

# Numerični izračuni pričakovanih deležev kisika v vdihanem zraku ( $F_I O_2$ ) različnih sistemov za aplikacijo kisika

## Numerical calculation of expected fractional inspired oxygen concentrations ( $F_I O_2$ ) for different oxygen delivery systems

### Povzetek

V prispevku smo izvedli analizo pričakovanih koncentracij deleža kisika v vdihanem zraku ( $F_I O_2$ ), ki jih dovajajo različni sistemi za aplikacijo kisika. Izračunali smo vrednosti  $F_I O_2$  za traheostomske vlažilce, nosne katetre, navadne obrazne maske, maske z rezervoarji in Venturi maske. V metodologiji izračunov smo uporabili standardni normalni dihalni vzorec pacientov s spontanim dihanjem:  $V_T=500$  ml,  $I:E=1:2$ ,  $t_I=1$ s,  $t_E=2$ s in  $t_{EP}=0,5$ s. Vplivi dihalnih vzorcev na deleže kisika so prikazani tabelarično. Delež vdihanega zraka ( $F_I O_2$ ) je v realnih razmerah odvisen od vzorca dihanja in od tesnjenja sistema za aplikacijo kisika. Rezultati kažejo razlike predvsem zaradi mrtvih prostorov in zaokroževanja vrednosti koncentracije kisika v atmosferskem zraku.

Miljenko Križmarić  
Štefek Grmec

asist. mag. Miljenko Križmarić, univ.  
dipl. inž. el.

Univerza v Mariboru,  
Visoka zdravstvena šola Maribor,  
Žitna ulica 15, 2000 Maribor

doc. dr. Štefek Grmec dr. med.  
Zdravstveni dom dr. Adolfa Drolca  
Maribor,  
Center za nujno medicinsko pomoč in  
reševalne prevoze,  
Ulica talcev 9, 2000 Maribor

## Uvod

Pri zdravljenju akutnega koronarnega sindroma, moramo pacientu zagotoviti pretok čistega kisika v mejah od 4 l/min do 8 l/min, kot je to navedeno v Evropskih smernicah za oživljanje (1). Če se odločimo za aplikacijo v sredini omenjenih mej: 6 l/min, imamo na razpolago različne sisteme za aplikacijo kisika. Kisik lahko dovajamo z nosnim katetrom, z navadno obrazno masko, ali masko z rezervoarjem s povratnim dihanjem. Tako nosni katetri, kot navadne obrazne maske in maske z rezervoarjem imajo namreč v specifikacijah podano, da lahko delujejo pri pretoku 6 l/min. Pa vendar, pripomočki bi pri enakem pretoku čistega kisika (6 l/min) dovajali različne vrednosti deleža kisika v vdihanem zraku ( $F_{I,O_2}$  – Fractional Inspired Oxygen). Aplikacija z nosnim katetrom bi dodatno zahtevala vlaženje vdihanega zraka, pri maski s povratnim dihanjem pa pazimo, da se rezervoar prazni le do 1/3. Avtorji bi zato v smernicah za oživljanje, morali nakazati, kateri sistem za aplikacijo kisika je treba uporabiti, ali pa navesti potreben delež kisika v vdihanem zraku.

Geneshan v svoji raziskavi (2) ugotavlja, da večina mlajših zdravnikov in medicinskih sester v sekundar-

ni oskrbi, ni prepoznalo masko z rezervoarjem in nepovratnim dihanjem (NRB maska). Četrtnina zdravnikov in skoraj polovica medicinskih sester ni vedela izbrati ustrezno koncentracijo in ustrezno metodo za aplikacijo kisika v primeru srčnega zastoja. Avtor zaključí, da mlajši zdravniki in medicinske sestre nimajo dovolj znanja za pravilno in varno aplikacijo kisika.

Pri upoštevanju normalnih vzorcev dihanja lahko v določenih primerih izračunamo pričakovane deleže kisika  $F_{I,O_2}$ , ki nam služijo kot okvirne, normalne vrednosti. Pripomočki za aplikacijo kisika seveda niso idealni in pacienti dihaajo z različnimi vzorci, zato se realni  $F_{I,O_2}$  razlikuje od pričakovanega  $F_{I,O_2}$ . Za neinvazivno aplikacijo kisika uporabljamo največkrat nosne katetre ali obrazne maske, pri oživljanju pa dihalne balone ali posebne linearne anestezijske sisteme. Venturi maske, oziroma Venturi nastavki so sistemi, ki dovajajo natančno določeno koncentracijo deleža kisika. Pri teh sistemih koncentracija deleža kisika v vdihanem zraku ostaja nespremenljiva, proizvajalec pa določi potreben pretok čistega kisika in ga ponavadi označi na samem Venturi nastavku. Posebni sistemi za aplikacijo kisika na zahtevo, nimajo kontinuiranega pretoka ampak dovajajo kisik samo, ko pacient to sam zahteva z začetkom vdiha (3-4).

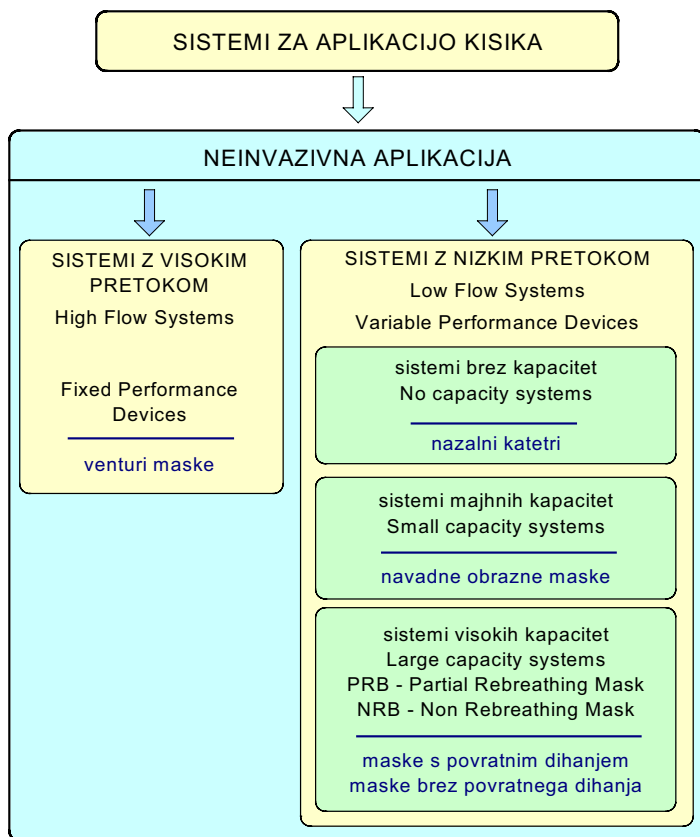
## Vrste sistemov za aplikacijo kisika

Funkcija sistemov za aplikacijo kisika je dovajanje zraka obogatene s kisikom za terapijske namene. Sisteme za aplikacijo kisika razdelimo v dve veliki skupini. Sisteme z **nizkim pretokom** (Low Flow ali Variable Performance Devices) in sisteme z **visokim pretokom** (High Flow ali Fixed Performance Devices). Razdelitev je prikazana na sliki 1.

Sistemi z nizkim pretokom ne zagotavljajo pacientu dovolj velik pretok, ki bi zagotovili njegove inspiratorne potrebe, zato mora pacient dodatno vdihovati okoliški

**Tabela 1.** Vrednosti maksimalnega pretoka (PIF) različnih dihalnih volumnov pri  $t_I=1$  s.

dihalni volumen $V_T$ [ml]	PIF [l/min]
300	18
400	24
500	30
600	36
700	42
800	48
900	54
1000	60



**Slika 1.** Razdelitev neinvazivnih sistemov za aplikacijo kisika

atmosferski zrak. Ta dodatni atmosferski zrak, zagotovi potrebe po dihalnem volumnu in se meša z dovajanim 100% kisikom. Pacient pri vdihu doseže maksimalni pretok vdihanega zraka ( $PIF - Peak Inspiratory Flow$ ), ki izhaja iz časa trajanja dihalnega enkratnega volumna ( $PIF=V_T/t_I$ ). Tabela 1 nam prikazuje izračunane vrednosti maksimalnega inspiratornega pretoka ( $PIF$ ) pri različnih dihalnih volumnih, kjer predpostavljamo trajanje inspiratorne faze 1 sekundo.

Pretok iz sistema za aplikacijo bi se moral ujemati s  $PIF$ , če bi hoteli zagotoviti inspiratorne potrebe, kar bi pomenilo zahtevane pretoke od 30  $l/min$  do 60  $l/min$ , v primeru dihalnih volumnov  $V_T$  od 500 ml do 1000 ml. Sistemi z nizkim pretokom, kot so nosni katetri in obrazne maske, takih vrednosti pretoka ne morejo doseči, zato jih uvrščamo med sisteme z nizkim pretokom. Sisteme za aplikacijo kisika z nizkim pretokom lahko nadalje razdelimo na:

- sisteme brez kapacitet shranjevanja čistega kisika,
- sisteme majhnih kapacitet shranjevanja čistega kisika,
- sisteme visokih kapacitet shranjevanja čistega kisika.

Kapacitete so v tem kontekstu mišljene kot rezervoarji, kjer se deponira čisti kisik. Ta kisik pacient vdihne, v prvem delu inspiratorne faze ( $t_I$ ). Čim večji je rezervoar, tem večjo količino 100% kisika pacient lahko vdihne. Preostanek inspiratornih potreb pacient vdihne iz atmosferskega zraka. Nosni katetri so sistemi brez zunanjih kapacitet (*No capacity systems*), medtem, ko v visoke kapacitete prištevamo maske z rezervoarji (*Large capacity systems*). Maske z rezervoarji se nadalje razdelijo v dve skupini: maske z delnim povratnim dihanjem ( $PRB - Partial Rebreathing Mask$ ) in na maske brez povratnega dihanja ( $NRB - Non Rebreathing Mask$ ). Zgodovinski začetki uporabe mask z rezervoarji segajo v leto 1938, ko so predstavili Boothby-Lovelace-Bulbulian masko ( $BLB$  maska). Ta maska je imela pomembno vlogo pri pilotih

v II svetovni vojni, saj je omogočala dihanje kisika na visokih višinah. Maska je imela inspiracijske in ekspiracijske zaklopke in je predhodnica današnjih  $NRB$  mask z rezervoarji.

Med sisteme z visokim pretokom (*High Flow Systems*) uvrščamo Venturi maske. Te maske dovajajo dovolj visoke pretoke, da zadovoljijo pacientovim potrebam po pretoku vdihanega zraka. Pri Venturi maskah so koncentracije deleža kisika v vdihanem zraku natančno določene in od tod tudi angleško ime *Fixed Performance Devices*.

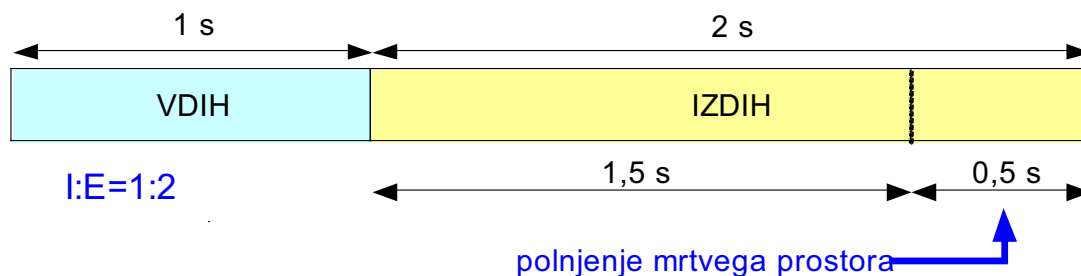
Razdelitev sistemov za aplikacijo kisika je ponekod tudi glede na pretok čistega kisika. Pod 6  $l/min$  govorimo o sistemih z nizkim pretokom. Med 6  $l/min$  in 12  $l/min$  so sistemi s srednjim pretokom ( $PRB$  maske, navadne maske). Pri sistemih z visokim pretokom so vrednosti pretokov med 12  $l/min$  in 15  $l/min$  ( $NRB$  maske).

### Metode izračunov pričakovanih vrednosti

Pri izračunih smo upoštevali konstantne parametre dihalnega volumna ( $V_T=500$  ml), frekvence dihanja ( $RR=20$ ) in ustreznega razmerja med vdihom in izdihom ( $I:E=1:2$ ). Čas trajanja vdihla ( $t_I$ ) je trajal 1 sekundo,



Slika 3. Hydro-Trach T Mk.II, Intersurgical



Slika 2. Parametri za izračune deležev kisika  $FIO_2$

čas izdiha ( $t_E$ ) pa 2 sekundi. Ekspiratorna pavza ( $t_{EP}$ ) znotraj faze izdiha je trajala 0,5 sekunde (slika 2).

V času ekspiratorne pavze se v večini sistemov polni mrtvi prostor s čistim kisikom (slika 2). Ta čisti kisik se nato v prvi fazi vdihne, v preostali fazi vdihne, pa je vdihani zrak mešanica atmosferskega zraka in kisika iz sistema.

Najenostavnejša aplikacija kisika, je popolnoma odprti sistem, oziroma preprihanje (*Blow-by, Wafting*) s čistim (100%) kisikom, ki piha blizu pacientovih ust. Za takšno obliko aplikacije lahko uporabimo tudi obrazno masko, ki jo ustrezno držimo nad pacientovimi usti, ali pa dovajamo kisik neposredno na sapnični tubus oziroma traheostomo. Obstajajo tudi sistemi, ki se namestijo na glavo in po cevi dovajajo kisik v neposredno bližino pacientovih ust (5-6).

Nosni katetri so sistemi brez možnosti zunanega deponiranja čistega kisika, zato se tam kisik nalaga v anatomskem prostoru. Pacientu se polni ta anatomski mrtvi prostor z dotokom kisika med pavzo med izdihom ( $t_{EP}$ ).

Princip aplikacije z navadno obrazno masko je podoben, le da dodatni rezervoar predstavlja notranjost obrazne maske, ki poveča kapaciteto prostora v katerem se deponira čisti kisik.

Največje zaloge kisika so v maskah z rezervoarji, kjer pacient vdihuje največji delež kisika v vdihanem zraku.

## Rezultati

### Odprti sistem aplikacije kisika (*Blow-by, Wafting*)

Pri popolnoma odprtih sistemih ni mogoče natančno izračunati pričakovan delež vdihanega kisika. Kisik pri teh sistemih dovajamo v atmosferski zrak, blizu pacientovih ust preko cevi po kateri teče 100% kisik in je preveč zunanjih parametrov, ki vplivajo na tak način aplikacije. Druga tehnika odprtega sistema je neposredno dovajanje čistega kisika na sapnični tubus ali traheostomo. Tak pristop se uporablja pri odvajanju intubiranih pacientov od ventilatorja, ko pričnejo samostojno dihati. Na sliki 3 je predstavljen Hydro-Trach sistem, kjer je v sredini konusni priključek za kisikovo cev, ob straneh pa vidimo hidroskopični material, ki deluje kot vlažilnik oziroma izmenjevalnik toplote in vlage (*Švedski nos*). Atmosferski zrak prihaja od strani, medtem ko v osrednji del vlažilca dovajamo čisti kisik. Pri intubiranih pacientih ali pacientih s traheostomo, tak vlažilec pritrdimo na sapnični tubus ali traheostomo s standardno ISO 15 mm konusno spojko. Hydro-Trach omogoča

tudi enostaven dostop do sapničnega tubusa v primeru potrebne aspiracije.

Pacientu, ki smo ga kontrolirano predihavali z ventilatorjem, z na primer 50% kisikom, želimo pri odvajanju od ventilatorja, v prvi fazi dovajati enako količino kisika. Potrebno je izračunati, kolikšen pretok kisika bomo nastavili na pretočnem merilniku, da bo pacient s spontanim dihanjem skozi sapnični tubus dobil enako koncentracijo kisika kot iz pljučnega ventilatorja. Pri izračunu  $F_I O_2$  za omenjen vlažilec Hydro-Trach izhajamo iz razmerja med količino čistega kisika in skupnega dihalnega volumna:

$$F_I O_2 = \frac{\text{volumen} O_2 + (0,21 \times (V_T - \text{volumen} O_2))}{V_T}$$

Atmosferski zrak ( $V_T - \text{volumen} O_2$ ) moramo pomnožiti s faktorjem 0,21 zaradi prisotne 21% koncentracije kisika. Iz enačb v naslednjih korakih izpeljemo volumen čistega kisika ( $\text{volumen} O_2$ ):

$$F_I O_2 = \frac{\text{volumen} O_2 + 0,21 \times V_T - 0,21 \times \text{volumen} O_2}{V_T}$$

$$F_I O_2 = \frac{\text{volumen} O_2 + 0,21 \times V_T - \text{volumen} O_2}{V_T}$$

$$F_I O_2 = \frac{\text{volumen} O_2}{V_T} + 0,21 - \frac{0,21 \times \text{volumen} O_2}{V_T}$$

$$F_I O_2 - 0,21 = \text{volumen} O_2 \times \left( \frac{1 - 0,21}{V_T} \right)$$

$$\text{volumen} O_2 = \frac{F_I O_2 - 0,21}{\left( \frac{1 - 0,21}{V_T} \right)}$$

Prejšnje enačbe so izhajale iz deleža kisika, ki ga vdihne pacient pri enkratnem volumnu, pomešanega z atmosferskim zrakom. Iz enačb smo na koncu izpeljali kako se lahko izračuna volumen čistega kisika. Naslednja spodnja enačba pa dodatno upošteva volumen kisika, ki ga dovajamo iz jeklenke pri določenem pretoku ( $O_2$  flow), katerega nastavimo na pretočnem merilniku. Volumen vdihanega čistega kisika je odvisen od časa trajanja vdih  $t_p$ , merimo pa ga v ml. Pretočni merilniki se nastavljajo v litrih/minuto zato je potrebna konverzija. Če hočemo dobiti pretok v ml/s, moramo pretok kisika

na pretočnem merilniku ( $O_2$  flow) pomnožiti s kvocien-  
tom 1000/60:

$$\text{volumen } O_2 \text{ [ml]} = t_1 \times O_2 \text{ flow} \times \frac{1000}{60}$$

$$O_2 \text{ flow} = \frac{100 \times F_{I}O_2 - 21}{\left(\frac{100 - 21}{V_T}\right) \times t_1} \times \frac{60}{1000}$$

Enačbe se nato izenačijo in dobimo pretok kisika, ki je odvisen od želene vrednosti  $F_{I}O_2$ , enkratnega dihalnega volumna ( $V_T$ ) in časa trajanja inspiracijske ( $t_i$ ) faze:

$$O_2 \text{ flow} = \frac{F_{I}O_2 - 0,21}{\left(\frac{1 - 0,21}{V_T}\right) \times t_1} \times \frac{60}{1000}$$

Desno stran zgornje enačbe pomnožimo s kvocien-  
tom 100, saj je  $F_{I}O_2$  podan v procentih in dobimo konč-  
no enačbo za izračun potrebnega pretoka na pretočnem  
merilniku, za doseganje želenega deleža kisika:

Če upoštevamo normalni vzorec dihanja ( $V_i=500$  ml  
in  $t_i=1$  s) in parametre vstavimo v prejšnjo enačbo pri-  
demo do enostavnejše formule za zagotovitev ustreznega  
deleža kisika  $F_{I}O_2$ :

$$O_2 \text{ flow} = \frac{100 \times F_{I}O_2 - 21}{\left(\frac{100 - 21}{500}\right) \times 1} \times \frac{60}{1000} = \frac{100 \times F_{I}O_2 - 21}{2,6333}$$

Uporabo enačbe pokažimo na primeru, ko je paci-  
ent bil predihavan na ventilatorju z deležem kisika 50%  
(0,5). Delež kisika vstavimo v zgornjo formulo in izraču-  
namo pretok kisika, ki ga moramo dovajati na sapnični  
tubus skozi konusni priključek traheostomskega vlažil-

**Tabela 2:** Izračunane natančne vrednosti<sup>1</sup> in empirične vrednosti<sup>2</sup> pretoka za želene deleže  $F_{I}O_2$  pri času inspirirja  $t_i=1$  s in  $V_T=500$  ml

$F_{I}O_2$ [%]	$O_2$ flow <sup>1</sup> [l/min]	$O_2$ flow <sup>2</sup> [l/min]	Razlika [l/min]
30	3,42	3,00	0,42
40	7,22	6,33	0,88
50	11,01	9,67	1,35
60	14,81	13,00	1,81
70	18,61	16,33	2,27
80	22,41	19,67	2,74
90	26,20	23,00	3,20
100	30,00	26,33	3,67

**Tabela 3:** Izračunane vrednosti pretoka kisika za doseganje želene vrednosti  $F_{I}O_2$  pri različnih dihalnih vzorcih ( $V_T=400$  ml,  $V_T=600$  ml,  $t_i=0,9$  s in  $t_i=1,1$  s)

$F_{I}O_2$ [%]	$O_2$ flow [l/min] $V_T=400$ $t_i=0,9$	$O_2$ flow [l/min] $V_T=400$ $t_i=1,1$	$O_2$ flow [l/min] $V_T=600$ $t_i=0,9$	$O_2$ flow [l/min] $V_T=600$ $t_i=1,1$
30	2,46	3,01	3,69	4,51
40	5,19	6,35	7,79	9,52
50	7,93	9,69	11,89	14,54
60	10,66	13,03	15,99	19,55
70	13,40	16,37	20,10	24,56
80	16,13	19,72	24,20	29,57
90	18,87	23,06	28,30	34,59
100	21,60	26,40	32,40	39,60

ca:  $(50-21)/2,6333=11$  l/min. V enotah intenzivne nege, največkrat empirično izračunajo potreben pretok tako, da od želenega deleža kisika odštejejo število 21 in vse skupaj delijo s številom 3 (Janja Slemenjak, Klinični Center Ljubljana, Infekcijska klinika). Na primer, če je pacient predihavan z 40% kisikom je empirični izračun naslednji:  $40-21=19$  in  $19/3=6,33$  l/min. Tako dobijo okvirne vrednosti potrebnega pretoka kisika, ki pa ne odstopajo preveč od natančnih vrednosti, kar je prikazano v tabeli 2. Izračunana natančna vrednost za želen 40% delež kisika bi bil nekoliko večja in sicer 7,22 l/min.

V tabeli 3 so prikazani potrebni pretoki, za zagotovitev ustreznega deleža kisika ( $F_{I,O_2}$ ) pri različnih dihalnih vzorcih pacienta. Prva dva stolpca prikazujeta rezultate pri enkratnem dihalnem volumnu  $V_T=400$  ml in dveh različnih časih inspiracijske faze ( $t_I=0,9$  s in  $t_I=1,1$  s). Zadnja dva stolpca tabele vsebujeta izračune za nekoliko večjo vrednost dihalnega volumna ( $V_T=600$  ml), medtem ko sta časa inspiririja enaka kot v prvih dveh stolpcih ( $t_I=0,9$  s in  $t_I=1,1$  s).

Z merilnikom pretoka na kisikovi jeklenki, ki omogoča maksimalno nastavitev 25 l/min bi pri dihalnem vzorcu  $V_T=600$  in  $t_I=1,1$  dosegli okrog 70% delež kisika v vdihanem zraku.

### Nosni katetri

Na sliki 2 imamo prikazane parametre, ki ponazarjajo faze, katere ustrezajo posameznim fazam v funkcijskem delovanju nosnega katetra. Pri izračunih upoštevamo anatomski mrtvi prostor 2 ml/kg pacienta s telesno maso 75 kg, kar znaša 150 ml. Od celotnega mrtvega prostora je 1/3 zgornjega dela prostora dihal (50 ml), namenjena shranjevanju čistega kisika. Ta mrtvi prostor sestavlja nosna votlina, nosni del žrela in ustni del žrela. Za izračun deleža vdihanega zraka se uporabljajo že omenjeni standardni dihalni parametri:

$$V_T=500 \text{ ml,}$$

$$I:E=1:2,$$

$$\text{pavza med izdihom } t_{EP}=0,5 \text{ s,}$$

$$t_I=1 \text{ s,}$$

$$t_E=2 \text{ s.}$$

Če bi sistem za aplikacijo kisika bil sposoben dovajati zrak s pretokom 30 l/min v času vdiha bi govorili o sistemih z visokim pretokom. Tedaj bi nosni kateter uspel dovajati 100% kisik ob  $V_T=500$  ml v času  $t_I=1$ s. Vendar so pretoki skozi nosni kateter mnogo manjši od 30 l/min zato govorimo o sistemih z nizkim pretokom. Tabela 4 nam prikazuje pretoke čistega kisika skozi nosni kateter v območju od 1 l/min do 6 l/min preračunane v manjše enote ml/s.

V času pavze med izdihom se skozi nosni kateter polni anatomski mrtvi prostor ( $V_d$ ), kjer imamo na razpolago maksimalno kapaciteto anatomskega rezervoarja zgornjih dihalnih poti, 50 ml. Pri pretoku 1 l/min se ta mrtvi prostor v pavzi med izdihom napolni z 8,33 ml čistega kisika ( $16,7 \text{ ml/s} \times 0,5 \text{ s} = 8,33 \text{ ml}$ ). Ta volumen 100% kisika se meša pri fazi vdiha z atmosferskim zrakom in dodatnim 100% kisikom ki ga uspe dovajati nosni kateter v trajanju inspiracijskega cikla ( $t_I=1$  s). V eni sekundi pacient tako dodatno vdihne 16,7 ml čistega kisika saj je pretok skozi kateter 16,7 ml/s ( $16,7 \text{ ml/s} \times 1 \text{ s} = 16,77 \text{ ml}$ ). Razliko do dihalnega volumna ( $V_T$ ) pacient vdihne iz atmosferskega zraka kjer je koncentracija kisika 21%. Vdihan volumen atmosferskega zraka izračunamo tako, da od dihalnega volumna odštejemo obe izračunani vrednosti volumna 100% kisika:

$$500\text{ml} - 8,33\text{ml} - 16,7\text{ml} = 475\text{ml.}$$

Koncentracija kisika v vdihanem zraku se ob upoštevanju zgornjih parametrov izračuna na naslednji način:

$$F_{I,O_2} = \frac{8,33\text{ml} + 16,7\text{ml} + 0,21 \times 475 \text{ ml}}{500\text{ml}} = 25\%$$

**Tabela 4.** Delež vdihanega kisika pri dveh metodah izračuna upoštevajoč 20% 1 koncentracijo kisika v zraku in koncentracijo 21% 2 v zunanjem zraku.

pretok O <sub>2</sub> [l/min]	pretok O <sub>2</sub> [ml/s]	polnjenje V <sub>d</sub> z O <sub>2</sub> [ml]	atmosferski zrak [ml]	F <sub>I,O<sub>2</sub></sub> <sup>1</sup> (%)	F <sub>I,O<sub>2</sub></sub> <sup>2</sup> (%)
1	16,7	8,33	475	24	25
2	33,3	16,67	450	28	29
3	50,0	25,00	425	32	33
4	66,7	33,33	400	36	37
5	83,3	41,67	375	40	41
6	100,0	50,00	350	44	45

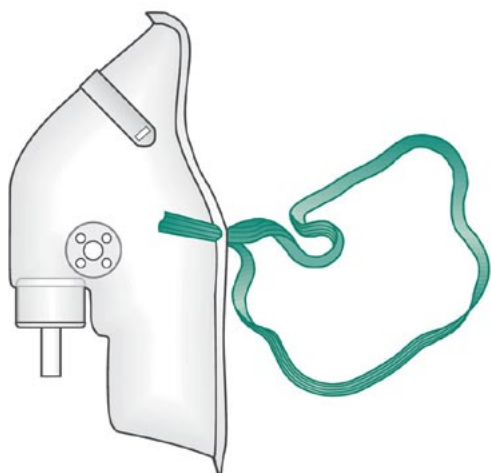
Na podoben način lahko izračunamo koncentracijo kisika v vdihanem zraku za pretok 3 l/min (50 ml/s) skozi nosni kateter:

- (1) Polnjenje  $V_d$  z  $O_2$ :  $50 \text{ ml/s} \times 0,5 \text{ s} = 25 \text{ ml}$ ,
- (2) Vdih ( $t_i=1s$ ):  $50 \text{ ml/s} \times 1 \text{ s} = 50 \text{ ml}$ ,
- (3) Vdih atmosferskega zraka:  
 $500 \text{ ml} - 25 \text{ ml} - 50 \text{ ml} = 425 \text{ ml}$ ,

Delež kisika v vdihanem zraku:

$$F_{I}O_2 = \frac{25 \text{ ml} + 50 \text{ ml} + 0,21 \times 425 \text{ ml}}{500 \text{ ml}} = 33\%$$

V tabeli 4 je prikazano kolikšen delež zraka iz atmosfere se pomeša s kisikom iz tlačne posode ali iz kisikove plinske instalacije. Deleži kisika so izračunani upošte-



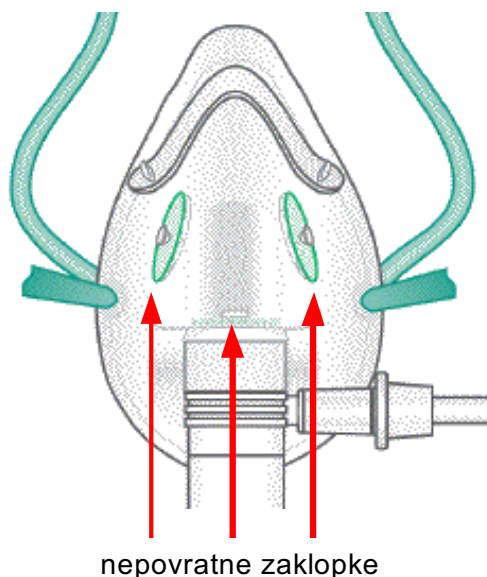
Slika 4. Navadna obrazna maska, Intersurgical

vajoč koncentracijo kisika v zraku 0,21 in zaokroženo vrednost koncentracije v zraku 0,2.

### Navadna obrazna maska

Navadna obrazna maska prikazana na sliki 4 spada v skupino sistemov za aplikacijo kisika z nizkim pretokom. Notranjost maske predstavlja dodatni rezervoar ( $V_{D-m}$ ), ki ga prištejemo k anatomskemu mrtvem prostoru ( $V_{D-a}$ ) in je odvisen od oblike same maske.

Na ta način se poveča skupni mrtvi prostor, oziroma kapaciteta shranjevanja kisika ( $V_D=V_{D-m}+V_{D-a}$ ). Mrtvi prostor maske, zaradi različnih oblik mask in proizvajalcev, znaša med 40 ml in 100 ml. Takim sistemom pra-



nepovratne zaklopke

Slika 5 Maska z rezervoarjem in nepovratnim dihanjem (NRB), Intersurgical

Tabela 5. Pretoki in izračunane vrednosti pri aplikaciji navadne obrazne maske

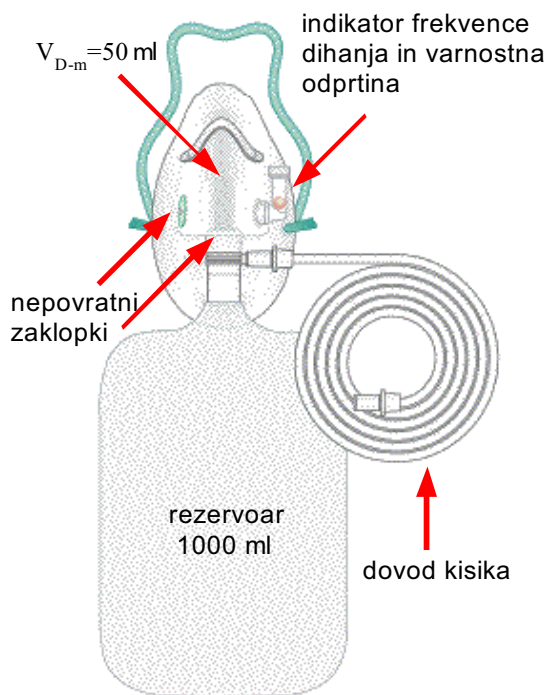
pretok [l/min]	polnjenje $V_D$ ( $t=0,5 \text{ s}$ ) [ml]	izpodrivanje $CO_2$ [ml]	$F_{I}O_2$ ( $V_T=300 \text{ ml}$ )	$F_{I}O_2$ ( $V_T=500 \text{ ml}$ )	$F_{I}O_2$ ( $V_T=800 \text{ ml}$ )
4	33,3	100	47%	37%	31%
5	41,7	125	54%	41%	33%
6	50,0	150	61%	45%	36%
7	58,3	175	67%	49%	38%
8	66,7	200	74%	53%	41%
9	75,0	225	80%	57%	43%
10	83,3	250	87%	61%	46%
11	91,7	275	93%	64%	48%
12	100,0	300	100%	68%	51%

vimo tudi sistemi majhnih kapacitet (*Small Capacity Systems*).

V času ekspiratorne pavze se polni mrtvi prostor s čistim kisikom, kar je prikazano v prvem stolpcu tabele 5. Količina dovedenega čistega kisika v mrtvi prostor pri pretoku 4 l/min znaša 33,3 ml, pri pretoku 12 l/min, pa je ta količina kisika 100 ml. Pri teh maskah je osnovni predpogoj za pravilno delovanje, da izpodrinemo izdihan zrak z visoko koncentracijo CO<sub>2</sub> in s tem preprečimo ponovno vdihavanje ogljikovega dioksida.

### Maske z rezervoarji

Maska z rezervoarjem in povratnim dihanjem (PRB) ima rezervoar v obliki vrečke iz PVC materiala, ki je nameščen na spodnji odprtini maske. Kisik prihaja skozi

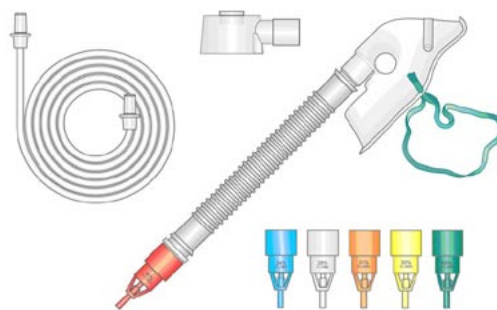


Slika 6. Maska z rezervoarjem (NRB) in indikatorjem dihanja, Intersurgical

spojko, ki se nahaja med masko in rezervoarjem. Ti rezervoarji so kapacitete med 600 in 1000 ml in predstavljajo dodatni večji rezervoar k maski in anatomskemu prostoru. Ta maska nima nobenih vgrajenih zaklopk.

Maske brez povratnega dihanja (NRB) onemogočajo povratno dihanje. Pri teh maskah so vgrajene dodatne zaklopkice, v primerjavi z PRB masko, ki usmerjajo zrak samo v eno smer. Na sliki 5 je NRB maska s tremi nepovratnimi zaklopkami. Večkrat je ena stranska zaklopka zamenjana z indikatorjem dihanja, kar je prikazano na sliki 6.

Pri teh sistemih za aplikacijo kisika je teoretično na razpolago 100% delež kisika v vdihanem zraku. Varnostna odprtina ima funkcijo, da omogoča pacientu dihanje v primeru, če se prekine dotok kisika oziroma, če se izprazni jeklenka s kisikom. Pazljivost je potrebna kadar imamo nepokretne paciente brez nadzora, kateri bi se lahko zadušili, v primeru, da se prekine dotok kisika. Presek cevi za dovod kisika je pri maski na sliki 6 posebne zvezdaste oblike, ki omogoča, da kisik teče tudi, ko je cevka prepognjena. Zvezdasta oblika preseka ustvari več lumnov (kanalov) znotraj celotne kisikove cevke. To je dodatni varnostni sistem (*anti-kink, kink resistant, non-crush oxygen tubing*), ki se pokaže uporaben, če zapeljemo s kolesom vozička ali postelje na kisikovo



Slika 7: Venturi maska z različnimi nastavki, Intersurgical

Tabela 6: Izračunani pretoki za Venturi sistem in razmerja med atmosferskim zrakom in kisikom

F <sub>I</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> pretok [l/min]	pretok zraka [l/min]	skupni pretok [l/min]	razmerje zrak:kisik
24%	2	51	53	25
28%	4	41	45	10
31%	6	41	47	7
35%	8	37	45	5
40%	10	32	42	3
60%	15	15	30	1

cevko, ali jo na kak drug način pripremo. Pri navadnih cevkah bi se dovod kisika prekinil.

### Venturi maske

Venturi maske spadajo v sisteme, ki zadovoljijo pacientovim potrebam po vdihanem zraku. Pretoki so v teh sistemih dovolj visoki, da zagotovijo potrebo po pretoku v inspiratorni fazi. Na sliki 7 je prikazan tak sistem, kjer vidimo dovodno cev po kateri priteče 100% kisik. Zraven cevi je nastavek, ki omogoča dodatno morebitno vlaženje, ter maska z različnimi Venturi nastavki. Venturijev učinek nastane zaradi Bernoulijevega pojava, kadar zaradi zoženja cevi naraste hitrost in pade tlak v cevi po kateri teče plin. Venturi je Bernoulijev učinek uporabil tako, da je napravil stranske odprtine in tako omogočil, da padec tlaka vsrka okoliški zrak, ki se nato pomeša s čistim kisikom. Barve Venturi nastavkov so na sliki 7 kodirane za vsako posamezno določeno vrednost deleža kisika: modra (24%, 2 l/min), bela (28%, 4 l/min), oranžna (31%, 6 l/min), rumena (35%, 8 l/min), rdeča (40%, 10 l/min) in zelena (60%, 15 l/min). Uporablja se tudi venturi nastavek roza barve, ki daje 50% koncentracijo kisika, pri pretoku kisika 13 l/min.

Venturi sistemi dovajajo natančno določeno koncentracijo deleža kisika, ki se izračuna po enačbah, ki sledijo. Skupni pretok skozi Venturi sistem je vsota pretoka čistega kisika in pretoka atmosferskega zraka:

$$\text{skupni pretok} = \text{O}_2 \text{ pretok} + \text{pretok zraka.}$$

Delež kisika v mešanici se izračuna kot razmerje med prispevkom kisika iz tlačne posode in prispevkom kisika iz atmosferskega zraka ( $0,21 \times \text{pretok zraka}$ ), ter skupnim pretokom:

$$F_1\text{O}_2 = \frac{\text{O}_2 \text{ pretok} + (0,21 \times \text{pretok zraka})}{\text{skupni pretok}}$$

Če iz zgornje enačbe izpeljemo pretok kisika iz tlačne posode ( $\text{O}_2$  pretok) dobimo naslednje zveze:

$$\text{O}_2 \text{ pretok} = F_1\text{O}_2 \times \text{skupni pretok} - 0,21 \times \text{pretok zraka,}$$

$$\text{O}_2 \text{ pretok} = F_1\text{O}_2 \times \text{skupni pretok} - 0,21 \times (\text{skupni pretok} - \text{O}_2 \text{ pretok}),$$

$$\text{O}_2 \text{ pretok} \times (1 - 0,21) = \text{skupni pretok} (F_1\text{O}_2 - 0,21),$$

$$\text{O}_2 \text{ pretok} = \frac{\text{skupni pretok} \times (F_1\text{O}_2 - 0,21)}{0,79}$$

$$\text{skupni pretok} = \frac{\text{O}_2 \text{ pretok} \times 0,79}{F_1\text{O}_2 - 0,21}$$

V tabeli 6 so izračunane vrednosti pretoka atmosferskega zraka, skupnega pretoka in razmerja med zrakom in kisikom.

### Razprava

Izračunane vrednosti se od realnih razlikujejo predvsem zaradi različnih zunanjih vzrokov, kot je tesnjenje obrazne maske, natančnosti pretočnega merilnika ali zaradi različnih vzorcev dihanja pacientov. Ustrezni praktični pokazatelj učinkovitosti oksigenacije sistema, je saturacija arterijske krvi s kisikom, ki jo največkrat neinvazivno merimo s pulznim oksimetrom.

Realni delež kisika, ki ga dovajamo pacientu je pri uporabi nosnih katetrov v nizkih koncentracijah,  $F_1\text{O}_2 = 24\%$  do  $40\%$  (pretok do 6 l/min). Navadne obrazne maske omogočajo dovajanje srednjih koncentracij kisika,  $F_1\text{O}_2 = 35\%$  do  $50\%$  pri pretoku 5 do 10 l/min (7,12). Sistemi za dovajanje kisika najvišjih koncentracij so obrazne maske z dodatnim rezervoarjem (NRB – Non Rebreathing Mask), kjer so koncentracije deleža vdihanega kisika  $F_1\text{O}_2 = 60\%$  do  $80\%$  (7).

Delež kisika v plinski mešanici zraka, ki ga dovajamo v sistem za aplikacijo kisika označujemo s kratico  $F_D\text{O}_2$  (Fractional concentration of Oxygen Delivered). Pri nosnih katetrih in obraznih maskah je ta doveden delež skoraj vedno čisti kisik  $F_D\text{O}_2=100\%$ , ki ga dovajamo iz plinskih instalacij ali kisikovih tlačnih posod. Če dovajamo kisik iz anestezijskega aparata ali pljučnega ventilatorja, je ta delež lahko tudi različen od 1 (na primer 40%, 50%, 60%, ...).

Aplikacija z odprtim sistemom (Blow-by) je specifična aplikacija in jo klasificiramo kot sistem z majhnim pretokom, brez rezervoarja. Prav tako so realne vrednosti v tej aplikaciji  $F_1\text{O}_2$  odvisne od mnogih dejavnikov, zato je tak način aplikacije v uporabi, ko ostali sistemi niso mogoči. Je najmanj invazivna metoda in se mnogokrat uporablja pri aplikaciji kisika otrokom, ko cev po kateri teče kisik namestimo v bližino otrokovih ust. Pri aplikaciji preko traheostome se večje razlike med izračunano in empirično, oziroma zaokroženo vrednostjo pojavljajo pri višjih želenih vrednostih deleža kisika. Klasični merilniki pretoka s spremenljivim ustjem omogo-

čajno nastavitve čistega kisika med 1 l/min in 25 l/min. Ta sistem ni ekonomičen in ne omogoča deponiranja kisika v rezervoarjih, bodisi anatomskih ali umetnih.

Pri nosnih katetrih pride do razlike  $F_iO_2$  ob upoštevanju različnih vrednosti koncentracij kisika v atmosferskem zraku (tabela 4). V prvem primeru se upošteva zaokrožena koncentracija kisika v zraku 0,2%, v drugem primeru pa znaša v izračunu koncentracija kisika, ki jo upoštevamo v zraku 0,21%. To je verjetno razlog zakaj različni avtorji in različni proizvajalci navajajo različne vrednosti deleža kisika pri določenem pretoku (11, 12, 22). Ob upoštevanju natančnejše vrednosti deleža kisika (0,21%) dobimo vrednosti  $F_iO_2$  od 25% do 45% pri pretoku čistega kisika skozi kateter od 1 l/min do 6 l/min. Vsako povečanje pretoka kisika za 1 l/min pomeni povečanje  $F_iO_2$  za 4%. Vidimo, da pretok 6 l/min predstavlja zgornjo mejo pri kateri je v pavzi med izdihom popolnoma napolnjen anatomski mrtvi prostor (tabela 4). Vrednosti pretoka nad to mejo ne vplivajo na delež dovedenega kisika v vdihanem zraku. Sistem ne bi bil ekonomičen, saj bi nam višek čistega kisika uhajal v okoliški prostor. Nad vrednostjo pretoka 4 l/min je potrebno vlaženje vdihanega zraka saj precej izsušimo nosno sluznico, prav tako bi visoki pretoki postali moteči za pacienta. Posebna oblika nosnih katetrov ima dodatni rezervoar kapacitete okrog 20 ml, s katerim povečamo učinkovitost dovajanja kisika. Nasičenost arterijske krvi se poveča za 2,6% pri uporabi pretoka 1 l/min v primerjavi z nosnim katetrom brez rezervoarja (23). Nosni katetri se uporabljajo za dovajanje nižjih koncentracij kisika. So neinvazivni in najmanj dražijo pacienta.

Da preprečimo akumulacijo  $CO_2$  pri navadnih obraznih maskah, ga izpodrivamo med izdihom v trajanju 1,5 s. V tabeli 5 je v tretjem stolpcu izračunan volumen čistega kisika, ki prihaja v masko glede na njegov pretok. Pri pretoku 4 l/min lahko izpodrinemo 100 ml ogljikovega dioksida, pri pretoku 12 l/min pa 300 ml. Zadnji trije stolpci v tabeli 5 predstavljajo izračunane deleže, glede na tri različne enkratne dihalne volumne ( $V_T=300$  ml,  $V_T=500$  ml in  $V_T=800$  ml). Pri pretoku čistega kisika 10 l/min opazimo mnogo večja odstopanja  $F_iO_2$  kot pa pri nižji vrednosti 5 l/min. Pri  $V_T=300$  ml je  $F_iO_2$  87%, pri  $V_T=800$  ml pa je  $F_iO_2$  le 46%. Pri oceni deleža kisika igra najpomembnejšo vlogo, globina pacientovega dihanja. Pri navadnih obraznih maskah je

bolje, če je mrtvi prostor čim manjši, da dosežemo višje koncentracije.

Maske z rezervoarji in delnim povratnim dihanjem (PRB) lahko dostavljajo v realnih razmerah  $F_iO_2$  od 0,40 do 0,60 pri pretokih 6–8 l/min (7). Pri PRB maski mora biti pretok nastavljen na tako vrednost, da se rezervoar sprazni le za 1/3. Tako sme v rezervoar le izdihan zrak, ki ni sodeloval pri izmenjavi plinov v pljučnih mešičkih. Pred pričetkom aplikacije kisika napolnimo rezervoar, tako da zgornjo odprtino rezervoarja zapremo s prstom. Prehodnost zaklopke testiramo v naslednjem koraku s pritiskom na rezervoar, ki se mora sprazniti. Če se rezervoar ne izprazni, masko zavržemo saj je zaklopka blokirana. Pri maski s povratnim dihanjem, pacient zrak iz anatomskega mrtvega prostora (150 ml), izdiha v rezervoar. Ta plin ni sodeloval pri izmenjavi plinov v pljučnih mešičkih in ima visok delež kisika  $PO_2$  ter nizko vrednost delnega tlaka  $PCO_2$ . Pacient lahko ponovno vdahne ta zrak pri naslednjem vdihu. Zadnji dve tretjini izdihanega zraka, ki vsebujeta večjo količino  $CO_2$  pa odvajamo skozi dve odprtini na bočnih straneh maske. Masko brez povratnega dihanja (NRB) mora imeti rezervoar najmanj s kapaciteto, kot je pacientov enkratni volumen.

Venturi maske pri nizkih vrednostih PIF maske delujejo dobro, medtem ko je pri visokih vrednostih opaziti nekoliko variabilnosti (4). Nad 40% se lahko zgodi, da ne zagotovimo ustrezno inspiratorno potrebo pacienta. Venturi nastavek namreč ni sposoben dati večji totalni pretok. S povečanjem pretoka kisika ne naraste koncentracija, ampak se poveča samo totalni pretok.

#### Zahvala

Hvala Razvojnemu in raziskovalnemu oddelku podjetja Intersurgical Ltd. Crane House, Molly Millars Lane, Wokingham, Berkshire, in njihovem slovenskemu zastopniku za dragocene podatke, informacije in slikovni material.

## Literatura

1. European Resuscitation Council guidelines for resuscitation 2005. *European Resuscitation Council. Resuscitation* 2005; 67 (2): 89-90.
2. Ganeshan A, Quen Hon L, Soonawalla ZF. Oxygen: Can we prescribe it correctly? *Eur J Intern Med* 2006; 17: 355-9.
3. Bliss PL, McCoy RW, Adams AB. Characteristics of demand oxygen delivery systems: maximum output and setting recommendations. *Respir Care* 2004; 49: 160-5
4. Tiep BL, Carter R, Nicotra B, Berry J, Phillips RE, Otsap B. Demand oxygen delivery during exercise. *Chest* 1987; 91: 15-20.
5. Ling E, McDonald L, Dinesen TR, DuVall D. The OxyArm - a new minimal contact oxygen delivery system for mouth or nose breathing. *Can J Anaesth.* 2002; 49: 297-301.
6. Dinesen T, McDonald L, McDonald S, DuVall D. A comparison of the OxyArm oxygen delivery device and standard nasal cannulae in chronic obstructive pulmonary disease patients. *Respir Care* 2003; 48: 120-3.
7. By Kallstrom TJ, AARC Clinical Practice Guideline: oxygen therapy for adults in the acute care facility 2002 revision & update. *American Association for Respiratory Care (AARC), Respiratory Care [Respir Care]*, 2002 Jun; Vol. 47 (6), pp. 717-20;
8. Jerry P. Nolan, Charles D. Deakin, Jasmeet Soar, Bernd W. Böttiger, Gary Smith, *European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2005 Section 4. Adult advanced life support.*
9. Hill SL, Barnes PK, Hollway T, Tennant R. Fixed performance oxygen masks: an evaluation. *British Medical Journal (Clin Res Ed)*. 1984 Apr 28;288(6426):1261-3.
10. Gary CW. *Basic Clinical Lab Competencies for Respiratory Care: An integrated approach (ed 4)*. NY, Thomson Learning, 2003, pp 219-238.
11. Gary CW. *Equipment theory for respiratory care (ed 4)*, NY, USA, Thomson Learning, 2005, pp 64-95.
12. Cairo JM, Susan PP. *Mosby's respiratory care equipment (ed 7)*, Philadelphia, USA, Elsevier Health Science, 2004, pp 58-85
13. Davay JA, Diba A. *Ward's anaesthetic equipment (ed 5)*, Philadelphia, USA, Elsevier Health Science, 2005, pp 215-230.
14. Hill SL, Barnes PK, Hollway T, Tennant R. Fixed performance oxygen masks: an evaluation. *Br Med J (Clin Res Ed)*. 1984, 28; 288(6426):1261-3.
15. McCoy R. Oxygen-conserving techniques and devices. *Respir Care* 2000; 45: 95-103.
16. Bakr AF, El-Attar A. Oxygen concentrations at the rear and front of the bag in bag valve mask devices during oxygenation of neonates. *Resuscitation* 2005; 66: 217-23.
17. Quintana S, Martinez Perez J, Alvarez M, Vila JS, Jara F, Nava JM. Maximum FIO<sub>2</sub> in minimum time depending on the kind of resuscitation bag and oxygen flow. *Intensive Care Med.* 2004; 30: 155-8.
18. Bateman NT, Leach RM. ABC of oxygen. *Acute oxygen therapy.* *BMJ.* 1998; 317: 798-801.
19. Breakell A, Townsend-Rose C. The clinical evaluation of the Respi-check mask: a new oxygen mask incorporating a breathing indicator. *Emerg Med J.* 2001; 18: 366-9.
20. Sasaki H, Yamakage M, Iwasaki S, Mizuuchi M, Namiki A. Design of oxygen delivery systems influences both effectiveness and comfort in adult volunteers. *Can J Anaesth.* 2003; 50: 1052-5.
21. Waldau T, Larsen VH, Bonde J. Evaluation of five oxygen delivery devices in spontaneously breathing subjects by oxygraphy. *Anaesthesia* 1998; 53: 256-63.
22. Scott M. *Family Practice Notebook (www.fpnotebook.com)*, 2000, pp 4831.
23. Tiep BL, Nicotra B, Carter R, Belman MJ, Mittman C. Evaluation of a low-flow oxygen-conserving nasal cannula. *Am Rev Respir Dis.* 1984;130(3): 500-2.