

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

BIOLOŠKI ODSJEK

**ADAPTACIJA VESTIBULARNOG SUSTAVA KOD KITOVA NA  
MODELU DOBROG DUPINA**

ADAPTATION OF THE VESTIBULAR SYSTEM IN CETACEANS USING COMMON  
BOTTLENOSE DOLPHIN AS A MODEL SPECIES

**SEMINARSKI RAD**

Sven Rosandić

Preddiplomski studij Znanosti o okolišu, 3. godina  
(Undergraduate Study of Environmental Sciences)

mentor: doc. dr. sc. Duje Lisičić

Zagreb, 2017.

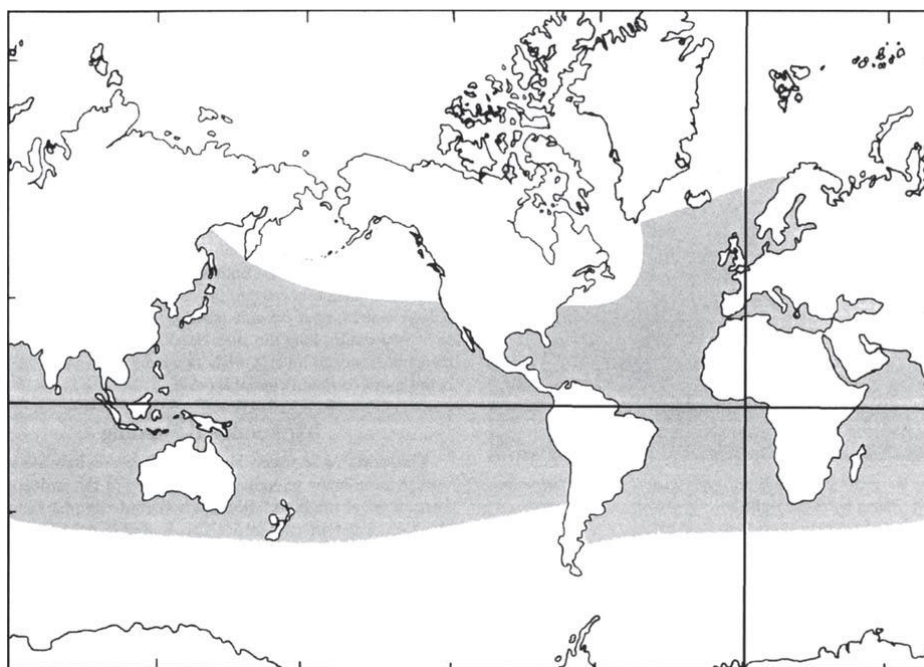
# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. PRILAGODBE NA ŽIVOT POD VODOM .....	3
3. VESTIBULARNI APARAT DOBROG DUPINA .....	6
4. EVOLUCIJA VESTIBULARNOG APARATA .....	10
5. ZAKLJUČAK .....	11
6. LITERATURA .....	12
7. SAŽETAK .....	13
8. SUMMARY .....	14

## 1. UVOD

Dobri dupin (*Tursiops truncatus* Montagu, 1821) je najpoznatiji pripadnik reda kitova (Cetacea), odnosno podreda kitova zubana (Odontoceti), uz koje kitovima pripadaju još i izumrli kitovi (Archeoceti) te kitovi usani (Mysticeti). (Wells i Scott, 2009.)

Dobri dupini su kozmopoliti te su prisutni u većini toplih mora, blizu ili daleko od obale. (Slika 1.) Prepoznatljivi su po svojem robusnom tijelu srednje veličine, kukastoj dorzalnoj peraji te tamnoj obojenosti. Odrasle jedinke su veličine između 2.5 i 3.8 metara, a na veličinu im utječe temperatura vode. Ventralno su bijelo obojeni, dok im dorzalna strana varira od svijetlo sive do crne boje. (Wells i Scott, 2009.)



**Slika 1.** Karta svijeta gdje je sivom bojom prikazana kozmopolitska rasprostranjenost dobrog dupina (Wells i Scott, 2009.)

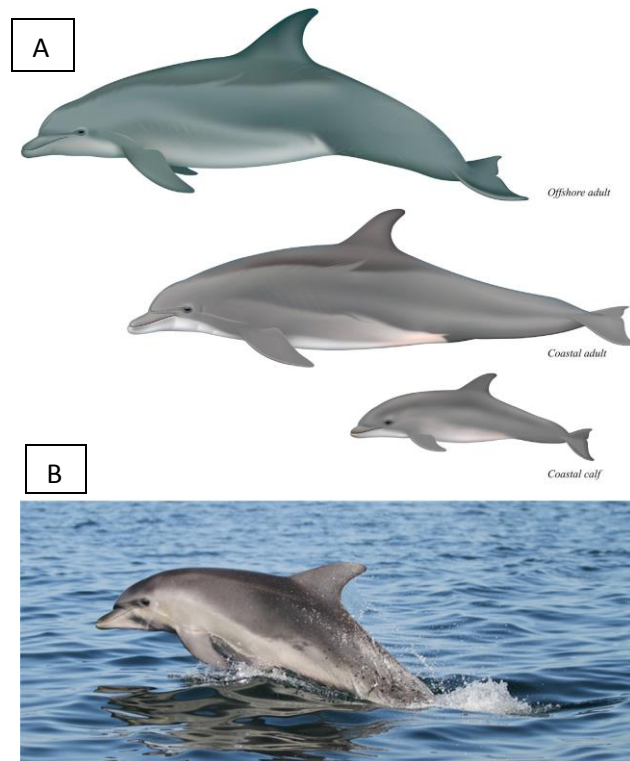
Hrane se većinom ribom i lignjama, a preferiraju ribe iz porodica Sciaenidae, Scombridae i Mugilidae. Najčešći plijen su im ribe na dnu te one koje proizvode zvukove jer im oni pomažu u lociranju plijena. (Barros i Odell, 1990.)

Skupine dobrih dupina koji žive uz obalu imaju dobro proučenu migraciju kroz cijelu godinu dok su kretanja skupina koje žive udaljene od obale manje poznata. Obično žive u grupama od 2 do 15 jedinki, ali su zabilježene i skupine od 1000 jedinki. Sastav grupe je obično dinamičan a glavni faktori su spol, starost, reproduktivno stanje te obiteljski odnosi. Aktivni su i danju i noću, a aktivnost im ovisi o raznim okolišnim faktorima poput godišnjeg doba, dobu dana te raznim psihološkim faktorima. Proizvode tri osnovna zvuka tijekom komunikacije a to su cičanje, piskutanje te kliktanje, koje je najbitnije kada se služe eholokacijom. Eholokacija im služi ponajprije za navigaciju, pronalaženje plijena te izbjegavanje predatora. (Wells i Scott, 2009.) U radu su predstavljeni načini na koji su se dobri dupini prilagodili životu u moru s naglaskom na njihov vestibularni aparat, odnosno osjetom za ravnotežu.

## 2. PRILAGODBE NA ŽIVOT POD VODOM

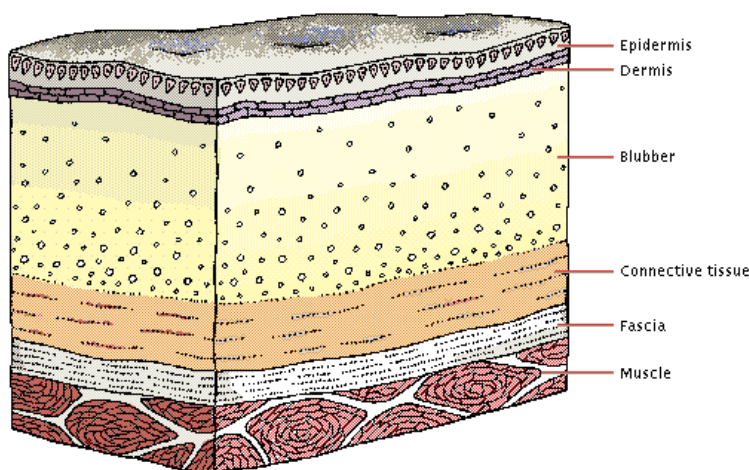
Voda je mnogo gušća i viskozija od zraka, te pruža otpor tijekom gibanja kroz nju pa se podrazumijeva da su životinje tijekom evolucije, odnosno tijekom prelaska s kopna u vodu razvile niz sposobnosti i prilagodbi kako bi mogle preživjeti u njoj. (Osburn, 1903.)

Dobri dupin kao i ostali kitovi ima niz prilagodbi, a najuočljivija je hidrodinamičan oblik tijela (Slika 2.) pomoću kojeg se mogu brzo kretati kroz vodu. Premještanje nosnog otvora s terminalne na dorzalnu poziciju je prilagodba na disanje na površini vode. Reducirane su im i žlijezde slinovnice s obzirom na to da njihova funkcija nije toliko potrebna jer većina dupina guta cijelu hranu. Vanjske uši su im reducirane, te im je skraćen vrat sto pridonosi hidrodinamičnom obliku tijela. (Osburn, 1903.)



**Slika 2.** Na prikazu (A) su redom prikazane odrasle jedinke dobrog dupina koji živi udaljen od obale, jedinke koja živi uz obalu, te mladog dupina koji živi uz obalu. Na prikazu (B) je odrasla jedinka prilikom skakanja iz vode (*Tursiops truncatus* Montagu, 1821) (Cozzi i sur., 2017.)

Kako bi im kretanje kroz vodu bilo što jednostavnije, lakše i učinkovitije, dupini nemaju krzno, pa umjesto njega imaju debeli vodonepropusni epidermis. Funkciju izolacije koje inače pruža krzno kod njih preuzima debeli sloj potkožnog masnog tkiva. Potkožno masno tkivo je posebno specijalizirano kod kitova i dupina te prekriva veći dio tijela. Osim što služi kao izolator, služi i kao skladište energije te pomaže boljoj plovnosti. Posebno je bitan kod novorođenih dupina jer je voda medij koji oduzima toplinu s tijela 25 puta brže nego što to radi zrak. (Dunkin i sur., 2005) (Slika 3.)



**Slika 3.** Prikaz potkožnog masnog tkiva unutar presjeka kože dupina.

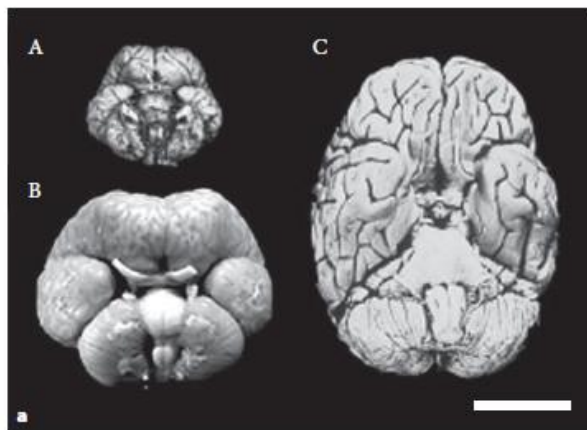
(<http://smokeyandrafael.blogspot.hr>)

Imaju razvijen mrežni krvožilni sustav koji omogućuje širenje sakupljene topline u središnjem dijelu organizma u periferni koji je stalno u gubitku topline zbog okolne hladne vode. Iz istog razloga im je cijelo tijelo kompaktno s kraćim udovima. (Reidenberg, 2007.)

Tako je kao uočljiva prilagodba i njihov razvoj peraja. Dorzalne peraje im služe za plivanje kao što služe i ribama. Dobri dupini, kao i ostali kitovi, imaju velike kaudalne, odnosno repne peraje podržane gusto raspoređenim vezivnim tkivom. Njihove se repne peraje, za razliku

od ribljih čije se repne peraje šire vertikalno, šire lateralno, kako bi mogli brže doći na površinu i ponovno zaroniti. (Osburn, 1903.)

Kitovi, pa tako i dobri dupini, imaju jedne od najvećih mozgova, kako u apsolutnoj masi tako i u usporedbi s veličinom tijela. (Slika 4.) Smatralo se da bi to mogla biti prilagodba na podvodni način života, pogotovo kod kitova zubana koji se služe eholokacijom, međutim to nije nužno razlog. Istraživanja su pokazala da je veličina mozga neovisna o prijelazu životinja s kopna u more jer se proučavanjem fosila vidjelo da se mozak povećao i prije tog prelaska. Iako je eholokacija kao adaptacija na život u moru moguće pridonijela razvoju mozga, smatra se da je veličina mozga najviše u korelaciji sa općenitom inteligencijom kitova, kao i s njihovom kompleksnom socijalnom strukturom. (Marino, 2007.)



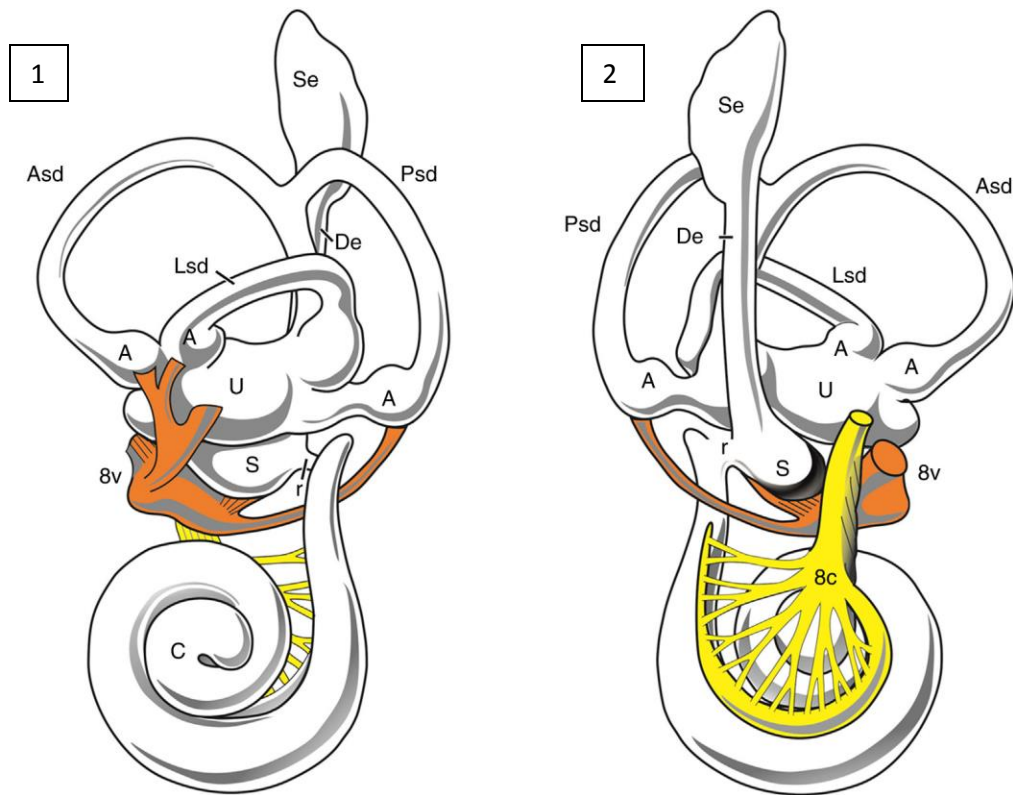
**Slika 4.** Odnosi veličina mozga riječnog dupina (A), oceanskog dupina (B) i čovjeka (C)  
(Kern i sur., 2009.)

Jedna od najbitnijih prilagodbi kitova je prilagodba na dugotrajno zadržavanje pod vodom jer ono uzrokuje hipoksiju. Tijekom hipoksije, nekoliko staničnih mehanizama proizvode reaktivne kisikove spojeve koji mogu oštetiti stanicu. Poznati antioksidant koji štiti stanicu od djelovanja reaktivnih kisikovih spojeva je glutation, te je dokazana promjena u genomu kitova kod koje su geni koji su bitni za ekspresiju antioksidanata povećani te je i njihova sama ekspresija jača. (Yim i sur., 2014.)

### 3. VESTIBULARNI APARAT DOBROG DUPINA

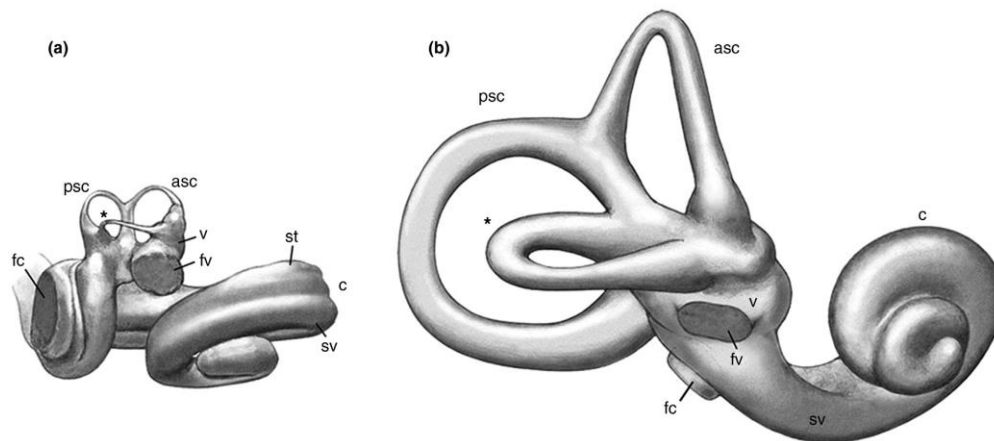
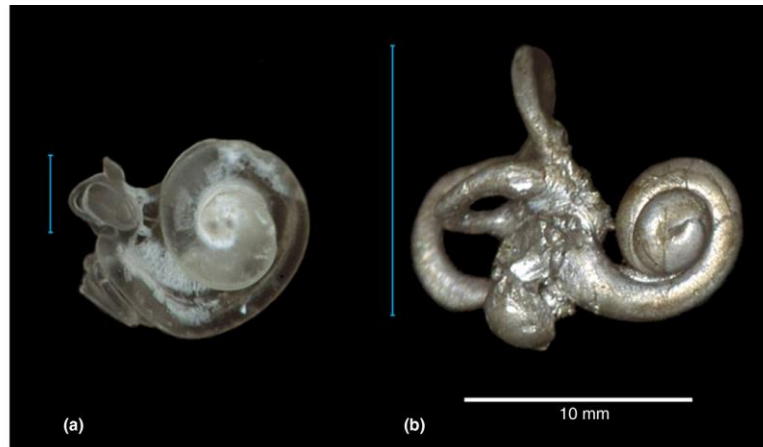
Vestibularni aparat dobrog dupina je funkcionalno sličan onome kod kopnenih sisavaca (Slika 5.). To je membranozni i koštani labirint u unutarnjem uhu kojem pripada još i pužnica, a čine ga utrikulus, sakulus i polukružni kanalići koji su ispunjeni tekućinom endolimfom. Unutarnja površina utrikulusa i sakulusa je prekrivena jednostrukim slojem ljuskavog epitela te sadrži potporne i osjetilne stanice. Kod sisavaca je njihov srednji medijalni zid deblji te formira izbočine odnosno okrugle pjege *macula utriculi* i *macula saccule*. Unutar pjege, spljoštene stanice ljuskavog epitela su promijenjene u stupaste osjetilne dlake koje su učvršćene u nereceptivne stanice koje ih podržavaju te kroz njih prolaze živčana vlakna vestibularnog živca. Te osjetilne dlake dotiču želatinasti sloj na vrhu svake pjege. Za želatinasti sloj se pridržavaju maleni kristali kalcijevog karbonata koji se nazivaju otoliti ili statoliti. Pomakom otolita pod utjecajem sile teže potiče ili sprječava neuronske signale iz osjetnih stanica s dlačicama koje su povezane za njih. Živčani impulsi se iz vestibularnog sustava prenose moždanim živcem u vestibularne jezgre moždanog debla i mali mozak. Tri su polukružna kanalića, stražnji, prednji i lateralni, te čine koštani labirint unutar kojeg su smještene tri polukružne membranske cijevi. Svaka od tih polukružnih membranskih cijevi izlazi iz utrikulusa, formira dvije trećine kruga u istoj ravnini te se ponovno vraća u utrikulus. Sva tri polukružna kanalića su međusobno položeni u jednakim kutevima. Kod dupina, prednji polukružni kanalić je smješten u ravnini dijagonalnoj od ravnine glave, stražnji polukružni kanalić je smješten u ravnini koja je sagitalna od ravnine glave, dok je lateralni polukružni kanalić smješten u ravnini horizontalnoj od ravnine glave. Takav položaj polukružnih kanalića kod dupina je sličan onome kojeg imaju konj, ovca i svinja, no ne i onome kojeg nalazimo kod čovjeka, gdje su kanalići, gledajući odozdo, rotirani 45 stupnjeva od pužnice. Svaka polukružna cijev na jednom kraju ima proširenje s ampulom na kojem se nalaze skupine osjetnih stanica u obliku grebenčića (*crista ampullaris*) od kojih polaze živčana vlakna i prenose podražaje u mozak.





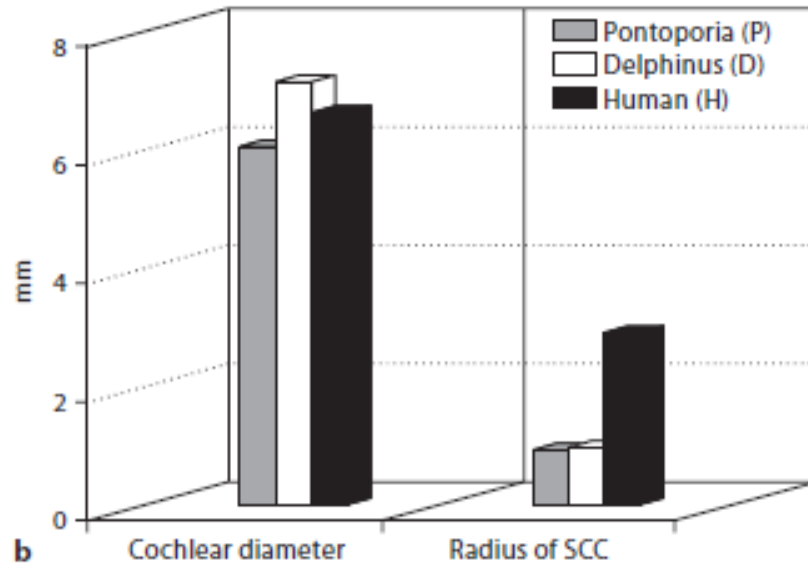
Slika 5. Prikaz anatomije lateralne (1) i medijalne (2) strane unutarnjeg uha sisavaca. Crveno je prikazan vestibularni živac, žuto je prikazan živac pužnice. Ostali dijelovi su ampula polukružnih kanalića (A), anteriorni polukružni kanalić (Asd), pužnica (C), *ductus endolymphaticus* (De), lateralni polukružni kanalić (Lsd), posteriorni polukružni kanalić (Psd), *ductus reuniens* (r), sakulus (S), *saccus endolymphaticus* (Se), utrikulus (U), živac pužnice (8c) i vestibularni živac (8v) (Cozzi i sur., 2017.)

U usporedbi s kopnenima sisavcima, omjer veličina vestibularnog sustava i pužnice je puno drukčiji kod dupina (Slika 6.). Kitovi su specifični po tome što imaju puno manje polukružne kanaliće od cijevi pužnice.



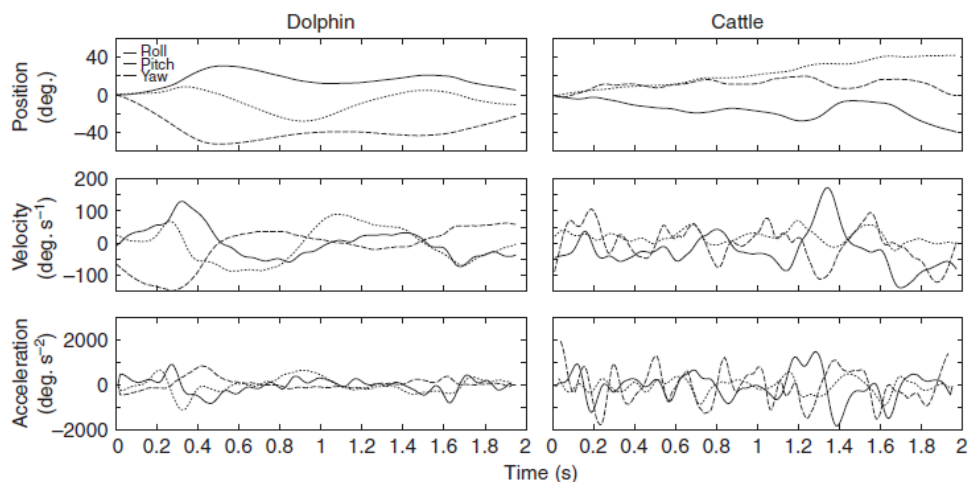
Slika 6. Usporedba vestibularnog aparata dobrog dupina (a) i čovjeka (b) (Cozzi i sur., 2017.)

Dapače, imaju manje radijuse polukružnih kanalića u usporedbi s gotovo svim sisavcima slične veličine. (Slika 7.) Tako su primjerice sakulus i utrikulus fetalnog narvala normalne veličine u usporedbi s ostalim sisavcima dok su im polukružni kanalići puno manji. Prostor između predvorja vestibularnog aparata i svakog polukružnog kanalića je manji. Proporcionalno je smanjena i inervacija polukružnih kanalića. Kod dupina manje od 5% ravnotežno-slušnog živca pripada vestibularnim vlaknima, dok je kod ostalih sisavaca 40%. Takva redukcija vestibularnog sustava nije poznata ni kod jednog kopnenog sisavca. Kod kosti koja obuhvaća srednje uho dupina, prostor koji zauzima pužnica je dva puta veći od prostora koji zauzima vestibularni aparat. Ista je situacija kod fetalnog narvala te fosilnih predaka kitova i dupina. (Cozzi i sur., 2017.)



**Slika 7.** Omjeri veličina pužnice (lijevo) naspram polukružnih kanalića (desno) riječnog dupina (P), oceanskog dupina (D) i čovjeka (H) (Kern i sur., 2009.)

Mnogo je mogućih razloga zašto je došlo do ovakve redukcije vestibularnog sustava. Jedna od hipoteza je bila da je do redukcije došlo zbog velikih kretnji glave. Istraživanja su pokazala da su kretnje glave dupina sličnog intenziteta kao i kod goveda iako goveda imaju veće polukružne kanaliće (Slika 8.), što sugerira da skraćeni ili spojeni vratni kralješci kod dupina i kitova te njihov utjecaj na kretnje glave nisu mogle biti jedini razlog redukcije vestibularnog aparata, pa se konkretni razlozi još uvijek ne znaju. (Kandel i Hullar, 2009.)



**Slika 8.** Podaci o poziciji, brzini i ubrzanju kretanja glave dupina i goveda (Kandel i Hullar, 2009.)

#### 4. EVOLUCIJA VESTIBULARNOG APARATA

Preci Cetacea su evoluirali iz kopnenih četveronožaca u obligatne plivače. Kao što je već rečeno, kitovi i dupini imaju mnogo manje polukružne kanaliće u usporedbi s ostatkom tijela naspram kopnenih sisavaca. Smanjeni polukružni kanalići reduciraju osjetljivost vestibularnog aparata. Funkcionalno su se u početku smatrali posljedicom zakržljivosti do koje je došlo zbog ograničenih pokreta vratom i očima, međutim istraživanja su pokazala da smanjeni polukružni kanalići i reducirani vestibularni sustav nisu znak zakržljivosti nego strukturna prilagodba sustava. Život pod morem je drugačiji nego na kopnu i u zraku, ponajviše jer na organizam ne djeluje jaka sila gravitacije te je mogućnost kretanja u vodi puno veća. Kopnene akrobatske vrste s istaknutim kompleksnim kretanjem s druge strane imaju veće polukružne kanaliće. Smatra se da je razlog tome to što je zbog malih polukružnih kanalića kod dupina i kitova reducirana osjetljivost vestibularnog aparata što odgovara brzim i kontroliranim pokretima prema svim smjerovima, uključujući rotaciju tijela, koje oni izvode u vodi. Na fosilima predaka dupina se vidi da je do promjene, odnosno do smanjenja i reduciranja vestibularnog aparata došlo vrlo rano i vrlo brzo nakon što su prešli s kopna u vodu, za razliku od skraćivanja vrata i transformacije te prilagodbe kostura što je bio dugotrajniji proces. Ta prilagodba je specifična za život u vodi te nije kompatibilna kretanju na kopnu pa ta adaptacija predstavlja točku bez povratka u evoluciji životinja koje su prešle s kopna u more. (Spoor i sur., 2002.)

## 5. ZAKLJUČAK

Prelaskom s kopna na more, preci dobrog dupina su morali razviti niz prilagodbi kako bi u moru i preživjeli. Niz prilagodbi poput povećanja mozga i eholokacije su već postojeće prilagodbe koje su razvile i neke kopnene životinje, međutim redukcija i funkcionalna prilagodba vestibularnog sustava je specifična te unatoč dosadašnjim istraživanjima, vrlo je neistražena te ne postoje konkretni zaključci i dokazi koji bi ukazali na razloge promjene u konstrukciji samog vestibularnog aparata. Svejedno, poznato je da je kretanje pod vodom drugačije od onog na kopnu, te je u njoj kao drugačijem mediju omogućeno brze i preciznije kretanje u različitim smjerovima uz brze rotacije, te je moguće da je radi toga reducirani vestibularni aparat kako bi se smanjila i osjetljivost na pokrete te se time izbjegle vrtoglavice, gubitak ravnoteže i ostali mogući problemi.

## 6. LITERATURA

1. Barros, N.B., and D.K. Odell. (1990) Food habits of the bottlenose dolphins in the Southeastern United States. Pp. 309–328, In S. Leatherwood, and R.R. Reeves (Eds.). *The Bottlenose Dolphin*. Academic Press, San Diego, CA. 653 pp.
2. Kandel, B. M., Hullar, T. E. (2010) The relationship of head movements to semicircular canal size in cetaceans. *Journal of Experimental Biology* 210: 1175-1181.
3. Cozzi, B., Huggenberger, S., and Oelschläger, H. A. (2017) “Anatomy of dolphins: Insights into body structure and function,” Academic Press, United Kingdom.
4. Dunkin, R. C., McLellan, W. A., Blum, J. E., and Pabst, D. A. (2005). The ontogenetic changes in the thermal properties of blubber from Atlantic bottlenose dolphin *Tursiops truncatus*. *J. Exp. Biol.* 208, 1469-1480.
5. Kern, A., Seidel, K., Oelschläger, H., 2009. The central vestibular complex in dolphins and humans: functional implications of Deiters’ nucleus. *Brain Behav. Evol.* 73, 102e110.
6. Marino, L. (2007), Cetacean brains: How aquatic are they?. *Anat Rec*, 290: 694–700.
7. Osburn, R. C. "Adaptation to Aquatic, Arboreal, Fossorial and Cursorial Habits in Mammals. I. Aquatic Adaptations," *The American Naturalist* 37, no. 442 (Oct., 1903): 651-665.
8. Reidenberg, J. S. (2007), Anatomical adaptations of aquatic mammals. *Anat Rec*, 290: 507–513.
9. Spoor F, Bajpai S, Hussain ST, Kumar K, Thewissen JGM. 2002. Vestibular Evidence for the Evolution of Aquatic Behaviour in Early Cetaceans. *Nature* 417:163-166.
10. Wells RS, Scott MD (2009) Common bottlenose dolphin - *Tursiops truncatus*. In: *Encyclopedia of marine mammals* 2nd Ed.(Perrin WF, Würsig B, Thewissen JGM, eds.) Academic Press, Amsterdam, pp. 249-255.
11. Yim, H.-S., Cho, Y. S., Guang, X., Kang, S. G., Jeong, J.-Y., Cha, S.-S., Oh, H.-M., Lee, J.-H., Yang, E. C., Kwon, K. K., Kim, Y. J., Kim, T. W., Kim, W., Jeon, J. H., Kim, S.-J., Choi, D.

H., Jho, S., Kim, H.-M., Ko, J., Kim, H., Shin, Y.-A., Jung, H.-J., Zheng, Y., Wang, Z., Chen, Y., Chen, M., Jiang, A., Li, E., Zhang, S., Hou, H., Kim, T. H., Yu, L., Liu, S., Ahn, K., Cooper, J., Park, S.-G., Hong, C. P., Jin, W., Kim, H.-S., Park, C., Lee, K., Chun, S., Morin, P. A., O'Brien, S. J., Lee, H., Kimura, J., Moon, D. Y., Manica, A., Edwards, J., Kim, B. C., Kim, S., Wang, J., Bhak, J., Lee, H. S., & Lee, J.-H. (2014). Minke whale genome and aquatic adaptation in cetaceans. *Nature Genetics*, 46(1), 88–92.

Web izvori:

<http://smokeyandrafael.blogspot.hr/>

## 7. SAŽETAK

Dobri dupin (*Tursiops truncatus* Montagu, 1821) je najpoznatiji pripadnik reda kitova (Cetacea), te je kozmopolit a živi u većini toplih mora diljem svijeta. Hrani se pretežito ribama i lignjama, a kako bi se kretao kroz vodu koja se kao medij dosta razlikuje od zraka, razvio je niz prilagodbi kojima mu je život pod vodom olakšan. Vjerojatno najzanimljivija prilagodba je adaptacija i redukcija vestibularnog sustava baš zato što je specifična za kitove i dupine. Njihovi su polukružni kanalići puno manji naspram tijela nego što je to slučaj kod kopnenih sisavaca. Također je došlo do zaokretanja u odnosu na pužnicu. Mnogo je razloga zbog koje je moglo doći do ovakve adaptacije, a jedan od vjerojatnih je da je došlo do redukcije kako bi se smanjila osjetljivost na podražaje kako bi se životinji omogućilo brzo i akrobatsko kretanje u svim smjerovima kroz vodu.

## 8. SUMMARY

The common bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus* Montagu, 1821) is the most well-known member of the order Cetacea, and is the cosmopolitan species living in most of the warm seas across the world. Its diet consists mostly of fish and squids, and in order to move through the water which is a very different medium compared to air, it developed a series of adaptations that made it easier to live underwater. Probably the most interesting adaptation is the adjustment and the reduction of the vestibular system because it's specific for dolphins and whales. Their semicircular canals are a lot smaller compared to their body size in contrast to the ones found in land mammals. There is also a slight rotation difference towards the cochlea. Many reasons could have led to this adaptation, and one of the most probable ones is that reduction happened so that the stimuli sensitivity is lowered as well, which allowed the animal quick and acrobatic movements in all directions through the water.