

Fizika ronjenja

Galić, Ivana

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:166:143899>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-01**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet

FIZIKA RONJENJA

Završni rad / Bachelor thesis

Ivana Galić

Split, rujan 2023.

Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet
Odjel za fiziku
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Završni rad

Fizika ronjenja

Ivana Galić

Sveučilišni prijediplomski studij Fizika

Sažetak:

Ronjenje s podvodnom aparaturom predmet je istraživanja nekoliko znanstvenih disciplina. Prilikom njegova razvoja ljudi su stradavali zbog nepoznavanja utjecaja fundamentalnih prirodnih zakona na čovjekovu fiziologiju. Cilj je ovoga rada objasniti osnovne zakone fizike te važnost njihova poznavanja radi unapređenja sigurnosti ronionca, opreme i poboljšanja kvalitete iskustva ljubitelja podvodne okoline. Budući da je čovjek sam po sebi složeno biće, nužno je također poznavanje i njegove fiziologije, kao sastavnog dijela materije zbog koje se i pojavila potreba za formiranjem, a onda i razvojem, fizike ronjenja. U ovom radu naglasak će se staviti na principe na kojima se temelji fizika ronjenja te na njihov utjecaj na fiziologiju ronionca i na razvoj adekvatne opreme za ronjenje, koje je lijep i zanimljiv, ali ekstreman sport.

Ključne riječi: fizika, ronjenje, tlak, zaron, izron

Rad sadrži: 26 stranica, 15 slika, 2 tablice, 21 literaturni navod. Izvornik je na hrvatskom

Mentor: doc. dr. sc. Ivana Weber

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Ivana Weber
Josipa Šćurla, mag. phys.
Tamara Rom, mag. phys.

Rad prihvaćen: 22. rujna 2023.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno – matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

Basic documentation card

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

Bachelor thesis

Diving Physics

Ivana Galić

University undergraduate study Physics

Abstract:

Diving with an underwater breathing apparatus has been subject of research of several scientific fields. During its development, human lives were lost due to lack of knowledge of how fundamental laws of nature affect human physiology. The purpose of this thesis is to explain basic laws of physics and the importance of understanding them in order to improve safety measures of the diver, equipment and quality of experience for fans of underwater environment. Human is a very complex being, hence it is necessary to know a firm basis in his physiology. Human physiology is the main reason why the physics of diving was created, and then developed. This thesis will highlight principles on which diving physics is based and their effect on physiology of the diver and also on development of an adequate diving equipment of this beautiful, interesting and extreme sport.

Keywords: physics, diving, pressure, descent, ascent

Thesis consists of: 26 pages, 15 figures, 2 tables, 21 reference. Original language: Croatian

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ivana Weber

Reviewers: Assist. Prof. Dr. Ivana Weber
Josipa Šćurla, MSc. Phys.
Tamara Rom, MSc. Phys.

Thesis accepted: September 22, 2023

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Osnovne fizikalne veličine i zakoni u fizici ronjenja.....	2
2.1	Tlak.....	2
2.2	Atmosferski tlak.....	2
2.3	Hidrostatski tlak.....	3
2.4	Uzgon.....	4
2.4.1	Arhimedov princip.....	4
2.5	Plovnost	5
2.6	Boyle-Mariotteov zakon	6
2.7	Charlesov zakon.....	8
2.8	Gay – Lussacov zakon	9
2.9	Daltonov zakon	10
2.9.1	Mješavine plinova koji se koriste pri ronjenju	10
2.10	Henryjev zakon.....	11
2.11	Percepcija predmeta, boja i zvukova	12
2.11.1	Snellov zakon	12
2.11.2	Valna duljina	13
2.11.3	Zvuk.....	14
2.12	Toplina.....	16
2.12.1	Specifični toplinski kapacitet i toplinska vodljivost te gubitci.....	16
3	Ronilačka oprema	18
4	Primjena fizikalnih zakona u ronjenju	21
4.1	Problem tlaka	21
4.2	Zaron.....	22
4.3	Izron.....	23
5	Zaključak	25
6	Literatura.....	26

1 Uvod

Ljudsko tijelo prilagođeno je životu pri standardnom atmosferskom tlaku od oko 101 325 Pa. U svakodnevnom životu, razlike u tlaku zraka ne osjećamo znatno unutar organizma dok se ne odlučimo zaroniti u more, jezero ili rijeku. Naoko se ronjenje može činiti jednostavnim, no taj sport prilično je složen i opasan zbog fizičkih zakona kojima je čovjek podvrgnut pod vodom, stoga se često ubraja u ekstremne sportove. Fizički zakoni koji opisuju ovisnost plinova o promjeni tlaka, temperature ili volumena, ovisnost koncentracije plinova o tlaku, toplinske gubitke te prirodu svjetlosti i zvuka, osnova su fizike ronjenja.

Unatoč činjenici da je ronjenje s bocom stlačene smjese zraka predmet istraživanja od 1940-ih godina, tip takvog ronjenja još uvijek je poprilično nepoznat i pun neodgovorenih pitanja. Fizika i fiziologija ronjenja još se uvijek istražuju te se oprema, tehnike i mjere sigurnosti konstantno modificiraju.

Ključ sigurnosti pri aktivnostima ronjenja poznavanje je zakona fizike koji djeluju na ljudsko tijelo i opremu koja ronioncu omogućava preživljavanje u takvim ekstremnim uvjetima. Nadalje, znanja iz fizike ronjenja potrebna su zbog unapređivanja tehnologije aparature za ronjenje i povećavanja mjera sigurnosti. Najmanja greška, tj. ignoriranje fundamentalnih zakona fizike, može biti pogubna za život.

U ovom radu navest će se i objasniti osnovni principi na kojima se temelji fizika ronjenja te pružiti uvid u njihovu važnost i važnost njihova poznavanja. Objasnit će se osnovni pojam tlaka, Arhimedov princip i uzgon. Neki od, za fiziku ronjenja, bitnih zakona koji opisuju ponašanje plinova s promjenom tlaka ili temperature su: Boyle-Mariotteov zakon, Charlesov zakon, Henryjev zakon, Gay-Lussacov zakon te Daltonov zakon. Nadalje, u radu će se objasniti percepcija predmeta, zvukova i boja u vodi, koncept topline i toplinski gubitci. Također će se navesti i bitne komponente ronilačke opreme za autonomno ronjenje. Cjelokupna primjena spomenutih principa, zakona i opreme bit će sažeta u posljednjem poglavlju.

Treba napomenuti da će se u radu naglasak staviti na autonomno ronjenje, poznato i kao SCUBA (od engl. Self-Contained Underwater Breathing Apparatus, što znači samostalni podvodni aparat za disanje) ronjenje, ili još preciznije – bit će riječi o autonomnom ronjenju otvorenog kruga. Kod autonomnog ronjenja otvorenog kruga udahnuti zrak izdiše se u okolinu. Za razliku od njega, autonomno ronjenje zatvorenog kruga podrazumijeva opremu za reinhalaciju s filterima za ugljikov dioksid. To je proces udisanja i izdisanja koji se odvija u „zatvorenom“ ili „poluzatvorenom krugu“ gdje se zrak ne izdiše u vodenu okolinu, nego u dio opreme. Iznimno je složen za korištenje i rijetko se koristi, najčešće u vojsci i nekim rekreacijskim ronjenjima.

2 Osnovne fizikalne veličine i zakoni u fizici ronjenja

2.1 Tlak

Općenito, tlak je sila koja djeluje okomito na površinu:

$$p = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

gdje je p oznaka za tlak, F iznos sile i A površina na koju djeluje sila. Mjerna jedinica za tlak u SI sustavu¹ je paskal [$\text{Pa} = \text{N} / \text{m}^2$], često se u praksi koristi i mjerna jedinica bar [$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$].

Pri ronjenju, na ronioca djeluju dvije vrste tlaka:

- atmosferski
- hidrostatski.

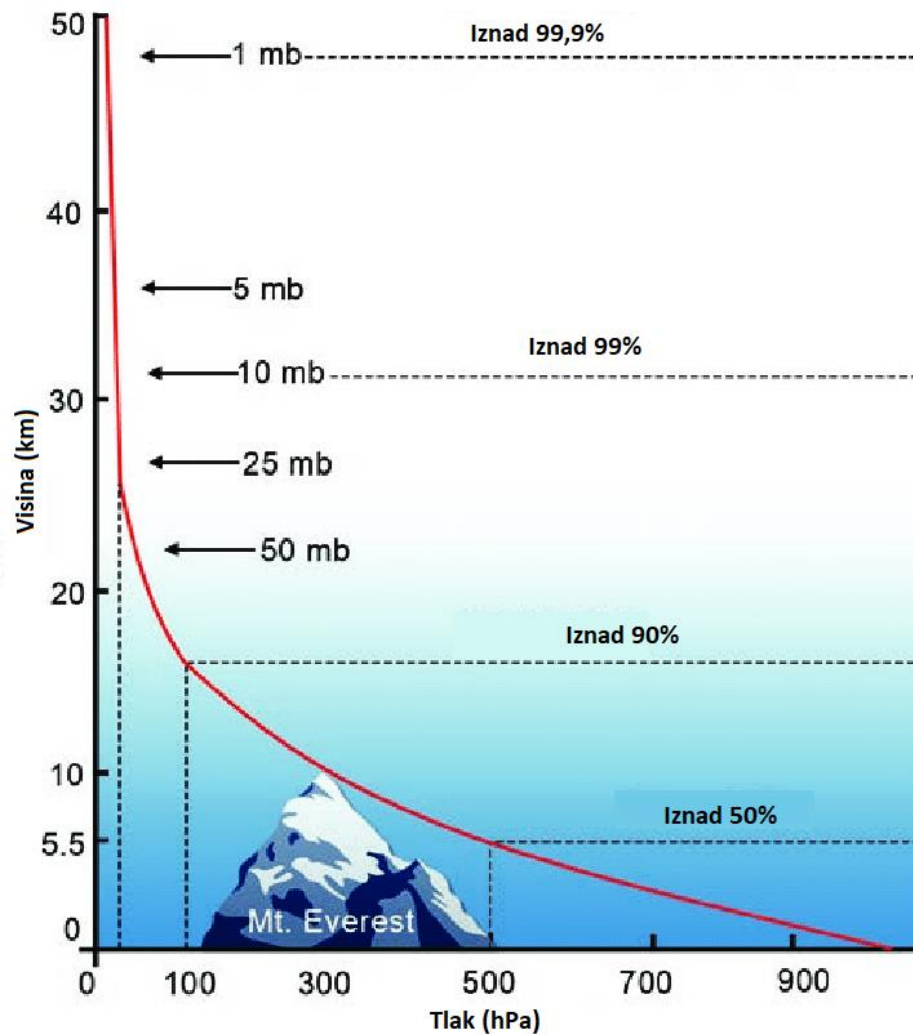
U primjeni se radi jednostavnosti koristi pojam *apsolutni tlak* koji je samo zbroj atmosferskog i hidrostatskog tlaka.

2.2 Atmosferski tlak

Atmosferski tlak je tlak kojeg vrši atmosfera na neku točku na Zemlji; smanjuje se porastom nadmorske visine, a povećava se smanjenjem nadmorske visine (slika 1). Prema tome mjesta na Zemlji koja se nalaze ispod srednje razine mora koja nisu ispunjena vodom imaju veći atmosferski tlak. Na razini mora atmosferski tlak p_0 iznosi 101 325 Pa (ili otprilike 1 bar = 100 kPa ili 1 atm).

Prosječna površina ljudskog tijela je 2,06 m² za odraslog muškarca te 1,8 m² za odraslu ženu [1], te atmosferski tlak koji djeluje na njega iz potpoglavlja 2.1 pokazuju da sila koja djeluje na čovjeka iznosi 18 000 - 20 600 N, što bi bio ekvivalent držanju mase od 18 - 20 tona. Razlog zašto taj tlak ne zdrobi čovjeka upravo je taj što je tlak unutar ljudskog tijela izjednačen s vanjskim. Ta je činjenica bitna jer nas vodi k osnovnom pravilu ronjenja: vanjski tlak (atmosfera, voda, plinovi) i unutarnji (tlak u tijelu ronioca) moraju konstantno biti izjednačeni.

¹ Međunarodni sustav mjernih jedinica (skraćeno SI prema francuskom nazivu *Système International d'Unités*) je sustav mjernih jedinica čija je uporaba zakonom propisana u svim državama svijeta osim SAD-a, Liberije i Mjanmara.



Slika 1 Atmosferski tlak; s porastom nadmorske visine, atmosferski tlak je manji jer je manja količina zraka koja pritišće atmosferu ispod sebe. Što smo bliže tlu, atmosferski tlak je veći. (slika preuzeta i uređena s <https://www.researchgate.net> [2])

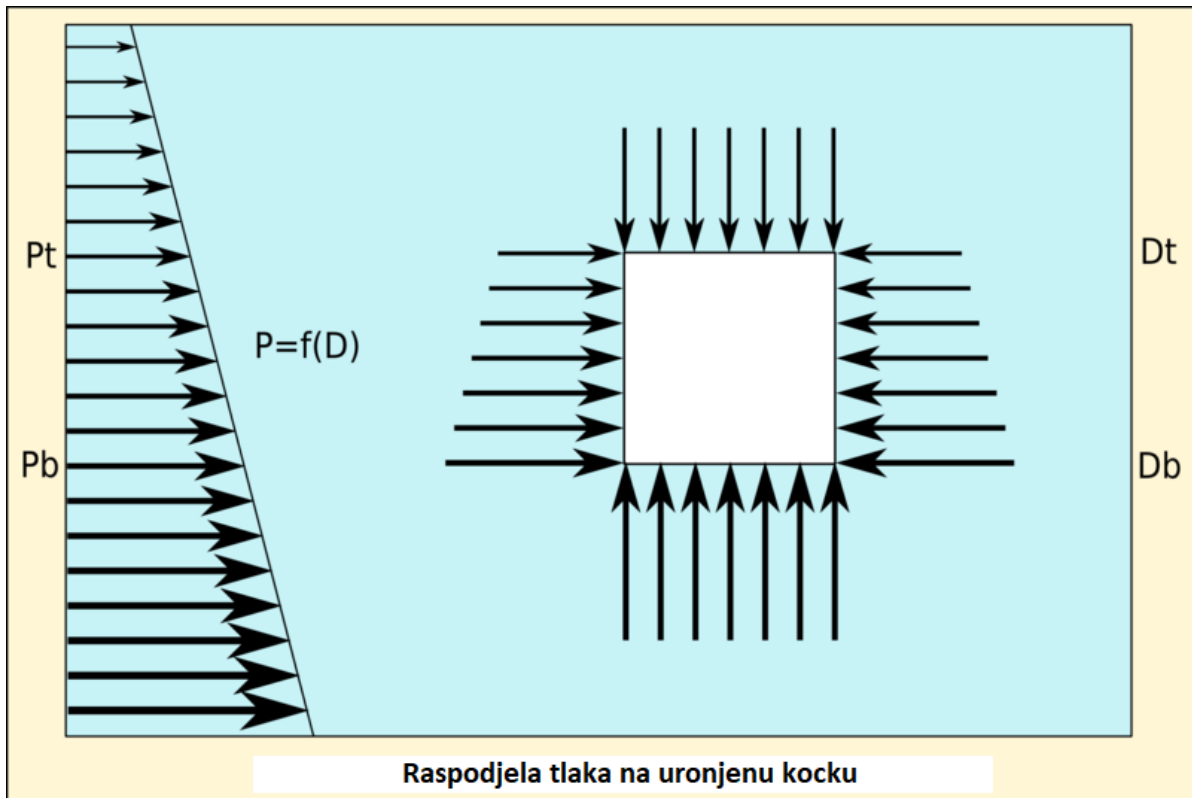
2.3 Hidrostatski tlak

Hidrostatski tlak je tlak prouzročen težinom stupca tekućine iznad zadane točke u unutrašnjosti tekućine. Možemo reći da je to tlak kojim tekućina pritišće neku površinu tj. stvara silu kojom nastoji sabiti neko tijelo [3]. Prema formuli :

$$p = \rho \cdot g \cdot h, \quad (2)$$

gdje je ρ gustoća vode, g akceleracija sile teže i h visina stupca tekućine. Iz ovoga vidimo da se tlak povećava s dubinom i sa svih strana djeluje jednako na tijelo (slika 2). Dodamo li ovoj formuli iznos atmosferskog tlaka, dobit ćemo ukupan tlak koji djeluje na neko tijelo u tekućini :

$$p_{uk} = p_0 + \rho \cdot g \cdot h, \quad (3)$$



Slika 2 Hidrostatski tlak; ilustracija kako tekućina pritišće kocku sa svih strana. (slika preuzeta i uređena s <https://hr.wikipedia.org> [4])

2.4 Uzgon

Uzgon je sila kojom fluid djeluje na uronjeni dio tijela, čija je orijentacija suprotna od orijentacije gravitacije. Vrijedi:

$$F_{uzgon} = \rho_{fluid} \cdot g \cdot V_{uronjeni}, \quad (4)$$

gdje je F_{uzgon} oznaka za silu uzgona, ρ_{fluid} fluid koji djeluje na tijelo, g akceleracija gravitacije i V obujam uronjenog dijela tijela u fluid. Što je tekućina gušća uzgon je veći, zato je uzgon veći u slanim vodama nego u slatkim.

2.4.1 Arhimedov princip

Prema Arhimedovu principu iznos sile uzgona uvijek je jednak težini istisnute tekućine. Drugim riječima, reguliranjem ukupne težine tijela može se kontrolirati iznos sile uzgona. Za to, kod ronjenja, služe olovni utezi (povećavaju težinu ronioca), „dubina disanja“ (količina zraka koja uđe u pluća podešava sitne razlike u uzgonu) i kompenzator plovnosti (prsluk u koji se pušta ili ispušta zrak znatno regulira plovnost).

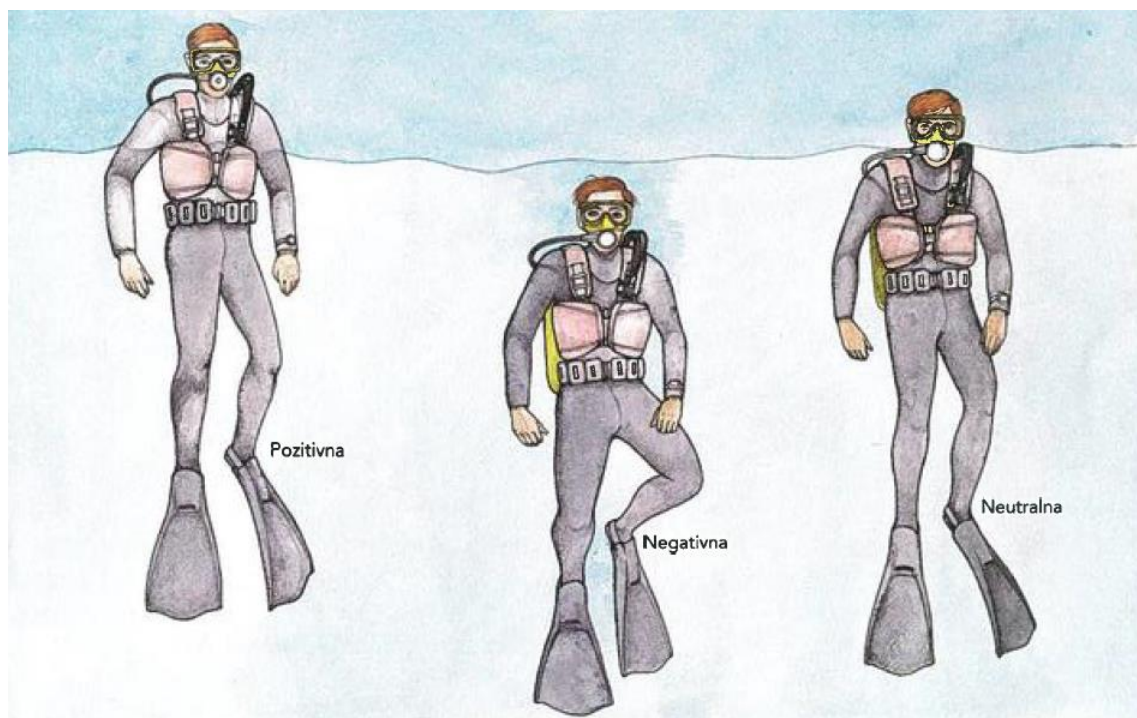
2.5 Plovnost

Ukupna sila za tijelo uronjeno u vodu jednaka je

$$\vec{F}_{ukupno} = \vec{F}_{uzgon} + \vec{F}_g \quad (5)$$

gdje su \vec{F}_{uzgon} i \vec{F}_g sile koje djeluju po istom pravcu, ali suprotne orijentacije. Sila uzgona nastoji izbaciti tijelo prema površini, a sila gravitacije nastoji tijelo vući prema dolje. Za pozitivnu orijentaciju uglavnom se odabere orijentacija sile uzgona (prema gore), te se uvodi se pojam plovnosti (slika 3) na sljedeći način:

- **Pozitivna plovnost** - ako je ukupna sila na uronjeno tijelo pozitivna ($F_{ukupno} > 0$), onda će tijelo nastojati izroniti iz vode
- **Neutralna plovnost** - ako je ukupna sila na uronjeno tijelo jednaka nuli ($F_{ukupno} = 0$), onda će tijelo mirovati u trenutnom položaju u odnosu na vertikalnu
- **Negativna plovnost** – ako je ukupna sila na uronjeno tijelo negativna ($F_{ukupno} < 0$), onda će tijelo tonuti.



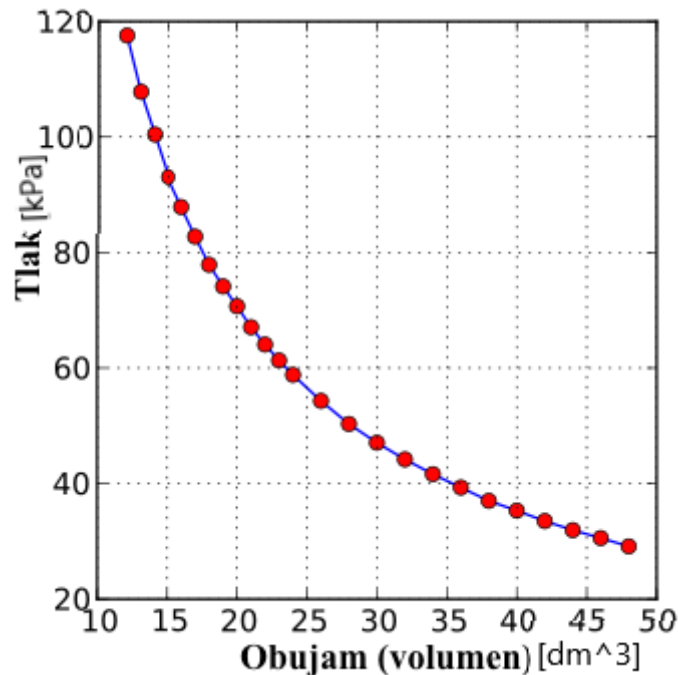
Slika 3 Slika prikazuje različite situacije plovnosti. Prva (lijevo) kada je ronilac na površini označava pozitivnu plovnost, tj. sila uzgona veća je od sile gravitacije. Druga (sredina) pokazuje situaciju kada je sila uzgona manja od sile gravitacije, tj. negativnu plovnost i ronilac tone. Treća (desno) je neutralna plovnost, tj. kada su sila uzgona i sila gravitacije jednake i ronilac miruje na mjestu na kojem se nađe. Plovnost se uvelike regulira s kompenzatorom plovnosti (prsluk u koji se utiskuje ili ispuhuje zrak), ostali su olovni utezi (smanjuju plovnost), odijelo (u neoprenskim odijelima se nalaze mjehurići zraka koji povećavaju plovnost) i dubina disanja (količina zraka u plućima). (slika preuzeta iz: RONJENJE PRIRUČNIK – Jack Jackson [5])

2.6 Boyle-Mariotteov zakon

Boyle-Mariotteov zakon koji opisuje izotermni proces ($T = \text{konst.}$) prilikom kojeg se mijenjaju tlak i volumen plina pri stalnoj temperaturi glasi:

$$p \cdot V = \text{konst.}, \quad (6)$$

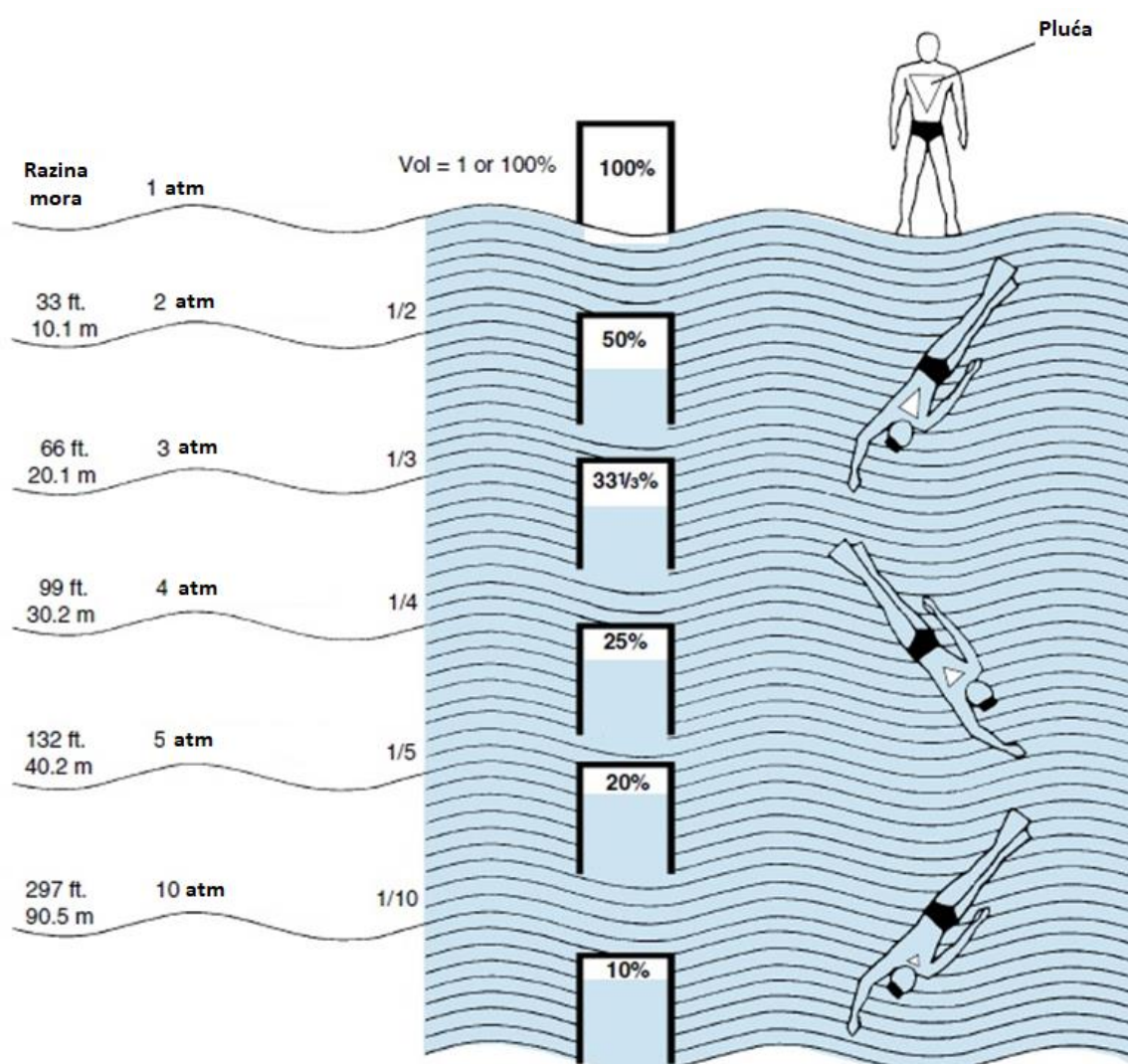
gdje je p oznaka za tlak, a V volumen plina (slika 4). Ovaj zakon vrijedi za idealni plin, ali je jako dobro primjenjiv i na realne plinove.



Slika 4 Boyle-Mariotteov zakon; graf prikazuje promjenu tlaka i volumena plina pri konstantnoj temperaturi. Tlak i volumen su obrnuto proporcionalni, što znači da se povećanjem tlaka na plin njegov volumen smanjuje. (slika preuzeta i uređena s <https://hr.wikipedia.org> [6])

Kada u kruti spremnik (ronilačka boca, čiji je obujam nepromjenjiv) utiskujemo fiksnu količinu zraka, volumen spremnika odredit će tlak zraka u njemu. No kada bismo istu tu količinu zraka utiskivali u nekakav balon (npr. pluća i ostali organi koji sadržavaju zrak) tada bi se mijenjao obujam, ali tlak unutar njega bi bio isti kao i tlak okolnog zraka.

Tlak na morskoj površini iznosi otprilike 1 bar. Na dubini od 10 m ispod površine vode taj tlak se povećava na oko 2 bara i time obujam zraka u plućima, koji ronilac na dah udahne na površini, sabija na polovicu njegova početnog obujma (slika 5). Za idućih 10 m (ukupno 20 m dubine) tlak se poveća na 3 bara što sabija zrak na trećinu njegova početnog obujma. Dakle, za tlak od n bara, obujam zraka jest $1/n$ početnog obujma. Kod ronioca na bocu pluća se neće smanjivati s porastom dubine.



Slika 5 Ronilac na dah; primjena Boyle - Mariotteovog zakona na ronjenje na dah. Za tlak od n atm, obujam će pluća biti $1/n$ od početnog obujma. Npr. na dubini od 10 m gdje je tlak 2 atm, obujam ronioćevih pluća je $1/2$ od početnog obujma. (slika preuzeta i uređena iz *The NOAA Diving Manual ; Chapter 2; Physics of diving* [7])

Također je bitno spomenuti da se sabijanjem zraka smanjuje prostor između molekula plina, tj. zrak postaje gušći. Iz definicije za gustoću

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (7)$$

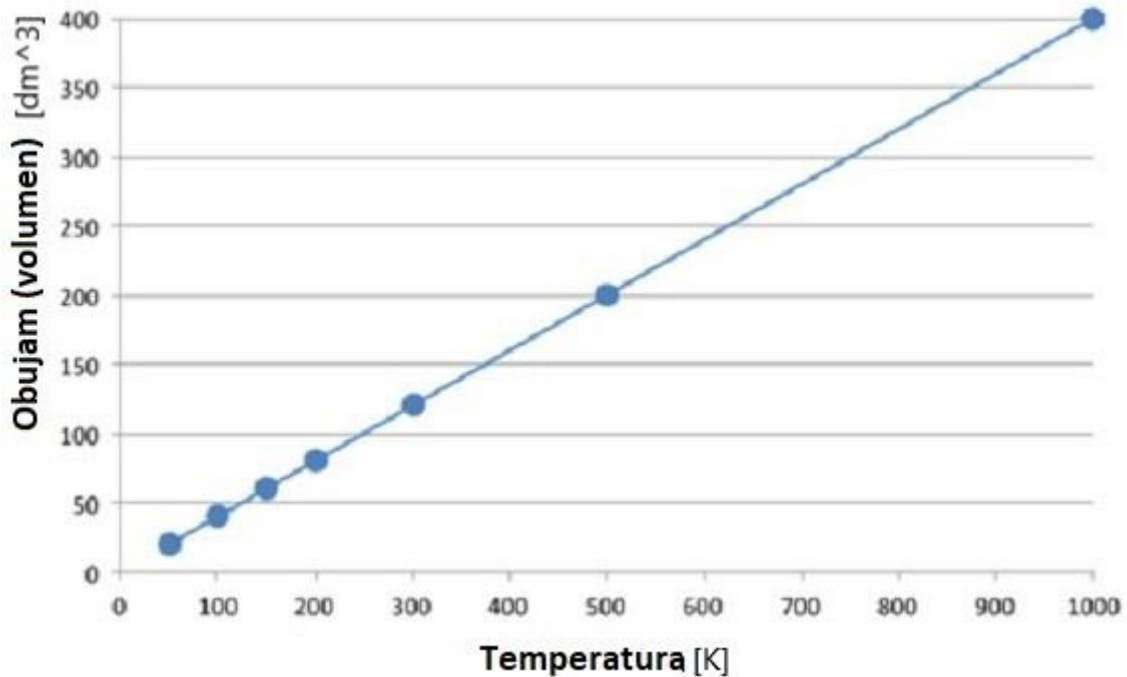
vidimo da se za konstantnu masu m , promjenom obujma V mijenja njegova gustoća ρ . Za 2 puta manji obujam dobivamo 2 puta veću gustoću. To znači da će ronionci na toj dubini udisati dvostruko veću količinu zraka pri jednom udahu (iz razloga što ronioncu regulator dovodi zrak kojemu je tlak jednak tlaku okoline koji je veći od onog na površini, zato mu je volumen zraka pri većim dubinama manji, a gustoća veća), za razliku od udaha na površini i time im je dvostruko kraće vrijeme koje mogu provesti pod vodom u usporedbi s onim na površini.

2.7 Charlesov zakon

Charlesov zakon opisuje izobarni proces ($p = \text{konst.}$) pri kojem se mijenjaju volumen V i temperatura T idealnog plina, te vrijedi:

$$\frac{V}{T} = \text{konst.}, \quad (8)$$

gdje je V oznaka za volumen plina, a T oznaka za njegovu temperaturu.



Slika 6 Charlesov zakon; graf prikazuje odnos između volumena i temperature idealnog plina pri konstantnom tlaku. Kada se temperatura plina povećava njegov volumen se također povećava. Također, kada se temperatura plina smanjuje, njegov volumen se također smanjuje. Drugim riječima volumen i temperatura plina su proporcionalni. (slika preuzeta i uređena s <https://chemistryrack.com> [8])

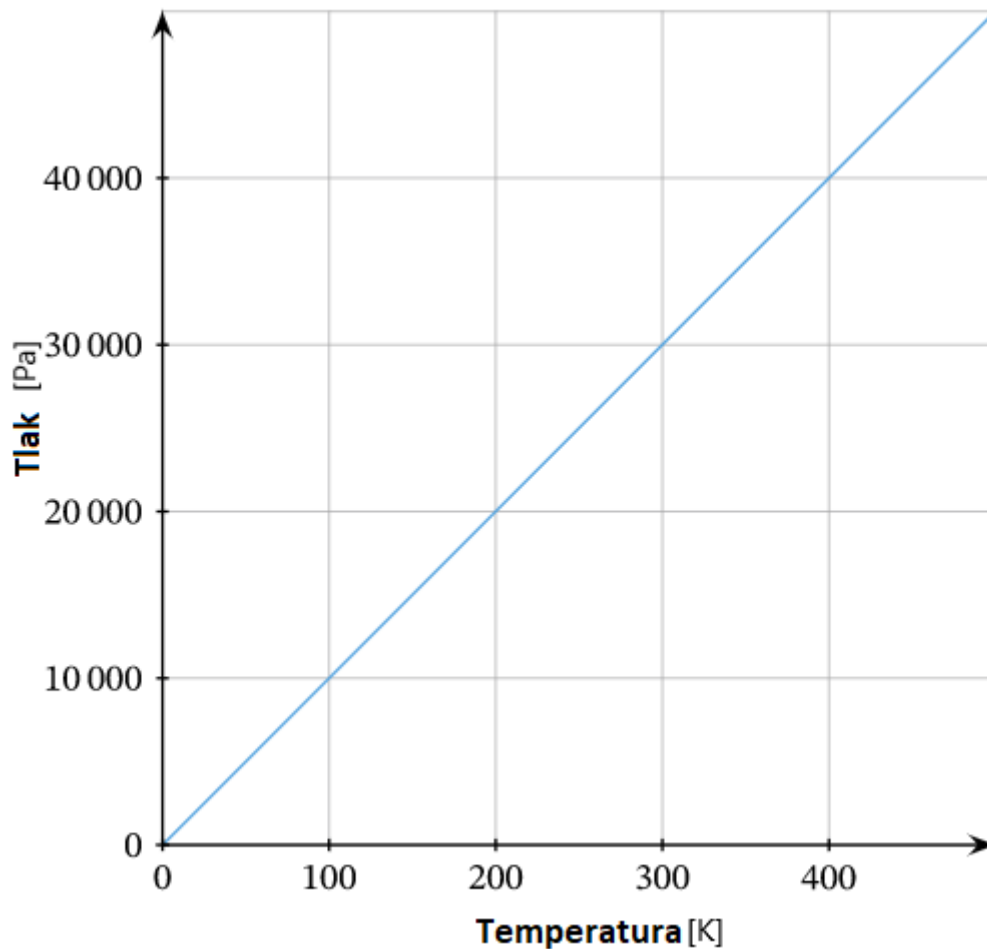
Bitno je naglasiti da ovaj zakon u primjeni funkcionira s „fleksibilnim kontejnerima“, tj. kada se tijelo koje sadrži plin također može širiti onda će tlak plina ostati konstantan (slika 6). Ali, kod ronjenja boce su kruta tijela (nemaju značajno promjenjiv volumen) te bi se tlak plina u boci povećavao kada bi se plin zagrijavao. Iz toga je razloga važno ne ostavljati punjene boce na velikim vrućinama, kako bi se zbog mogućeg širenja plina i visokog tlaka koji se stvori u boci izbjegla eksplozija.

2.8 Gay – Lussacov zakon

Gay-Lussacov zakon (ponekad i Charlesov zakon) opisuje izovolumni (izohorni) proces pri kojem se mijenjaju tlak p i temperatura T uz konstantan volumen ($V = \text{konst.}$):

$$\frac{p}{T} = \text{konst.}, \quad (9)$$

gdje je p oznaka za tlak plina, a T oznaka za njegovu temperaturu (slika 7).



Slika 7 Gay-Lussacov zakon; graf prikazuje odnos između tlaka i temperature idealnog plina pri konstantnom volumenu. Kada se temperatura plina povećava njegov tlak se također povećava. Kada se temperatura plina smanjuje, njegov tlak pada. (slika preuzeta i uređena s <https://www.nagwa.com> [9])

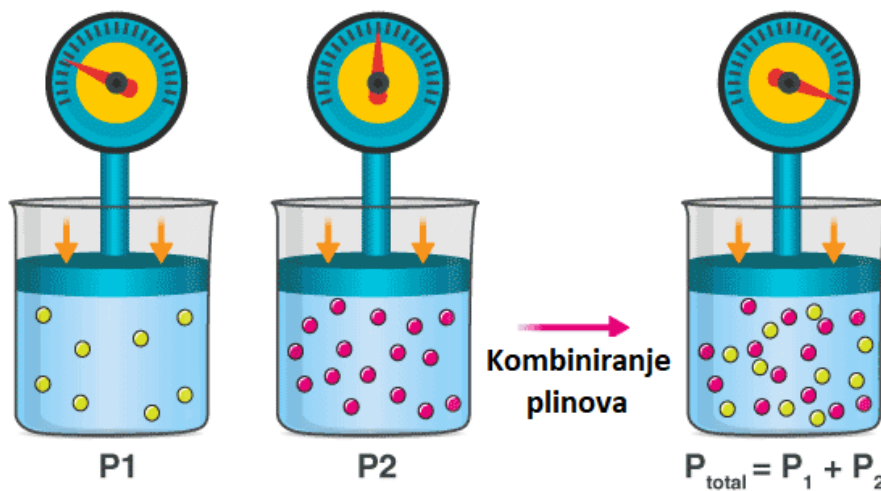
Ovaj zakon u ronjenju ključan je za punjenje boca. Prilikom punjenja boca, plin se zagrijava i time je tlak u boci veći. Potrebno je neko vrijeme da se plin u boci ohladi, time padne tlak te se dobije još malo prostora za unos dodatne količine plina.

2.9 Daltonov zakon

Parcijalni tlak određenog plina u smjesi, tlak je koji bi taj plin imao kada bi sam zauzimao obujam koji zauzima smjesa.

$$p_{uk} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i, \quad (10)$$

gdje je p_{uk} ukupni tlak smjese plinova (slika 8). Ova relacija predstavlja matematički zapis Daltonovog zakona.



Slika 8 Daltonov zakon; u posudi lijevo je plin X, a u posudi u sredini je plin Y. Svaki imaju, ovisno o njihovoj količini u posudi, neki svoj tlak. Kada plin X i Y pomiješamo, ukupni tlak u posudi desno bit će zbroj tlakova u lijevoj i desnoj posudi. (slika preuzeta i uređena s <https://byjus.com> [10])

2.9.1 Mješavine plinova koji se koriste pri ronjenju

Da bi se omogućila maksimalna sigurnost prilikom ronjenja, jako je bitno poznavati kako se određeni plinovi i njihova količina u krvi, pri visokim tlakovima, ponašaju u tijelu.

Kisik na velikim dubinama postaje toksičan, stoga se koriste različite smjese plinova za ronjenje da bi se izbjeglo trovanje kisikom. Osim toga, ako je premalo kisika u smjesi, može doći do gubljenja svijesti usred hipoksije. Također je bitna količina dušika kako bi se smanjio rizik od dekompresijske bolesti (detaljnije o plinovima u potpoglavlju 2.10 i poglavlju 4) [5]. Neke od smjesa koje se često koriste su :

- Atmosferski zrak (79% dušik, 21% kisik)
- Nitrox (22-40% kisik, ostalo dušik)
- Trimix (kisik, helij, dušik; postotak varira)

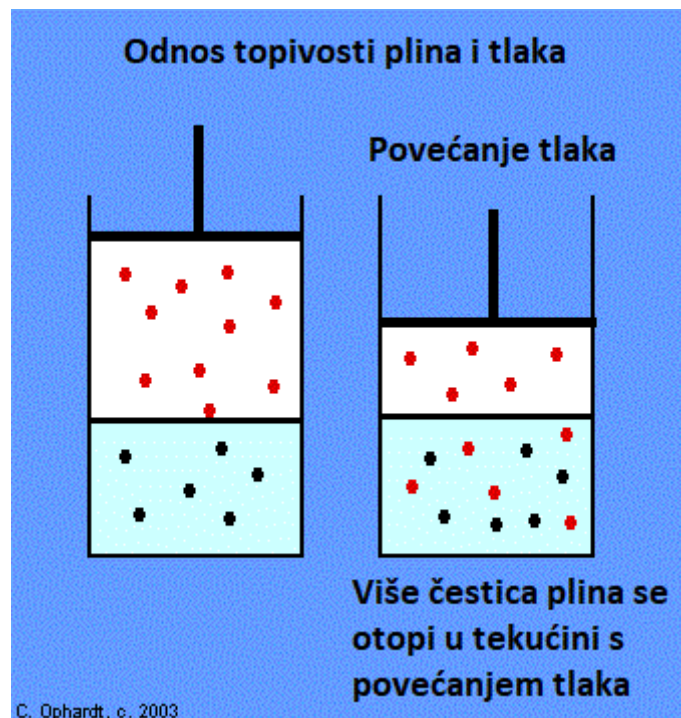
- Heliox (helij, kisik).

2.10 Henryjev zakon

Pri konstantnoj temperaturi, količina plina koja će se otopiti u tekućini s kojom je u kontaktu, direktno je proporcionalna parcijalnom tlaku tog plina.

$$p_{\text{parc}} = k \cdot c, \quad (11)$$

gdje je p_{parc} parcijalni tlak plina koji se otapa u tekućini, c količina plina i k konstanta topivosti pojedinog plina.



Slika 9 Henryjev zakon; ilustracija prikazuje kako se s povećanjem tlaka (pri konstantnoj temperaturi) više molekula plina može sabiti između molekula tekućine jer je prostor između molekula tekućine veći nego kod plina. (slika preuzeta i uređena s <https://scubatechphilippines.com> [11])

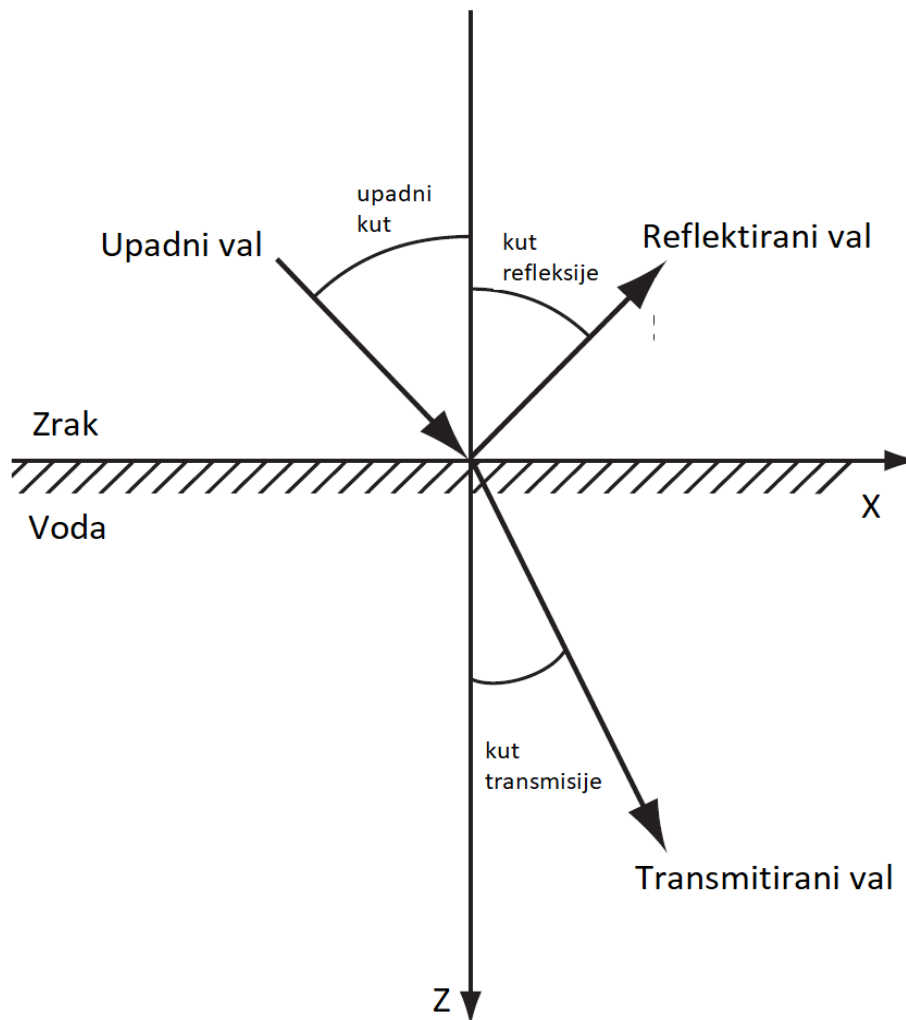
Prostori između molekula od kojih je sastavljena tekućina veći su nego kod krutih tvari te manji nego kod plinova. U tekućinama, između molekula ima dovoljno prostora u koji se mogu smjestiti neke molekule plina i tada se kaže da je plin otopljen u tekućini (slika 9). Molekule plina u otopini zadržavaju svojstva plina. One će u tekućini djelovati pod određenim tlakom (pojam poznat kao *napetost plina*). Važno je napomenuti da različita tkiva različito upijaju plinove u tijelo. U poglavlju 4 dodatno ćemo pojasniti važnost ovog zakona. [5]

2.11 Percepcija predmeta, boja i zvukova

Čovjekova percepcija lako je promjenjiva s obzirom na to da je ograničena na pet osjetila koji daju informaciju o okolini. Kratko ćemo navesti, bez ulaženja u detalje, zašto je u mediju poput vode doživljaj okoline drugačiji nego na kopnu.

2.11.1 Snellov zakon

Općenito elektromagnetski valovi podliježu Snellovu zakonu. Spektar elektromagnetskog zračenja pokriva raspon frekvencija od 10^3 do 10^{22} Hz tj. raspon valnih duljina od 10^6 do 10^{-13} m, i između ostalih ga čine i npr. radio valovi, x-zrake, ultraljubičasto zračenje, vidljiva svjetlost, infracrveno zračenje, no nama je ovdje od interesa vidljiva svjetlost raspona valnih duljina od $3 \cdot 10^{-7}$ do $1 \cdot 10^{-6}$ m jer želimo objasniti vizualnu percepciju.



Slika 10 Snellov zakon: shema opisuje elektromagnetski val (svjetlost) koji se pri dolasku na drugi medij (npr. iz zraka na površinu vode) djelomično reflektira u početni medij (zrak) i djelomično transmitira u novi medij (voda). Kut pod kojim će se zraka lomiti ovisi o mediju i upadnom kutu. (slika preuzeta i uređena iz David J. Griffiths – Introduction to Electrodynamics – Addison – Wesley (2012))[12]

Jednadžba koja opisuje odnos indeksa lomova² i upadnog te reflektiranog kuta jest Snellova jednadžba:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 , \quad (12)$$

gdje je n_1 indeks loma prvog sredstva, n_2 indeks loma drugog sredstva, θ_1 kut upada vala na drugo sredstvo, θ_2 kut transmisije u drugo sredstvo (slika 10).

Gledajući izvana u vodu, objekti u vodi nam se čine veći; oči fokusiraju sliku ovisno o tome kako svjetlost ulazi u oko. Razlog zašto nam je vid mutan u vodi jest taj što su tekućina u oku i voda slične gustoće te time imaju približno isti indeks loma što znači da se svjetlost ne lomi pa se slika formira iza mrežnice. Ako između oka postoji pregrada ispunjena zrakom (ronilačka maska) onda će se slika objekata moći formirati na mrežnici i time je slika izoštrenija. Povećanje slike objekta ovisit će o dizajnu maske, udaljenosti stakla od očiju i bistrini vode.

2.11.2 Valna duljina

Ono što percipiramo kao „boju“ dio je elektromagnetskog (EM) zračenja neke valne duljine koja je u vidljivom spektru. Sve površine djelomično apsorbiraju i djelomično reflektiraju EM valove. Kada se EM val određene valne duljine reflektira od neke površine, vidjet ćemo točno tu boju koju površina reflektira, dok je ostale apsorbirala.

EM val frekvencije f čija je brzina v u nekom sredstvu, ima valnu duljinu:

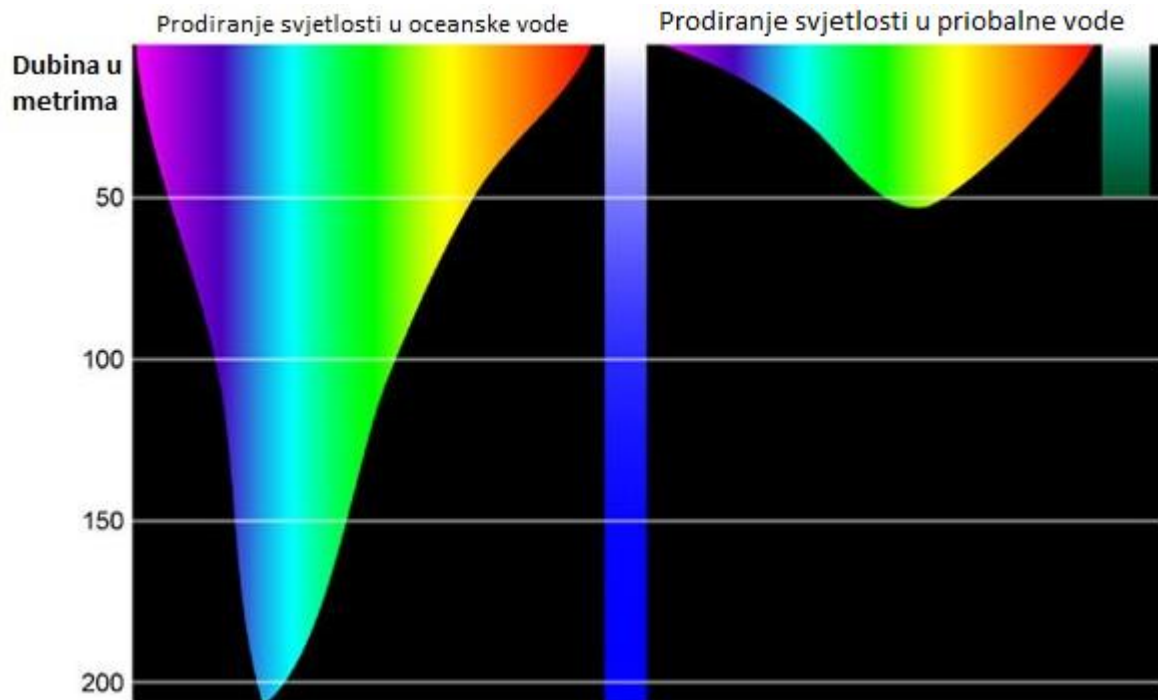
$$\lambda = \frac{v}{f} ., \quad (13)$$

Tablica 1 Tipične vrijednosti valnih duljina, frekvencija i energije EM zračenja koje upadaju u vidljivi spektar. Tablica preuzeta i uređena s <https://www.britannica.com> [13]

Raspon vidljivog spektra zračenja			
boja	valna duljina (nm)	frekvencija (10^{14} Hz)	energija (eV)
crvena (limit)	700	4.29	1.77
crvena	650	4.62	1.91
narančasta	600	5.00	2.06
žuta	580	5.16	2.14
zelena	550	5.45	2.25
cijan	500	5.99	2.48
plava	450	6.66	2.75
ljubičasta (limit)	400	7.50	3.10

² Indeks loma je veličina koja opisuje omjer brzine svjetlosti u vakuumu i brzine svjetlosti u sredstvu (drugim riječima, postotak kojim se u sredstvu lomi svjetlost).

Budući da svakoj boji odgovara točno određena energija, što vidimo iz tablice iznad, svjetlost neke boje može prodrijeti do određene dubine. Što je valna duljina svjetlosti kraća to je veća energija EM vala i time svjetlost te boje prodire dublje. Potrebno je napomenuti da dubina do koje će doprijeti neka boja ovisi i o mediju te nije ista za ocean, jezero, mutnu vodu i sl., a također ovisi i o količini medija jer voda u čaši je premala količina da reflektira plavu i ljubičastu boju zato nam se i čini prozirna za razliku od jezera koje je slične gustoće, ali daleko većeg obujma. U mutnim vodama čestice koje zamućuju vodu raspršuju svjetlost, time potpuno drukčije boje vidimo u mutnijim nego u bistrijim vodama.



Slika 11 Približan opis prodiranja boja u vodeni medij. Na jako velikim dubinama dominantna je plava boja jer ima najveću energiju zračenja i time dublje prodire, dok su crvena i narančasta brzo apsorbirane pri manjim dubinama jer imaju malu energiju zračenja. (slika preuzeta i uređena s <https://deepoceaneducation.org> [14])

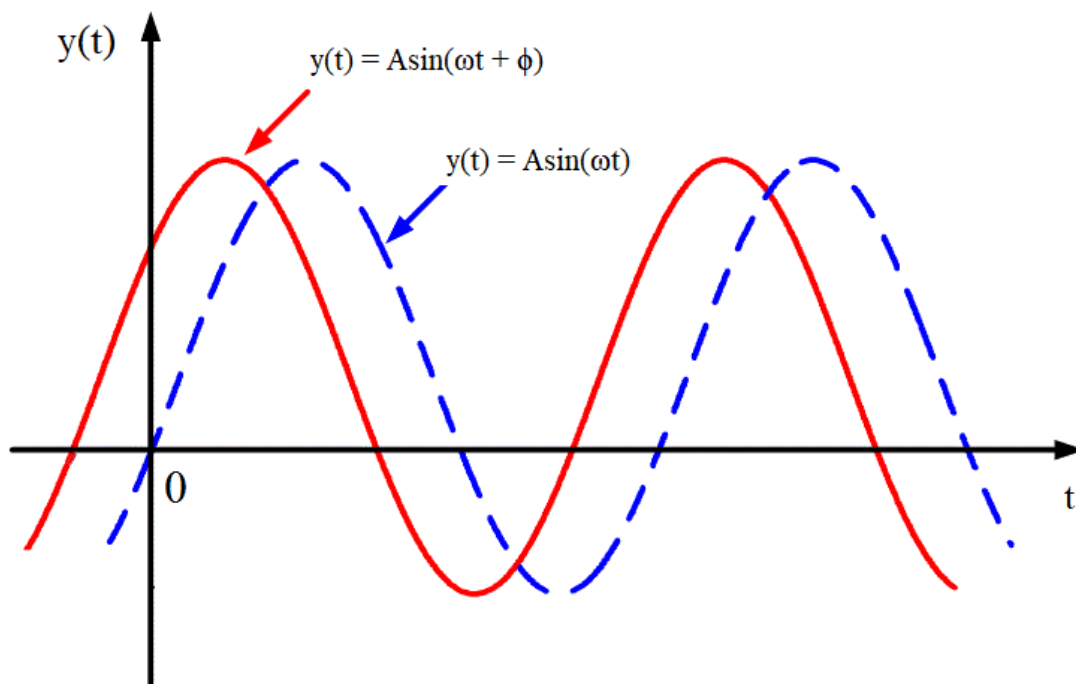
Iz ovoga možemo zaključiti da ćemo ronjenjem na velikim dubinama sve vidjeti u nijansama plave, ljubičaste i zelene (slika 11). Također što dublje idemo, svi objekti i živi organizmi činit će nam se u nijansama sive pa čak i crne boje.

2.11.3 Zvuk

Zvuk je mehanički longitudinalni val frekvencije od oko 20 Hz do 20 kHz na koji je osjetljivo ljudsko uho. Nastaje zbog periodičnoga titranja čestica u nekom elastičnom sredstvu i širi se radijalno u svim smjerovima. U idealnim uvjetima, čisti zvuk bez ikakvih šumova bismo mogli opisati periodičnom funkcijom oblika:

$$y = A \sin(\omega t + \phi), \quad (14)$$

gdje je A amplituda (maksimalna udaljenost od ravnotežnog položaja) i nju percipiramo kao glasnoću zvuka, ω frekvencija titranja (broj valova u jedinici vremena) koju percipiramo kao tonsku visinu (viši ili dublji tonovi), ϕ fazni pomak koji je pomak vala u odnosu na ishodište (drugim riječima, govori nam koliko val kasni ili rani u odnosu na referentnu točku) (slika 12).



Slika 112 Grafički prikaz sinusne funkcije. Isprekidanom linijom funkcija polazi od ishodišta i zato joj je fazni pomak 0. Punom linijom prikazana je funkcija s faznim pomakom različitim od 0 u odnosu na isprekidanu funkciju. Obje funkcije imaju iste amplitude i frekvencije, ali ne i fazni pomak koji govori o 2 vala koji u različito vrijeme dolaze do iste točke. (slika preuzeta i uređena s <https://electricalacademia.com> [15])

Ljudsko uho prilagođeno je detekciji izvora zvuka na kopnu i njegova fizionomija je takva da ta detekcija nije jednostavna u vodi. Što je medij gušći, zvuk se brže širi. Brzina širenja zvuka u zraku je oko 343 m/s dok je u vodi 1500 m/s, što je skoro 5 puta brže.

Detekcija zvuka funkcionira na principu „minimalno 2 mikrofona“ ili detektora (što su kod čovjeka uši). Kada zvuk dolazi iz nekog smjera, jedno uho većinom prije primi signal dok do drugog treba proći određeno kratko vrijeme da bi i ono moglo detektirati zvuk. U vodi je to daleko teže jer je razlika dolaska zvuka od jednog do drugog uha toliko mala da uho ne može dovoljno brzo i precizno obraditi informaciju te je iz tog razloga vrlo teško odrediti izvor zvuka u vodi, i vjerojatnost da ćete pogriješiti pri procjeni izrazito je visoka.

2.12 Toplina

Po jednoj od definicija u fizici, toplina je energija koja prelazi s jednog tijela na drugo zbog razlike njihovih temperatura i prema termodinamici ona uvijek prelazi s toplijeg tijela na hladnije. Načini na koje se toplina prenosi su :

- kondukcija (izravni dodir s izvorom topline)
- konvekcija (prijenos pomoću tekućina i fluida)
- zračenje ili radijacija (zagrijano tijelo emitira elektromagnetsko zračenje).

2.12.1 Specifični toplinski kapacitet i toplinska vodljivost te gubitci

Specifični toplinski kapacitet jest količina topline potrebna da se kilogram tvari zagrije za 1°C ili 1 K:

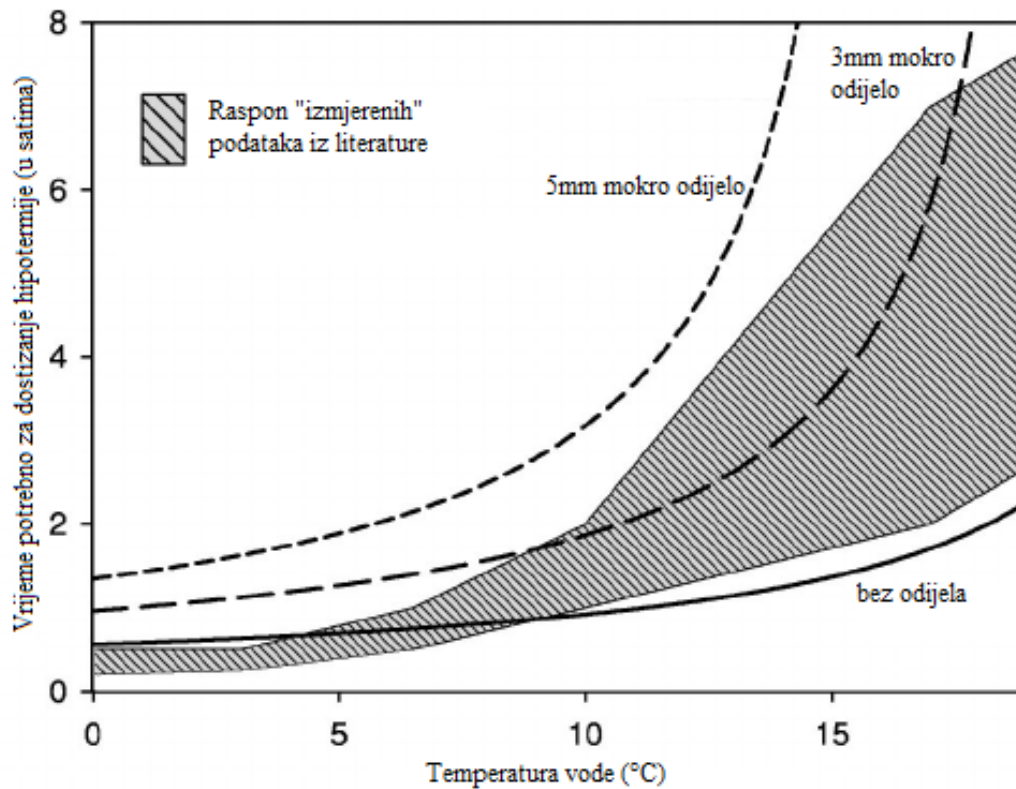
$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (15)$$

gdje je Q toplina, m masa tvari, c specifični toplinski kapacitet, ΔT razlika u početnoj i krajnjoj temperaturi.

Tablica 2 Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta pojedinih tvari. Preuzeto i uređeno s <https://www.engineeringtoolbox.com> [16]

Tvar	c [J / kg K]
Suhi zrak (0 m nadmorske visine)	1005
Voda	4186
Dušik	1040
Kisik	918

Voda ima daleko veći toplinski kapacitet od zraka (tablica 2) što znači da puno brže odvodi toplinu, zato nam je recimo na 20°C na zraku značajno toplije nego na 20°C u vodi. Toplina tijela u vodi se daleko brže gubi nego na zraku. Tijelo ne može dovoljno brzo nadoknaditi izgubljenu toplinu u vodi, zato se ronilačka odijela prave od posebnog materijala i debljine da se ti gubitci značajno umanje i uspore, inače bi ronilac već pri temperaturama od 15 °C i niže bez odijela doživio hipotermiju (stanje izrazito snižene tjelesne temperature koje može biti fatalno) u roku od 30 min (slika 13). Detaljnije o toplinskim gubitcima bit će riječi u četvrtom poglavlju o primjeni fizikalnih zakona u ronjenju.



Slika 123 Prikaz vremena potrebnog za dostizanje hipotermije u ovisnosti o temperaturi vode. Ronjenjem bez odijela pri temperaturama od 15 °C i nižih toplina iz tijela gubi se brže u odnosu na korištenje odijela različitih materijala i debljine. Naime, podatak je preuzet iz istraživanja ronioca na dah koji zbog zadržavanja zraka gube manje topline iz tijela nego roniaci na bocu, ali svakako je dobar ogledni primjer zašto je odijelo potrebno. (slika preuzeta i uređena s <https://www.researchgate.net> [17])

3 Ronilačka oprema

Važnu ulogu u ronjenju na bocu igra adekvatna ronilačka oprema (slika 14). U ovom poglavlju navest ćemo i opisati njene najvažnije dijelove.



Slika 134 Ronilačka oprema (slika preuzeta s <http://www.ronjenjehrvatska.com> [18])

Maska za ronjenje dio je opreme koji nam daje čistu sliku pod vodom te sprječava ulazak vode u zračni prostor. Postoje maske za ronjenje na dah i autonomno ronjenje. Razlika je u dimenziji i volumenu zračnoga prostora.

Postoje i maske koje pokrivaju cijelo lice ronioca i omogućavaju disanje i na nos, te ugradnju uređaja za komunikaciju između ronioca i bazne stanice na površini. Uglavnom se koristi za profesionalno ronjenje.

Disalica je dio opreme koji služi za disanje ispod površine vode. Iako se najčešće koristi pri ronjenju s maskom i perajama (tada govorimo o tzv. snorkelingu – izraz dolazi od engl. *snorkel* što znači ronjenje s disalicom), ona je obvezna oprema svakoga ronioca jer se njome koristi prije i poslije zarona da ne bi trošio zrak iz boca.

Ronilačko odijelo uvelike smanjuje gubitak topline iz tijela, što mu je glavna uloga. Također koristi kao zaštita od ogrebotina i životinjskih uboda. Dva su tipa odijela za ronjenje: mokro i

suho odijelo. Mokra odijela izrađuju se od neoprenskog materijala i tijesno prianjaju uz tijelo održavajući tjelesnu temperaturu ronioca. Propuštaju malu količinu vode i zbog toga se zovu mokra odijela, no ta količina vode između kože i odijela vrlo se brzo zagrije i postaje toplinski izolator. Suha odijela potpuno sprječavaju ulaz vode. Na sebi imaju priključak za stlačeni zrak i mogu se napuhavati te na taj način služiti i kao dodatni kompenzator plovnosti. Ispod suhoga odijela odijeva se pododijelo koje je ključni čimbenik za osiguranje dobre termičke zaštite. Iako su suha odijela puno bolja toplinska zaštita od mokrih odijela, za njihovu uporabu potrebno je završiti poseban specijalistički tečaj kako bi ih se naučilo pravilno koristiti. Ulogu sličnu ronilačkom odijelu imaju rukavice, čizmice i kapuljača.

Regulatori služe za nesmetano disanje pod vodom. Sastoje se od prvoga i drugoga stupnja. Prvi stupanj ima zadatak reducirati tlak iz boce na 9 bara. Drugi stupanj se sam regulira na tlak okoline prilikom čega omogućava nesmetano disanje ronioncu tj. dio koji ide u usta.

Kompenzator plovnosti (uzgona) služi za reguliranje uzgona. Kompenzator plovnosti sadrži zračni mjehur (vreću) čijim punjenjem i ispuštanjem ronionci kompenziraju razliku u plovnosti. Spojen je na regulator, tako da je u svakom trenutku moguće napuhavanje. Opremljen je sustavom za ispuštanje zraka te sigurnosnim ventilima za prenapuhivanje. Uglavnom je u obliku prsluka na koji se pričvršćuju boce, regulator, alternativni spremnici za zrak, razni dodatci, a na nekima i utezi.

Boce za ronjenje služe za spremanje i transport zraka pod visokim tlakom. Boce se pune stlačenim zrakom putem posebnoga kompresora i uglavnom su napravljene od čelika ili aluminijske. Boce treba redovito atestirati i davati na pregled. Trebaju se uvijek skladištiti uspravno s plinom za udisanje pod tlakom od 10 – 20 bara. Tako se smanjuje koncentracija kisika, što znači i korozija povezana s kisikom.

Utezi se dodaju da bi se smanjio uzgon kojeg s druge strane povećavaju odijelo i boce. Utege čini niz olovnih ploča na pojasu koji se kopča oko struka ili inačica s pojasom sa spremnicima u koje se stavljaju utezi u obliku vrećica punjenih olovnim kuglicama. Remen se zatvara / otvara kopčom koja omogućava brzo otkopčavanje i skidanje remena u slučaju opasnosti.

Konzole s instrumentima sadrže mjerače trenutne dubine i maksimalne postignute dubine, mjerač količine zraka u boci i kompas.

Ronilačko računalo ili dekompresijski mjerač jest uređaj koji se upotrebljava za mjerenje proteklog vremena i dubine tijekom ronjenja te nakon toga korištenje tih podataka za izračunavanje i prikaz profila uspona koji će prema programiranom dekompresijskom algoritmu dati nizak rizik od dekompresijske bolesti.

Nož ima sigurnosnu i komunikacijsku ulogu. Ako se ronilac slučajno zapetlja u ribarske mreže ili konope, njime ih može prerezati ili kucanjem nožem o tvrdi predmet, primjerice bocu, tj. davanjem zvučnih signala, može drugom ronioncu sugerirati tu ili neku drugu nezgodu i

opasnost. Najpogodnije mjesto za nošenje noža unutrašnja je strana potkoljenice, što ga čini lako dostupnim, ali i najmanje vjerojatnim da zapne za nešto.

4 Primjena fizikalnih zakona u ronjenju

4.1 Problem tlaka

Ranije navedeni zakoni fizike temelj su fizike podvodnog ronjenja. Ronjenje može biti iznimno opasna aktivnost te stoga ne dozvoljava zaobilaženje niti jednog zakona fizike. Na taj način maksimalno se osigurava ronilac, ali također i omogućava unapređenje podvodne tehnologije te tako i pospješivanje ugođaja ronilaca.

Krenut ćemo redom po spomenutim zakonima. Tlak je temeljni pojam koji „komplicira“ cijelu fiziku ronjenja kao što je pojašnjeno u početku. Ako postoji razlika tlakova između okoline (voda) i sustava (balon uronjen u vodu) te ako je tlak okoline veći, on će nastojati sabiti balon dok se tlak zraka u balonu ne izjednači s tlakom okoline.

Ljudsko tijelo prilagođeno je životu na kopnu pri atmosferskom tlaku (101 325 Pa ili otprilike 1 bar), stoga ga ono „ne osjeća“, ali je osjetljivo na promjene tlaka. I najmanja promjena u tlaku izaziva fiziološke promjene u organizmu, ali to nije tema rada pa ćemo se zadržati na činjenici da postojanje razlike tlakova utječe jako na prirodu plinova i čovjekov organizam. Razlog zašto čovjeka ne sabije tlak zraka atmosfere jest taj što su naša pluća fleksibilna kao balon i mogu se stiskati i rastezati, time je tlak u plućima i tlak čestica zraka unutar našeg tijela izjednačen s tlakom vanjskog zraka sve dok zrak ne zadržavamo.

Porastom dubine, raste i ukupan tlak kojim zajedno atmosfera i okolna voda pritišću ronilaca. Potrebno je naglasiti da je tlak u morskim i slatkim vodama različit (zbog različite koncentracije soli, različita je gustoća medija). Za morske vode, tlak će se povećati za 1 atm svakih 10.1 m, dok će se za slatke vode povećavati svakih 10.4 m.

Nadalje, boce su punjene smjesom plinova (smjesa ovisi o kakvom će se ronjenju raditi) pod visokim tlakom, što znači da je izrazito važna ispravnost dijelova koji smanjuju tlak zraka iz boce koji ronilac udiše. Ukratko, regulatori imaju 2 stupnja reguliranja tlaka; u prvom stupnju koji je bliži boci, tlak se uvelike smanji, dok se u drugom stupnju tlak smanjuje do tlaka okoline kako bi ronilac sigurno udisao smjesu zraka iz boce.

Što se tiče samih boca, u trenutku punjenja boca (boce su „kruti kontejneri konstantnog volumena“) tlak u boci raste te se smjesa plinova zagrijava. Na prvu će se činiti da je boca puna (prema uređajima koji mjere tlak boce), ali kada ostavimo bocu da se malo ohladi past će tlak, temperatura i volumen smjese unutra, stoga treba pripaziti da se na zaron ne krene s manjom količinom plinova nego je potrebno. Također, budući da boce nisu fleksibilne kao balon, ostavljanjem boca pri jakom izvoru topline (kao npr. ako se boca ostavi na suncu) povećava se tlak plina u boci, ali i njegov volumen te to može dovesti do eksplozije (pogledati potpoglavlja 2.7 i 2.8).

4.2 Zaron

Navučete svu opremu na sebe (poglavlje 3), uskočite u more i prvo što ćete primijetiti je da plutate (prsluci su ispunjeni zrakom i time kontroliraju plovnost, odijela su ispunjena mjehurićima zraka i pluća konstantno mijenjaju količinu zraka u sebi) bez obzira koliko tešku opremu na sebi imali. Za ovo je odgovoran uzgon, i jako je važno usavršiti kontroliranje plovnosti (uzgon koji vuče gore + sila teža koja vuče dolje) jer su brzina zarona i izrona ključni u održavanju zarona sigurnijim (o uzgonu u potpoglavlju 2.4).

Brzi zaron nije pretjerano opasan kao brzi izron, ali treba ga izbjegavati jer određenim strukturama u ljudskom tijelu treba vremena da se prilagode na novi tlak (uši, sinusi, oči, pluća, kosti, zubi...) te može dovesti do tzv. barotraume (povreda tkiva ili organa koja je posljedica izloženosti velikim razlikama tlaka između prostora u tijelu ispunjenih plinom i zračnog ili vodenog prostora oko tijela, tijekom zarona ili izrona). Iz ovoga možemo zaključiti da postoji preporučena brzina zarona, prema literaturi maksimalna preporučena brzina je u prosjeku 22 m po minuti [19]. Zrak kojim se napuhuje prsluk dolazi iz boce, tako da je i to jedna do komponenti koje limitiraju količinu dostupnog zraka tijekom ronjenja.

Porastom dubine, raste tlak. Iz drugog poglavlja znamo da se volumen plinova smanjuje pri povećanju tlaka (uz konstantnu temperaturu), što znači da će se plin u boci sve više sabijati (postajati gušći) pa će količina zraka koju udiše ronilac biti sve veća, što je jedan od faktora koji se vrlo lako može zanemariti. Tu se nailazi na problem koji često može biti fatalan. Radi se o prirodi plina dušika.

Dušik je jako inertan plin (ne ulazi lako u kemijske reakcije) i obično ga se u atmosferi nalazi oko 79% . Sastavni je dio živih bića i većina smjesa plinova za ronjenje. Kao što smo naveli u prethodnom paragrafu, povećanjem koncentracije plina koju ronilac udiše s porastom dubine, povećava se i količina dušika koja ulazi u organizam. Pri velikim dubinama, tj. pri jako visokim tlakovima, molekule dušika se puno više otapaju u tekućini (ovdje mislimo na krv jer se putem krvnih žila sve tvari prenose do tkiva i organa pa tako i plinovi). Drugim riječima, povećava se koncentracija dušika u krvi i u drugim tkivima što nije samo po sebi toksično, ali izaziva stanje „dušikove narkoze“ ili opijenosti dušikom čiji su simptomi opijenost, povećana euforija, ometeno rasuđivanje itd. Važno je napomenuti da različita tkiva različitom brzinom upijaju molekule plina, što će biti ključno u poglavlju o izranjanju.

Za razliku od dušika, količina kisika u velikim količinama je toksična za organizam jer velike količine kisika mogu narušiti stanične membrane pogotovo u respiratornom sustavu što može dovesti do kolapsa pluća, ali i problema s centralnim živčanim sustavom. Zato se za dublje zarone koriste boce s manjim udjelom kisika.

Budući da je ronjenje jako „hladan sport“, tj. tijelo je izloženo jako niskim temperaturama i održavanje stalne tjelesne temperature jako je zahtjevno, bitno je obratiti pozornost na termalne gubitke koji se nastoje umanjiti poboljšanjem tehnologije.

Prvi način na koji se toplina gubi jest konvekcija tj. prijenos topline u direktnom dodiru tijela ronioca s hladnijom okolnom vodom. To je ujedno i najbrži način gubljenja topline, objašnjen u potpoglavlju 2.12. Drugi razlog zbog kojeg se također gubi toplina jest disanje. Udisanjem hladnog zraka, tijelo mora zagrijati i vlažiti udahnuti zrak na tjelesnu temperaturu od oko 37°C, čime mora utrošiti dodatnu energiju. Budući da se pri ronjenju na bocu zrak ne smije zadržavati, odmah se taj zagrijani zrak izbacuje i gubitak topline na taj način jako je značajan.[20]

Također, s povećanjem dubine opada temperatura, povećava se tlak te taj tlak vrši kompresiju na mjehuriće zraka unutar odijela. Budući da se mjehurići smanjuju, dodir s okolnom vodom je veći i time se smanjuje efikasnost odijela što se dublje roni. Zato je jako važan odabir tipa i debljine odijela.

Vrlo važna činjenica koja zna često promaknuti jest da toplinski kapacitet plinova raste s porastom tlaka, a veći toplinski kapacitet znači brži gubitak topline što znači da zrak koji udišemo svakim se udahom mora zagrijavati i vlažiti [20]. Različite mješavine plina će imati veći toplinski kapacitet (kao npr. TRIMIX – u poglavlju 2.9.1.). To je često podcijenjena, ali izrazito bitna komponenta koja uvelike utječe na pad tjelesne temperature pri jako dubokim zaronima.

4.3 Izron

Kao što je najavljeno, kada se govori o izronu, važno je skrenuti pozornost na barotraumu i dekompresijsku bolest. Tijekom ronjenja neovisno o radnji, uvijek morate kontinuirano disati tj. ne zadržavati zrak. Kao što je napisano u potpoglavlju 2.6, tlak je pri konstantnoj temperaturi obrnuto proporcionalan volumenu. Prilikom izrona, hidrostatski tlak se smanjuje, a volumen povećava. Zadržavanjem zraka (čiji se volumen povećava što više izranjamo) može doći do oštećenja bilo kojih organa ili tkiva koja su ispunjena zrakom (uši, oči, pluća...) te posljedice mogu biti pogubne za život.

Kao što postoji preporučena brzina zarona, također postoji preporučena brzina izrona (9 m po minuti) i tzv. dekompresijske stanice. Dekompresijska stanica jest dubina na kojoj ronilac treba provesti neko vrijeme prilikom izranjanja da se ukloni što veća količina otopljenog dušika iz tkiva i krvi kako bi se izbjegla dekompresijska bolest. Nije uvijek nužno zaustavljanje na dekompresijskim stanicama i za to postoje ronilački planeri s kompleksnim tablicama koje

sadrže informacije kada i koliko je potrebno biti na nekoj dekompresijskoj stanici pogotovo ako planirate više zarona (slika 15).

RECREATIONAL DIVE PLANNER™
DIVING SCIENCE & TECHNOLOGY, CORP. TABLE 2
SURFACE INTERVAL CREDIT TABLE

START DEPTH (metres) ▼	▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼ ▼																																														
	10*	12	14	16	18	20	22	25	30	35	40	42																																			
A	10	9	8	7	6	6	5	4	3	3	▼	▼	▶								A	0:00	3:00																								
B	20	17	15	13	11	10	9	8	6	5	5	4	▶										0:00	0:48	3:48																						
C	26	23	19	17	15	13	12	10	8	7	6	▼	▶									0:00	0:26	1:10																							
D	30	26	22	19	16	15	13	11	9	8	▼	▶	▶									0:00	0:09	0:31	1:19																						
E	34	29	24	21	18	16	15	13	10	▼	▶	▶	▶									0:00	0:08	0:30	1:18	4:19																					
F	37	32	27	23	20	18	16	14	11	9	8	▶	▶									0:00	0:08	0:16	0:25	0:47	1:35																				
G	41	35	29	25	22	20	18	15	12	10	9	▶	▶									0:00	0:06	0:13	0:21	0:29	0:38	1:00	1:46																		
H	45	38	32	27	24	21	19	17	13	11	▶	▶	▶									0:00	0:05	0:12	0:20	0:28	0:37	0:59	1:47	4:48																	
I	50	42	35	29	26	23	21	18	14	12	▶	▶	▶	▶								0:00	0:04	0:11	0:18	0:26	0:34	0:43	1:05	1:53	4:54																
J	54	45	37	32	28	25	22	19	15	13	▶	▶	▶	▶	▶							0:00	0:03	0:10	0:17	0:25	0:33	0:41	1:03	1:51	5:00																
K	59	49	40	34	30	26	24	21	16	14	▶	▶	▶	▶	▶	▶						0:00	0:05	0:11	0:17	0:23	0:30	0:38	0:46	0:55	1:17	2:05															
L	64	53	43	37	32	28	25	22	17	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶						0:00	0:05	0:10	0:16	0:22	0:28	0:35	0:43	0:51	1:00	1:22	2:10														
M	70	57	47	39	34	30	27	23	19	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶					0:00	0:05	0:10	0:15	0:20	0:26	0:33	0:40	0:47	0:56	1:05	1:26	2:15													
N	75	62	50	42	36	32	29	25	20	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶				0:00	0:04	0:09	0:14	0:19	0:25	0:31	0:37	0:44	0:52	1:00	1:09	1:31	2:19												
O	82	66	53	45	39	34	30	26	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶			0:00	0:03	0:08	0:13	0:18	0:24	0:29	0:35	0:42	0:48	0:56	1:04	1:13	1:35	2:24											
P	88	71	57	48	41	36	32	28	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶		0:00	0:04	0:09	0:13	0:18	0:24	0:29	0:35	0:41	0:47	0:55	1:03	1:12	1:34	2:23	3:12										
Q	95	76	61	50	43	38	34	29	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0:00	0:03	0:07	0:11	0:16	0:20	0:25	0:30	0:36	0:42	0:48	0:55	1:03	1:11	1:20	1:42	2:30	3:31								
R	104	82	64	53	46	40	36	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0:00	0:04	0:08	0:12	0:17	0:21	0:26	0:31	0:37	0:43	0:49	0:56	1:04	1:12	1:21	1:43	2:31	3:31								
S	112	88	68	56	48	42	37	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0:00	0:04	0:07	0:11	0:15	0:19	0:24	0:29	0:34	0:40	0:46	0:52	0:59	1:07	1:15	1:24	1:46	2:34	3:35							
T	122	94	73	60	51	44	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0:00	0:03	0:06	0:10	0:14	0:18	0:23	0:27	0:32	0:37	0:42	0:48	0:54	1:00	1:07	1:14	1:23	1:32	1:54	2:42	3:42					
U	133	101	77	63	53	45	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0:00	0:03	0:07	0:11	0:14	0:18	0:22	0:26	0:30	0:35	0:40	0:45	0:51	0:57	1:03	1:10	1:18	1:26	1:35	1:57	2:45	3:45				
V	145	108	82	67	55	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0:00	0:03	0:06	0:09	0:13	0:16	0:20	0:24	0:28	0:32	0:37	0:41	0:46	0:51	0:57	1:03	1:09	1:16	1:24	1:32	1:41	2:03	2:51			
W	160	116	87	70	56	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0:00	0:02	0:05	0:08	0:12	0:15	0:19	0:23	0:27	0:31	0:35	0:40	0:45	0:50	0:56	1:02	1:08	1:15	1:23	1:31	1:40	2:02	2:50	3:51		
X	178	125	92	72	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0:00	0:02	0:05	0:08	0:11	0:15	0:18	0:22	0:26	0:30	0:34	0:39	0:43	0:48	0:53	0:59	1:05	1:11	1:16	1:26	1:34	1:43	2:05	2:53	3:54	
Y	199	134	98	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0:00	0:02	0:05	0:08	0:11	0:15	0:18	0:22	0:26	0:30	0:34	0:38	0:42	0:47	0:52	0:57	1:03	1:09	1:15	1:22	1:30	1:38	1:47	2:09	2:57	3:57
Z	219	147	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	0:00	0:02	0:05	0:08	0:11	0:15	0:18	0:22	0:26	0:30	0:34	0:38	0:41	0:45	0:50	0:55	1:00	1:06	1:11	1:18	1:24	1:31	1:40	1:79	2:36	3:36

Z Y X W V U T S R Q P O N M L K J I H G F E D C B A
CONTINUE ON OTHER SIDE

Slika 145 Dekompresijska tablica; sažeti planer za ronjenje pomoću kojeg se računaju dekompresijske stanice i količina preostalog dušika u tijelu nakon zarona. Slika preuzeta s <https://www.scribd.com> [21]

Dekompresijska bolest pojava je koja se događa uslijed nagle promjene pri prelasku iz područja visokog tlaka u niži s relativno visokim koncentracijama dušika u organizmu. Budući da postoji vrijeme koje je potrebno tkivima da upiju dušik, također je potrebno i da on polako izađe iz njih. Smanjenjem tlaka, povećava se volumen plina, tek ako se to učini naglo nastaje burna reakcija kao pri otvaranju limenke koju ste protresli i naglo izlaze mjehurići zraka gurajući i tekućinu i limenku na sve strane. Simptomi dekompresijske bolesti jesu bolovi na području zglobova, vrtoglavica, zadihanost, paraliza, nesvjestica pa čak i smrt.

Ukratko, prilikom izranjanja bitno je paziti na kontinuirano disanje i brzinu izrona.

5 Zaključak

Fizika ronjenja objašnjava efekt podvodne okoline na ronioca i njegovu opremu. Budući da je čovjekovo tijelo prilagođeno uvjetima života na kopnu, njegovo dovođenje u ekstremne uvjete pod vodom i visokim tlakom komplicira promjene unutar ljudskog organizma te je svaka greška prilikom podvodnog ronjenja izrazito opasna.

Osnovni pojmovi fizike, poput tlaka, uzgona, ponašanje plina koji prolazi kroz promjene tlaka i temperature te kompresiju unutar boca, topivost plinova, gubitci topline, vizualna percepcija i podvodna akustika, temelj su fizike ronjenja koji diktiraju složenost same ronilačke aktivnosti.

Pojave poput barotraume, dušikove narkoze, dekompresijske bolesti te trovanja kisikom jedne su od najopasnijih koje se mogu vrlo lako javiti nepoštivanjem mjera sigurnosti i često su bile fatalne u počecima razvoja podvodnog ronjenja.

U ovom radu nastojalo se prikazati kako je poznavanje fizike korisno radi razumijevanja fizioloških efekta ronjenja, planiranja zarona, opasnosti koje taj sport nosi i mogućnosti unapređenja opreme da bi se omogućila maksimalna sigurnost ronioca.

6 Literatura

- [1] Wikipedia, Body surface area, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Body_surface_area (25. 4. 2023.).
- [2] Branislava Lalić, *Agricultural Meteorology and Climatology*, URL: https://www.researchgate.net/figure/Distribution-of-atmospheric-pressure-and-mass-in-percent-by-altitude_fig2_338779501 (25. 4. 2023.).
- [3] STRUNA, hrvatsko strukovno nazivlje, URL: <http://struna.ihjj.hr/naziv/hidrostatski-tlak/7877/> (27. 4. 2023.).
- [4] Wikipedia, Hidrostatski tlak, URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidrostatski_tlak#/media/Datoteka:Pressure_distribution_on_an_immersed_cube.png (27. 4. 2023.).
- [5] Jack Jackson, *RONJENJE PRIRUČNIK*, Leo commerce d.o.o., Zagreb 2007.
- [6] Wikipedia, Boyle-Mariotteov zakon, URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Boyle-Mariotteov_zakon#/media/Datoteka:Boyle-Mariotteov_zakon_1.png.
- [7] Greg Mcfall, *NOAA Diving Manual*, Best Publishing Company 2017.
- [8] Chemistry Rack, URL: <https://chemistryrack.com/charles-law-graph/> (30. 4. 2023.).
- [9] Nagwa, Lesson Explainer: Gay-Lussac's law, URL: <https://www.nagwa.com/en/explainers/317198720793/> (4. 5. 2023.).
- [10] BYJU'S, Dalton's Law Of Partial Pressure, URL: <https://byjus.com/chemistry/daltons-law-of-partial-pressure/> (4. 5. 2023.).
- [11] Scuba Tech Philippines, URL: https://scubatechphilippines.com/scuba_blog/scuba-gas-laws-for-diving-physics/ (5.5. 2023.).
- [12] David J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics – Addison – Wesley, Cambridge University Press*, Cambridge 2012.
- [13] Britannica, *The visible spectrum*, URL: <https://www.britannica.com/science/color/The-visible-spectrum> (13. 5. 2023.).
- [14] Deep Ocean Education Project, Bioluminescence, URL: <https://deepoceaneducation.org/resources/light-and-color-in-the-deep-sea/> (22. 5. 2023.).
- [15] Electrical Academia, Sinusoidal Waveform or Sine Wave in Electricity, URL: <https://electricalacademia.com/basic-electrical/sinusoidal-waveform-or-sine-wave-in-electricity/> (22. 5. 2023.).
- [16] The Engineering Toolbox, Specific Heat of common Substances, URL: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html (24. 5. 2023.).
- [17] Katerina Kozakova, *Hypothermia and Respiratory Heat Loss while Scuba Diving*, https://www.researchgate.net/figure/Time-needed-for-the-divers-body-temperature-to-reach-hypothermia-35-C-as-a-function_fig3_233951484 (2. 6. 2023.).
- [18] Ronjenje u Hrvatskoj, Oprema za ronjenje, URL: http://www.ronjenjehrvatska.com/hr/o_ronjenju/38-ch-0 (5. 6. 2023.).
- [19] The Scuba Tutor, Ascents & Descents, URL: <http://www.scuba-tutor.com/diving-skills/ascents-descents/> (5. 6. 2023.).
- [20] Mgr. Martin Nosek, *Journal of Outdoor Activities*, 4, 27-31 (2015.).
- [21] SCRIBD; URL: <https://www.scribd.com/document/489784616/PADI-RDP-TABLE-RDP-Table-Met-1> (21. 6. 2023.).