

**FIZIOLOGIJA LETENJA, PUTOVANJA U SVEMIR I DUBINSKOG
RONJENJA**

Kako se ljudi avionima, penjanjem na planine i svemirskim letjelicama uspinju na sve veće visine, tako postaje sve važnije da se shvate učinci visine i niskih tlakova plinova na ljudski organizam. Isto tako, ljudi se sve dublje spuštaju u more, pa je potrebno da se shvate i učinci plinova pod visokim tlakom.

U ovom poglavlju razmotrit ćemo sve te probleme: prvo hipoksiju na velikim visinama; drugo, ostale fizičke faktore koji djeluju na organizam u velikim visinama; treće, ogromne sile akceleracije koje se javljaju i u letačkoj i u kozmičkoj fiziologiji; najзад, učinke plinova pod visokim tlakom u morskim dubinama.

DJELOVANJE NISKOГ TLAKA KISIKA NA ORGANIZAM

Barometarski tlakovi na različitim visinama. Tablica 1 prikazuje barometarske tlakove na različitim visinama, te se može vidjeti da je tlak na razini mora 760 mm Hg, dok je na približno 3000 m samo 523 mm Hg, a na kojih 15000 m iznosi samo 87 mm Hg. To sniženje barometarskog tlaka osnovni je uzrok svih problema što ih uzrokuje hipoksija na velikim visinama. Naime, kad god se barometarski tlak snizuje, razmjerno se snizuje i tlak kisika, koji uvijek iznosi manje od 21% ukupnog barometarskog tlaka.

Parcijalni tlak kisika na različitim visinama. Tablica 1 pokazuje i to da parcijalni tlak kisika (P_{O_2}) u suhom zraku na morskoj razini iznosi približno 150 mm Hg. Kada u zraku ima mnogo vodene pare, ta se vrijednost može smanjiti za 10 mm Hg. Na približno 3000 m P_{O_2} iznosi oko 110 mm Hg, na približno 6000 m kreće se oko 73 mm Hg, a na približno 15000 m iznosi 18 mm Hg.

Alveolarni P_{O_2} na različitim visinama

Kad se na većim visinama P_{O_2} u atmosferi snizuje, može se, naravno, očekivati i pad P_{O_2} u alveolama. Na manjim visinama alveolarni P_{O_2} ne snizuje se baš u tolikoj mjeri kao parcijalni tlak kisika u atmosferi, jer se smanjenje kisika u atmosferi donekle nadoknađuje povećanom ventilacijom. Međutim, na većim visinama P_{O_2} u alveolama se snizuje čak i više nego P_{O_2} u atmosferi, i to zbog posebnih razloga koje ćemo protumačiti.

Učinak ugljičnog dioksida i vodene pare na kisik u alveolama. Čak i na velikim nadmorskim visinama ugljični se dioksid stalno odstranjuje iz krvi plućnih kapilara u alveole. Isto tako se i voda s respiracijskih površina isparava u alveolarni prostor. Zbog toga ta dva plina razrjeđuju kisik i dušik koji se već nalaze u alveolama, te tako snizuju koncentraciju kisika.

Nazočnost ugljičnog dioksida i vodene pare u alveolama postaje napose važna na velikim visinama, jer ukupan barometarski tlak pada na niske vrijednosti, dok se tlakovi ugljičnog dioksida i vodene pare ne snizuju razmjerno tome. Dokle god je

temperatura tijela normalna, tlak vodene pare zadržava vrijednost od 47 mm Hg, bez obzira na visinu; ali zbog pojačanog disanja na krajnje velikim visinama tlak ugljičnog dioksida pada od približno 40 mm Hg, koliko iznosi na morskoj razini, na približno 24 mm Hg.

Da razmotrimo na koji način tlakovi tih dvaju plinova djeluju na raspoloživi prostor za kisik. Pretpostavimo li da ukupan barometarski tlak padne na 100 mm Hg, tada 47 mm Hg od toga mora otpasti na tlak vodene pare, pa će za sve ostale plinove preostati samo 53 mm Hg. Od tih 53 mm Hg 24 mm Hg mora otpasti na ugljični dioksid, te preostaje slobodno svega 29 mm Hg. Kada se kisik u tijelu ne bi trošio, jedna petina od 29 mm Hg bio bi kisik, a četiri petine bi otpadale na dušik, tj. P_{O_2} bi u alveolama iznosio 6 mm Hg. Međutim, tkiva dotične osobe postala bi do tog trenutka gotovo posve anoksična, pa bi se zbog toga čak i ovaj zadnji trag kisika apsorbirao u krv, ne ostavljajući više od 1 mm Hg tlaka u alveolama. Prema tome, pri barometarskom tlaku od 100 mm Hg čovjek ne bi mogao preživjeti ako bi udisao zrak. Učinak je, međutim, bitno drukčiji ako čovjek diše čisti kisik, kao što ćemo to opisati u daljnjem izlaganju.

Alveolarni P_{O_2} na različitim visinama. Tablica 1 prikazuje i P_{O_2} u alveolama na različitim visinama kad čovjek diše zrak i kad diše čisti kisik. Diše li zrak, alveolarni P_{O_2} iznosi 104 mm Hg na morskoj razini, na visini od 3000 m pada na 67 mm Hg, a na 15000 m snizuje se na svega 1 mm Hg.

Zasićenje hemoglobina kisikom na različitim visinama. Slika 1 prikazuje zasićenje arterijske krvi kisikom na različitim nadmorskim visinama, kad čovjek diše zrak i kad diše kisik, a zasićenje u postocima na svakih 3000 m prikazuje Tablica 1. Do visine od približno 3000 m, čak i kad se diše zrak, zasićenje arterijske krvi kisikom održava se na vrijednosti od najmanje 90%. Međutim, kao što prikazuje lijeva krivulja na slici, iznad 3000 m zasićenje arterijske krvi kisikom sve više pada, tako da na visini od 6000 m iznosi svega 70%, a na većim visinama još manje.

Utjecaj udisanja čistog kisika na alveolarni P_{O_2} na različitim visinama

Osvrćući se još jednom na tablicu 1, zapažamo da u čovjeka koji na visini od približno 9000 m udiše zrak alveolarni P_{O_2} iznosi samo 21 mm Hg, iako barometarski tlak iznosi 226 mm Hg. Ta je razlika u prvom redu uzrokovana činjenicom da znatan dio alveolarnog zraka čini dušik. Ako čovjek umjesto zraka udiše čisti kisik, glavnina alveolarnog prostora, koju je prije zapremao dušik, ispunja se kisikom. Teorijski, na približno 9000 m pilot bi mogao u alveolama imati P_{O_2} od 139 mm Hg, a ne 21 mm Hg, koliko ima kad udiše zrak.

Druga krivulja na Slici 1 prikazuje zasićenje arterijske krvi kisikom na različitim

visinama kad čovjek udiše čist kisik. Može se zapaziti da zasićenje ostaje iznad 90% dok pilot ne dosegne približno 12000 m, a da se zatim naglo smanjuje do oko 50% na visini od 14000 m. To je otprilike granična vrijednost koju pilot kroz duže vrijeme može podnijeti, pa se zbog toga ta visina ponekad naziva „stropom“.

Učinci hipoksije

Plućna ventilacija obično se ne povećava znatnije dokle god se ne postigne visina od približno 2500 m. Na toj visini zasićenje arterijske krvi kisikom pada na približno 93%, a to je razina na kojoj kemoreceptori izrazito reagiraju. Iznad 2500 m mehanizam stimulacije preko kemoreceptora sve više povećava ventilaciju, dokle god se ne dosegne visina od približno 5000 do 6000 m. Na toj visini ventilacija postiže maksimalnu vrijednost od približno 65% iznad normalne. Daljnje povećanje visine ne pojačava više aktivnost kemoreceptora.

Ostali učinci hipoksije koji se počinju javljati na visini od približno 3500 m jesu pospanost, tromost, mentalni umor, ponekad glavobolja i mučnina, a katkad i euforija. Većina se tih simptoma pojačava na još većim visinama. Glavobolja je često osobito jako izražena, a cerebralni simptomi ponekad se pogoršavaju sve do stadija kad se jave trzaji i konvulzije, te u neaklimatizirane osobe završavaju komom na visini od oko 7000 m.

Jedan je od najvažnijih učinaka hipoksije smanjenje mentalnih sposobnosti, zbog čega je otežano rasuđivanje i pamćenje, te izvođenje finih motoričkih pokreta. Obično te sposobnosti ostaju potpuno normalne do 2500 m, a za kratko vrijeme mogu biti potpuno normalne do visine od 4500 m. Međutim, ako je avijatičar izložen hipoksiji duže vrijeme, njegova se mentalna sposobnost, mjerena vremenom reakcije, rukopisom i drugim psihološkim testovima, može smanjiti na 80% normalne vrijednosti, čak i na visini od 3300 m. Ako letač ostane na 4500 m jedan sat, njegova će se mentalna sposobnost obično smanjiti na približno 50% normalne vrijednosti, a nakon 18 sati provedenih na toj visini na približno 20% normalne vrijednosti.

Aklimatizacija na nizak P_{O_2}

Ako čovjek ostane na velikim visinama nekoliko dana, tjedana ili godina, postepeno će se aklimatizirati (prilagoditi) na nizak P_{O_2} . Tako će štetni utjecati niskog P_{O_2} na organizam postajati sve slabiji, pa će čovjek moći raditi teže poslove ili se uspinjati na još veće visine. Navest ćemo nekoliko načina na koje se postiže aklimatizacija: 1) povećanje plućne ventilacije, 2) povećanje količine hemoglobina u krvi i 3) povećanje stupnja vaskularizacije tkiva.

Povećana plućna ventilacija. Prilikom iznenadnog izlaganja niskom P_{O_2} , podraživanje kemoreceptora hipoksijom povećava alveolarnu ventilaciju za maksimalno 65%. To je

trenutna kompenzacija učinka velike visine, koja sama omogućuje da se čovjek popne nekoliko tisuća metara više nego što bi mogao da se ventilacija nije povećala. Ako čovjek na veoma velikoj visini ostane nekoliko dana, ventilacija se postepeno povećava na vrijednost koja je pet do sedam puta veća od normalne. Sada ćemo opisati osnovni uzrok ovom postepenom povećanju ventilacije.

Nagli porast plućne ventilacije za 65%, kad se čovjek penje na veliku visinu, odstranjuje velike količine ugljičnog dioksida. Zato se u tjelesnim tekućinama smanjuje P_{CO_2} i povećava pH. Obje te promjene koče centar za disanje i na taj se način *protive podraživanju hipoksijom*. Međutim, tokom narednih tri do pet dana ta inhibicija nestaje, omogućujući respiracijskom centru da sada punom snagom odgovara na signale iz kemoreceptora podraženih hipoksijom, pa ventilacija postane pet do sedam puta veća od normalne.

Porast količine hemoglobina u toku aklimatizacije. Već smo u 5. poglavlju iznijeli da je hipoksija glavni podražaj za pojačanu produkciju eritrocita. Obično se pri potpunoj aklimatizaciji na nizak tlak kisika hematokritska vrijednost povećava od normalnih 40–45 na prosječno 60–65, uz prosječni porast koncentracije hemoglobina od normalnih 15 g% na približno 22 g%.

Osim toga, i volumen se krvi povećava, često za 20 do 30%, što izaziva ukupan porast količine hemoglobina u cirkulaciji za 50 do 90%.

Međutim, to povećanje količine hemoglobina i volumena krvi ide sporo, tj. praktički se uopće ne zapaža u prva dva do tri tjedna, razvije se do polovice otprilike za mjesec dana ili nešto više, a posve se razvije tek nakon nekoliko mjeseci.

Pojačana vaskularizacija. Histološka istraživanja na životinjama koje su mjesecima ili godinama bile izložene niskim razinama kisika pokazuju da se *jako pojačava vaskularizacija* (povećan broj i veličina kapilara) hipoksičnih tkiva. To pomaže da se protumači što se događa s onih 20–30% porasta volumena krvi. Krv, dakle, dolazi u mnogo tješnji kontakt s tkivnim stanicama nego inače.

Prirodna aklimatizacija domorodaca na visokim planinama

Mnogi stanovnici Anda i Himalaja žive na visinama iznad 4000 m, a jedna skupina u Peruanskim Andama živi zapravo na visini od približno 5500 m i radi u rudniku na visini od 6000 m. Mnogi od ovih ljudi rođeni su na tim visinama i žive tu čitava života. U pogledu svih prije navedenih aspekata aklimatizacije domoroci su u prednosti i pred najbolje aklimatiziranim stanovnicima nizina, čak i onima koji deset godina ili duže žive na velikoj razini. Proces aklimatizacije domorodaca počinje u ranom djetinjstvu. U njih je prsni koš znatno povećan, dok je veličina tijela nešto smanjena, pa je zbog toga omjer ventilacijskog kapaciteta prema masi tijela velik. Osim toga, u usporedbi

sa stanovnicima nizina, u njih je veće i srce, naročito desno, koje u plućnoj arteriji osigurava visok tlak potreban za tjeranje krvi kroz jako proširen sistem plućnih kapilara.

Predodžbu o važnosti aklimatizacije mogu nam dati podaci koje ćemo sada navesti. Radni kapacitet, izražen u postocima maksimalno mogućeg za normalnu osobu na morskoj razini, iznosi na visini od oko 5000 m približno:

u neaklimatiziranih osoba	50%
nakon dvomjesečne aklimatizacije	68%
u gorštaka koji žive na 4000 m,	87%
a rade na 5000 m	

Prirodno aklimatizirani gorštaci mogu, dakle, čak i na tim visinama postići dnevni učinak gotovo jednak onome u normalnih osoba na morskoj razini, dok ljudi iz nizina taj rezultat ne mogu gotovo nikad postići, čak ni kad su dobro aklimatizirani.

FIZIOLOGIJA DUBINSKOG RONJENJA I RADA POD VISOKIM TLAKOM

Kad se čovjek spušta u more, tlak se oko njega jako povisuje. Da bi se spriječio kolaps pluća, zrak se čovjeku mora dostavljati također pod visokim tlakom, pa se krv u plućima izlaže krajnje visokim alveolarnim tlakovima plinova. Iznad nekih granica ti visoki tlakovi mogu izazvati velike promjene u funkcijama organizma, što opravdava potrebu ovog razmatranja.

Visokim atmosferskim tlakovima izlažu se i radnici u kesonima, koji kopajući tunele ispod rijeka ili na drugim mjestima često moraju raditi pod visokim tlakom koji sprečava da se tunel ne uruši. I u ovom se slučaju javljaju isti problemi zbog pretjerano visokih tlakova u alveolama.

Prije no što protumačimo učinke visokih tlakova plinova na organizam, treba da ponovimo neke fizičke principe o promjenama tlaka i volumena u različitim morskim dubinama.

Odnos dubine prema tlaku. Stupac morske vode od 10 m vrši na dno jednak pritisak kao sva atmosfera iznad Zemlje. Zato će čovjek deset metara ispod morske površine biti izložen tlaku od 2 atmosfere, jednoj atmosferi zbog tlaka zraka iznad vode i drugoj atmosferi zbog težine same vode. Na dubini od 20 m tlak će iznositi 3 atmosfere itd., u skladu s tablicom 30-2.

Djelovanje dubine na volumen plinova. Drugi važan učinak dubine jest kompresija plinova na sve manji volumen. Na morskoj dubini od 10 m, gdje tlak iznosi 2 atmosfere, volumen koji na razini mora iznositi 1 litru stlačen je na svega pola litre. Na dubini od 30 m, gdje vlada tlak od 4 atmosfere, volumen je komprimiran na četvrtinu litre,

a pod tlakom od 8 atmosfera (dubina od 70 m) na jednu osminu litre. Taj je učinak izvanredno važan prilikom ronjenja, jer se u tijelu ronioca šupljine ispunjene zrakom, uključivši pluća, mogu ponekad toliko smanjiti da nastaju teška oštećenja.

Djelovanje visokih parcijalnih tlakova plinova na organizam

Ronilac koji udiše zrak izložen je normalno ovim plinovima: dušiku, kisiku i ugljičnom dioksidu.

Narkotičko djelovanje dušika pod visokim tlakom. Približno četiri petine zraka čini dušik. Pod tlakom koji vlada na morskoj razini dušik nema poznatih učinaka na tjelesne funkcije, ali pod visokim tlakovima može uzrokovati različite stupnjeve narkoze. Ako ronilac koji udiše komprimirani zrak ostane u moru nekoliko sati, prvi će se znaci blage narkoze javiti na dubini od približno 40 do 45 m. U toj dubini ronilac počinje pokazivati veselost i gubiti mnogo od svoje opreznosti. U dubini od 45 do 60 m postaje pospan. Između 60 i 75 m snaga ronioca jako se smanjuje i on postaje tako nespretn da ne može obavljati rad koji se od njega zahtijeva. Ispod 90 m (tlak od 10 atmosfera) ronilac obično postaje zbog narkoze dušikom gotovo posve nesposoban. Međutim, da bi se u tijelu otopilo toliko dušika da bi nastale ove pojave *visok tlak obično treba da djeluje jedan sat ili duže.*

Narkoza dušikom pokazuje simptome veoma slične onima što se javljaju prilikom otrovanja alkoholom, pa se zbog toga često naziva „dubinsko pijanstvo“ ili „opojenost dubinom“.

Smatra se da je mehanizam narkotičkog učinka jedna učincima svih drugih plinova anesthetika. To znači da se dušik lako otapa u mastima organizma, pa se, vjerojatno, kao i većina ostalih plinovitih anesthetika otapa u membranama ili drugim lipidnim strukturama neurona. Svojim *fizičkim* učinkom dušik mijenja prijenos električnih naboja, pa tako smanjuje podražljivost neurona.

Toksičnost kisika pod visokim tlakom. Udisanje kisika pod vrlo visokim parcijalnim tlakovima može pogubno djelovati na centralni nervni sistem, izazivajući ponekad epileptičke grčeve nakon kojih nastupa koma. Izlaganje tlaku kisika od 3 atmosfere ($P_{O_2} = 2280$ mm Hg) u većine ljudi izaziva konvulzije i komu za približno jedan sat. Te konvulzije često nastaju bez ikakvog prethodnog znaka, pa za ronioca u moru mogu, dakako, biti smrtonosne.

Uzrok ili uzroci toksičnosti kisika nisu još poznati, ali ćemo navesti jednu pretpostavku. Nakon teškog otrovanja kisikom koncentracije nekih oksidacijskih enzima u tkivima znatno su snižene. Zbog toga se smatra da višak kisika inaktivira pojedine oksidacijske enzime i izaziva otrovanje na taj način što smanjuje sposobnost tkiva da stvara visokoenergetske fosfatne vezove.

Toksičnost ugljičnog dioksida u velikim dubinama. Ako je ronilačka oprema dobro konstruirana i ispravno radi, za ronioca nema opasnosti od otrovanja ugljičnim dioksidom, jer sama dubina ne povećava P_{CO_2} u alveolama. Razlog tome je taj što se ugljični dioksid stvara u organizmu, pa dokle god ronilac udiše normalan respiracijski volumen izdisat će i dalje onoliko ugljičnog dioksida koliko ga stvara, te će parcijalni tlak tog plina u alveolama održati na normalnoj vrijednosti.

Ipak u nekim vrstama ronilačke opreme, kao npr. u ronilačkom šljemu i pojedinim tipovima aparata za povratno disanje, ugljični se dioksid često može nagomilavati u zraku mrtvog prostora samog aparata, odakle ga ronilac ponovno udiše. Ronilac podnosi to nagomilavanje dok tlak ugljičnog dioksida (P_{CO_2}) u alveolama ne dosegne oko 80 mm Hg, što je dvostruko veća vrijednost od normalne. Tada se minutni volumen disanja poveća do maksimalne vrijednosti, koja je 6 do 10 puta veća od normalne, pa se time kompenzira povišenje koncentracije ugljičnog dioksida. Međutim, iznad razine od 80 mm Hg stanje postaje nepodnošljivo, te umjesto podraživanja konačno počinje depresija centra za disanje, što znači da disanje počinje zatajivati umjesto da kompenzira. Kao posljedica, u ronioca se razvija teška respiracijska acidoza, različiti stupnjevi letargije, narkoza i, najzad, anestezija.