

FIZIOLOGIJA DIHANJA

Franc Kandare

UDK/UDC 612.2

PHYSIOLOGY OF BREATHING

DESKRIPTORJI: dihanje-fiziologija

DESCRIPTORS: respiration-physiology

IZVLEČEK – *Osnovna naloga pljuč je oksigenacija krvi. V procesu izmenjave respiracijskih plinov v pljučih sodelujejo ventilacija, difuzija in perfuzija. Vsak od teh procesov je lahko v posameznem pljučnem oddelku prisoten v različno velikem obsegu. Zato je pravilno količinsko ujemanje ventilacije, difuzije in perfuzije v posameznih pljučnih oddelkih najpomembnejši dejavnik, ki določa velikost plinske izmenjave. Opisani so različni dejavniki, ki vplivajo na vsako fazo plinske izmenjave v normalnih pljučih.*

ABSTRACT – *The main function of the lung is oxygenation of the blood. Ventilation, diffusion and perfusion occur during pulmonary gas exchange. In separate pulmonary compartments the processes are present to a different extent. Quantitative equality of ventilation, perfusion and diffusion in pulmonary compartments is the most important factor of pulmonary gas exchange. Different factors contributing to the extent of pulmonary gas exchange in normal circumstances are discussed.*

Dihanje opredelimo kot procese, ki so udeleženi pri izmenjavi respiracijskih plinov (kisika – O₂ in ogljikovega dioksida – CO₂) med okoljem in organizmom. Proces dihanja je v literaturi različno opredeljen (1). Nekateri ga delijo v notranje in zunanje dihanje. Z zunanjim dihanjem označujejo vse procese, ki so potrebni za prenos respiracijskih plinov med okolico in celicami organizma, z notranjim dihanjem pa procese pridobivanja energije v celici iz substrata ob sodelovanju prejemnika elektronov, to je kisika. O slednjem je veliko manj znanega, zato se pri obravnavanju dihanja v glavnem omejimo na procese, ki sodelujejo pri plinski izmenjavi v pljučih.

V procesu oskrbe celic organizma s kisikom poleg pljuč sodelujejo tudi drugi organi (srce, kri). Ti lahko v določenih primerih (ki pa niso tako redki) odločilno vplivajo na velikost plinske izmenjave in oskrbo celic organizma z zadostnimi količinami kisika.

Struktura pljuč ustreza funkciji, ki jo pljuča opravljajo. Sestavljena so iz dihalnih poti, ki jih ob njihovem poteku spremljajo tudi druge strukture (krvne žile, limfne poti, vezivno tkivo). Dihalne poti se od traheje naprej delijo nepravilno dihotomno in po sedemnajstih delitvah že zasledimo v stenah dihalnih poti prve alveole, v katerih že poteka plinska izmenjava. Zadnjo dihalno pot, ki v svoji steni še nima alveolov, imenujemo terminalni bronhiol. Del pljuč, ki ga terminalni bronhiol oskrbuje z zrakom, imenujemo acinus, ki je osnovna gradbena in funkcionalna enota pljuč. V pljučih povprečnega odraslega človeka je približno 30000 acinusov in okrog 300 milijonov alveolov. Na površini pljuč zajema en acinus površino približno 1/2 cm². Bronialno vejevje spremljajo krvne žile (pljučne arterije in vene, bronhialne arterije) in limfne poti. Pljuča imajo dvojno cirkulacijo:

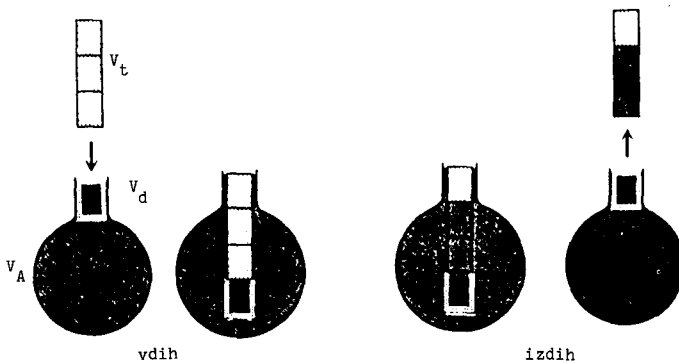
funkcionalno in nutritivno. Funkcionalno cirkulacijo predstavlja pljučna arterija s svojim povirjem in pljučne vene, ki zbirajo kri iz alveolnih kapilar. Nutritivni krvni obtok pa predstavljajo bronhialne arterije. Venozna kri z njihovega povirja se zliva v pljučne vene in predstavlja stalno venosno primes. Zapletena zgradba pljuč se je razvila med evolucijo zaradi prilagajanja potrebam po vse večji plinski izmenjavi. Za učinkovito plinsko izmenjavo je namreč potrebna izjemno velika izmenjevalna površina med zunanjim zrakom in krvjo. Pri normalnem odraslem človeku je površina alveolokapilarne membrane približno 80 do 120 m² in v mirovanju prek nje preide 250–300 ml O₂ na minuto, pri maksimalnem naporu pa celo 5000 ml O₂ na minuto. V približno enaki količini pa se mora izločiti tudi CO₂.

V plinski izmenjavi si procesi, ki pri tem sodelujejo, sledijo zaporedno. Velikost izmenjave določa najšibkejši del. Ostali procesi sicer nekoliko modificirajo vpliv tega, vendar ne veliko.

V procesu zunanjega dihanja, si procesi sledijo v sledečem zaporedju: ventilacija, difuzija, perfuzija in regulacija dihanja. Slednja, čeprav omenjena zadnja, lahko pomembno vpliva predvsem na ventilacijo (2).

Ventilacija je proces, pri katerem zunanji zrak vstopa v dihalna in jih v približno enaki količini, vendar v spremenjeni sestavi tudi zapušča (slika 1). Volumen zraka, ki pri vsakem vdihu vstopi v dihalna, imenujemo dihalni volumen. Ventilacija je potrebna za obnovo zraka v alveolnem prostoru. Alveolni prostor predstavlja tisti volumen dihalnih poti in alveolov, v katerem se odvija plinska izmenjava in ga imenujemo funkcionalna residualna kapaciteta (FRC). V tem prostoru se koncentracije plinov med normalnim dihanjem le malenkostno spreminjajo, zato vrednosti plinov v arterijski krvi med dihanjem pomembneje ne nihajo.

Na koncu normalnega izdihajo so dihalne poti napolnjene z alveolnim zrakom, ki se pri naslednjem vdihu porazdeli po pljučnih oddelkih glede na njihove karakteristike. Na koncu normalnega vdiha pa so dihalne poti napolnjene z ovlaženim zunanjim zrakom, ki ga pri naslednjem izdihu izdihnemo. Pri obnovi kisika in izločanju ogljikovega dioksida iz alveolnega prostora ne sodeluje ves dihalni volumen, pač pa je ta zmanjšan za velikost tako imenovanega mrtvega prostora. To je volumen dihalnih poti do respiratornih bronhiolov, kjer se ne odvija plinska izmenjava in ga imenujemo anatomski mrtvi prostor (približno 150 ml). Če obstajajo tudi distalno od respiracijskih bronhiolov predeli, v katerih ne poteka plinska



Slika 1. Shematski prikaz alveolne ventilacije in ventilacije mrtvega prostora (V_t = dihalni volumen, V_d = volumen mrtvega prostora, V_A = alveolni volumen).

izmenjava, imenujemo to alveolni mrtvi prostor. Alveolni in anatomski mrtvi prostor pa skupaj predstavljata tako imenovani fiziološki mrtvi prostor.

Razlika med dihalnim volumnom in mrtvim prostorom je učinkoviti volumen vdihanega zraka, ki obnavlja alveolni zrak. Ta del ventilacije imenujemo alveolno ventilacijo. Normalno človek lahko poveča celotno ventilacijo za 20–25-krat.

Pljuča v prsnem košu visijo na hilusnih strukturah in so razpeta v pleuralno votlino. Pljuča imajo tendenco h kolapsu, prsni koš pa k razširitvi. Da so pljuča raztegnjena, je potreben med pljuči in prsno steno negativni tlak. Ta je zaradi vpliva gravitacije bolj negativen v vrhovih kot na bazi. Na ravni funkcionalne residualne kapacitete so elastične sile pljuč in prsnega koša v ravnotežju. So enako velike in nasprotno usmerjene.

Zrak se giblje po dihalnih poteh zaradi gradienta tlakov vzdolž dihalnih poti. Razlika tlakov med usti in alveoli je pri dihanju odraz kakovosti dihalnih poti, med usti in pleuralnim prostorom, tako imenovani transpulmonalni tlak pa poleg kakovosti dihalnih poti zajema tudi elastične značilnosti pljučnega parenhima.

Za gibanje zraka v dihalnih poteh sta odgovorna dva fizikalna fenomena: konvekcija in difuzija. Oba procesa sta prisotna hkrati, vendar v različnih delih dihalnih poti prispevata različno velik delež k gibanju plinov. Tako v zgornjih dihalnih poteh prevladuje konvekcija, na pljučni periferiji pa difuzija. Koliko svežega zraka bo prispelo ob vdihu v posamezni pljučni oddelek (distribucija ventilacije), je odvisno od fizikalnih značilnosti tega oddelka (komplianse oddelka in upora v dihalnih poteh, kompliansa pomeni spremembo volumna na enoto tlaka). Čim večja je kompliansa pljučnega oddelka in čim večji je upor v dihalnih poteh, tem počasneje bo pljučni oddelek reagiral na spremembe intrapleuralnega tlaka med dihanjem. Ob tem dejstvu je skoraj neverjetno, da bi bile koncentracije respiracijskih plinov v vseh pljučnih segmentih enake. Že pri popolnoma zdravih pljučih obstajajo večje razlike v ventilaciji med vrhovi pljuč in bazami zaradi vpliva gravitacije. Alveoli v pljučnih vrhovih so zato večji in bolj razširjeni kot na pljučnih bazah, zato so volumske spremembe oddelkov med dihanjem večje v pljučnih bazah kot vrhovih. Enostavneje rečeno so pljučne baze hiperventilirane in pljučni vrhovi hipoventilirani.

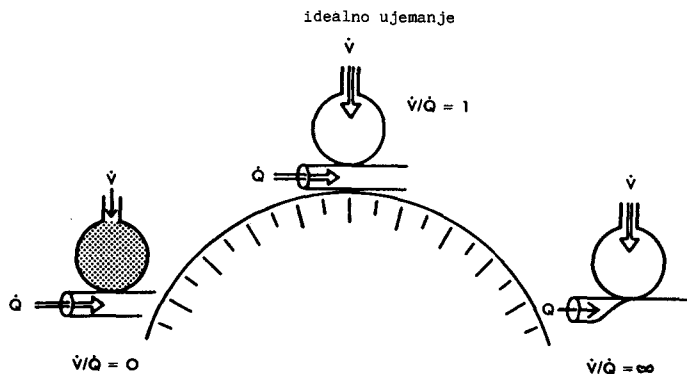
Naslednji proces, ki sodeluje v plinski izmenjavi v pljučih, je difuzija. Respiracijski plini prek alveolokapilarne membrane prehajajo po fizikalnih principih. Sila, ki omogoča prehajanje plinov, je razlika med parcialnimi tlaki respiracijskih plinov v alveolnem zraku in mešani venski krvi na začetku pljučnih kapilar. Količina plina, ki preide skozi alveolokapilarno membrano je odvisna od velikosti gradienta tlaka, fizikalno kemijskih karakteristik opazovanega plina (topnost v maščobah, velikost plinskih molekul itn.), velikosti površine alveolokapilarne membrane, kakovost alveolokapilarne membrane (debelina, sestava), količine hemoglobina v kapilarni krvi, ki je sposoben sodelovanja pri plinski izmenjavi, in velikosti pretoka krvi prek pljučnih kapilar. Ko pride mešana venska kri v pljučne kapilare, se začne izmenjava plinov med krvjo in alveolnim zrakom. Koncentracije plinov se med alveolnim zrakom in krvjo izredo hitro izenačijo, tako da so praktično že na polovici pljučne kapilare parcialni tlaki respiracijskih plinov v kapilarni krvi in alveolnem zraku enaki. Meja izenačitve se pomika proti koncu kapilare, če se pretok v pljučni kapilari močno poveča. Prekratek kontaktni čas je le redko omejitveni dejavnik plinske izmenjave v pljučih.

Pljuča so poleg srca edini organ v telesu, ki prejema celotni minutni volumen srca. Ima dvojni krvni obtok: funkcionalni in nutritivni. Nutritivni obtok predstavlja le nekaj odstotkov funkcionalnega. Ker se venska kri iz nutritivnega obtoka izliva v pljučne vene, ustvarja to stalni anatomski shunt v pljučih (do 5%). Pljučna cirkulacija ima nekatere značilnosti, ki omogočajo, da lahko pljuča sprejmejo celotni minutni volumen srca. To je sistem z nizkim uporom, saj upor v pljučni cirkulaciji predstavlja 1/7 upora v sistemski cirkulaciji. Zato so pri enakem pretoku tlaki v pljučni cirkulaciji skoraj za toliko nižji. Pljučno žilje je izredno pliabljivo (raztegljivo), zato tudi kljub velikim povečanjem minutnega volumna srca tlaki v pljučni cirkulaciji pomembno ne porastejo. Pomembna značilnost pljučne cirkulacije so tudi tako imenovane speče žile. To so kapilare v posameznih pljučnih predelih, ki se ob povečanju tlakov v pljučni cirkulaciji zaradi povečanega pretoka odprejo in postanejo funkcionalne. S tem pa se upor v pljučni cirkulaciji dodatno zniža.

Podobno kot na razporeditev ventilacije po pljučih tudi na prekrvavitev posameznih pljučnih oddelkov vplivajo različni dejavniki. Pri zdravih ljudeh je tak najpomembnejši dejavnik gravitacija. Ta pri stoječem človeku povzroči, da gre večji del minutnega volumna srca prek spodnjih in srednjih predelov pljuč. Vrhovi pljuč so bolj prekrvljeni le ob povečanju pretoka prek pljuč. Pri normalnih pretokih pa so zgornji predeli pljuč bolj prekrvljeni takrat, ko so zaradi patoloških procesov v pljučih povečani tlaki v pljučni cirkulaciji.

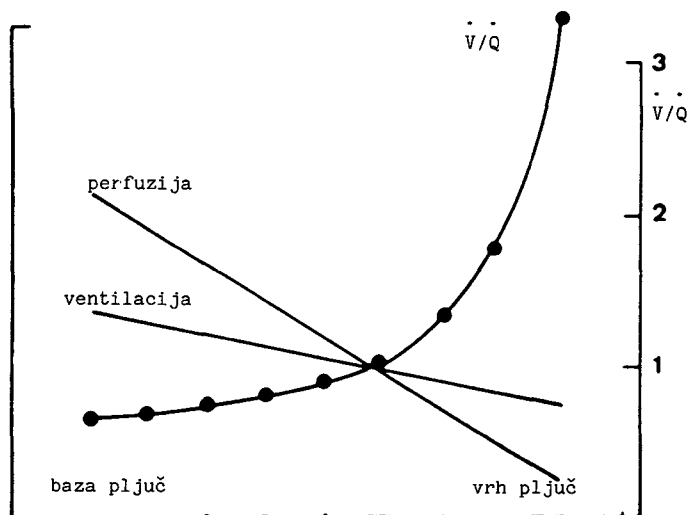
Ko govorimo o pretokih v pljučih (pljučni perfuziji), vedno pri tem mislimo tudi kri z zadostno količino funkcionalnega hemoglobina (hemoglobin, sposoben prenosa respiracijskih plinov) v rdečih krvničkah. Brez funkcionalnega hemoglobina bi bila izmenjava respiracijskih plinov med alveolnim zrakom in krvjo zelo borna. Fizikalno raztopljene količine respiracijskih plinov so izredno majhne in bi bile že za oskrbo organizma s kisikom v mirovanju potrebne visoke inspiracijske koncentracije kisika in izjemno velik minutni volumen srca.

Za učinkovito plinsko izmenjavo je izrednega pomena usklajeno delovanje vseh procesov, ki sodelujejo pri plinski izmenjavi v pljučih. Najpomembnejše je količinsko ujemanje med ventilacijo in perfuzijo (\dot{V}/\dot{Q}) v posameznih pljučnih oddelkih. V pljučih so možni vsi prehodi med skrajnostma, to je pljučnim oddelkom brez perfuzije in ohranjeno ventilacijo ($\dot{V}/\dot{Q} = \infty$, povečanje mrtvega prostora) in



Slika 2. Prikaz možnosti neujemanja ventilacije s perfuzijo (\dot{V}/\dot{Q}) v pljučih.

pljučnim oddelkom z ohranjeno perfuzijo brez ventilacije ($\dot{V}/\dot{Q} = 0$, kratki spoj ali shunt) (slika 2). V normalnih pogojih tako na ventilacijo in perfuzijo deluje gravitacija, posledica le-te pa je večja ventilacija na pljučnih bazah, kjer je tudi večja perfuzija. Vendar ujemanje med njima ni idealno (slika 3), saj so pljučne baze nekoliko bolj perfundirane kot ventilirane, obratno pa so pljučni vrhovi bolje ventilirani kot perfundirani.



Slika 3. Distribucija ventilacije in perfuzije v zdravih pljučih (odnos \dot{V}/\dot{Q} se od vrha pljuč proti bazi zmanjšuje).

Poleg gravitacije pa pri bolnih pljučih delujejo še številni drugi dejavniki, ki to razmerje lahko porušijo. Odraž celotne vsklajenosti vseh procesov v posameznih pljučnih oddelkih in minutnega volumna srca pa so vrednosti parcialnih tlakov respiracijskih plinov v arterijski krvi. Določanje le teh v arterijski krvi je najpogosteje uporabljena metoda za oceno učinkovitosti plinske izmenjave v pljučih v mirovanju in v primerih povečanega metabolizma.

Literatura

1. Forster II RE, AB DuBois, WA Briscoe, AB Fisher. The Lung. Physiologic basis of pulmonary function tests. Chicago, London : Year Book Medical Publishers, 1986.
2. West JB. Respiratory Physiology – the essentials. 3rd ed. Baltimore, London : Williams & Wilkins, 1985.