

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
MEDICINSKI FAKULTET**

**Juraj Potrebica**

# **Medicinski aspekti ronjenja**

**DIPLOMSKI RAD**

Zagreb, 2014.

Ovaj diplomski rad izrađen je na Katedri za Zdravstvenu ekologiju i medicinu rada Škole narodnog zdravlja Andrija Štampar pod vodstvom prof. dr. sc. Jadranke Mustajbegović, dr.med. i predan je na ocjenu u akademskoj godini 2013/2014.

Mentor rada: prof. dr. sc. Jadranka Mustajbegović, dr.med.

## Sadržaj

1. Sažetak	
2. Summary	
3. Uvod.....	1
3.1 Povijest ronjenja.....	2
3.2 Povijest ronjenja u Hrvatskoj.....	4
4. Vrste ronjenja.....	4
4.1 Sportsko ronjenje .....	5
4.2 Rekreativno ronjenje .....	5
4.3 Znanstveno ronjenje.....	6
4.4 Profesionalno ronjenje .....	6
4.5 Ronjenje za posebne potrebe.....	6
5. SCUBA – uređaj za ronjenje sa zračnim spremnicima.....	7
6. Temeljni zakoni fizike plinova .....	8
7. Fiziologija oksigenacije .....	8
7.1 Kisikov put.....	8
7.2 Put ugljikovog dioksida .....	11
8. Učinak dubine na ljudski organizam.....	11
8.1 Utjecaj visokih parcijalnih tlakova pojedinih plinova na organizam.....	12
8.2 Toksično djelovanje kisika pod visokim tlakom.....	13
8.3 Toksično djelovanje ugljikovog dioksida pod visokim tlakom .....	15
8.4 Narkotično djelovanje dušika pod visokim tlakom.....	17
9. Hipoksija.....	18
10. Dekompresijska bolest .....	19
10.1 Simptomi.....	20
10.2 Dekompresija .....	21
11. Učinak visokog tlaka na tjelesne šupljine.....	23
11.1 Barotraumatski poremećaj srednjeg uha i zvučnog voda .....	23
11.2 Barotraumatski poremećaj unutarnjeg uha .....	25

11.3 Smetnje u sinusima .....	25
11.4 Smetnje u zubima.....	26
12. Liječenje posljedica ronjenja .....	27
12.1 Liječenje dekompresijskih bolesti.....	27
12.2 Liječenje plinske embolije .....	28
13. Zdravstveni nadzor i preventivne mjere .....	29
14. Zaključak.....	32
15. Zahvale.....	33
16. Literatura.....	34
17. Životopis .....	36

## 1. Sažetak

Naslov rada: Medicinski aspekti ronjenja

Ime i prezime autora: Juraj Potrebica

Hrvatska kao pomorska zemlja ima dugu tradiciju ronilaštva. Ronjenje kao oblik sportske, profesionalne i rekreativne aktivnosti u posljednje vrijeme sve se više popularizira. Ono što ronjenje čini posebnim u odnosu na većinu ostalih sportskih aktivnosti uvjeti su u kojima se odvija. Dubina, tj. visoki tlak u vodi, za čovjeka je neprirodno okruženje i zahtijeva izuzetnu fizičku spremnost, bez obzira je li riječ o ronioncu rekreativcu ili profesionalcu. Ovaj rad ukazuje na moguće posljedice štetnog djelovanja ronjenja na ljudsko tijelo. Pomnije je obrađeno djelovanje pojedinih plinova (kisika, ugljikova dioksida i dušika) koji su u atmosferskim uvjetima koji vladaju na razini mora bezopasni. Međutim, pod utjecajem dubine njihov parcijalni tlak raste i izaziva mnoge štetne učinke u tijelu kao što su: dekompresijska bolest, neruotoksičnost dušika, tzv. dubinska opijenost te neurotoksičnost kisika i njegovih slobodnih radikala. Spomenuta je i problematika hipoksije, stanja smanjenog parcijalnog kisika u krvi, kao izuzetno opasne pojave koja može rezultirati smrtnim ishodom u samo par minuta. Opisane su i moguće štetne posljedice visokog tlaka vode na sinuse i srednje uho, jedne od češćih patologija ronjenja. Za sva navedena stanja potrebno je biti upoznat s patofiziologijom ronjenja i prepoznati rane znakove štetnih zbivanja. To je važno jer zahtjevni uvjeti ronjenja često usporavaju i onemogućavaju pravovremeno pružanje medicinske pomoći, što nerijetko za posljedicu ima smrtne ishode. Upravo iz ovoga razloga i za što uspješniju prevenciju, važno je prije samoga ronjenja upoznati i medicinske aspekte ove aktivnosti.

## **2. Summary**

Title of the paper: Medical aspects of diving

Name and surname of the author: Juraj Potrebica

Croatia as a maritime country has a long tradition in diving. Popularity of diving, as a form of sports, professional and recreational activity has recently significantly increased. What makes diving so special compared to most other sports activities, are the conditions in which it is performed. Depth, i.e. high pressure of water, is unnatural environment for men and it requires extreme physical fitness, both for professional and recreational divers. This paper stresses possible consequences of harmful effects diving might have on human body and with more details it deals with effect of some gasses (oxygen, carbon dioxide and nitrogen), which are harmless in the atmospheric conditions at sea level, but however, with the influence of depth their partial pressure increases and causes many harmful effects in a diver's body like: decompression sickness, neurotoxicity of nitrogen, so called deep sea intoxication, neurotoxicity of oxygen and its free radicals. The paper also deals with hypoxia, condition of reduced partial oxygen in blood, as an extremely dangerous occurrence which may have lethal consequence in only a few minutes. Possible harmful effect of high water pressure on sinuses and middle ear are also described in this paper, as one of pathologies of diving which occur rather often. Because of all the described conditions it is necessary to be well informed about the pathophysiology of diving in order to be able to recognize early signs of harmful effects. That is important because demanding diving conditions often make impossible for medical care to be provided on time or to be provided at all which often results in death. It is because of this reason and because of a more successful prevention that it is necessary to be well informed about medical aspects of this activity before going to dive.

### 3. Uvod

Danas je ronjenje popularizirano kao oblik rekreacijske aktivnosti, ali i kao profesionalna djelatnost za znanstvene, istraživačke, poslovne i profitne svrhe. Ronjenje je ljudska aktivnost ispod vodene površine uz zadržavanje daha pri uronu ili uz uporabu autonomnog ronilačkog aparata. Čovjeka je oduvijek privlačila nepoznanica morske dubine, ali ta znatiželja bila je ograničena tadašnjim tehnološkim i medicinskim spoznajama. U posljednje vrijeme sinergijom medicinskih i tehničkih dostignuća ronilačka aktivnost razvila se u složenu djelatnost i isprofilirala prema profesionalnom i rekreacijskom ronjenju. Obje vrste ronjenja zahtijevaju fizičku i mentalnu spremnost. Kako bi se bolje razumio razvitak ronjenja i njegovo shvaćanje u kontekstu medicinske znanosti potrebno je sagledati povijest ronjenja kao i glavne tipove ove discipline:

- ronjenje na dah (apneja)

ili ronjenje pomoću:

- autonomnih ronilačkih uređaja otvorenog kruga disanja
- autonomnih ronilačkih uređaja zatvorenog kruga disanja
- opskrbe zrakom plinskim mješavinama s površine ili iz ronilačkog zvona (Furlan 2009).

Obzirom da se sve veći broj ljudi priključuje ovoj aktivnosti zbog promjena u tijelu i utjecaja dubine, tj. tlaka vode na ronioca važno je prevenirati moguće zdravstvene poteškoće koje se javljaju prilikom ronjenja.

### 3.1 Povijest ronjenja

Prvo je ronjenje najvjerojatnije bilo motivirano ribolovom i skupljanjem morskih školjki, što potvrđuju iskopine vrlo starih naslaga školjki na priobalnim pojasevima koje nisu bile dostupne dotadašnjim konvencionalnim ribolovnim tehnikama. Primjerice, u nekim egipatskim piramidama, 4500. godina pr. Kr., nađeni su sedefasto biserni ukrasi. U vrijeme VI. dinastije u Kini, prema spomeniku iz 2250. godine pr. Kr. dio poreza caru plaća se u biserima. Nadalje, Homer u svojoj *Ilijadi* u 16. pjevanju navodi čovjeka koji je ronio radi vađenja školjki iz mora. Herodot spominje ronioca Scillasa od Scilona koji je prilikom perzijskog napada na grčku mornaricu prerezao sidrenu užad perzijskim ratnim brodovima te je stekao slavu u antičkoj Grčkoj. Bizantski pisac Mauricius u djelu *Strategicon* navodi kako su stari Slaveni izbjegavali neprijatelja skrivajući se u malim dubinama ležeći na leđima dišući kroz trsku. Spominje se i ronjenje u vojne svrhe: podatak o roniocima apnejašima prilikom napada i obrane Malte od strane Turske 1565. godine. Primjer profesionalnog ronjenja u brodogradnji bili su ronioci na dah koji su održavali brodska korita, tzv. *Murgons* u službi kralja Luja XIII (Gošović 1990).

Postoje svjedočanstva i o korištenju pomagala za zadržavanje ispod vodene površine: najstarija među njima nalaze se na dvama asirskim reljefima iz 880. godine pr. Kr. koji prikazuju asirske ratnike s napuhanim mjehovima od životinjske kože koji su služili kao spremnici zraka. Arapski pisac Bohedin spominje ronioca koji se također koristi životinjskim mijehom prilikom ulaska u grad koji je bio pod pomorskom blokadom. Prvi značajniji pomak u ronjenju bio je izum zvona za ronjenje. Prvi zapisi potječu od Aristotela koji spominje pomagalo prilikom spužvarenja. Pomagalo se sastojalo od zvona, čiji je otvor bio okrenut prema dnu, a ronilac je udisao zarobljeni zrak. Francesco De Marchi (1490. – 1574.) spominje zvono uz čiju se pomoć moglo boraviti ispod površine do jednog sata, a korišteno je 1553. godine za istraživanje dna i



pronalaženje Caligulinih galija u jezeru Nemi u Italiji. Daljnje unaprjeđenje ronjenja omogućio je izum kesona, specijalno konstruiranog zvona u koje je dopreman zrak s površine pod tlakom višim od onog u okolnoj vodi. Prvi keson konstruirao je engleski inženjer John Smeaton 1788. godine za potrebe postavljanja temelja mosta kod Hexhama (Gošović 1990).

Godine 1715. u upotrebu ulazi i čvrsti skafander, konstruiran od strane Johna Lethbridgea, a 1893. godine W. H. Taylor dodatno ga unapređuje ugradnjom metalnog kućišta i pokretnih nastavaka za udove, što je omogućilo lakše kretanje. Zrak je kontinuirano dopreman s površine preko posebne cijevi. August Siebe konstruirao je 1819. godine u Engleskoj preteču "klasičnog", tj. mekog skafandera. Usavršavanje ovog izuma omogućilo je nagli razvoj ronjenja. Sljedeću prekretnicu označio je izum autonomnih aparata za ronjenje s komprimiranim zrakom. Najvažniji izum na tom području svakako je onaj H. A. Fleussa iz 1878. godine, a sastojao se od spremnika s kisikom pod tlakom od 30 bara te filtera natopljenog kalijevim hidroksidom za apsorpciju izdahnutog ugljikova dioksida. Na sličnom principu korišteni su svi uređaji za ronjenje u vodećim vojnim mornaricama uoči i tijekom Drugog svjetskog rata (Gošović 1990).

Zasigurno najveću prekretnicu za moderno ronjenje označava izum J. Y. Costeaua i E. Gagnanea – hidrostatski regulator koji omogućava doziranje zraka prilikom povišenog tlaka okoline tijekom faze udisanja (Gošović 1990).

### **3.2 Povijest ronjenja u Hrvatskoj**

Hrvatska kao pomorska zemlja ima dugu tradiciju profesionalnog ronjenja, od spužvarenja do sudjelovanja pri izgradnji luka i lukobrana. Posebice se ističe uloga hrvatskih ronilaca u austrougarskoj ratnoj mornarici. U razdoblju između dva svjetska rata profesionalno ronjenje skoro u cijelosti obilježavaju krapanjski spužvari i upotreba skafandera koji je u tom razdoblju bio vrhunac tehničkog dostignuća u ronjenju. Godine 1944. osnivaju se i zasebni ronilački odredi u sklopu ratne mornarice, što dodatno naglašava rastuću ulogu ronjenja u profesionalne svrhe (Gošović 1990).

Amatersko ronjenje, s naglaskom na istraživanje podmorja, stupa na scenu gotovo u isto vrijeme kao i u Francuskoj i Italiji, tadašnjim državama pionirima ronjenja. Među početnim entuzijazistima posebno se ističu braća Ivan i Dušan Kuščer te D. Leskovšek i M. Zalokor, koristeći opremu otvorenog tipa s komprimiranim zrakom. Godine 1950. Josip Medur u Rijeci izrađuje prvi ronilački aparat zatvorenog tipa. Daljnji zamah amaterskom ronjenju daje osnivanje mnogih istraživačkih instituta i športsko-ribolovnih saveza, što ronjenje uzdiže na sami vrh rekreativnih aktivnosti (Gošović 1990).

### **4. Vrste ronjenja**

Ronjenje se temeljem određenih kriterija kao što su: svrhe ronjenja, dubine ronjenja, vrste opreme koja se koristi tijekom ronjenja, vrste medija koji se koristi za disanje, lokacije ronjenja i zakonskih propisa može razvrstati na nekoliko kategorija. Prema zakonskoj, tj. pravnoj podjeli postoje: sportsko ronjenje, rekreativno ronjenje, turističko ronjenje, tehničko ronjenje – ronjenje u tehničkoj kulturi, znanstveno ronjenje, izvođenje ronilačkih radova, ronjenje u ribarstvu i

marikulturi te ronjenje za posebne potrebe. Hrvatski ronilački savez, prema kriterijima *Confederation Mondiale Des Activites Subaquatiques* (CMAS) priznanje 13 ronilačkih kategorija i 6 specijalnosti. Edukacija se provodi prema međunarodno priznatim programima ronilačkih udruga, kao što su *Confederation Mondiale Des Activites Subaquatiques* (CMAS), *Professional Association of Diving Instructors* (PADI), *Divers Alert Network* (DAN) i *Scuba Schools International* (SSI) (Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture 2009).

#### **4.1 Sportsko ronjenje**

Sportsko ronjenje, tj. ronilaštvo u Republici Hrvatskoj pod nadzorom je Hrvatskog ronilačkog saveza. Službeno priznate kategorije unutar sportskog ronilaštva su: orijentacijsko ronjenje, plivanje s perajama, ronjenje na dah, podvodni ragbi, podvodni hokej, podvodno gađanje u metu i podvodna fotografija. Podvodni ribolov ističe se kao zasebna sportska aktivnost ronjenja na dah te spada pod nadležnost Hrvatskog saveza za sportski ribolov na moru (Hrvatski olimpijski odbor 2012).

#### **4.2 Rekreativno ronjenje**

Rekreativno ronjenje najzastupljenija je kategorija ronjenja, posebice kao turistička djelatnost. Provodi se u ronilačkim klubovima i centrima koji su pod nadležnošću Hrvatskog ronilačkog saveza i regionalnih lučkih kapetanija. Kategorizacija ronioca vrši se prema službeno usvojenom stupnju vještina (Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture 2009).

### **4.3 Znanstveno ronjenje**

Znanstveno ronjenje izvodi se kao dio znanstveno-istraživačke i/ili obrazovne djelatnosti. U znanstveno ronjenje spadaju i ronilačke aktivnosti koje se izvode zbog potrebe treninga i/ili znanstveno-ronilačkog usavršavanja (Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture 2009).

### **4.4 Profesionalno ronjenje**

Profesionalno ronjenje je kategorija ronjenja koja se prvenstveno provodi za poslovne i profitne svrhe i temeljno je zanimanje ronioca koji obavlja tu aktivnost. Nacionalna klasifikacija zanimanja priznaje profesionalne ronioce kao zanimanje ronioc/roniteljica (Narodne novine 2010).

To je širok raspon zanimanja koje u praksi obuhvaća brojne aktivnosti kao što su: podvodno zavarivanje, podvodni građevinski radovi, radovi na naftnim i plinskim bušotinama, rad u vatrogasnim službama, edukacija ronioca itd. (Furlan 2009).

### **4.5 Ronjenje za posebne potrebe**

Ronjenje za posebne potrebe izuzetno je zahtjevna djelatnost koju isključivo obavljaju visoko osposobljeni i kvalificirani pojedinci kao što su pripadnici vojnih postrojbi i specijalne policije (Gošović 1990). U navedenu kategoriju ulaze i posebno obučeni roniaci, speleolozi Hrvatske gorske službe spašavanja (HGSS) koji dobrovoljno sudjeluju u akcijama spašavanja (HGSS 2004).

## 5. SCUBA – uređaj za ronjenje sa zračnim spremnicima

Sve do 1943. godine prilikom obavljanja svih ronilačkih aktivnosti koristila se oprema koja se sastojala od odijela i ronilačke kacige povezane s površinom preko cijevi kojom se dostavljao zrak. Jacques Cousteau 1943. godine konstruirao je uređaj sa zračnim spremnicima za disanje ispod površine vode, poznat pod imenom SCUBA, prema engl. selfcontained underwater breathing apparatus. Drugi naziv je i ARA, tj. autonomni ronilački aparat. Taj uređaj predstavlja sustav otvorenog kruga i koristi se skoro u svim zaronima u komercijalnom ili u sportskom ronjenju (Guyton & Hall 2006).

SCUBA uređaj sastoji se od spremnika s komprimiranim zrakom, ili nekom drugom smjesom plinova, redukcijskog ventila za snižavanje visokog tlaka iz spremnika, kombiniranog ventila za udisanje koji omogućuje uvlačenje i izdisanje zraka uz vrlo mali negativni, tj. pozitivni tlak te maske i sustava cijevi za dovod (Edmonds 2013). Sustav otvorenog kruga djeluje na sljedećem principu. Vrlo visoki tlak iz jednog ili više spremnika snižava se preko redukcijskog ventila, pa se zrak doprema do roniočevih usta pod tlakom samo malo višim od tlaka okolne vode (Haux 1982). Važna prednost SCUBA uređaja je u tome što zrak ne mora neprekidno strujati u masku, već pri svakom udahu mali negativni tlak, kao početak udisaja, otvara membranu na kombiniranom ventilu i dopušta ulazak zraka u roniočevu masku i dalje u pluća. To ostvaruje višestruku prednost jer struji samo količina zraka potrebna za jedan udah. Prilikom izdisaja tlak se na ventilu povisi kao posljedica dotoka zraka iz pluća, ventil se otvara te se zrak ne vraća u spremnik već se izdiše u okolinu, tj. u vodu. Najveće ograničenje takvih uređaja za disanje ispod površine mora je ograničeno vrijeme koje ronilac može provesti pod morem, jer je na većim dubinama potreban golem protok zraka da bi se odstranio ugljikov dioksid iz pluća. Što je dubina

veća potreban je veći protok zraka u minuti jer su volumeni plinova izrazito stlačeni (Guyton & Hall 2006).

## **6. Temeljni zakoni fizike plinova**

Atmosfera je mješavina plinova koja sadržava 21% kisika i 79% dušika, a na razini mora stvara tlak od 760 milimetara živinog stupca (mmHg). Svaki od plinova koji čine zrak, tj. atmosferu proizvodi tlak razmjeran udjelu u ukupnom volumenu, tj. prema Daltonovu zakonu:

Parcijalni tlak plina = (apsolutni tlak) x (razmjerni udio u ukupnom volumenu plina)

Tlakovi koje proizvode plinovi otopljeni u vodi ili tjelesnim tekućinama nisu jednaki tlakovima koje ti plinovi proizvode kada su u plinovitom stanju. Koncentracija plina u tekućini ovisi o tlaku i koeficijentu topljivosti plina, prema Henryjevom zakonu:

Koncentracija otopljenog plina = (tlak) x (koeficijent topljivosti)

Koeficijent topljivosti različit je za pojedine tekućine te ovisi o temperaturi, tako je ugljikov dioksid dvadeset puta topljiviji od kisika (Kain 2010).

## **7. Fiziologija oksigenacije**

### **7.1 Kisikov put**

Kisikov put počinje udahom, tj. ulaskom zraka u pluća, iz kojeg kisik prelazi u alveolski zrak, a potom putem krvi plućnih kapilara i vena u sistemski arterijski krvotok sve do razine kapilara u ciljnim tkivima. Iz kapilara koje su granica i komunikacija arterijskog i venskog krvotoka, kisik difundira kroz međustaničnu i unutarstaničnu tekućinu sve do ciljnih tkiva, tj. stanica. Sve dok

krv neprekidno cirkulira plućnim krvotokom kisik se apsorbira iz udahnutog zraka u alveolama. Tlak kisika u alveolama, u fiziološkim uvjetima, približno je stalan i iznosi 104 mmHg. Prilikom napora stalna vrijednost parcijalnog tlaka kisika u alveolama održava se četverostrukim povećanjem ventilacije alveola (Kain 2010).

U isto vrijeme ugljični dioksid, koji se neprekidno stvara u organizmu, istim mehanizmom se izlučuje u alveole, a zatim izdahnutim zrakom u okolinu. Parcijalni tlak ugljičnog dioksida u alveolama iznosi približno 40 mmHg, ali se može i povećati razmjerno brzini izlučivanja ugljikovog dioksida iz krvi, ili smanjiti obrnuto razmjerno veličini alveolarne ventilacije (Kain 2010).

Razlika između parcijalnog tlaka kisika u alveolama (104 mmHg) i parcijalnog tlaka kisika u venskoj krvi (40 mmHg) uvjetuje difuziju kisika iz alveola u plućnu krv. Kisik se u najvećem postotku prenosi do ciljnih tkiva vezan za hemoglobin, tu se otpušta i difundira do stanica, a ugljični dioksid, koji nastaje kao nusprodukt metaboličkih procesa difundira i veže se na hemoglobin, te se tako vezan prenosi natrag do pluća. Prilikom krajnjih napora, potrebe organizma za kisikom se povećavaju i do dvadeset puta, ali oksigenacija krvi ostaje konstantna zahvaljujući četverostrukom povećanju difuzije kisika. Ta prilagodba organizma prvenstveno se ostvaruje povećanjem broja kapilara koje prenose kisik iz alveolarnog zraka u sistemski krvotok i dodatnim dilatiranjem već aktivnih alveola i kapilara. Također, krv u normalnim uvjetima teče tri puta sporije nego što je potrebno za potpuno zasićenje hemoglobina kisikom, stoga i prilikom izrazitih napora, kada je cirkulacija kroz pluća ubrzana, krv, tj. hemoglobin uspije apsorbirati dostatnu količinu kisika (Guyton & Hall 2006). Hemoglobin u eritrocitima na sebe veže 97% kisika, dok je preostalih 3% otopljeno u krvi, drugim riječima u 100 ml zasićene arterijske krvi nalazi se približno 19,5 ml kisika. Prolaskom krvi kroz kapilare i iskorištavanjem kisika u

tkivima ta se količina smanjuje na 14,5 ml i zasićenost hemoglobina kisikom pada na 75%. Ukratko, 100 ml krvi prenese u tkivo približno 5 ml kisika (Kain 2010).

Hemoglobin je zaslužan i za održavanje stalne vrijednosti parcijalnog tlaka kisika u tkivima, tako pri umjetnim uvjetima kada se višestruko poveća parcijalni tlak kisika u zraku, tj. alveolama, parcijalni tlak kisika u tkivima neznatno se mijenja. Razlog tome je što se zasićenost hemoglobina kisikom može povećati samo za 3% jer je hemoglobin već 97% zasićen kisikom.

Povećanje koncentracije kisika ili tlaka kisika u udahnutom zraku ne uzrokuje povećanje količine kisika koji je vezan za hemoglobin. To je izuzetno važno svojstvo hemoglobina i čini hemoglobin puferom za kisik (Kain 2010).

Prolaskom krvi kroz tkiva parcijalni tlak kisika se s 160 mmHg u alveolama postupno snižava do samo par mmHg-a, to postepeno snižavanje parcijalnog tlaka kisika naziva se "kisikova kaskada". Kapilare zbog svog malog promjera stvaraju veliki otpor protoku krvi koji je specifičan za pojedina tkiva, o čemu posljedično ovisi i sama dostava kisika u tkiva. Za odvijanje unutarstaničnih procesa u stanici dostatna je vrlo mala količina kisika, a brzina potrošnje kisika određena je brzinom razgradnje ATP u ADP (Kain 2010).

Dostava kisika do stanica ovisi o još jednom čimbeniku, a to je difuzija. Difuzija je ovisna o udaljenosti zida kapilare od stanice i parcijalnom tlaku kisika. Ako je udaljenost zida kapilare i stanice veća od 50 mikrometara i parcijalni tlak niži od 1-3 mmHg, iskorištenje kisika u stanici uvelike se smanjuje zbog pada kapaciteta difuzije samog kisika (Guyton & Hall 2006). Na tu pojavu posebno su osjetljive stanice bijele moždane tvari koje su najranjivije u stanju hipoksije i hiperoksije, tj. u stanju smanjene i povećane količine kisika u krvi i tkivu (Kain 2010).



## **7.2 Put ugljikovog dioksida**

Osim uloge glavnog prenosioca kisika u krvi, hemoglobin sudjeluje i u transportu ugljikovog dioksida. Vežanjem kisika na sebe hemoglobin postaje jača kiselina što za posljedicu ima otpuštanje ugljikovog dioksida iz krvi. Ova reakcija poznata je kao Haldaneov učinak (Guyton & Hall 2006). Istiskivanje ugljikovog dioksida vezanog za hemoglobin u prisustvu kisika temelji se na dva mehanizma. U kiselijem mediju hemoglobin se slabije veže s ugljikovim dioksidom u karboksi-hemoglobin, na ovaj način se u tim uvjetima najveći dio ugljikovog dioksida koji je vezan za hemoglobin u krvi istiskuje iz te veze. Također, povećana kiselost hemoglobina dodatno oslobađa vodikove ione, koji, vežući se za bikarbonat, stvaraju ugljičnu kiselinu. Ugljična kiselina potom se razgrađuje na vodu i ugljikov dioksid koji se u plućima izdahom eliminira iz organizma. Hemoglobin je zaslužan što se u prisustvu kisika veže puno manje ugljikova dioksida (Kain 2010).

## **8. Učinak dubine na ljudski organizam**

Ronjenje kao ljudska aktivnost obavlja se ispod površine mora, što podrazumijeva učinak dubine, tj. visokog tlaka na ljudski organizam. Kako bi se kompenzirao utjecaj visokog tlaka i spriječio kolaps pluća, koja su tjelesna šupljina ispunjena zrakom, zrak koji se udiše mora se dovoditi pod povišenim tlakom koji je znatno viši od onoga na razini mora. Pritom je krv preko alveola također izložena iznimno visokim tlakovima. Ova pojava zove se hiperbarizam. Iznad određenih vrijednosti visoki tlakovi uzrokuju promjene tjelesnih funkcija, pritom čak mogu izazvati smrt (Guyton & Hall 2006).

Tijekom ronjenja i boravka na dubini od 10 metara, okomiti stupac vode proizvodi tlak kao i atmosfera na razini mora, tj. 760 mmHg ili 1 ATA (atmosfera), što je ekvivalent tlaku od 1013 bara. Pritom je ronilac koji se nalazi na dubini od 10 m izložen tlaku od 2 atmosfere, 1 atmosferu proizvodi okomiti stupac vode, a 1 atmosferu stupac zraka iznad površine vode. Tlak kojem je ronilac izložen na dubini od 20 metara iznosi 3 atmosfere. Dubina uzrokuje kompresiju plinova na sve manji volumen. Taj učinak definira Boyleov zakon prema kojem je volumen na koji se komprimira određena količina plina obrnuto razmjern tlaku koji djeluje na taj plin. Sukladno tome, 1 litra zraka na razini morske površine na dubini od 10 metara stlači se na 0,5 litre. Visoki tlakovi mogu u tijelu ronioca uzrokovati kolabiranje tjelesnih šupljina ispunjenih zrakom, prvenstveno pluća, i posljedično dovesti do oštećenja istih (Kain 2010).

Povišeni tlak također povećava i gustoću plina koji se udiše, ali na nižim dubinama taj utjecaj kod zdravog čovjeka je zanemariv (Kain 2010).

Utjecaj tlaka na temperaturu plina određen je Charlesovim zakonom. Prilikom stlačivanja temperatura plina raste, dok rastlačivanje plina uzrokuje snižavanje temperature plina. Kad je volumen plina konstantan, odnos tlaka i temperature izravno je razmjern (Kain 2010).

### **8.1 Utjecaj visokih parcijalnih tlakova pojedinih plinova na organizam**

Prilikom ronjenja ronilac je izložen mješavini plinova koja se sastoji od: dušika, kisika, ugljikovog dioksida i rjeđe helija, vodika i neona. Dok su kisik i ugljični dioksid neophodni za odvijanje životnih procesa, ostali plinovi koji se nalaze u zraku u normalnim atmosferskim uvjetima ne sudjeluju u odvijanju tih procesa (Gošović 1990). Pod utjecajem dubine, tj. visokih tlakova, svaki od navedenih plinova proizvodi određene fiziološke učinke. Tako tijekom ronjenja, zbog povišene koncentracije dušika u zraku koji ronilac udiše, dušik pokazuje izrazite

negativne učinke na organizam. Također, i ostali inertni plinovi mogu izazvati negativan učinak kada se koriste u velikom postotku kao plinske mješavine za disanje. Omjer navedenih plinova u smjesi za disanje prvenstveno ovisi o dubini, namjeni ronjenja i uređaju koji se koristi tijekom ronjenja (Kain 2010).

## **8.2 Toksično djelovanje kisika pod visokim tlakom**

Iako je kisik pri uvjetima normalnog atmosferskog tlaka neškodljiv i neophodan za odvijanje svih životnih procesa, ukoliko se udiše pod povišenim tlakom, može djelovati izrazito toksično. Već je prije spomenuto da je u fiziološkim uvjetima 97% kisika u krvi vezano za hemoglobin, a tek 3% otopljeno u krvi i da hemoglobin djeluje kao pufer za kisik. Kada parcijalni tlak kisika poraste iznad 13 kPa, količina otopljenog kisika se povećava. Ukratko, porastom parcijalnog tlaka kisika u alveolama raste i postotak kisika otopljenog u krvi, neovisno o kisiku vezanom za hemoglobin. To dovodi do zaključka da prevelikim porastom parcijalnog tlaka kisika hemoglobin gubi puferska svojstva i ne uspijeva održavati vrijednosti tlaka u sigurnom rasponu od 2,7 kPa do 8,0 kPa (Guyton & Hall 2006). U tim stanjima kisik može djelovati štetno na: živčani sustav, srce, krvne žile, respiratorni sustav i endokrini sustav. Prema vodećim znakovima štetno djelovanje dijeli se na dvije grupe: neurotoksično djelovanje, kisikova epilepsija ili Paul Bertov učinak i poremećaj plućne funkcije ili Lorain-Smithov učinak (Gošović 1990).

Organizam može biti izložen čistom kisku pod tlakom od oko 100 kPa duže vrijeme, bez akutnog toksičnog djelovanja na središnji živčani sustav. Otprilike 12 sati nakon takvog izlaganja dolazi do pojave Lorain-Smithova učinka, tj. kongestije dišnih puteva, plućnog edema i atelektaza zbog oštećenja sluznice bronha i alveola. Same promjene rijetko reagiraju na bilo kakvu terapiju (Gošović 1990).

Poremećaj prvenstveno pogađa pluća, a ne ostala tkiva, jer je sluznica dišnog sustava prva na udaru visokog tlaka kisika, dok u ostalim tkivima puferski sustav hemoglobina djelomično uspijeva neutralizirati učinke kisika. Na svu sreću ova promjena nije od velikog značaja za svakodnevnu ronilačku praksu jer se ronjenje najčešće ne odvija dovoljno dugo da bi se postigli odgovarajući uvjeti za nastanak oštećenja, ali može biti problem kod iznimno dugih zarona i profilaktičkih dekompresijskih procedura (Guyton & Hall 2006).

Drugi štetni učinak kisika odnosi se na živčani sustav, tj. neurotoksični učinak. To je značajniji problem jer je češći u svakodnevnom ronjenju i drastično ograničava primjenu kisika tijekom ronjenja na malim dubinama i na kraće vrijeme. Kako se takav toksični učinak često manifestira grčevima sličnim epileptičkim napadajima, koristi se i naziv kisikova epilepsija (Gošović 1990).

Uzrok je pretjerana stanična oksidacija i pojačano stvaranje slobodnih kisikovih radikala. Da bi kisik oksidirao druge spojeve, on mora poprimiti aktivni oblik, tj. postati slobodni kisikov radikal, kao što su: superoksidni kisikov radikal  $O_2^{\cdot -}$  i kisikov peroksid (Sawatzky 2008). Stvaranje slobodnih radikala odvija se i pri niskim parcijalnim tlakovima kisika, ali se oni neutraliziraju enzimima kao što su: peroksidaze, katalaze i superoksid dismutaze. Dokle god hemoglobinski puferski sustav održava kisik u normalnim rasponima enzimi uspijevaju neutralizirati slobodne radikale. Pri porastu parcijalnog tlaka kisika poviše 200 kPa, puferski sustav hemoglobina nije dostatan i slobodni radikali prevladavaju enzimski mehanizam. Posljedično dolazi do oštećenja staničnih membranskih lipida, čak i do propadanja stanica. Zbog visokog sadržaja lipida živčano tkivo posebno je osjetljivo na oštećenja (Guyton & Hall 2006). Sukladno tome javljaju se znakovi oštećenja živčanog sustava. Prije pojave karakterističnih grčeva može se javiti cijeli niz nespecifičnih znakova kao što su: uznemirenost, bljedilo lica, mučnina, pojačano znojenje, nagon na povraćanje i sužavanje vidnog polja. Neposredno pred

pojavu grčeva mogu se zamijetiti fascikulacije na licu, potkoljenici, bedru ili drugim mišićnim skupinama. Nakon toga slijede grčevi identični onim u eplieptičkim napadajima, koji traju od desetak sekundi do 2-3 minute. Grčevi su praćeni pomućenjem ili gubitkom svijesti. Po prestanku napadaja javlja se: umor, pospanost, konfuzija s amnezijom. Napadaji se mogu ponoviti ukoliko ronilac i dalje ostane izložen visokom tlaku kisika (Gošović 1990). Nakon 30-60 minuta izlaganja kisiku u tim uvjetima može nastupiti i koma. Kako grčevi često nastaju iznenada i bez predznaka, ovakvo stanje može završiti smrtnim ishodom (Guyton & Hall 2006). U slučaju nastanka grčeva ili pojave predznakova potrebno je odmah početi s izronom, jer smanjivanjem okolnog tlaka pada i parcijalni tlak kisika, uslijed čega smetnje postepeno nestaju (Gošović 1990).

### **8.3 Toksično djelovanje ugljikovog dioksida pod visokim tlakom**

U atmosferskom zraku količina ugljikovog dioksida nedostatna je za bilo kakav štetni učinak na ljudski organizam. Na ugljikov dioksid otpada 0,03% zraka, no u zatvorenim i loše ventiliranim prostorima njegov dio može značajno porasti. Kako se ugljikov dioksid kao krajnji produkt sagorijevanja tvari koje sadrže ugljik oslobađa u okolinu, tako se i prilikom metaboličkih procesa u tijelu ugljikov dioksid izlučuje iz tijela. U alveolarnom zraku u plućima zastupljen je s 5,3% (Gošović 1990).

Ugljikov dioksid u krvi ima važnu ulogu regulacije disanja. Djeluje kao stimulans na centar za disanje u mozgu, te o njegovoj koncentraciji zavisi dubina i frekvencija disanja. Prilikom porasta koncentracije ugljikovog dioksida stimulira disanje i time pospješuje i ubrzava svoje odstranjivanje iz krvi, a pojačava i dotok kisika. U stanju mirovanja izluči se oko 300 ml

ugljkovog dioksida po minuti, dok za vrijeme izrazitih napora, kao što je i ronjenje u ekstremnim uvjetima, izlučuje se oko 2-3 litre po minuti (Gošović 1990).

Ako je ronilačka oprema ispravna, u ronioca neće nastati otrovanje ugljikovim dioksidom jer dubina ne povisuje parcijalni tlak ugljikovog dioksida. Na dubini u većini slučajeva stvaranje ugljikovog dioksida se ne povećava, pa dokle god se udiše normalan respiracijski volumen, ronilac izdiše jednaku količinu ugljikovog dioksida koliko ga i proizvodi. Sukladno tome, parcijalni tlak ugljikovog dioksida u plućima ostaje nepromijenjen. Iako rijetko, u nekim vrstama ronilačke opreme, kao što je ronilačka kaciga ili u neispravnim uređajima za povratno disanje, ugljikov dioksid može se nagomilavati u mrtvom prostoru, i udisanjem ulaziti u krvotok ronioca. Sve dok vrijednost parcijalnog tlaka ugljikovog dioksida ne prelazi 10,7 kPa, što je približno dvostruka vrijednost u odnosu na fiziološke uvjete, ronilac to nagomilavanje podnosi bez većih poteškoća. Zbog porasta parcijalnog tlaka ugljikovog dioksida raste i njegova koncentracija u krvi pa se kao mehanizam kompenzacije povećava i minutni volumen disanja do krajnjih vrijednosti koje su 8-11 puta veće u odnosu na mirovanje (Guyton & Hall 2006).

Kad alveolarni parcijalni tlak ugljikovog dioksida poraste iznad granice od 10.7 kPa, tj. udjel mu poraste više od 3% u zraku, umjesto dotadašnjeg stimuliranja centra za disanje počinje kočenje tog centra zbog metaboličkog učinka povišenog parcijalnog tlaka ugljikovog dioksida (Guyton & Hall 2006).

Prvi simptomi karakterizirani su osjećajem pritiska iza prsne kosti, dubljim disanjem i osjećajem nedostatka zraka. Ako koncentracija ugljikovog dioksida poraste iznad 4-6% simptomi postaju izraženiji i javlja se crvenilo i osjećaj žarenja u licu. Klinički najvažniji znak je glavobolja s izrazitim osjećajem pulsacija u sljepoočnom predjelu, a ako stanje potraje ronilac postaje izrazito

cijanotičan. Početak simptoma trovanja praćen je osjećajem euforije, dok u poodmaklom stadiju nastupa smetenost, pospanost i poremećaj svijesti sve do gubitka svijesti. Besvjesno stanje karakterizirano je bradikardijom, bradipnejom i hipotenzijom. Rjeđe se u simptome trovanja ubrajaju i privremeni poremećaj vida i sluha. U slučaju blažeg oblika trovanja dovoljno je unesrećenika izložiti atmosferskom zraku s normalnim udjelom ugljikovog dioksida. Kod težih oblika trovanja s gubitkom svijesti treba primijeniti napredne metode održavanja života kao što su: umjetno disanje, masaža srca, inhalacija kisika i primjena farmakoterapeutika. Ukoliko se pravovremeno ne prepozna navedeno stanje i ne pruži prva pomoć, trovanje može završiti smrtnim ishodom (Gošović 1990).

#### **8.4 Narkotično djelovanje dušika pod visokim tlakom**

U zraku pri atmosferskim uvjetima dušik je najzastupljeniji plin i čini udio od skoro 79% zraka. Pri tlaku koji vlada na razini mora dušik nema značajnijih učinaka na ljudski organizam, ali pod visokim tlakom može uzrokovati različite stupnjeve narkoze (Guyton & Hall 2006). Ako ronilac ostane na dubini od 35 metara dulje od jednog sata udišući komprimirani zrak, javljaju se prvi znaci blage narkoze karakterizirane otežanim izvođenjem finih motoričnih pokreta. Nakon toga slijedi euforično ponašanje i ronilac postaje neoprezan. Na dubinama od 45-60 metara javlja se pospanost, a na dubini od 60-75 metara ronilac osjeća mišićnu slabost u toj mjeri da često ne može izvršiti najobičnije pokrete. Pri duljem boravku na dubinama većim od 75 metara ronilac zbog narkoze postaje potpuno nesposoban za bilo kakav rad (Guyton & Hall 2006).

Kako su simptomi narkoze dušikom vrlo slični simptomima alkoholnog pijanstva, ti simptomi nazivaju se dubinska opijenost. Smatra se da je učinak dušika u tim uvjetima jednak učinku plinovitih anestetika. Plinovi koji pri visokim tlakovima imaju izražen narkotički efekt, u prvom

redu dušik, ali rjeđe i argon, imaju visok koeficijent topljivosti u mastima i lipidima. Živčano tkivo koje je bogato lipidima, pogotovo membrane živčanih stanica, izrazito je osjetljivo na narkotični učinak dušika. Simptomi nastaju promjenom vodljivosti na membrani stanice i mijenjanjem neuronske podražljivosti (Guyton & Hall 2006). Simptomi vrlo brzo nestaju nakon početka izrona, tj. snižavanja tlaka, pa u tom slučaju nije potrebna nikakva pomoć. No treba biti oprezan jer ako se na vrijeme ne prepozna dubinska opijenost, ovo itekako može biti životno ugrožavajuće stanje. Da bi se takvo stanje izbjeglo, na većim dubinama koristi se umjetna mješavina kisika i helija, a samo u iznimnim slučajevima, kao što su spašavanje života, dozvoljava se ronjenje s komprimiranim zrakom do 80 metara dubine (Gošović 1990).

## **9. Hipoksija**

Hipoksija označava pomanjkanje kisika u krvi i tkivima zbog smanjenja parcijalnog tlaka kisika u udahnutom zraku ili zbog nemogućnosti iskorištavanja kisika (Edmonds 2013). Čovjek nema zalihe kisika osim kisika u jednom udahu i privremene zalihe u krvi i tkivima. Prilikom normalnog disanja u krvi se nalazi približno 1 litra kisika i 200-300 ml u zraku koji je udahnut (Gošović 1990).

Hipoksija se češće javlja kod ronjenja s autonomnim uređajima zatvorenog i poluzatvorenog tipa, no danas je uporaba tih uređaja tijekom ronjenja dosta rijetka i češće se roni s aparatima otvorenog tipa. Kod uređaja tog tipa do hipoksije u pravilu ne dolazi. Izuzetno, do hipoksije može doći kada ronilac na dnu ostane bez zraka ili ako greškom spremnici budu napunjeni dušikom ili nekim drugim inertnim plinom umjesto smjesom s kisikom (Gošović 1990).



Hipoksiju tijekom ronjenja karakterizira iznenadan gubitak svijesti i to često bez ikakvih upozoravajućih znakova. Ako je sadržaj kisika u udahnutom zraku do 13%, hipoksija se može kompenzirati povećanjem broja i dubine udaha, tahikardijom i mobilizacijom kisika iz slezene i jetre. Kada udio kisika u udahnutom zraku padne ispod 10%, kompenzacijski mehanizmi zakazuju i dolazi do naglog gubitka svijesti. Na kopnu većina hipoksičnih stanja prođe bez posljedica, dok tijekom ronjenja, zbog neprirodnog i zahtjevnog okruženja, u prosjeku svaki drugi slučaj završi smrtnim ishodom. U slučaju hipoksije nužno je bez odgađanja pružiti prvu pomoć, dok je u prevenciji najvažnije, kao i za prevenciju ostalih ugrožavajućih stanja, roniti u paru (Gošović 1990).

## **10. Dekompresijska bolest**

Kada ronilac duže vrijeme provodi udišući zrak pod visokim tlakom, primjerice tijekom rada na dubini, povećava se količina otopljenog dušika u tijelu. Uzrok tome je krv koja se, prolazeći kroz plućne kapilare zasiti dušikom do istih vrijednosti parcijalnog tlaka u alveolama. Ako to stanje potraje par sati dovoljno se dušika prenese u sva tkiva pa se parcijalni tlak dušika u tkivima i parcijalni tlak dušika u udahnutom zraku izjednače (Guyton & Hall 2006).

Kako je dušik inertan plin i ne sudjeluje u metaboličkim procesima u tijelu, nakuplja se otopljen u tkivima. Dušik se iz tkiva može ukloniti tek kada se snizi njegov parcijalni tlak u plućima.

Ako se uspoređi utjecaj dubine, tj. tlaka i volumena otopljenog dušika u tijelu, na razini mora u cijelom tijelu otopljena je 1 litra dušika, dok se na 30 metara volumen dušika povećava na 4 litre, a na dubini od 90 metara čak na 10 litara (Guyton & Hall 2006).

Za izjednačavanje tlaka dušika u zraku i tkivima potrebno je nekoliko sati jer difuzija dušika kao ni protok krvi nisu dovoljno brzi za trenutačno izjednačavanje parcijalnih tlakova. Vrijeme potrebno za uspostavljanje te ravnoteže u većini tkiva iznosi približno 1 sat. Masno tkivo koje je slabije prokrvljeno i koje može primiti peterostruko više dušika od ostalih tkiva, zbog liposolubilnosti dušika, zahtijeva i nekoliko sati za uspostavljanje ravnoteže. Ukratko, pri kratkom uronu ne postiže se veliko otapanje dušika, ali ako se uron odvija na većim dubinama i duže traje, tkiva se mogu u potpunosti zasititi dušikom. Ako u takvom stanju ronilac naglo izroni na površinu u njegovim se tjelesnim tekućinama, unutarstaničnim i izvanstaničnim, mogu stvoriti mjehurići dušika. Vrijeme potrebno za to može varirati od nekoliko minuta do nekoliko sati, jer dušik u prezasićenom stanju može ostati otopljen i duže vrijeme dok ne počne stvarati mjehuriće (Guyton & Hall 2006).

## **10.1 Simptomi**

Kao posljedica nastanka mjehurića dušika mogu nastati oštećenja u svim tkivima u tijelu, što se naziva dekompresijska bolest. Mjehurići dušika naglim padom tlaka, najčešće prebrzim izronom, opstruiraju male krvne žile. Klinička slika ovisi o lokalizaciji, brojnosti i veličini mjehurića. U početku su zahvaćene samo manje krvne žile, ali spajanjem u veće mjehuriće dolazi i do opstrukcije većih krvnih žila te do posljedične ishemije, čak i nekroze tkiva (Glavaš 2010).

U 85-90% oboljelih od dekompresijske bolesti, početni simptomi odnose se na bolove u zglobovima i mišićima nogu i ruku. Rjeđe, tj. u 5-10% slučajeva javljaju se simptomi oštećenja živčanog sustava, od omaglice do paralize i gubitka svijesti. Paraliza je većinom prolazna, ali iznimno može ostati trajna. U najmanjem broju slučajeva, okvirno oko 2%, bolest se prezentira

gušenjem zbog začepljenja plućnih kapilara, te plućnim edemom koji može rezultirati smrtnim ishodom (Guyton & Hall 2006).

## **10.2 Dekompresija**

Kako bi se preveniralo ovo izuzetno opasno stanje, ronilac izron treba provoditi postupno. Tako može odstraniti dostatnu količinu dušika otopljenog u tkivima pa ne nastaju uvjeti za razvoj dekompresijske bolesti (Thalman 2004). Ukratko, 60% otopljenog dušika ukloni se za jedan sat, a 90% za šest sati. Tablice po kojima se provodi postupna dekompresija nazivaju se dekompresijske tablice. Dekompresija ronioca koji je proveo 1 sat na dubini od 58 metara udišući smjesu zraka trebala bi se izvoditi po sljedećoj shemi (prema uputama mornarice SAD):

10 minuta na dubini od 15 metara

17 minuta na dubini od 12 metara

19 minuta na dubini od 9 metara

50 minuta na dubini od 6 metara

84 minute na dubini od 3 metra

Na dekompresiju otpada vremenski značajan udio kompletnog urona, jer se iz tablica može zaključiti da za jedan sat proveden na dubini dekompresija iznosi 3 sata (Guyton & Hall 2006).

Osim ovakve dekompresije, tijekom urona kod profesionalnih ronilaca provodi se i dekompresija u komori. To je postupak u kojem se ronilac zatvori u posebno konstruiranu komoru, tzv. barokomoru s viskom tlakom, te se postupno tlak snižava do vrijednosti normalnog atmosferskog tlaka. Barokomora se koristi i u slučajevima kada je zbog izostanka ili nepravilne dekompresije

nastala dekompresijska bolest. U tom slučaju ronilac se što hitnije smješta u barokomoru, uz iste vrijednosti tlaka na kojem je ronio te se provodi dekompresija. Dekompresija u sklopu liječenja provodi se znatno duže nego prilikom standardnog izrona (Gošović 1990).

Ako se zaron vrši na dubinama od 75-300 metara, ronionci se pripremaju na način da kroz razdoblje od nekoliko dana žive u barokomori izloženi tlaku istih vrijednosti kao na dubini na kojoj će boraviti. To kondicioniranje održava tkiva i tjelesne tekućine zasićene plinovima koje će udisati. Nakon zarona vraćaju se u komoru s istim vrijednostima tlaka pa se ne stvaraju mjehurići plinova niti posljedično nastaje dekompresijska bolest. Takav oblik ronjenja i pripreme zarona se naziva saturacijsko ronjenje (Guyton & Hall 2006).

Zbog navedenih negativnih učinka dušika na većim dubinama, zrak se u spremnicima prilikom dubinskog ronjenja zamjenjuje smjesom helija i kisika. Za to postoji nekoliko razloga. Helij kao plin pri visokom tlaku ima samo petinu narkotičnog učinka dušika. Helij se značajno slabije otapa u tjelesnim tkivima, tj. duplo slabije u usporedbi s dušikom. Također, za oslobađanje helija iz tkiva prilikom dekompresije, potrebno je značajno manje vremena u usporedbi s dušikom (Wienke & O'Leary 2002). Helij ima sedam puta manju gustoću od dušika te pruža znatno manji otpor u dišnim putovima, što je važno na visokim dubinama kada su plinovi toliko gusti da stvaraju izrazit otpor strujanju. Osim zamjene dušika helijem, važno je smanjiti i udio kisika na većim dubinama u smjesi koja se udiše, kako bi se izbjegao toksični učinak kisika i trovanje kisikom (Guyton & Hall 2006).

## **11. Učinak visokog tlaka na tjelesne šupljine**

Tijelo je čovjeka zbog velikog udjela vode nestlačivo, zbog tog svojstva čovjek relativno lako podnosi tlak na većim dubinama. Pritom je bitna i neometana cirkulacija zraka koji ispunjava tjelesne šupljine kao što su: pluća, crijeva, želudac, sinusi i uši. Pluća, želudac i crijeva komuniciraju s okolinom preko velikih dobro prohodnih otvora, pa rijetko dolazi do opstrukcije (Gošović 1990). Problemi se često javljaju u sinusima i ušima kod kojih su otvori koji ih povezuju s okolinom skloniji opstrukciji zbog manjeg promjera otvora (Rul & Rivier-Zurak 2008).

### **11.1 Barotraumatski poremećaj srednjeg uha i zvukovoda**

Prilikom zarona često se javlja bol u ušima zbog nemogućnosti izjednačavanja tlaka u srednjem uhu s visokim tlakom koji prevladava u ždrijelu i zvukovodu. Srednje uho je koštana šupljina koja je od zvukovoda odijeljena bubnjićem, a sa ždrijelom komunicira preko Eustahijeve tube. Prilikom porasta tlaka, bubnjić se utiskuje prema srednjem uhu (Rul & Rivier-Zurak 2008). Ako je Eustahijeva tuba prohodna, tlak u srednjem uhu uspijeva se izjednačiti s okolnim i bubnjić zauzima središnji, tj. neutralni položaj. Ukoliko je Eustahijeva tuba opstruirana neće doći do izjednačavanja tlakova i zbog utiskivanja bubnjića javljaju se bolovi u srednjem uhu. Razlika tlakova s vanjske i unutarnje strane bubnjića viša od 0,3-0,7 bara može uzrokovati puknuće bubnjića. Puknuće bubnjića praćeno je oštrom boli, krvarenjem, čak i gubitkom svijesti. Puknućem bubnjića hladna voda prodire u srednje uho, podražuje labirint unutarnjeg uha što dovodi do mučnine, povraćanja, vrtoglavice i gubitka svijesti, što potencijalno može uzrokovati smrt. Poteškoće u izjednačavanju tlaka najčešće se javljaju prilikom zarona na malim dubinama, do 10 metara, jer su na tim dubinama promjene tlaka najznačajnije (Gošović 1990).

Prilikom zarona, ako podtlak u srednjem uhu potraje, javlja se zastoj krvi u sluznici srednjeg uha koji uzrokuje edem sluznice i sekreciju seroznog ili krvavog sekreta u šupljinu srednjeg uha. Pojava je praćena bolovima, zujanjem u uhu i nagluhošću, te se naziva barotraumatska otopatija. Barotraumatsku otopatiju treba razlikovati od upalnih procesa jer je za razliku od upalnih procesa uzrokovana mehaničkom opstrukcijom (Gošović 1990). Otokopskim pregledom može se klasificirati u šest stupnjeva:

- stupanj 0: smetnje u izjednačavanju tlaka bez izrazitih promjena na bubnjiću
- stupanj 1: uvučenost bubnjića prema šupljini srednjeg uha s difuznim crvenilom
- stupanj 2: promjene slične prvom stupnju uz lagana krvarenja u slojevima bubnjića
- stupanj 3: promjene kao u prvom stupnju uz jako krvarenje u bubnjiću
- stupanj 4: blago izbočen bubnjić u smjeru zvukovoda, zbog krvarenja mogu biti vidljivi i aerolikvidni nivoi u srednjem uhu
- stupanj 5: ruptura bubnjića s krvarenjem u srednjem uhu i zvukovodu (Edmonds 2013)

Ako se prilikom ronjenja koriste gumeni čepovi za uši ili neoprenska kapuljača koja priliježe na uške u zvukovodu, stvara se podtlak u odnosu na srednje uho. Zbog toga su gumeni čepovi apsolutno kontraindicirani za vrijeme ronjenja jer onemogućavaju izjednačavanje tlaka u srednjem uhu. Bubnjić se posljedično izbočuje prema zvukovodu i na vanjskoj strani bubnjića javljaju se krvlju podliveni mjehurići. U anglosaksonskoj literaturi ta pojava naziva se "inverted ear" ili "obrnuto uho". Ako dođe do rupture bubnjića potrebno je što prije izroniti i ušnu školjku prekriti sterilnom gazom i zavojem, a potom primjeniti antibakterijsku terapiju. Ispiranje uha, primjenu kapi u zvukovod ili stavljanje vate treba izbjegavati kako ne bi nastala infekcija. Nakon

pravilno provednih spomenutih postupaka bubnjić vrlo brzo zacjeljuje, većinom bez trajnih posljedica, a ronilac može nastaviti s ronilačkim aktivnostima (Gošović 1990).

### **11.2 Barotraumatski poremećaj unutarnjeg uha**

Ronjenje na visokim dubinama može uzrokovati i oštećenje unutarnjeg uha. Oštećenja su često asimptomatska i otkrivaju se slučajno na testiranjima vestibularnog i kohlearnog organa. Javljaju se znatno rjeđe od oštećenja srednjeg uha. Oštećenje se može javiti izolirano na vestibularnom ili kohlearnom organu, kao i udruženo na oba organa. Oštećenje je praćeno raznim simptomima koji mogu biti različitog intenziteta, prolaznog karaktera ili izazvati trajne posljedice. Najučestaliji simptom je vrtoglavica. Oštećenje kohlearnog aparata često je praćeno jednostranom nagluhošću, mučninom, povraćanjem i nistagmusom. Iako su oštećenja unutarnjeg uha rijetka, ne smiju se zanemariti jer se zbog sličnih simptoma može zamijeniti s "ušnim" oblikom dekompresijske bolesti. Za razliku od barotraume unutarnjeg uha, u nastanku oštećenja unutarnjeg uha u sklopu dekompresijske bolesti dolazi do opstrukcije sitnih kapilara mjehurićima plina. Znatna je razlika i u terapiji. Dok se u terapiji "ušnog" oblika dekompresijske bolesti prvenstveno koristi terapijska rekompresija u barokomori, kod barotraume unutarnjeg uha ona je apsolutno kontraindicirna, jer bi uzrokovala sekundarnu traumu unutarnjeg uha. Terapija barotraume unutarnjeg uha sastoji se u mirovanju, a nerijetko i u rekonstruktivnim kirurškim zahvatima (Gošović 1990).

### **11.3 Smetnje u sinusima**

Sinusi su koštane šupljine obložene sluznicom, a nalaze se u kostima lica, čeonj kosti i bazi lubanje. Sluznica neprekidno stvara sekret koji se kroz uske otvore drenira u nosne hodnike. Ti

otvori ujedno su i komunikacija sinusa s okolinom. Zbog prirodnih deformacija, u akutnim ili kroničnim upalnim procesima zbog edema sluznice ti otvori dodatno su suženi. U takvim stanjima izjednačavanje tlaka unutar sinusa s tlakom nosne šupljine, tj. okoline izrazito je otežano ili u potpunosti onemogućeno. Puhanjem kroz nos komunikacija se može ponovno uspostaviti, često uz pojavu sluzavo-krvavog sekreta. Zbog nemogućnosti izjednačavanja tlaka javlja se izrazita glavobolja. Preporučuje se ispiranje nosa morskom vodom prije zarona jer može poboljšati prohodnost sinusa (Gošović 1990). Dreniranje sekreta pospješuje se primjenom dekongestiva (Bove 2010). Važno je naglastiti da se ronjenje treba izbjegavati za vrijeme akutnih upalnih procesa, posebno kod sinusitisa. Slični upalni procesi kroničnog karaktera, koji onemogućavaju izjednačavanje tlaka u sinusima, nespojivi su s obavljanjem ronilačkih aktivnosti (Gošović 1990).

#### **11.4 Smetnje u zubima**

Bol u zubima rijetko se javlja tijekom ronjenja, a ako se javi posljedica je nemogućnosti izjednačavanja tlaka plina koji se stvara ili prodire u šupljinu nepotpuno plombiranih zubi s tlakom usne šupljine, tj. okoline. Do neizdrživih bolova dolazi u šupljim zubima kad prilikom urona zrak ulazi u šupljinu zuba, a za vrijeme izrona ostaje zarobljen i širi se. Terapija takvog stanja sastoji se u otvaranju zuba i oslobađanju zarobljenog zraka. Kako bi se ove smetnje izbjegle, svi oni koji se bave ronjenjem trebaju provoditi redovitu njegu i kontrolu zuba (Gošović 1990).



## **12. Liječenje posljedica ronjenja**

Ozljede, tj. bolesti, kao posljedice ronjenja uzrokovane su promjenom okolnog tlaka vode i zajednički naziv svim takvim patološkim stanjima je disbarične ozljede ili disbarizami. Dekompresijska bolest najčešći je oblik disbarizma. Uz dekompresijsku bolest, značajna je i plinska embolija kao posljedica barotraume pluća (Kain 2010).

### **12.1 Liječenje dekompresijskih bolesti**

Nerijetko je, zbog sličnih simptoma, teško razlikovati dekompresijsku bolest i plućnu emboliju uzrokovanu barotraumom, no cilj i strategija liječenja za navedna je stanja ista. Sastoji se u osiguravanju prohodnosti dišnih puteva, postupaka oživljavanja, primjene 100% kisika i što hitnijeg prijevoza do najbližeg centra s barokomorom za postupak rekompresije. Ciljevi rekompresije su: smanjenje volumena mjehurića plina, preraspodjela i ponovno otapanje plina u tjelesnim tekućinama, smanjivanje edema i hipoksije tkiva (Kain 2010).

Bol u zglobovima se, kao prvi i najčešći simptom dekompresijske bolesti, povlači već nakon primjene 100% kisika na površini vode. Moguća oštećenja živčanog sustava važno je pravovremeno uočiti neurološkim pregledom. Primjena 100% kisika u sklopu prve pomoći smanjuje opseg neuroloških ispada, a pritom je bitno obratiti pozornost da se kisik koji se udiše ne razrjeđuje sa zrakom. Preporučeno je i uzimanje tekućine, oralno po mogućnosti, a ako je prisutna mučnina, tekućina se primjenjuje intravenski. Daljnji terapijski postupci uključuju terapijsku rekompresiju, koja se zasniva na primjeni kisika pod povišenim parcijalnim tlakom, tj. hiperbaričnoj oksigenaciji. Maksimalna dopuštena vrijednost radnog tlaka u komori je 2,8 atmosfera, jer u protivnom bi kisik mogao imati toksičan učinak na tkiva. Ovisno o stupnju

oštećenja, primjenjuju se različiti protokoli rekompresije. Najčešće primjenjivani protokol, izrađen od strane Ratne mornarice Sjedinjenih Američkih Država traje 135 minuta, tijekom kojih ronilac udiše 100% kisik pod tlakom od 2,8 atmosfera, sa stankama od 5 minuta, s udisanjem zraka prije simuliranog izrona. Simulirani izron označava izjednačavanje tlaka u komori s tlakom koji vlada na razini mora. Kod težih neuroloških ispada, kao što je slučaj s oštećenjem leđne moždine, odgovor na hiperbaričnu oksigenaciju uvelike ovisi o stupnju oštećenja, tj. o stupnju ishemije. Ako se ni nakon tri 20-minutna intervala primjene 100% kisika pod tlakom od 2,8 atmosfera simptomi ne počnu povlačiti, može se probati s primjenom helija. Kod oštećenja unutarnjeg uha, indicirana je hitna rekompresija, tj. hiperbarična oksigenacija, potpomognuta vazodilatatorima i protuupalnim lijekovima. Farmakoterapija u ovom stanju je korisna i ukoliko se primijeni s vremenskim odmakom (Kain 2010).

U svim oblicima dekompresijskih bolesti neosporiva je djelotvornost rekompresije, tj. hiperbarične oksigenacije, čak i ako se rekompresiji pristupi naknadno. Jedina farmakološka terapija, dokazanog učinka, je rehidracija infuzijom fiziološke otopine. Smanjivanju stupnja oštećenja pridonosi i primjena protuupalnih lijekova, u prvom redu kortikosteroida. Najkorisniji su za smanjivanje edema prilikom oštećenja mozga (Kain 2010). Kod zaostalih bolova u zglobovima, preporučuje se primjena nesteroidnih protuupalnih lijekova, kao npr. diklofenaka (Edmonds 2013).

## **12.2 Liječenje plinske embolije**

Plinska embolija javlja se prodorom zraka u venski ili arterijski krvotok. Do prodora zraka u krvotok, kao posljedice ronjenja, može doći tijekom dekompresijske bolesti i prebrzog izrona ili zbog naglog porasta tlaka u plućima ronioca i posljedične barotraume pluća. Odmah po sumnji

na plinsku emboliju treba primjeniti 100% kisik preko maske. Kisik pospješuje smanjenje volumena mjehurića plina, te smanjuje učinke hipoksije i ishemije zahvaćenog tkiva. Od izuzetne važnosti je reagirati u što kraćem roku i osigurati prijevoz do najbližeg centra za rekompresiju. Ako se prijevoz obavlja zračnim putem, prostor u kojem se ronilac prevozi treba biti pod tlakom ili treba letjeti na nižoj nadmorskoj visini kako bi se izbjegao dodatni pad tlaka i posljedični porast razlike u tlakovima. U slučaju nastanka edema mozga indicirana je primjena bolus doze (10 mg) dexamethason-a. Kod plinskih embolija moždanih arterija, koja se nerijetko može potvrditi neurološkim ispadima, najvažniju ulogu ima rekompresija s hiperbaričnom oksigenacijom. Rekompresija započinje disanjem zraka pod tlakom od 6 atmosfera, ne duže od 30 minuta. Potom se tlak snižava na 2,8 atmosfera i započinje se s primjenom 100% kisika. Visoki tlak smanjuje volumen mjehurića plina, a kisik ublažava negativne učinke hipoksije i ishemije. Uz rekompresiju primjenjuje se i farmakoterapija, koja se sastoji od primjene antitrombocitnih lijekova, kao npr. aspirina, kortikosteroida, za smanjivanje edema mozga, i antikolvuziva, u prvom redu lidokaina (Kain 2010).

### **13. Zdravstveni nadzor i preventivne mjere**

Ronjenje, kako sportsko, tako i rekreativno, izuzetno je zahtjevna aktivnost. Ronjenje iziskuje određenu tjelesnu i mentalnu spremnost ronioca, ali i određeno znanje i vještine. Bitan čimbenik je i oprema s kojom se roni, jer tehnološki razvoj omogućio je sve dublje i duže zarone. Upravo zbog stalnih pomicanja ljudskih granica nužno je osigurati odgovarajuće zdravstvene preglede ronilaca u svrhu prevencije ozljeda.

Zdravstveni pregledi ronilaca mogu se svrstati u dvije kategorije: zdravstveni pregledi sportskih i rekreativnih ronilaca te zdravstveni pregledi profesionalnih ronilaca. Osposobljenost registriranih

ronilaca sportaša utvrđuju specijalisti sportske medicine i specijalisti medicine rada i sporta, a radnu osposobljenost ronilaca profesionalaca utvrđuju specijalisti medicine rada i specijalisti medicine rada i sporta (Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture 2010). Zdravstveni pregled ronilaca rekreativaca provodi se ispunjavanjem medicinskog upitnika (Narodne novine 2008).

Zdravstveni pregled ronilaca temelji se na:

- anamnezi, izravno ili putem upitnika
- antropometrijskim mjerenjima: tjelesne visine, mase tijela i indeksa tjelesne mase i opsega struka
- funkcionalnom ispitivanju fizičkih sposobnosti
- rendgenskom pregledu srca i pluća
- elektrokardiografskom pregledu
- otorinolaringološkom pregledu uha, grla i nosa
- neuropsihijatrijskom pregledu uključujući i elektroencefalografiju
- oftalmološkom pregledu s određivanjem oštine vida i pregledom očnog dna
- pregledu usne šupljine i zubala
- psihološkom testiranju (Gošović 1990).

Na temelju dobivenih rezultata ocjenjuje se zdravstvena osposobljenost ronilaca za obavljanje ronilačkih aktivnosti i saznaje o mogućim ograničenjima koja onemogućuju sigurno obavljanje ronilačkih aktivnosti. Liječnik koji provodi testiranja i donosi odluke pritom treba u svakom trenutku misliti o sigurnosti ispitanika i onih koji bi zajedno s ispitanikom mogli roniti (Furlan 2009). Primjenom spomenutih načela ronjenje je apsolutno kontraindicirano u bolesnika koji boluju od: svih organskih bolesti srca, bronhiektazija, plućnih upalnih bolesti, akutnog i

kroničnog sinusitisa, astme, pneumotoraksa, cističnih promjena na plućima, epilepsije, shizofrenije, sklonosti sinkopama, klaustrofobije, ovisnosti o alkoholu i opijatima. U tu skupinu spadaju i osobe s operativno-rekonstruktivnim zahvatima na uhu koji onemogućavaju izjednačavanje tlaka srednjeg uha i okoline (Gošović 1990). Uz spomenute zdravstvene preglede, potrebno je spomenuti i preventivnu ulogu ronjenja u paru.

## **14. Zaključak**

Budući da je ronjenje, kako sportsko, tako i rekreativno, izuzetno zahtjevna aktivnost koja uz znanje i vještine, iziskuje određenu tjelesnu i mentalnu spremnost ronioca, neophodan je odgovarajući zdravstveni nadzor ronilaca.

Zdravstveni nadzor ronilaca bi trebao provoditi liječnik s odgovarajućom edukacijom, specijalist medicine rada i sporta, pri čemu donoseći ocjenu zdravstvene osposobljenosti pojedinca za bavljenje ronjenjem, prije svega obraća pozornost na postojanje mogućih zdravstvenih ograničenja koja bi mogla ugroziti sigurno obavljanje ronilačkih aktivnosti.

## **15. Zahvale**

Iskreno hvala mojoj mentorici prof. dr. sc. Jadranki Mustajbegović, dr. med., na susretljivosti, strpljenju i uvijek rado pruženoj pomoći prilikom pisanja ovoga rada.

## 16. Literatura

Furlan, Tomislav (2009) Prijedlog zdravstvenih kriterija i opsega pregleda ronioca (specijalistički rad), Zagreb, Medicinski fakultet.

Glavaš, Duška (2010) Djelovanje ronjenja sa stlačenim zrakom na pojavljivanje mjehurića inertnog plina u rekreacijskih ronilaca i osoba s kroničnom ozljedom kralješničke moždine (doktorska disertacija), Split, Medicinski fakultet.

Gošović, Stracimir (1990) Ronjenje u sigurnosti. Zagreb, Jumena.

Guyton, Arthur C.; Hall, John E. (2006) Medicinska fiziologija, Zagreb, Medicinska naklada.

Haux, Gerhard (1982) Ronjenje i ronilačka tehnika, Zagreb, Spektar.

Hrvatski olimpijski odbor (2012) Nomenklatura športova i športskih grana, Zagreb, HOO.

Jain, Kewal K. (2010) Udžbenik hiperbarične medicine, Pula, Poliklinika za baromedicinu i medicinu rada OXY.

Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture (2009) Nacrt prijedloga zakona o ronjenju, (Narodne novine 181/04), Zagreb.

Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture (2010) Pravilnik o obavljanju podvodnih aktivnosti, (Narodne novine 96/2010), Zagreb.

Nacionalna klasifikacija zanimanja, (Narodne novine 147/2010), Zagreb.

Pravilnik o poslovima s posebnim uvjetima rada, (Narodne novine 150/2008), Zagreb.



[http://www.advanceddiver magazine.com/\\_PDFORDER/isfg/13sli/ADM%20ISSUE%2013.pdf](http://www.advanceddiver magazine.com/_PDFORDER/isfg/13sli/ADM%20ISSUE%2013.pdf).

Accessed 19 May 2014

<http://www.diverite.com/education/rebreather/tips/oxygen%20toxicity/>. Accessed 17 May 2014

<http://www.divingmedicine.info/Book%20DMfSD%202013.pdf>. Accessed 17 May 2014

[http://www.diversalertnetwork.org/medical/articles/Decompression\\_Illness\\_What\\_Is\\_It\\_and\\_Wh at\\_Is\\_The\\_Treatment](http://www.diversalertnetwork.org/medical/articles/Decompression_Illness_What_Is_It_and_Wh at_Is_The_Treatment). Accessed 18 May 2014

<http://www.gss.hr/hgss/strucne-komisije/komisija-za-speleospasavanje/hgss-speleoronjenje>.

Accessed 1 May 2014

<http://www.scubamed.com/divmed.htm>. Accessed 18 May 2014

<http://www.vasezdravlje.com/printable/izdanje/clanak/1763>. Accessed 20 May 2014

## 17. Životopis

Rođen sam 1989. godine u Dubrovniku. Godine 2007. maturirao sam u Gimnaziji *Dubrovnik*.

Iste godine upisao sam Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Tijekom obrazovanja u Dubrovniku trenirao sam vaterpolo u VK *Jug* i nastupao na regionalnim i državnim sportskim natjecanjima i prvenstvima. Za vrijeme studija položio sam tečaj za osposobljavanje spasilaca na bazenu i otvorenim vodama.