući oštećenja rožnice uslijed abrazije, a aktivira se tijekom hranjenja ili pri kontaktu sa stranim predmetima. Za razliku od toga, raže i himere ne posjeduju ovu membransku strukturu, već im je oko djelomično uvučeno u glavi, čime je zaštićeno

od ozljeda i čestica iz okoliša. Očnim mišićima hrskavičnjače mogu precizno pomicati oči u različitim smjerovima. Ova sposobnost igra važnu ulogu u praćenju plijena i orijentaciji u prostoru. Neke vrste, poput raža, mogu čak djelomično uvući oko unatrag u glavu, što im dodatno pomaže u zaštiti oka od oštećenja.



Slika 3. Prikaz sloja Tapetum lucidum A: Oko dubokomorskog psa (*Etmopterus* sp.), obojeni refleks iz kružne zjenice, B: Naznačeni dijelovi oka, C, D: Elektronska mikroskopija kristalnih struktura u oku vrste *Carcharhinus plumbeus*. Gvanin kristali (gc) raspoređeni su u reflektirajuće ploče, koje se mogu zatvoriti nakon migracije procesa pigmentnih stanica (pc) kada je oko prilagođeno svjetlu, ch – choroidea, rp – štapićasti fotoreceptori, rpe – retinalni pigmentni epitel.

Skala: C: 5 μ m, D: 10 μ m. (Izvor: <https://doi.org/10.1242/jeb.028589>)

Vanjski sloj oka sastoji se od sklere i zakrivljene, prozirne rožnice te šarenice koja može povećati veličinu zjenice pri slabom svjetlu ili je smanjiti pri jakom svjetlu. Pokretne zjenice u obliku crte se nalaze kod aktivnih predatora koji su aktivni i u dobro osvijetljenim i u slabo osvijetljenim staništima. Takva zjenica se može suziti do veličine rupice što se smatra vrlo efikasnim rješenjem (Hueter, 2004).

Rožnica im je optčki neaktivna pod vodom zbog svoje sličnosti u indeksu loma s morskom vodom (Hueter, 1991). Leće su velike i mogu sadržavati žuti pigment, sličan pigmentima leće kod koštunjača i dnevnih kopnenih životinja. Ti pigmenti filtriraju blizu UV svjetla te omogućavaju oštro fokusiranje višestrukih valnih duljina, povećavaju osjetljivost na contrast i smanjuju raspršenje svjetla i odsjaj pri jakom sunčevom svjetlu (Hueter, 2004).

Na stražnjem dijelu oka, iza mrežnice i ispred sklere, nalazi se choroidea, jedino prokrvljeno tkivo u oku odraslih prečnousta. Kod gotovo svih elasmobranchija, choroidea sadrži reflektirajući sloj, tapetum lucidum, koji se sastoji od paralelnih pločastih stanica koje sadrže kristale guanina. Funkcija ovog sloja je refleksija fotona koji su prošli kroz mrežnicu, a nisu apsorbirani u sloju fotoreceptora čime se povećava osjetljivost oka pri slabom svjetlu (Slika 3).

2.2. Osjetilo njuha

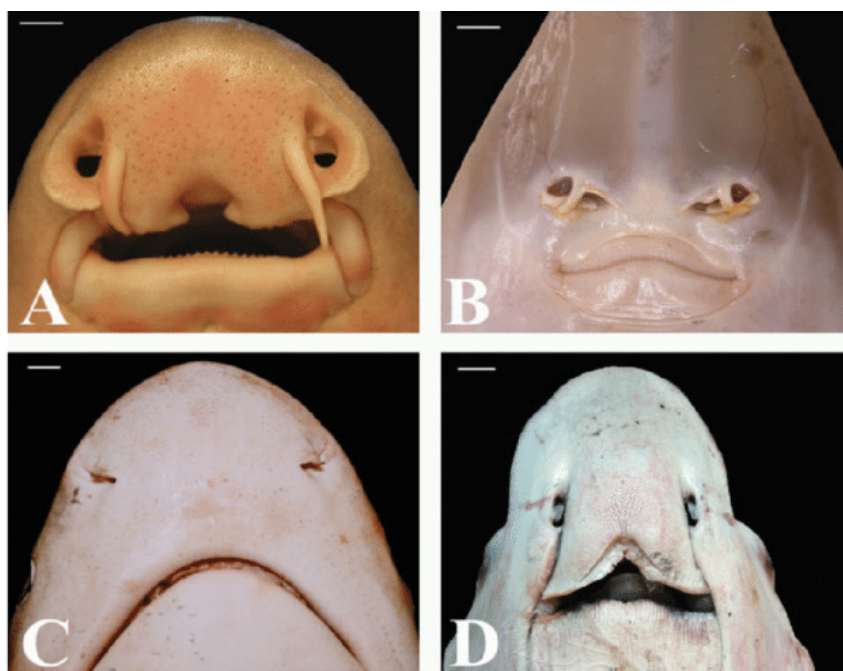
Hrskavičnjače imaju razvijeniji osjet njuha u usporedbi s koštunjačama te posjeduju velike olfaktorne strukture, uključujući veliku površinu njušnog epitela (Schluessel i sur., 2008) te velik volumen olfaktornog bulbusa (Lisney i sur., 2007; Lisney i Collin, 2006).

Anatomski, olfaktorni organi hrskavičnjača smješteni su u postrano položenim hrskavičnim kapsulama na trbušnoj strani glave, ispred usta (Slika 4). Elipsoidne, vrećaste strukture su podijeljene kožnim pregradama na ulazni nosni otvor koji je smješten sa strane (nares) i središnji izlazni nosni otvor. Udubina ili žlijeb usmjerava vodu prema ulaznom otvoru, nakon čega ona protječe kroz strukturu sastavljenu od pločica ili lamela. Svaka lamela svojim sekundarnim naborima podupire epitel s primarnim njušnim receptorima, potpornim stanicama i pratećim tkivima (Aicardi i sur., 2024).

Epitel je sličan epitelu u mirisnim sustavima većine kralježnjaka, s tim da bipolarne receptorske stanice hrskavičnjača nisu cilijarne, već imaju dendritičnu kvržicu iz koje se pruža

snop mikrovila (Reese i Brightman, 1970; Zeiske i sur., 1987). Slični mikrovilozni receptori pronađeni su uz „tipične“ cilijarne receptore kod određenih koštunjača.

Njuh hrskavičnjacima omogućuje precizno detektiranje kemijskih signala u morskoj vodi, što je ključno za pronalazak hrane, izbjegavanje opasnosti i za reproduktivnu komunikaciju. U mogućnosti su detektirati vrlo male koncentracije određenih tvari, poput aminokiselina, žučnih soli, tragova krvi i to na udaljenostima izmjerenim i do stotine metara. Visoka osjetljivost omogućava im rano prepoznavanje potencijalnog plijena ili opasnosti u okolini. Njuh je, pored traženja hrane, važan i u reproduktivnom ponašanju jer pomaže u pronalasku partnera putem feromona. Također, služi i kao orijentir u navigaciji u okolišu, posebnu u područjima sa slabom vidljivošću ili noću.



Slika 4. Fotografije nosnih otvora kod bentoskog morskog psa (*Chiloscyllium punctatum*) (A), bentoske raže (*Aptychotrema rostrata*) (B), bentopelagičnog morskog psa (*Carcharhinus. cautius*) (C), bentopelagične raže (*Aetobatus narinari*) (D). (Izvor: https://www.researchgate.net/publication/223465598_Morphometric_and_Ultrastructural_Comparison_of_the_Olfactory_System_in_Elasmobranchs_The_Significance_of_Structure-Function_Relationships_Based_on_Phylogeny_and_Ecology#fullTextFileContent)

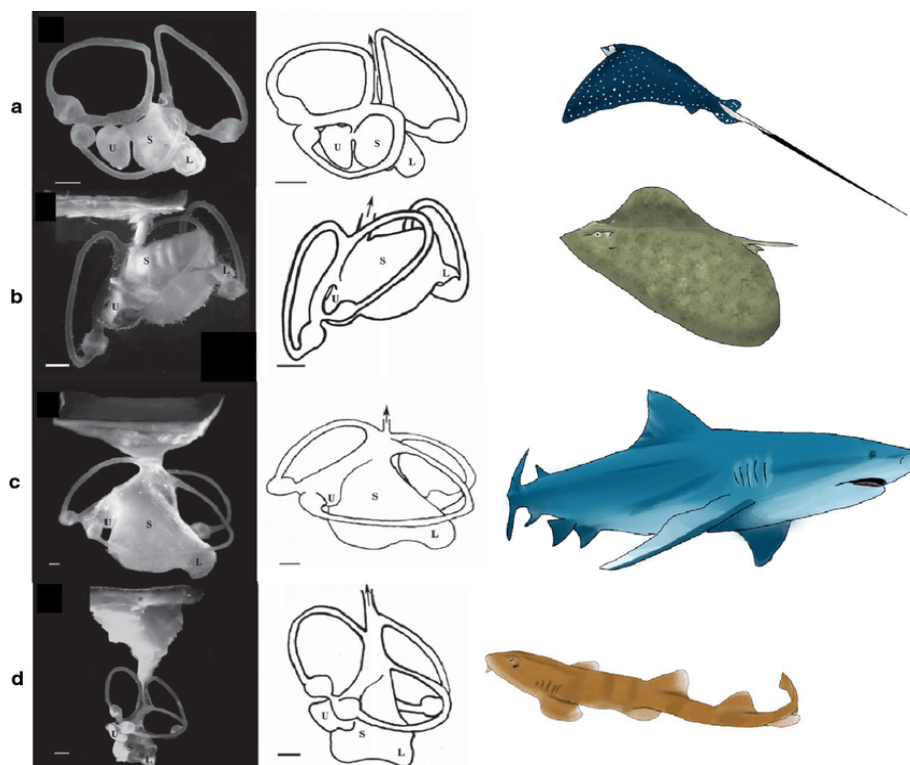
2.3. Osjetilo okusa

Kod riba okus je općenito manje razvijen nego kod kopnenih kralježnjaka, a ima ulogu u prepoznavanju i procjeni hrane. Na ždrijelu i unutar usne šupljine, posebno na jeziku, nalaze se okusni receptori koji detektiraju kemijske spojeve u vodi. Kemijski spojevi dolaze u kontakt s epitelom različitih okusa, poput slanog, slatkog, kiselog i gorkog. Ovaj sustav služi kao dodatni mehanizam potvrde hrane koja je već detektirana osjetom njuha i vida. Okus može potaknuti refleksne reakcije poput gutanja ili ispljuvavanja, štiteći organizam od toksičnih spojeva (Heuter, 2004).

2.4. Osjetilo sluha

Zvuk putuje na velike udaljenosti pod vodom pa kao i okolišni signal predstavlja važan pokazatelj u ponašanju i preživljavanju hrskavičnjaka, iako još uvijek postoje nedostaci u razumijevanju njihovog slušnog sustava. Na temelju dostupnih saznanja, hrskavičnjake su najosjetljivije na niskofrekventne zvukove (< 1500 Hz), a postoji obilje dokaza da njihovo unutarnje uho koristi isključivo detekciju pomaka čestica, a ne detekciju zvučnog tlaka (Chapuis i Collin, 2022).

Unutarnje uho prečnousta sastoji se od para membranskih labirinata, od kojih svaki ima tri polukružna kanala i četiri osjetilne makule (Maisey, 2001). Polukružni kanali ispunjeni su endolimfom, a nema dokaza o njihovoj ulozi u percepciji zvuka. Oni detektiraju rotacijske pokrete glave i odgovorni su za održavanje statičke i dinamičke ravnoteže (Slika 5). Sacculus, lagena i utrikulus (otoliti) sudjeluju i u održavanju ravnoteže i u percepciji zvuka. Bilježe linearna ubrzanja i položaj tijela u odnosu na gravitaciju (Yopak i sur., 2015).



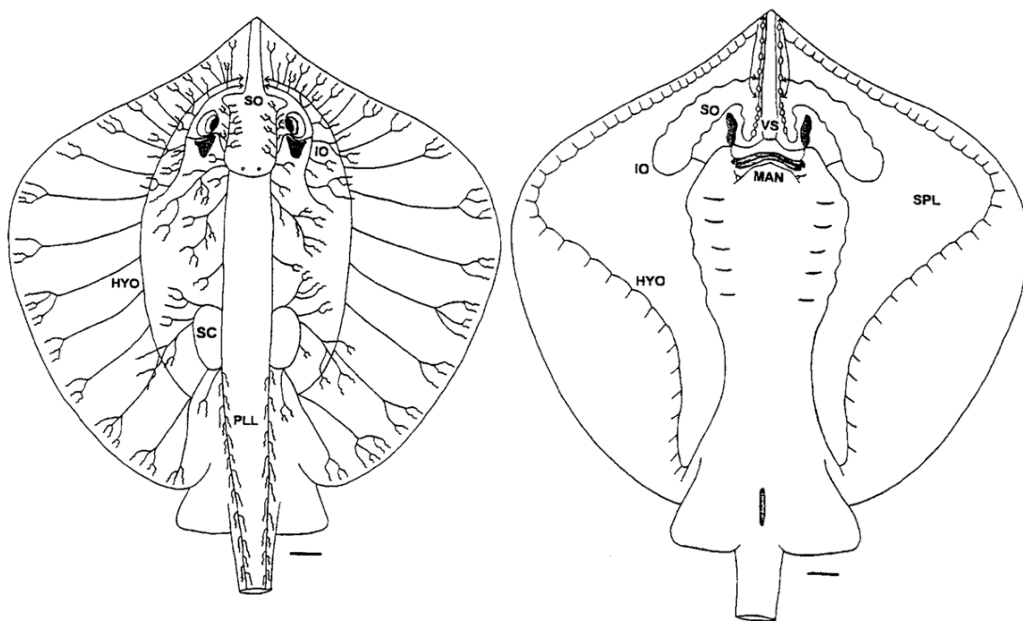
Slika 5. Prikaz unutarnjeg uha četiri vrste hrskavičnjača (a–d). (Izvor: https://www.researchgate.net/publication/358357153_The_auditory_system_of_cartilaginous_fishes/figures?lo=1)

Macula neglecta je specijalizirani osjetilni organ smješten u unutarnjem uhu - u posteriornom utrikulusu te predstavlja nakupinu osjetilnih stanica s dlačicama koje reagiraju na mehaničke vibracije i pomake endolimfe. Nema otolit iznad senzornog epitela, već je izravno povezana sa endolimfom. Ovakva struktura čini ju posebno osjetljivom na niskofrekvencijske vibracije i zvukove u moru što pomaže pri otkrivanju pokreta plijena, predatora, ali i kod komunikacije putem vibracija. Morski psi su među ribama jedinstveni po tome što imaju timpansku vezu, fenestru ovalis, prema stražnjem polukružnom kanalu koja pojačava sluh. Nalaze se u bazi parijetalne jame, koja predstavlja udubinu u stražnjem dijelu lubanje i vode do stražnjih kanalića polukružnih kanala, (Tester i sur., 1972).

2.5. Mehanorecepcija

Mehanorecepcija je sposobnost prepoznavanja mehaničkih podražaja iz okoliša, a kod hrskavičnjača mehanoreceptori služe za detektiranje vibracija, kretanje vode i pritiska. Sustav uključuje specijalizirane strukture, unutarnje uho i bočnu prugu (Slika 6).

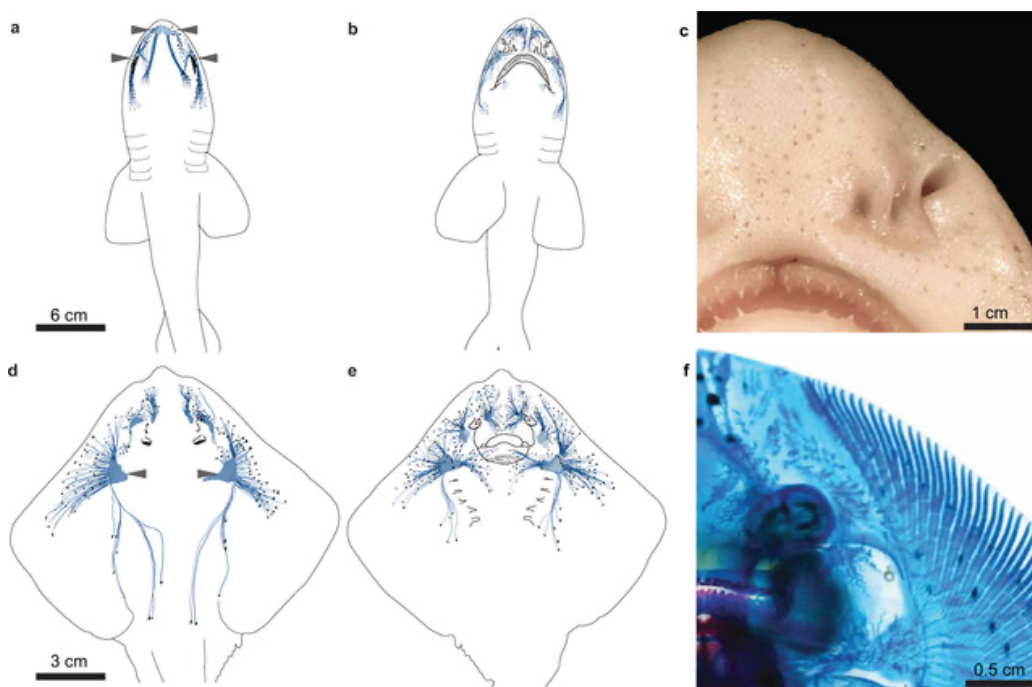
Neuromasti su osnovne mehanoreceptorske jedinice bočne pruge, a građeni su od osjetilnih stanica s dlačicama i potpornih stanica, koje su uronjene u želatinoznu kupolu. Uz pomoć cilija koje se nalaze na stanicama, neuromasti reagiraju na smjer i intenzitet gibanja vode što omogućava životinjama detektiranje plijena ili predatora te promjene u strujanju vode okoline. Dvije su glavne morfološke skupine neuromasta, kanalski i jamasti, koje zajedno omogućuju preciznu detekciju vanjskih podražaja. Signali iz neuromasta se prenose putem prednjeg i stražnjeg živca bočne pruge, zatim u stražnji režanj bočne pruge, a dodatno se granaju prema malom mozgu, gornje i donjem režnju uške te prema kralježničnoj moždini (Boord i Campbell, 1977).



Slika 6. Raspodjela sustava bočne linije na dorzalnoj i ventralnoj površini atlantske raže, *Dasyatis sabina*. (Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Distribution-of-the-lateral-line-canal-system-and-vesicles-of-Savi-on-the-dorsal-upper_fig8_225253484)

2.6. Elektrotepcija

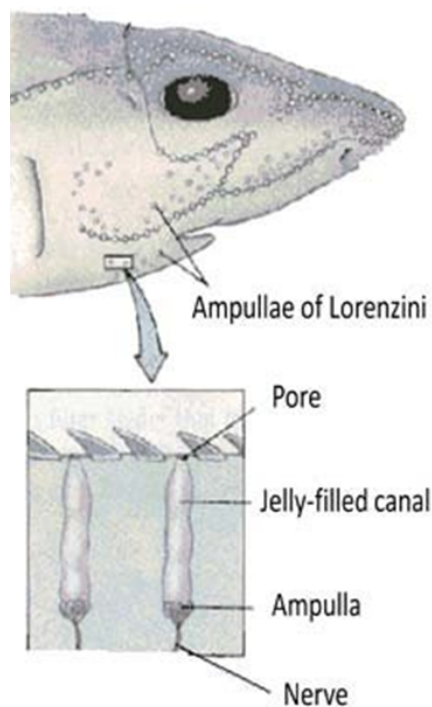
Elektrotepcija hrskavičnjača temelji se na specijaliziranim receptorima - Lorenzijeve ampule - smještenim potkožno na području glave, oko njuške i u području usta. Lorenzijeve ampule evolucijski su modificirani neuromasti koji se nalaze kod hrskavičnjača, morskih pasa i raža. Ampule se sastoje od želatinoznog kanala ispunjenim vodljivim materijalom, koji povezuje kožni porus s osjetilnim stanicama u unutrašnjoj komori te malih vrećastih proširenja, odnosno alveola čije stijenke oblažu osjetne dlačice i piramidalne potporne stanice (Slika 7). Apikalna površina tih stanica izložena je lumenu ampule, dok su stanice međusobno povezane čvrstim vezama koje čine visoko otpornu električnu barijeru između bazalne i apikalne strane epitela (Hueter, 2004).



Slika 7. Fotografija i shematski prikaz rasporeda Lorenzinijevih ampula u dvije vrste hrskavičnjača. Crne točke označavaju pojedinačne ampularne pore, a plave linije prikazuju strukture kanala. (Izvor:

https://www.researchgate.net/publication/325452458_Molecular_tuning_of_electroreception_in_sharks_and_skates/figures?lo=1)

Lorenzinijeve ampule mogućuju detekciju slabih električnih polja inteziteta i do 5nV/cm (Boord i Campbell, 1977). Istraživanja s početka dvadesetog stoljeća su potvrdila i temperaturnu osjetljivost ampula. Gel unutar ampula može generirati električne potencijale kao odgovor na vrlo male temperaturne gradijente, što omogućuje pretvaranje temperaturnih informacija u električne signale bez potrebe za hladno-osjetljivim ionskim kanalima, kakve imaju sisavci (Brown, 2003) (Hueter, 2004).



Slika 8. Prikaz i struktura Lorenzinijevih ampula

Ampularni elektrosenzorni sustav hrskavičnjača imala ulogu u detekciji plijena, potencijalnih predatora i pripadnika iste vrste tijekom socijalnih interakcija-omogućuje prepoznavanje slabih bioelektričnih signala koje plijen proizvodi kontrakcijama mišića, radom srca i drugim procesima. Sudjeluje i u detektiranju promjena u Zemljinom elektromagnetskom polju, što hrskavičnjača pomaže u orijentaciji i navigaciji kod migracija i dugih putovanja. Ovaj sustav može i registrirati električne promjene u okolišu koje nisu povezane s organizmima.

3. ZAKLJUČAK

Osjetilni sustavi hrskavičnjača su primjer evolucijskih prilagodbi životinja s predatorskom ulogom na ekološke uvjete u morskom ekosustavu. Složeni i različiti osjetilni organi omogućili su im preživljavanje i dominaciju u morskim ekosustavima više od 400 milijuna godina. Organi koji sudjeluju u mehanorecepciji, elektorecepciji, kemorecepciji te osjetilo vida i sluha čine funkcionalnu cjelinu koja nadilazi osjetilnu sposobnost većine ostalih riba, pri čemu svaki sustav ima jedinstvenu ulogu. Vidni sustav prilagođen je životu u različitim svjetlosnim uvjetima, od bentoskih područja gdje većinom prevladava tama do pelagičnih područja gdje većinom prevladava svijetlost. Osjetilo mirisa i okusa pripadaju kemoreceptorima i omogućuju detekciju mirisnih i okusnih molekula u vodi čime olakšavaju pronalaženje hrane, izbjegavanje opasnosti ili prepoznavanje pripadnika iste vrste. Kod sluha glavnu ulogu ima unutarnje uho, koje osim u percepciji zvuka, ima i ključnu funkciju u održavanju ravnoteže i prostorne orijentacije. Neuromastima registriraju mehaničke podražaje minimalnog inteziteta, što omogućuje praćenje plijena ili izbjegavanje predatora te praćenje promjene strujanja vode u okolini. Lorenzijeve ampule kao elektorecepcijski organi omogućavaju informacije koje prelaze granice uobičajene osjetilne percepcije kod životinja.

Međusobna povezanost ovih sustava oblikuje složenu mrežu koja hrskavičnjačama daje prednost u lovu i preživljavanju, osobito kod uvjeta slabe vidljivosti. Kombinacija različitih osjetila omogućava im da stvore sliku svog okoliša zbog čega se mogu lakše orijentirati, čime se povećava njihova uspješnost na vrhu hranidbenog lanca morskih ekosustava. Ovime ne samo da osiguravaju vlastiti opstanak, već imaju i ključnu ulogu u održavanju ravnoteže ekosustava, regulirajući brojnosti drugih organizama.

Zaključno, osjetilni sustav hrskavičnjača nije samo značajan evolucijski rezultat prilagodbi, već je i izvor bitnih znanstvenih spoznaja za biologiju, ekologiju i tehnologiju. Njihova jedinstvena osjetila i sposobnost evolucije i opstanka prikazuju složenost života u oceanima i podsjećaju na važnost očuvanja ovih skupina u sve ugroženijim morskim staništima.

4. LITERATURA

- Aicardi, S., Bozzo, M., Gualart, J., Garibaldi, F., Lanteri, L., Terzibasi, E., Bagnoli, S., Dionigi, F., Steffensen, J. F., Poulsen, A. B., et al. (2024). The olfactory system of sharks and rays in numbers. *Anatomical Record*. <https://doi.org/10.1002/ar.25537>
- Boord, R. L., & Campbell, C. B. G. (1977). Structural and functional organization of the lateral line system of sharks. *American Zoologist*, 17(2), 431–441. <https://doi.org/10.1093/icb/17.2.431>
- Brown, B. R. (2003). Sensing temperature with ion channels. *Nature*, 421, 495.
- Chapuis, L., & Collin, S. P. (2022). The auditory system of cartilaginous fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 32(2), 521–554. <https://doi.org/10.1007/S11160-022-09698-8>
- Gayford, J. H., & Jambura, P. L. (2025). Drivers of diversification in sharks and rays (Chondrichthyes: Elasmobranchii). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 12, Article 1530326. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1530326>
- Gilbert, P. W. (1963). The visual apparatus of sharks. In P. W. Gilbert (Ed.), *Sharks and Survival* (pp. 283–326). D.C. Heath, Boston.
- Gruber, S. H., & Cohen, J. L. (1978). Visual system of the elasmobranchs: State of the art 1960–1975. In E. S. Hodgson & R. F. Mathewson (Eds.), *Sensory Biology of Sharks, Skates, and Rays* (pp. 11–105). U.S. Office of Naval Research, Arlington, VA.
- Gruber, S. H., & Cohen, J. L. (1985). Visual system of the white shark, *Carcharodon carcharias*, with emphasis on retinal structure. *Memoirs of the Southern California Academy of Sciences*, 9, 61–72.
- Harris, A. J. (1965). Eye movements of the dogfish *Squalus acanthias* L. *Journal of Experimental Biology*, 43(1), 107–138. <https://doi.org/10.1242/jeb.43.1.107>
- Hueter, R. E., Mann, D. A., Maruska, K. P., Sisneros, J. A., & Demski, L. S. (2004). Sensory biology of elasmobranchs. In J. C. Carrier, J. A. Musick, & M. R. Heithaus (Eds.), *Biology of sharks and their relatives* (pp. 325–368). CRC Press.

- Lisney, T. J., & Collin, S. P. (2006). *The significance of structure–function relationships based on phylogeny and ecology*. *Journal of Morphology*, 269(11), 1365–1386. <https://doi.org/10.1002/jmor.10661>
- Lisney, T. J., Bennett, M. B., & Collin, S. P. (2007). *Volumetric analysis of sensory brain areas indicates ontogenetic shifts in the relative importance of sensory systems in elasmobranchs*. *Raffles Bulletin of Zoology*, Supplement No. 14, 7–15.
- Lisney, T. J., Theiss, S. M., Collin, S. P., & Hart, N. S. (2012). Vision in elasmobranchs and their relatives: 21st century advances. *Journal of Fish Biology*, 80(5), 2024–2054. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03253.x>
- Maisey, J. G. (2001). Remarks on the inner ear of elasmobranchs and its interpretation from skeletal labyrinth morphology. *Journal of Morphology*, 250(3), 236–264. <https://doi.org/10.1002/jmor.1074>
- Motivarash, Y., Fofandi, D., Rehanavaz, M., Kariya, P., & Dabhi, R. (2020). Importance of sharks in ocean ecosystem. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8, 611–613.
- Nelson, J. S., Grande, T. C., & Wilson, M. V. H. (2016). *The Diversity of Fishes: Biology, Evolution, and Ecology* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Reese, T. S., & Brightman, W. M. (1970). Olfactory surface and central olfactory connections in some vertebrates. In G. E. W. Wolstenholme & J. Knight (Eds.), *Taste and Smell in Vertebrates* (pp. 115–149). Ciba Foundation Symposium, J. and A. Churchill, London.
- Schluessel, V., Bennett, M.B., Bleckmann, H., Blomberg, S., & Collin, S. (2008). Morphometric and Ultrastructural Comparison of the Olfactory System in Elasmobranchs: The Significance of Structure–Function Relationships Based on Phylogeny and Ecology. *Journal of Morphology*, 269(11), 1365–1386. <https://doi.org/10.1002/jmor.10661>
- Takami, S., Luer, C. A., & Graziadei, P. P. C. (1994). Microscopic structure of the olfactory organ of the clearnose skate, *Raja eglanteria*. *Anatomy and Embryology*, 190, 211–230.

Tester, A. L., Kendall, J. I., & Milisen, W. B. (1972). Morphology of the ear of the shark genus *Carcharhinus*, with particular reference to the macula neglecta. *Pacific Science*, 26, 264–274.

Van der Laan, R., Fricke, R., & Eschmeyer, W. N. (2014, updated). Family-group names of Recent fishes. *Zootaxa*, 3882(2), 1–230. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3882.1.1>

Young, J. Z. (1962). *The Life of Vertebrates*. Oxford University Press, Oxford.

Yopak, K. E., Lisney, T. J., & Collin, S. P. (2015). Not all sharks are “swimming noses”: Variation in olfactory bulb size in cartilaginous fishes. *Brain Structure and Function*, 220(2), 1127–1143. <https://doi.org/10.1007/s00429-014-0798-8>

Zeiske, E., Theisen, B., & Gruber, S. H. (1987). Functional morphology of the olfactory organ of two carcharhinid shark species. *Canadian Journal of Zoology*, 65, 2406–2412.