



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta biomedicínského inženýrství (FBMI)
Katedra biomedicínské techniky**

**Analýza dýchacích okruhů pro experimenty
s dýcháním v lavinovém sněhu**

**Analysis of breathing circuits for breathing
experiments in avalanche**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika
Studijní obor: Biomedicínský technik

Vedoucí práce: prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.

Jan Filip

Kladno 2016

Katedra biomedicínské techniky

Akademický rok: 2015/2016

Z a d á n í b a k a l á ř s k é p r á c e

Student: **Jan Filip**
Obor: Biomedicínský technik
Téma: **Analýza dýchacích okruhů pro experimenty s dýcháním v lavinovém sněhu**
Téma anglicky: Analysis of breathing circuits for breathing experiments in avalanche snow

Zásady pro vypracování:

Analyzujte vliv dýchacích okruhů používaných při experimentech s dýcháním v lavinovém sněhu na koncentrace kyslíku a oxidu uhličitého v průběhu dechového cyklu. Určete jejich vliv na spolehlivost určování těchto parametrů lékařským monitorem. Analyzujte, jaký vliv na průběhy koncentrací má přítomnost a velikost vzduchové kapsy ve sněhu. K analýze použijte též data získaná při experimentálním dýchání dobrovolníků do sněhu.

Seznam odborné literatury:

- [1] Brugger H. et al., Hypoxia and hypercapnia during respiration into an artificial air pocket in snow: implications for avalanche survival, Resuscitation, ročník 58, číslo 1, 2003, 81-88 s.
[2] Roubík K., Sieger L., Sýkora K., Work of Breathing into Snow in the Presence versus Absence of an Artificial Air Pocket Affects Hypoxia and Hypercapnia of a Victim Covered with Avalanche Snow: A Randomized Double Blind Crossover Study, PLOS ONE, ročník 10, číslo 12, 2015, e0144332 s.

zadání platné do: 30.09.2017

Vedoucí: prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.

Konzultant: Ing. Ladislav Sieger, CSc., Mgr. Karel Sýkora

.....
vedoucí katedry / pracoviště

.....
děkan

V Kladně dne 22.02.2016

Název bakalářské práce

Analýza dýchacích okruhů pro experimenty s dýcháním v lavinovém sněhu

Abstrakt

Při experimentech v lavinovém sněhu jsou často pro sledování stavu probanda používány přístroje, které měří koncentraci CO_2 ve vydechovaném plynu a z koncentrační křivky následně vypočítávají koncentraci CO_2 ve vydechovaném plynu na konci výdechu (EtCO_2). Cílem této práce je zjistit, zda v případě patientského monitoru Datex-Ohmeda S/5 vzniká při vyhodnocování parametru EtCO_2 odchylka od skutečné hodnoty tohoto parametru. V případě, že k této odchylce dochází, tak kvantifikovat s jakou četností. V neposlední řadě je cílem zjistit, co je příčinou nesprávné funkce monitoru. Pro kvantifikaci vzniku odchylky byla použita data z experimentu, při kterém autoři zjišťovali velikost dechové práce v závislosti na přítomnosti ve sněhu uměle vytvořené vzduchové kapsy. Data z experimentu byla analyzována v programu Matlab a bylo zjištěno, že v případě dýchání do sněhu s uměle vytvořenou vzduchovou kapsou nastávala chyba určení EtCO_2 průměrně v 39 % času experimentu, v případě bez vzduchové kapsy v 30 % času, po který probíhal experiment. Ke zjištění příčiny vzniku této chyby byly provedeny respirační experimenty s modelem sněhu. Bylo zjištěno, že se odchylka objevuje vždy ihned po zvýšení koncentrace CO_2 v dýchacím okruhu, a to nezávisle na změně tvaru koncentrační křivky vlivem změny dechových parametrů způsobené změnou dechového vzorce. Při těchto experimentech bylo rovněž potvrzeno, že se chybný výpočet parametru EtCO_2 projevuje i u novějšího modelu monitoru CARESCAPE B650. Pro ověření, zda k tomuto jevu dochází i při standardních podmínkách, byl proveden experiment s použitím standardního anesteziologického přístroje, ze kterého byl vyjmut absorbér CO_2 . Tímto experimentem bylo dokázáno, že ke vzniku chyby určení EtCO_2 dochází i při standardních podmínkách, což by v praxi mohlo zapříčinit špatnou diagnostiku až ohrožení probanda či pacienta.

Klíčová slova:

Sněhová lavina, patientský monitor, dýchací okruh, kapnometrie

Bachelor's Thesis title

Analysis of breathing circuits for breathing experiments in avalanche

Abstract

During breathing experiments in avalanche snow, measurement of CO₂ is often conducted in order to monitor the volunteers. From the measured CO₂ curves, the monitor used calculates end-tidal CO₂ concentrations (EtCO₂). The aim of the study is to investigate, whether Datex-Ohmeda S/5 monitor evaluates EtCO₂ correctly, otherwise to characterize the occurrence of the error and to find out the possible cause of error. Data from a real experiment aimed at investigation of work of breathing into snow in the presence of an artificial air pocket were used to study precision of the monitor. The data were evaluated in Matlab environment. The analysis confirmed that the error of EtCO₂ evaluation occurred in 39 % and in 30 % of the total experimental time during breathing with and without the air pocket respectively. Breathing experiments with simulated snow were conducted in order to find the cause of the error. The error occurs immediately after a significant increase of CO₂ in the breathing circuit and is independent on other breathing parameters related to a change in breathing pattern. The experiment confirmed that a newer model CARESCAPE B650 monitor is prone to this error as well. The last experiment conducted with a standard anesthesia machine but with removed CO₂ absorber confirmed, that the error occurs even in a standard clinical setup, which might cause a wrong diagnoses or might harm a volunteer or a patient.

Key words:

Snow avalanche, patient monitor, breathing circuit, capnometry

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem

Analýza dýchacích okruhů pro experimenty s dýcháním v lavinovém sněhu

vypracoval samostatně a veškerou použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v příloženém seznamu literatury.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Kladně dne.....

.....

Jan Filip

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Karlu Roubíkovi, Ph.D. za poskytnutí odborných rad, věcné připomínky, ochotu a vstřícný přístup během zpracování této práce. Velké poděkování náleží celé mé rodině za podporu, trpělivost a povzbuzování po dobu mého studia.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	7
1 Úvod	8
1.1 Cíl práce.....	9
1.2 Současný stav – experimenty v lavinovém sněhu	10
2 Analýza problému s vyhodnocováním dat z experimentu v lavinovém sněhu	14
2.1 Experiment HyperAvaSM	14
2.2 Dýchací okruh použitý při experimentu HyperAvaSM.....	15
2.3 Cíl podkapitoly	16
2.4 Metody.....	16
2.5 Vyhodnocení.....	22
2.6 Výsledky.....	24
2.7 Statistické zpracování	28
2.8 Diskuse	29
2.8.1 Proudění v dýchacím okruhu s jednocestnými ventily.....	29
2.9 Závěr.....	36
3 Respirační experiment s dýcháním do modelu sněhu	37
3.1 Cíle experimentu.....	37
3.2 Metody.....	37
3.3 Výsledky.....	40
3.4 Diskuse	41
3.5 Závěr	42
4 Experiment se změnou dechového vzoru	42
4.1 Cíle experimentu.....	42
4.2 Metody.....	42
4.3 Výsledky.....	43

4.4	Diskuse	44
4.5	Závěr	44
5	Experiment s anesteziologickým přístrojem	44
5.1	Cíle experimentu.....	44
5.2	Metody.....	45
5.3	Výsledky.....	46
5.3.1	Fáze experimentu s přítomností absorbéru CO ₂	46
5.3.2	Fáze experimentu bez absorbéru CO ₂	47
5.4	Diskuse	47
5.5	Závěr	48
6	Diskuse	49
7	Závěr.....	51
	Seznam obrázků	52
	Reference.....	54
	Seznam příloh.....	56

Seznam použitých symbolů a zkratk

CO₂	oxid uhličitý
EKG	elektrokardiografie, elektrokardiogram
EtCO₂	koncentrace CO ₂ ve vydechovaném plynu na konci výdechu (%)
EtO₂	koncentrace O ₂ ve vydechovaném plynu na konci výdechu (%)
FiCO₂	koncentrace CO ₂ ve vdechovaném plynu (%)
FiO₂	koncentrace O ₂ ve vdechovaném plynu (%)
fvz	vzorkovací frekvence signálu (Hz)
hr	srdeční frekvence (Hz)
HyperAvaSM experiment	experiment hypercapnia and Gas Exchange Under the Avalanche Snow Model
L	litr
SpO₂	saturace krve kyslíkem (%)
t	čas (s)
P_{aw}	tlak v dýchacích cestách (mmH ₂ O)
V_{exp}	expirační dechový objem (L)

1 Úvod

Lavinové sesuvy nejsou v České republice nikterak ojedinělý jev. Tento živel může ohrozit na životě nejen milovníka zimních sportů či příslušníky horské služby, ale téměř každého, kdo se vyskytne v oblasti s možností výskytu lavin. Ztrátám na životech lze nejlépe předcházet snížením rizika výskytu lavin, například řízeným odstřelováním lavin. Tento způsob však není a ani nemůže být stoprocentní ochranou před zasypaním člověka. Pro pochopení toho, co se pod lavinou odehrává a jak by se dala ovlivnit pravděpodobnost přežití zasypaného, bylo již provedeno několik experimentů. Při těchto experimentech jsou často využívány měřicí přístroje, které jsou konstruovány pro použití na operačních sálech nebo u nemocničních lůžek a při jejich použití v experimentech při extrémních podmínkách může být ovlivněna jejich spolehlivost.

Při zpracování dat koncentrací plynů v experimentu HyperAvaSM [1] si autoři všimli, že číselné údaje hodnot EtCO_2 zobrazované na obrazovce monitoru Datex-Ohmeda S/5 (Datex-Ohmeda, Madison, WI, USA) v některých případech nekorespondují s časovým průběhem koncentrace CO_2 v dýchacím okruhu. Zobrazovaná hodnota EtCO_2 byla výrazně nižší než jakákoliv změřená koncentrace CO_2 v daném časovém období.

Pacientský monitor Datex-Ohmeda S/5 nasává z dýchacího okruhu plyn, který následně analyzuje. Výsledkem této analýzy jsou mimo jiné časové průběhy koncentrace CO_2 a O_2 v analyzovaném plynu. Monitor poskytuje tyto údaje s vzorkovací frekvencí 25 hodnot za sekundu (tato frekvence může být změněna v nastavení softwaru pro záznam a ukládání dat Datex-Ohmeda S/5 Collect). Monitor může tento časový průběh koncentrace CO_2 a O_2 zobrazovat na obrazovce, pokud je tato možnost zvolena v nastavení monitoru. Následně monitor tyto časové průběhy koncentrací analyzuje a vypočítává z nich čtyři parametry, které jako čísla zobrazuje na obrazovce monitoru. Monitor tyto parametry počítá pro každý zaznamenaný dech pomocí anesteziologického a spirometrického modulu E-CAiOVX (Datex-Ohmeda, Madison, WI, USA). Těmito parametry jsou koncentrace oxidu uhličitého na konci výdechu (EtCO_2 , end-tidal CO_2 concentration) koncentrace kyslíku na konci výdechu (EtO_2 , end-tidal O_2 concentration), koncentraci oxidu uhličitého v inspirovaném plynu (FiCO_2) a koncentraci kyslíku v inspirovaném plynu (FiO_2). Pacientský monitor je navržen a určen k používání na jednotkách intenzivní péče a jeho použití v terénu za nestandardních, zejména klimatických podmínek může mít vliv na jeho funkci. Přítomnost dýchacích okruhů využívaných při experimentech v lavinovém sněhu je opět nestandardní pro činnost monitoru a v klinické praxi se nevyskytuje. Použití těchto dýchacích okruhů má značný vliv na tvar

koncentračních křivek CO_2 a O_2 . Je možné, že tyto vlivy mohou zapříčinit, že algoritmus analyzující průběhy koncentrací CO_2 a O_2 nepracuje správně a odvozené číselné údaje EtCO_2 , EtO_2 , FiCO_2 a FiO_2 jsou nesprávné.

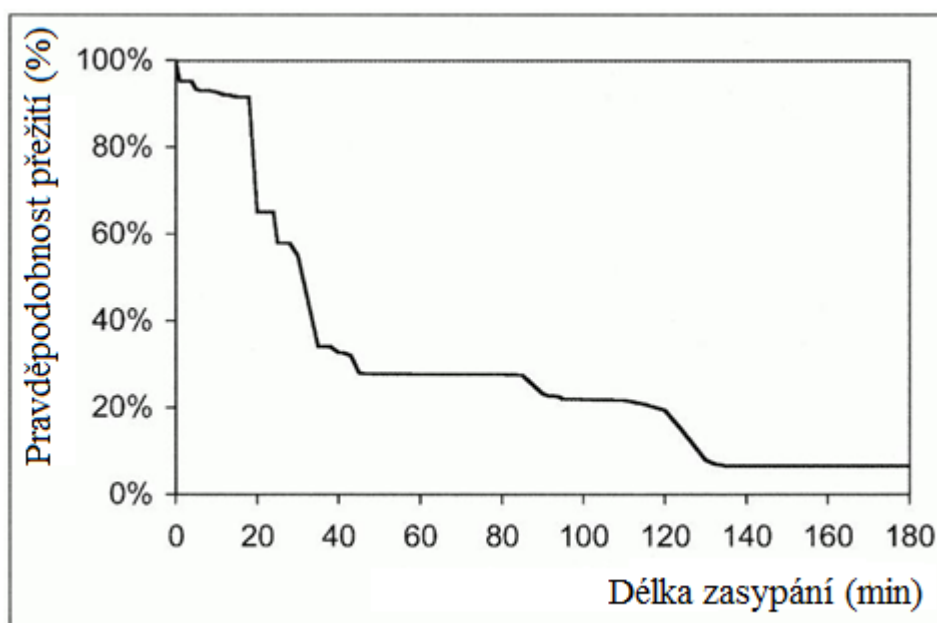
1.1 Cíl práce

Cílem práce je zjistit, zda dochází k odchylkám mezi měřenou koncentrací CO_2 a hodnotou EtCO_2 zobrazovanou na displeji monitoru. V případě, že k této odchylce dochází, tak kvantifikovat s jakou četností k tomuto nežádoucímu jevu dochází. V neposlední řadě je cílem vysvětlit, co je příčinou nesprávné funkce monitoru.

1.2 Současný stav – experimenty v lavinovém sněhu

V současné době bylo realizováno velké množství výzkumů, které se zabývají parametry a okolnostmi ovlivňujícími pravděpodobnost a délku přežití člověka pod lavinou. Experimentů ve skutečném sněhu s dýchacím okruhem však není mnoho z důvodu velkého množství faktorů ovlivňujících výsledky měření, jako jsou proměnlivé vlastnosti sněhu a často nestandardní a měnící se klimatické podmínky. Pro tyto experimenty je rovněž typická značná náročnost na přípravu a následnou realizaci těchto experimentů.

Jednu z prvních studií zabývajících přežitím při zasypání lavinou publikovali v roce 1994 Falk et al. [2]. Cílem této studie bylo z dostupných záznamů určit pravděpodobnost přežití v závislosti na čase stráveném pod lavinou.

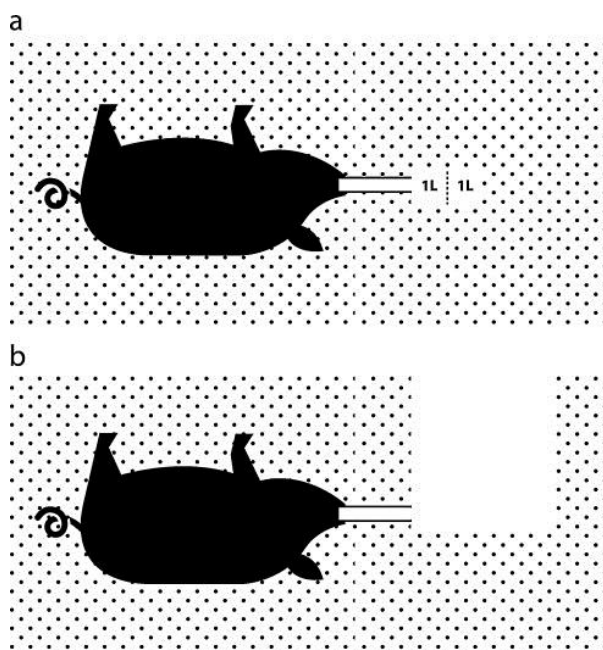


Obrázek 1: Závislost pravděpodobnosti přežití na délce zasypání lavinovým sněhem [2].

Na obrázku 1 je znázorněna pravděpodobnost přežití v závislosti na čase stráveném pod lavinou. Z obrázku je patrné, že k největšímu poklesu této pravděpodobnosti dochází mezi dvacátou a čtyřicátou minutou zasypání. V této studii nebyly použity žádné dýchací okruhy a pracovalo se záznamy ze záchranných akcí lidí z lavin ve Švýcarsku v letech 1981 až 1991.

Jak jednotlivé parametry ovlivňují pravděpodobnost přežití pod lavinou, zkoumali Paal et al. 2013 [3]. Ve svém experimentu použili jako měřené subjekty osm mladých prasat, která

dýchala do sněhové kapsy o objemech 1 L a 2 L, nebo dýchala okolní vzduch. Cílem této studie bylo zjistit efekty kombinace hypoxie, hyperkapnie a hypotermie. Prasata byla během experimentu pod sedativy zasypána sněhem a dýchala skrze endotracheální kanylu.

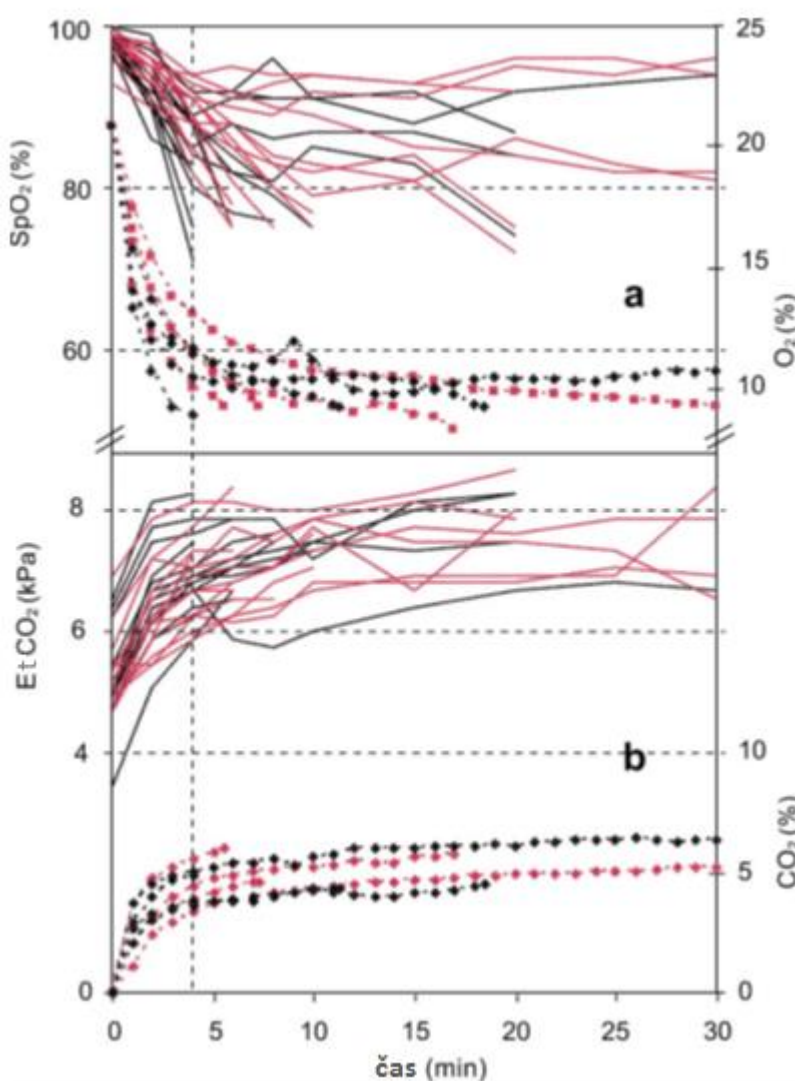


Obrázek 2: Způsoby vyústění endotracheální kanyly [3].

Na obrázku 2 je znázorněno, jak byla prasata při experimentu umístěna a jak bylo realizováno vyústění endotracheální kanyly do vzduchových kapes a okolního vzduchu. Měření a záznam většiny zkoumaných parametrů bylo zajištěno invazivním způsobem pomocí katetrů. Respirační parametry v tomto experimentu měřeny nebyly.

Brugger et al. (2003) [4] provedli experiment zabývající se vlivem velikosti vzduchové kapsy před obličejem zasypaného na respirační parametry. Při tomto experimentu dýchali účastníci do dvou uměle vytvořených kapes o objemu 1 L a 2 L. Při tomto experimentu se účastníci nacházeli mimo sněhovou stěnu a dýchali s nasazenou hermeticky padnoucí obličejovou maskou skrze 40 cm dlouhou hadici o mrtvém prostoru 125 cm³. Senzor pro měření EtCO₂ byl umístěn mezi obličejovou masku a hadici. V průběhu experimentu bylo monitorováno několik parametrů: SpO₂, EKG, krevní tlak a EtCO₂. Pro měření koncentrace CO₂ byl při tomto experimentu použit kapnograf Lifecap, Medtronic Physiocontrol. V této studii byl prokázán pozitivní vliv většího objemu vzduchové kapsy na pravděpodobnost přežití a pozorováno nečekané ustálení hodnot koncentrace CO₂ a O₂ po 20 minutách [4]. Toto zjištění bylo vysvětlováno vznikem tepelného proudění, přítomností krusty na povrchu

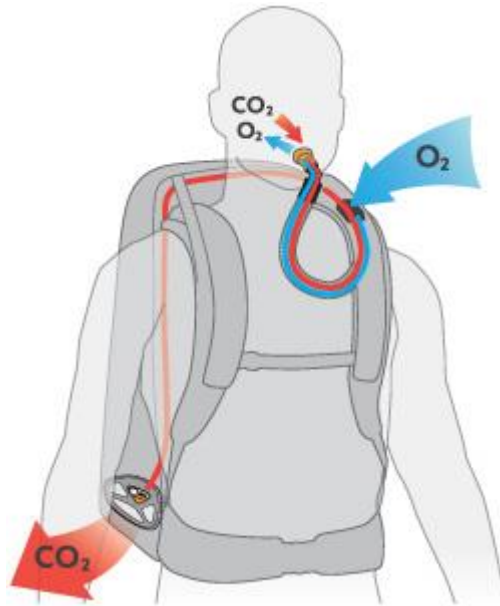
vzduchové kapsy a snížením produkce CO₂ [5]. Stejný jev je patrný i u dat, které byly použity v této bakalářské práci.



Obrázek 3: Závislost fyziologických parametrů na čase [4]. (Červená 2L černá 1L)

Na obrázku 3 je zobrazena závislost jednotlivých parametrů na čase. Červenou barvou pro umělou kapsu o velikosti 2 L a černou barvou pro kapsu o velikosti 1 L.

Pro zvýšení pravděpodobnosti přežití po delším čase je nutné snížit možnost akumulace CO₂, která bývá hlavní příčinou asfyxie [6–8]. K tomuto účelu byl vyvinut komerčně vyráběný dýchací okruh Avalung, který za pomoci jednocestných ventilů odvádí vydechaný CO₂ mimo oblast nádechu. Funkčnost tohoto okruhu testovali Radwin et al. [9, 10], kteří ve svých studiích za pomoci Avalungu dokázali, že je možné být zasypán pod lavinou až 90 minut (od 73 do 93 minut), s fyziologicky nevýznamnými odchylkami SpO₂ od normy.



Obrázek 4: Schéma fungování Avalungu [11].

Na obrázku 4 je zobrazeno, jak okruh Avalung odvádí pomocí jednocestného ventilu vydechovaný plyn o vysoké koncentraci CO_2 mimo oblast nádechu. Tento systém lze bez problémů pořídit i na českém trhu za necelé tři tisíce korun.

V roce 2004 porovnávali Grissom et al. [12] respirační parametry a tělesnou teplotu člověka vybaveného Avalungem s osobou, která Avalungem vybavena nebyla. Tímto srovnáním autoři prokázali, že hyperkapnie způsobuje vznik nebo prohloubení hypotermie.

2 Analýza problému s vyhodnocováním dat z experimentu v lavinovém sněhu

2.1 Experiment HyperAvaSM

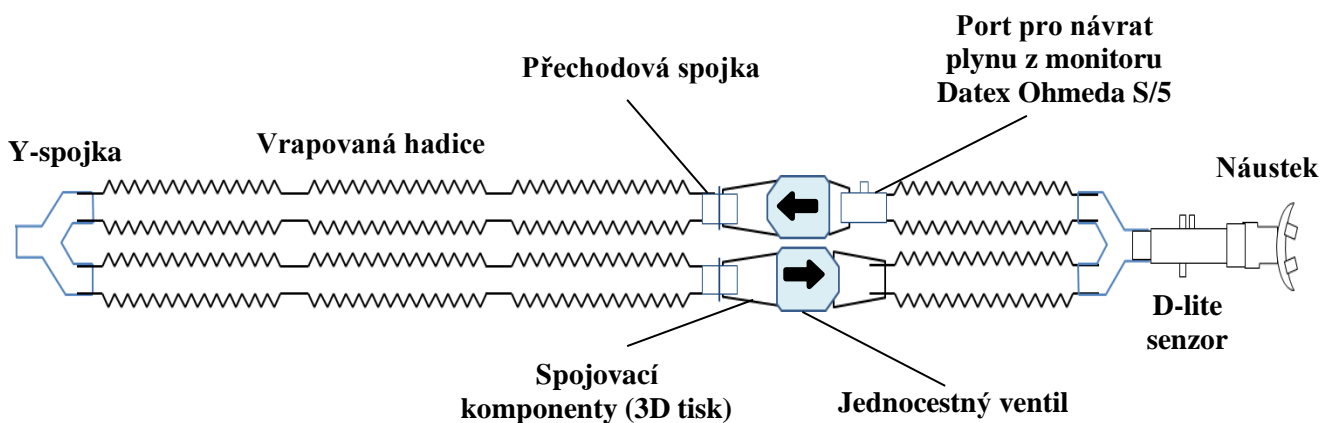
Data, která byla použita pro analýzu vlivu dýchacího okruhu, byla získána z experimentu zabývajícího se dechovou prací při zasypání lavinou v přítomnosti nebo absenci dechové kapsy [1, 13]. Tento experiment porovnával dechovou práci při dýchání v lavině uměle vytvořené vzduchové kapsy s dechovou prací při dýchání bez vzduchové kapsy přímo do sněhu. Velikost této dechové práce může mít značný vliv na fyzický stav a tím i na přežití člověka zasypaného lavinou. Cílem studie bylo zjistit, do jaké míry ovlivňuje velikost dechové práce vznik a prohloubení hypoxie a hyperkapnie.

Experimentu se zúčastnilo 12 dobrovolníků, a každý podstoupil dvě fáze měření: fázi s dýcháním do ve sněhu uměle vytvořené vzduchové kapsy o objemu 1 L a fázi bez vzduchové kapsy (0 L). Dýchání do sněhu bylo realizováno skrze dýchací okruh skládající se ze dvou větví s jednocestnými ventily (viz obrázek 5). Mezi dýchací cesty měřeného dobrovolníka a dýchací okruh byl umístěn spirometrický senzor D-lite (GE Healthcare, Helsinky, Finsko) měřící následující spirometrické parametry: koncentrace oxidu uhličitého na konci výdechu ($EtCO_2$, end-tidal CO_2 concentration) koncentrace kyslíku na konci výdechu (EtO_2 , end-tidal O_2 concentration), koncentraci oxidu uhličitého v inspirovaném plynu ($FiCO_2$) a koncentraci kyslíku v inspirovaném plynu (FiO_2). Při měření bylo na dobrovolníky umístěno několik dalších senzorů snímajících životní funkce. Data z těchto senzorů byla zaznamenávána a na místě vyhodnocována monitorem Datex-Ohmeda S/5 (Datex-Ohmeda, Madison, WI, USA). Data ze senzoru D-lite vyhodnocoval monitor pomocí anesteziologického a spirometrického modulu E-CAiOVX (Datex-Ohmeda, Madison, WI, USA) [1, 13].

Při tomto experimentu si autoři všimli, že číselné údaje hodnot $EtCO_2$ zobrazované na obrazovce monitoru Datex-Ohmeda S/5 (Datex-Ohmeda, Madison, WI, USA) v některých případech nekorespondují s časovým průběhem koncentrace CO_2 v dýchacím okruhu. Zobrazovaná hodnota $EtCO_2$ byla výrazně nižší než jakákoliv změřená koncentrace CO_2 v daném časovém období.

2.2 Dýchací okruh použitý při experimentu HyperAvaSM

Při tomto experimentu měli autoři za cíl sestavit okruh tak, aby byl mrtvý prostor (dead space) tohoto okruhu co nejmenší. Z toho důvodu byl zvolen okruh se dvěma větvemi, kde jedna větev slouží jako větev expirační, a druhá větev jako inspirační. Toho bylo docíleno použitím jednocestných ventilů s malým průtočným odporem.



Obrázek 5: Schéma dýchacího okruhu použitého při experimentu HyperAvaSM.



Obrázek 6: Fotografie dýchacího okruhu z přípravy experimentu HyperAvaSM.

Na obrázku 6 je vyfocen dýchací okruh použitý v experimentu HyperAvaSM. Tato fotografie byla pořízena při přípravě experimentu.

2.3 Cíl podkapitoly

Cílem této podkapitoly je zjistit, jak odchylka mezi monitorem vypočtenou hodnotou parametru EtCO_2 a skutečnou hodnotou koncentrace CO_2 ovlivňuje výsledky experimentu a z jakého důvodu k odchylce dochází.

2.4 Metody

V této studii byla použita data zaznamenaná v průběhu výzkumné studie Hypercapnia and Gas Exchange Under the Avalanche Snow Model (HyperAvaSM), která byla schválena Etickou komisí Fakulty tělovýchovy a sportu Univerzity Karlovy dne 17. 2. 2012 a byla registrována v registru ClinicalTrials.gov pod registračním číslem NCT02521272. [1]

Zpracována byla data od celkem 11 participantů, přičemž od každého participanta byla zpracována data z experimentu, kdy tento participant dýchal do uměle vytvořené vzduchové kapsy ve sněhu o objemu 1 L a dále z experimentu, kdy participant dýchal do sněhu bez přítomnosti vzduchové kapsy.

K analýze bylo využito signálu časového průběhu CO_2 a O_2 v analyzovaném plynu se vzorkovací frekvencí 25 Hz a jemu odpovídajících trendových signálů, to je monitorem vypočtených hodnot EtCO_2 , EtO_2 , FiCO_2 a FiO_2 se vzorkovací frekvencí 1 Hz. Tyto signály byly z monitoru exportovány do textových souborů s příponou .asc, kde každý signál byl v tomto souboru prezentován jedním sloupcem s názvem v prvním řádku. Data byla zpracována pomocí programu Matlab, verze MATLAB R2013b (MathWorks Natick, Massachusetts, USA).

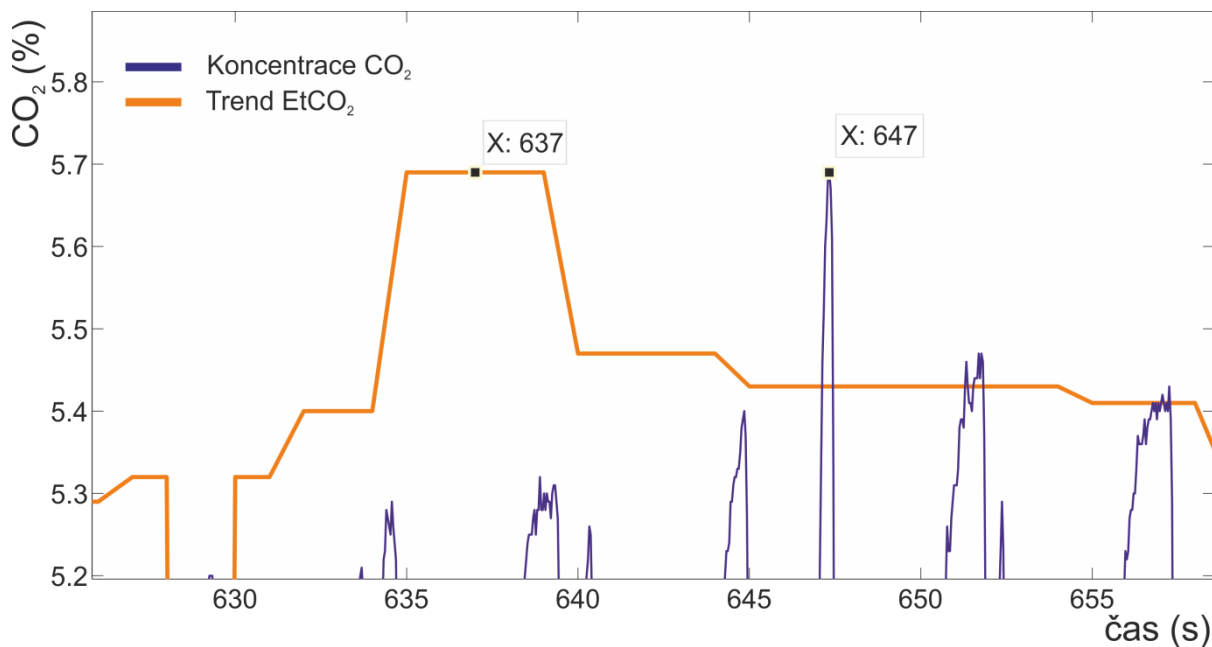
Zápis signálů časového průběhu koncentrace a signálů odpovídajících trendů EtCO_2 , EtO_2 , FiCO_2 a FiO_2 hodnot je nutno v softwaru S/5 Sollect iniciovat ručně stisknutím softwarového tlačítka. Z toho důvodu není možné iniciovat zápis těchto signálů současně a záznamy nezačínají ve stejném okamžiku měření. V textovém souboru obsahujícím signál trendu vypočtených hodnot EtCO_2 , EtO_2 , FiCO_2 a FiO_2 byla zaznamenána i informace o aktuálním čase. Jelikož vzorkovací frekvence tohoto signálu byla 1 Hz, byla časová prodleva mezi jednotlivými časovými záznamy jedna sekunda. Naproti tomu v souboru obsahujícím data o časovém průběhu koncentrace nebyla zaznamenána žádná informace o čase. Díky absenci časové informace v souboru signálu průběhu koncentrace bylo nutné pro zobrazení obou signálů do jednoho grafu zjistit, k jaké došlo prodlevě při iniciaci zápisu softwarovými tlačítky.

K tomu bylo potřeba zobrazit signály se společnou časovou osou. Toho bylo docíleno vytvořením časových vektorů pro pro oba signály:

$$\text{trendtime} = 0:1:\text{length}(\text{EtCO}_2);$$

$$\text{wavetime} = 0:1/\text{fvz}:n/\text{fvz};$$

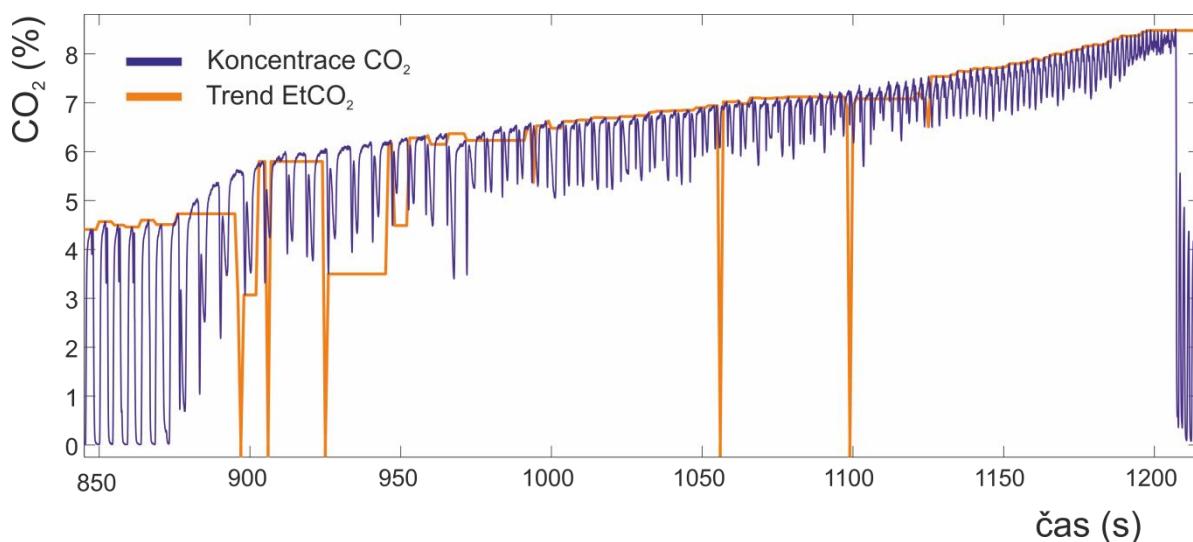
kde *trendtime* a *wavetime* jsou vektory, které zajišťují aby signály byly zobrazeny s časovou osou, která má počátek v nule, konec na posledním zaznamenaném vzorku a velikost kroku 1 sekunda. *Length(EtCO₂)* a *n* jsou čísla udávající velikost vektorů signálů, *fvz* je vzorkovací frekvence a *EtCO₂* a *CO₂* jsou samotné vektory s hodnotami záznamu. U takto zobrazených signálu, bylo možné zjistit již zmíněnou prodlevu mezi signály, způsobenou nesynchronní iniciací záznamu. Pro tento účel byla v grafu vyhledána dobře patrná a detekovatelná významná událost (například vysoký pík nebo pravidelná série píků), u této události byl zaznamenán čas u obou signálů. Rozdílem těchto časů byla získána absolutní hodnota časového posunu signálů. Jelikož záznam časového průběhu koncentrací byl iniciován vždy jako druhý, byl vždy opožděn za signálem trendu hodnot *EtCO₂*, *EtO₂*, *FiCO₂* a *FiO₂* Proto byla absolutní hodnota časového posunu odečítána od vektoru *wavetime*.



Obrázek 7: Časový posun signálů.

Na obrázku 7 je znázorněno odečítání hodnoty časového posunu ze snadno detekovatelného píku, v programu Matlab pomocí funkce Data cursor. Tento pík byl v modré koncentrační křivce CO₂ zaznamenán v čase 647 s a v oranžové křivce trendu EtCO₂ v čase 637 s. Odečtením těchto hodnot byla získána hodnota časového posunu 10 s.

Po odečtení této hodnoty od vektoru wavetime bylo možné zobrazit signály časového průběhu koncentrací a trendu vypočtených hodnot EtCO₂ do společného grafu.

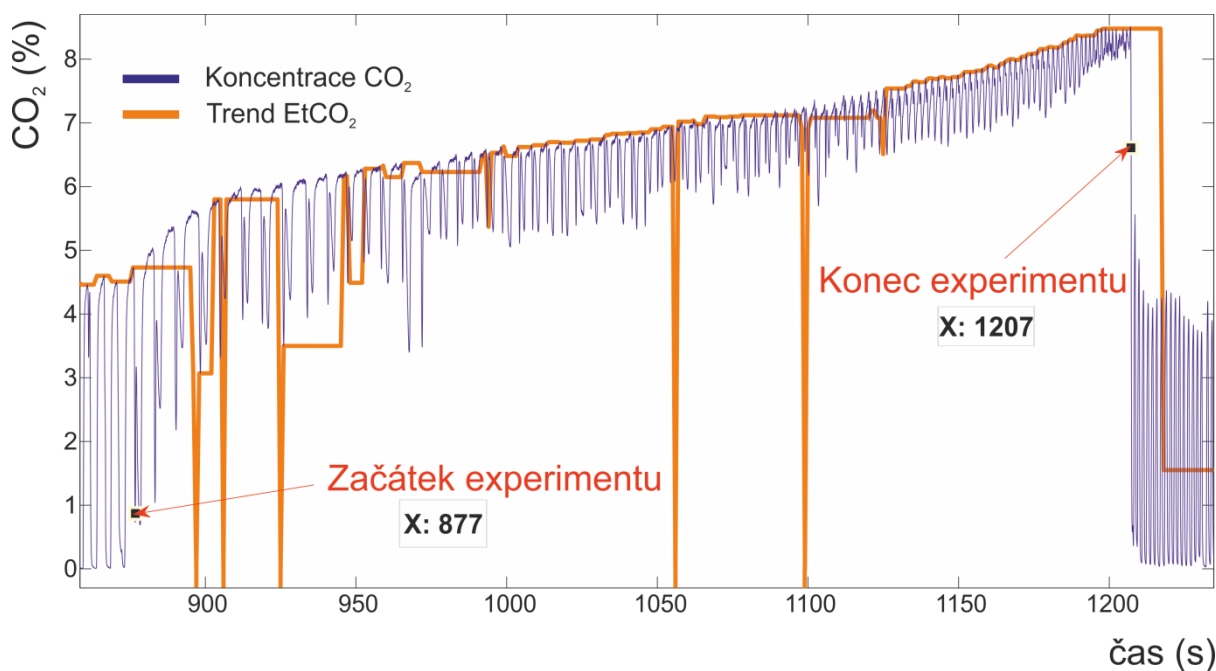


Obrázek 8: Zobrazení signálů.

Na obrázku 8 je modrou barvou znázorněn signál časového průběhu koncentrace CO_2 a oranžovou barvou signál trendu EtCO_2 z lékařského monitoru Datex-Ohmeda S/5. Je patrné, že monitorem vyhodnocené hodnoty EtCO_2 neodpovídají v každém okamžiku experimentu skutečným hodnotám EtCO_2 . Na obrázku 8 je dále patrné, že během experimentu došlo několikrát k výpadku signálu trendu EtCO_2 , projevující se klesnutím zaznamenaných hodnot na hodnotu $-32\,767$.

Tento jev může být zaviněn automatickým nulováním senzoru, ke kterému dochází 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60 minut po zapnutí monitoru a poté každých 60 minut [14, 15]. Při tomto procesu není monitor schopen analyzovat data, a proto zaznamená hodnotu $-32\,767$. Autoři experimentu HyperAvaSM se tomuto snažili předejít včasným zapnutím monitoru, avšak z důvodu vyšší frekvence automatického nulování tomuto jevu nešlo stoprocentně předejít. Automatické nulování by však způsobilo výpadek na delší časový úsek a zaznamenání hodnoty $-32\,767$ jak v časovém průběhu koncentrace, tak v signálu trendu hodnot EtCO_2 a v několika záznamech tomu tak skutečně je. Výpadek pouze v signálu trendu hodnot EtCO_2 bude s největší pravděpodobností způsoben nestandardním tvarem křivky signálu koncentrace CO_2 , který algoritmus nedokáže vyhodnotit a proto zaznamenává hodnotu $-32\,767$.

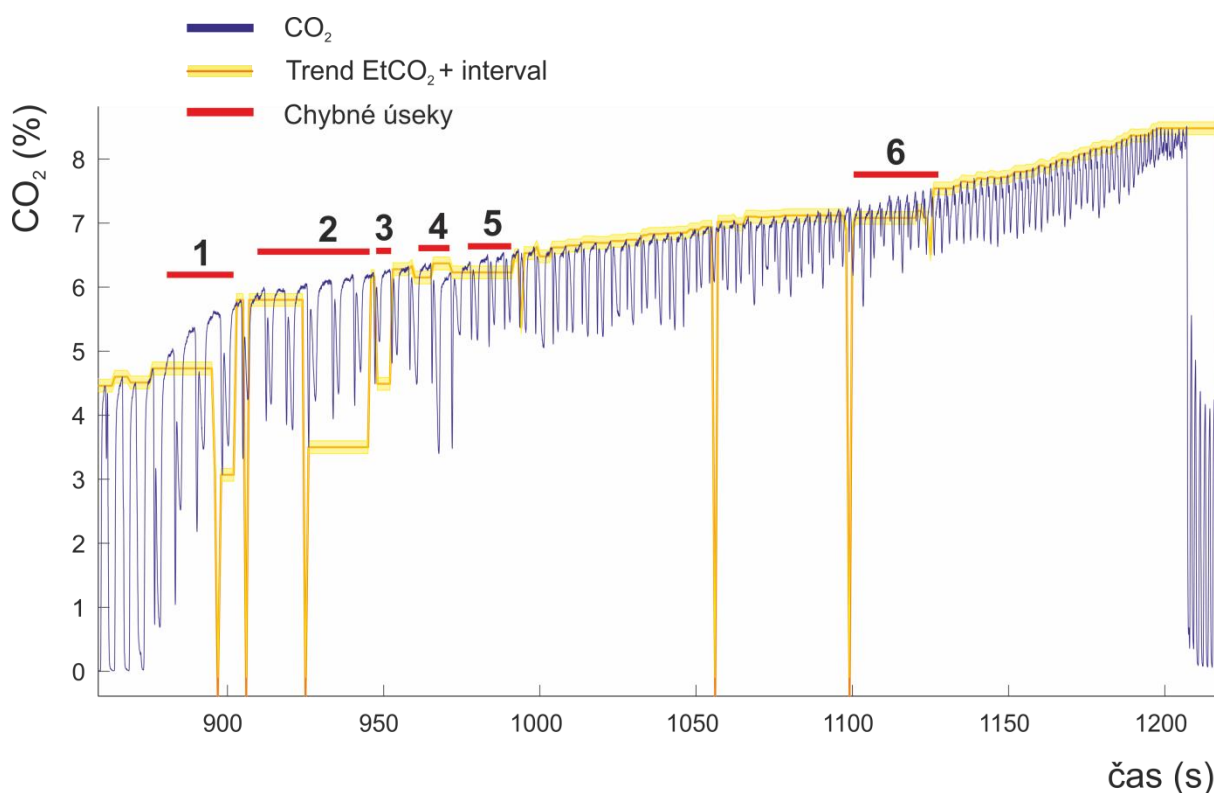
Pro kvantifikování četnosti, s jakou dochází k nesprávnému vyhodnocení hodnot monitorem, bylo rovněž nutné zjistit délku jednotlivých ventilačních experimentů. Při tom bylo postupováno obdobně jako při odečítání hodnot časového posunu. Pomocí funkce Data cursor v okně figure programu Matlab byly odečítány hodnoty začátku a konce měření. Jako začátek byl kurzorem na křivce koncentrace CO_2 vybrán bod, kde došlo k prvnímu nárůstu koncentrace. V případě O_2 byl vybrán na křivce bod, kde došlo k prvnímu patrnému poklesu koncentrace O_2 . V případě označování konce bylo snadno rozhodnutelné, v jakém okamžiku k němu dochází, jelikož docházelo k rapidnímu poklesu koncentrace CO_2 a nárůstu koncentrace O_2 .



Obrázek 9: Odečítání času začátku a konce měření.

Na obrázku 9 jsou znázorněné body použité při zjišťování délky experimentu. Konec experimentu nastal v čase 1207 s a začátek v čase 877 s, experiment s dýcháním tohoto participanta do sněhu tedy probíhalo 330 s.

Při bližším prozkoumání odchylek vypočítávaných hodnot trendu EtCO₂ a EtO₂ bylo patrné, že hodnoty jsou vyhodnocené buď velmi přesně, nebo naopak velmi nepřesně. Z tohoto důvodu byl vytvořen toleranční interval kolem křivky monitorem zobrazovaných hodnot EtCO₂, kterým bylo rozhodováno, zda je hodnota vyhodnocena správně či chybně. V případě parametru EtCO₂ byl tento interval zvolen o rozsahu $\pm 0,1 \%$ měřené hodnoty koncentrace CO₂ a v případě parametru EtO₂ byl tento rozsah zvolen $\pm 0,2 \%$ měřené hodnoty koncentrace O₂. Takováto velikost intervalu ve většině případů zaručuje, že pokud je hodnota monitorem vypočteného EtCO₂ vyhodnocena správně, tak se nachází v tomto intervalu, a pokud chybně, tak se v intervalu nenachází.



Obrázek 10: Vyznačení chyb v signálu trendu EtCO₂.

Na obrázku 10 jsou červenou barvou znázorněny časové úseky, ve kterých se signál vypočtených hodnot trendu EtCO₂ nenachází v tolerančním intervalu. Na obrázku jsou rovněž patrné dříve zmiňované výpadky měření. Při tomto měření došlo k pěti výpadkům, kdy každý trval 2 s. Tři z nich se na grafu nachází kolem času 900 s a dva mezi časem 1 050 s a 1 100 s.

2.5 Vyhodnocení

Takto vyznačené časové úseky byly pomocí funkce *Data cursors* v okně grafu v programu Matlab změřeny a jejich doba trvání následně zanesena do tabulek.

Tabulka 1: Nespolehlivě určené úseky z respiračního experimentu participanta 6.

Participant 6 bez kapsy EtCO ₂	
Úsek	Doba trvání (s)
1	22
2	35
3	5
4	9
5	14
6	24
Celkem 109	

V tabulce 1 jsou zaznamenány délky úseků z obrázku 10, kde se skutečná hodnota koncentrace EtCO₂ nenachází v tolerančním intervalu.

Experimentu se původně zúčastnilo 12 participantů, avšak výsledky z měření participanta číslo jedna byly z důvodu předčasného ukončení z měření vyřazeny.

Takto byly blíže prozkoumány záznamy z měření všech jedenácti participantů pro případy s dýcháním přímo do sněhu i pro případy s dýcháním do uměle vytvořené sněhové kapsy. Všechny 22 záznamů pro EtCO₂ bylo vyhodnoceno a zaneseno do jednotlivých tabulek. Stejným způsobem bylo postupováno i v případě spirometrických parametrů EtO₂, FiCO₂ a FiO₂.

Do posledních tří sloupců tabulek byla zanesena hodnota, která udává jaká část z celkového času je výpadek, jaké procento je správně vyhodnocené a jaké procento je vyhodnocené chybně. Při výpočtu těchto hodnot bylo postupováno následovně:

$$\text{Výpadek (\%)} = \frac{\text{Výpadek (s)}}{\text{Délka experimentu (s)}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\text{Správně (\%)} = \frac{\text{Správně (s)}}{\text{Délka experimentu (s)}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$\text{Chybně(\%)} = \frac{\text{Chybně (s)}}{\text{Délka experimentu (s)}} \cdot 100 \quad (3)$$

Procenta v posledních třech sloupcích posledního řádku byla vypočítána z kumulativních hodnot, tedy pomocí vztahů:

$$\text{Celkový výpadek (\%)} = \frac{\text{Celkový výpadek (s)}}{\text{Celková délka experimentu (s)}} \cdot 100 \quad (4)$$

$$\text{Celkem správně (\%)} = \frac{\text{Celkem správně (s)}}{\text{Celková délka experimentu(s)}} \cdot 100 \quad (5)$$

$$\text{Celkem chybně(\%)} = \frac{\text{Celkem chybně (s)}}{\text{Celková délka experimentu(s)}} \cdot 100 \quad (6)$$

V případě O₂ bylo postupováno stejným způsobem, jediným rozdílem v postupu byla velikost tolerančního intervalu pro rozhodování o správnosti vypočítávaných hodnot trendu EtO₂. Zatímco v případě EtCO₂ měl toleranční interval hodnotu ± 0,1 % měřené koncentrace CO₂, v případě EtO₂ byla velikost tohoto intervalu zvolena hodnota ± 0,2 % koncentrace O₂. Výsledky byly rovněž zaznamenány do tabulek.

Pro statistické vyhodnocení vlivu ve sněhu uměle vytvořené vzduchové kapsy bylo nutné nejprve ověřit, zdali data odpovídají Gaussovu normálnímu rozdělení. Toho bylo docíleno Kolmogorovo-Smirnovo testem. Dále byl proveden neparametrický test, jelikož data neodpovídají Gaussovu normálnímu rozdělení. U dat byl proveden Mann-Whitney-U test v programu Statistica (verze 7. 1.) a následně vytvořeny krabicové grafy, zvláště pro hodnoty CO₂ a O₂. Tímto testem byla otestována nulová hypotéza, že existuje rozdíl mezi hodnotami chyb pro dýchání do vzduchové kapsy a hodnotami chyb pro dýchání přímo do sněhu.

2.6 Výsledky

Tabulka 2: EtCO₂ pro případ se vzduchovou kapsou.

	EtCO ₂ vzduchová kapsa						
Participant	Délka experimentu (s)	Výpadek (s)	Správně (s)	Chybně (s)	Výpadek (%)	Správně (%)	Chybně (%)
2	552	12	395	145	2,2	71,6	26,3
3	136	0	40	96	0,0	29,4	70,6
4	419	12	190	217	2,9	45,3	51,8
5	345	10	202	133	2,9	58,6	38,6
6	438	12	221	205	2,7	50,5	46,8
7	326	26	158	142	8,0	48,5	43,6
8	739	29	380	330	3,9	51,4	44,7
9	394	33	259	102	8,4	65,7	25,9
10	365	10	225	130	2,7	61,6	35,6
11	411	8	198	205	1,9	48,2	49,9
12	379	24	306	49	6,3	80,7	12,9
celkem	4504	176	2574	1754	3,9	57,1	38,9

Tabulka 3: EtCO₂ pro případ bez vzduchové kapsy.

	EtCO ₂ bez vzduchové kapsy						
Participant	Délka experimentu (s)	Výpadek (s)	Správně (s)	Chybně (s)	Výpadek (%)	Správně (%)	Chybně (%)
2	499	10	377	112	2,0	75,6	22,4
3	484	16	407	61	3,3	84,1	12,6
4	358	10	182	166	2,8	50,8	46,4
5	256	6	148	102	2,3	57,8	39,8
6	330	10	211	109	3,0	63,9	33,0
7	314	8	241	65	2,5	76,8	20,7
8	431	44	279	108	10,2	64,7	25,1
9	200	4	123	73	2,0	61,5	36,5
10	319	8	193	118	2,5	60,5	37,0
11	326	8	148	170	2,5	45,4	52,1
12	268	8	196	64	3,0	73,1	23,9
celkem	3785	132	2505	1148	3,5	66,2	30,3

Tabulka 4: EtO₂ pro případ s kapsou.

Participant	EtO ₂ vzduchová kapsa						
	Délka experimentu (s)	Výpadek (s)	Správně (s)	Chybně (s)	Výpadek (%)	Správně (%)	Chybně (%)
2	552	12	415	125	2,2	75,2	22,6
3	136	0	10	126	0,0	7,4	92,6
4	419	12	154	253	2,9	36,8	60,4
5	345	10	167	168	2,9	48,4	48,7
6	438	12	246	180	2,7	56,2	41,1
7	326	26	132	168	8,0	40,5	51,5
8	739	29	340	370	3,9	46,0	50,1
9	394	33	201	160	8,4	51,0	40,6
10	365	10	221	134	2,7	60,5	36,7
11	411	8	203	200	1,9	49,4	48,7
12	379	24	301	54	6,3	79,4	14,2
celkem	4504	176	2390	1938	3,9	53,1	43,0

Tabulka 5: EtO₂ pro případ bez vzduchové kapsy.

Participant	EtO ₂ bez vzduchové kapsy						
	Délka experimentu (s)	Výpadek (s)	Správně (s)	Chybně (s)	Výpadek (%)	Správně (%)	Chybně (%)
2	499	10	381	108	2,0	76,4	21,6
3	484	17	342	125	3,5	70,7	25,8
4	358	10	177	171	2,8	49,4	47,8
5	256	6	135	115	2,3	52,7	44,9
6	330	10	171	149	3,0	51,8	45,2
7	314	8	154	152	2,5	49,0	48,4
8	431	44	268	119	10,2	62,2	27,6
9	200	4	90	106	2,0	45,0	53,0
10	319	8	136	175	2,5	42,6	54,9
11	326	8	226	92	2,5	69,3	28,2
12	268	18	89	161	6,7	33,2	60,1
celkem	3785	143	2169	1473	3,8	57,3	38,9

Tabulka 6: FiCO₂ pro případ se vzduchovou kapsou.

	FiCO₂ vzduchová kapsa						
Participant	Délka experimentu (s)	Výpadek (s)	Správně (s)	Chybně (s)	Výpadek (%)	Správně (%)	Chybně (%)
2	552	12	312	228	2,2	56,5	41,3
3	136	0	25	111	0,0	18,4	81,6
4	419	12	70	337	2,9	16,7	80,4
5	345	10	96	239	2,9	27,8	69,3
6	438	12	193	233	2,7	44,1	53,2
7	326	26	122	178	8,0	37,4	54,6
8	739	29	207	503	3,9	28,0	68,1
9	394	33	205	156	8,4	52,0	39,6
10	365	10	202	153	2,7	55,3	41,9
11	411	8	175	228	1,9	42,6	55,5
12	379	24	290	65	6,3	76,5	17,2
celkem	4504	176	1897	2431	3,9	42,1	54,0

Tabulka 7: FiCO₂ bez vzduchové kapsy.

	FiCO₂ bez kapsy						
Participant	Délka experimentu (s)	Výpadek (s)	Správně (s)	Chybně (s)	Výpadek (%)	Správně (%)	Chybně (%)
2	499	10	329	160	2,0	65,9	32,1
3	484	16	251	217	3,3	51,9	44,8
4	358	10	120	228	2,8	33,5	63,7
5	256	6	102	148	2,3	39,8	57,8
6	330	10	151	169	3,0	45,8	51,2
7	314	8	134	172	2,5	42,7	54,8
8	431	44	194	193	10,2	45,0	44,8
9	200	4	64	132	2,0	32,0	66,0
10	319	8	131	180	2,5	41,1	56,4
11	326	8	123	195	2,5	37,7	59,8
12	268	8	200	60	3,0	74,6	22,4
celkem	3785	132	1799	1854	3,5	47,5	49,0

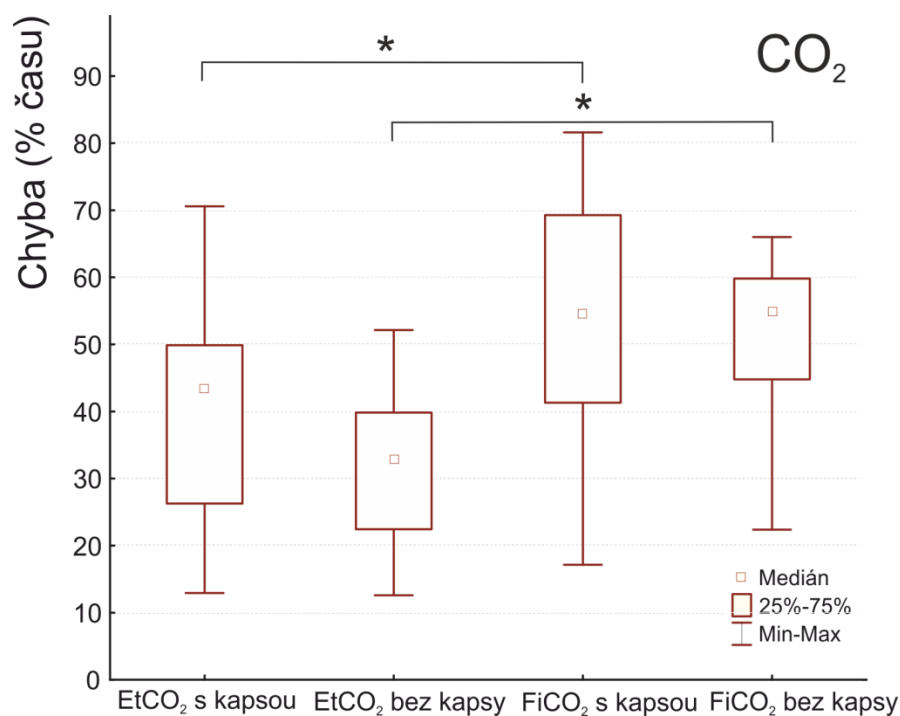
Tabulka 8: FiO₂ pro případ se vzduchovou kapsou.

	FiO₂ vzduchová kapsa						
Participant	Délka experimentu (s)	Výpadek (s)	Správně (s)	Chybně (s)	Výpadek (%)	Správně (%)	Chybně (%)
2	552	12	183	357	2,2	33,2	64,7
3	136	0	11	125	0,0	8,1	91,9
4	419	12	87	320	2,9	20,8	76,4
5	345	10	101	234	2,9	29,3	67,8
6	438	12	93	333	2,7	21,2	76,0
7	326	26	115	185	8,0	35,3	56,7
8	739	29	262	448	3,9	35,5	60,6
9	394	33	69	292	8,4	17,5	74,1
10	365	10	162	193	2,7	44,4	52,9
11	411	8	105	298	1,9	25,5	72,5
12	379	24	98	257	6,3	25,9	67,8
celkem	4504	176	1286	3042	3,9	28,6	67,5

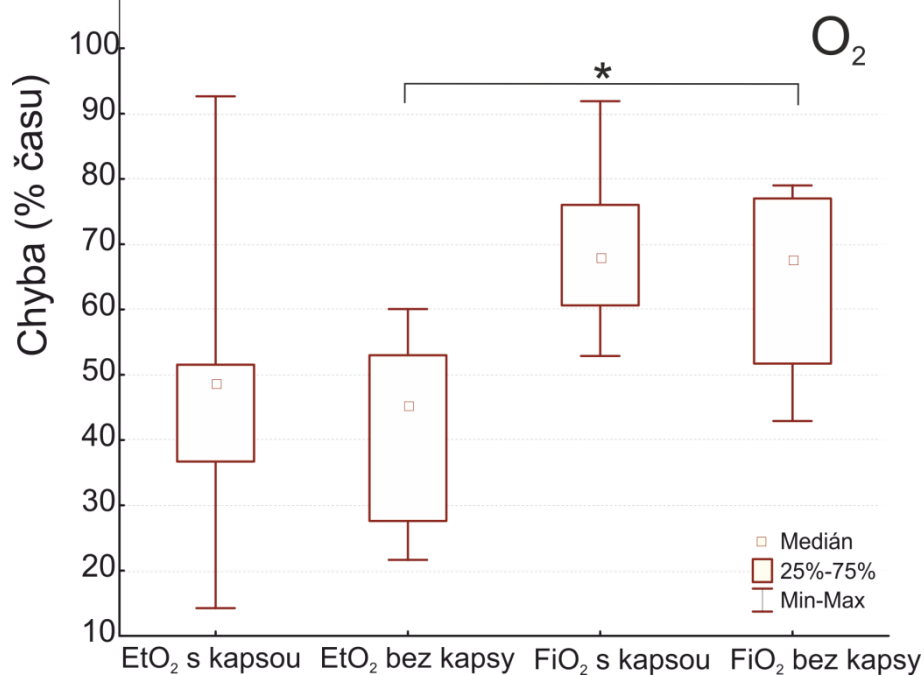
Tabulka 9: FiO₂ bez vzduchové kapsy.

	FiO₂ bez kapsy						
Participant	Délka experimentu (s)	Výpadek (s)	Správně (s)	Chybně (s)	Výpadek (%)	Správně (%)	Chybně (%)
2	499	10	231	258	2,0	46,3	51,7
3	484	17	215	252	3,5	44,4	52,1
4	358	10	75	273	2,8	20,9	76,3
5	256	6	68	182	2,3	26,6	71,1
6	330	10	104	216	3,0	31,5	65,5
7	314	8	94	212	2,5	29,9	67,5
8	431	44	176	211	10,2	40,8	49,0
9	200	4	38	158	2,0	19,0	79,0
10	319	8	63	248	2,5	19,7	77,7
11	326	8	67	251	2,5	20,6	77,0
12	268	18	135	115	6,7	50,4	42,9
celkem	3785	143	1266	2376	3,8	33,4	62,8

2.7 Statistické zpracování



Obrázek 11: Krabicové grafy pro CO₂.



Obrázek 12: Krabicové grafy pro O₂.

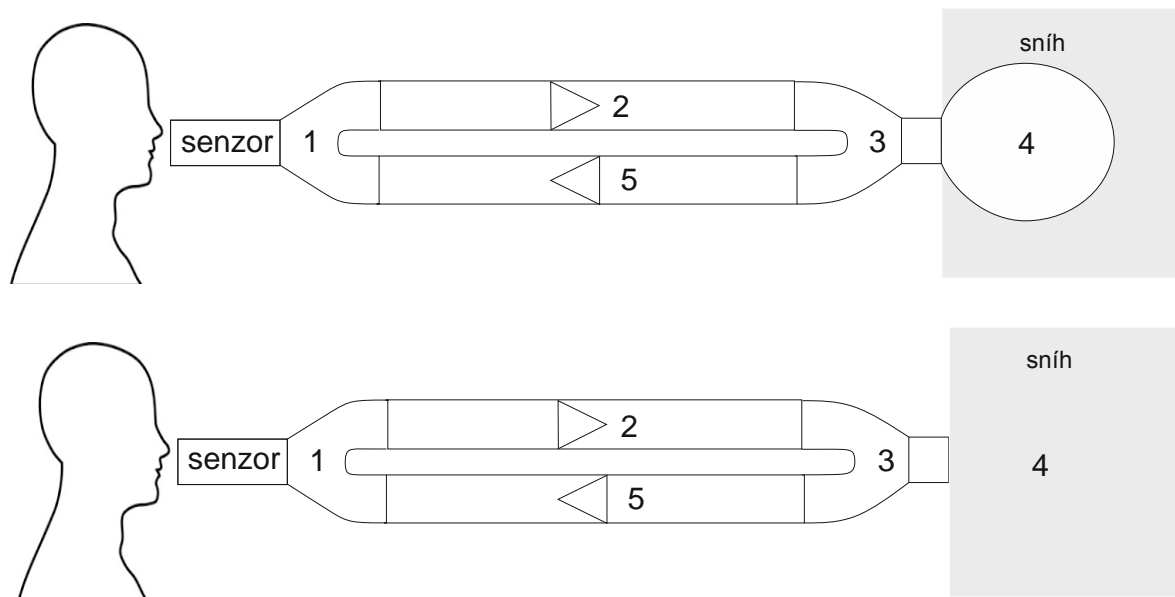
Na obrázku 11 a 12 jsou svorkou s hvězdičkou označeny skupiny měření, u kterých byla dosažená hladina významnosti vypočtená Mann-Whitney-U testem menší jak 0,05.

2.8 Diskuse

Hlavním výsledkem studie je, že v případě použití patientského monitoru Datex-Ohmeda S/5 v experimentech v extrémních podmínkách, monitor chybně stanovuje číselné hodnoty trendů EtCO_2 , EtO_2 , FiCO_2 a FiO_2 z kontinuálně měřené koncentrace těchto plynů. Chyba, se kterou jsou trendové parametry určeny, může nejen zkreslit či znehodnotit výsledky experimentu, za jehož účelem byl dýchací okruh zkonstruován, ale v případě, že pomocí těchto trendových dat je sledován i stav probanda v podmínkách extrémní hyperkapnie a hypoxemie, může dojít i k ohrožení života probanda.

Jednou z možností, jak tato odchylka vzniká, může být deformace tvaru koncentračních křivek CO_2 a O_2 , která je způsobena zpětným vdechováním již vydechnutého plynu, který může zůstat v částech dýchacího okruhu. Z tohoto důvodu bylo popsáno proudění skrze okruh v průběhu dechových cyklů.

2.8.1 Proudění v dýchacím okruhu s jednocestnými ventily



Obrázek 13: Schémata okruhů z experimentu HyperAvaSM.

Na obrázku 13 Jsou znázorněna schémata dýchacích okruhů a jejich vyústění, použité při experimentu HyperAvaSM, ze kterého byla použita data k této analýze. Tyto dýchací

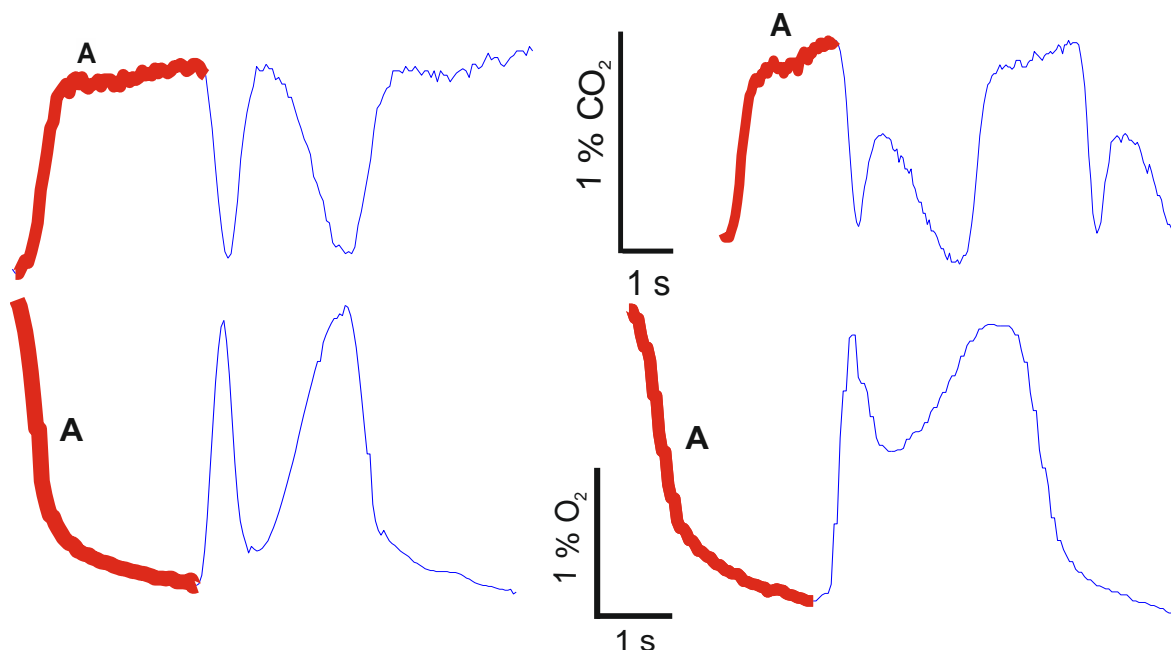
okruhy se skládají z expirační větve s jednocestným ventilem 2, inspirační větve s jednocestným ventilem 5, dále z y-spojky propojující obě větve s měřeným participantem 1 a y-spojku 3. Tato spojka propojuje obě větve buďto se vzduchovou kapsou, obklopenou sněhem, nebo ústí přímo do sněhu 4. Senzor snímající koncentraci CO_2 a O_2 je umístěn mezi dýchací cesty participanta a dýchací okruh.

Signál získaný tímto senzorem byl zobrazen, a následně rozložen na jednotlivé segmenty, které byly označeny písmeny A až D. Pro tuto analýzu byl použit signál z experimentu participanta 6. Jedná se o úsek, kdy participant dýchal už delší dobu do sněhu, proto je rozdíl mezi inspirovanou a exspirovanou koncentrací menší než u standardního dechového cyklu.

Segment A

Křivka získaná při dýchání do sněhu

Křivka získaná při dýchání do
vzduchové kapsy



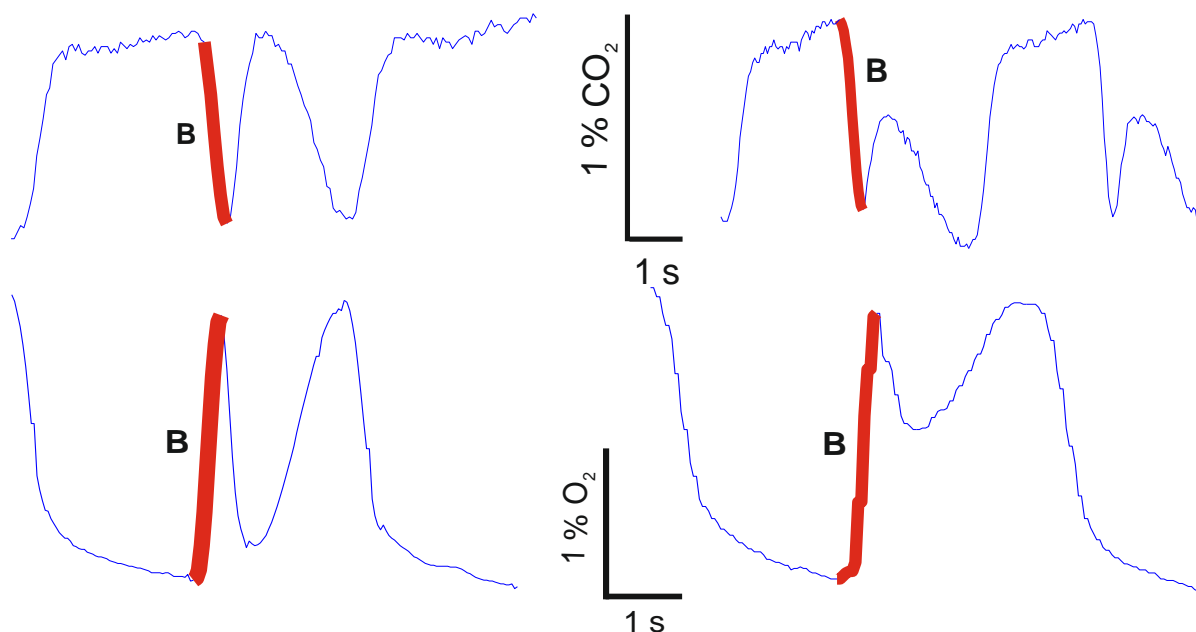
Obrázek 14: Segment A dechového cyklu pro koncentrace CO₂ a O₂.

V těchto segmentech se od sebe křivky pro případ dýchání do sněhu a případ dýchání do kapsy nijak zvláště neliší. Nepatrný rozdíl by mohl být způsoben větším odporem v případě dýchání do sněhu bez vzduchové kapsy. V tomto segmentu křivky senzor zaznamenává celý průběh výdechu. Plyn procházející senzorem vychází přímo z úst měřeného participanta a není tudíž nijak zkreslen okruhem. Na konci tohoto segmentu můžeme tedy odečíst skutečnou hodnotu vydechované koncentrace CO₂ a O₂, tedy hodnoty EtCO₂ a O₂. Vydechnutý plyn proudí dále skrze y-spojku 1, expirační rameno 2, y-spojku 3 do vzduchové kapsy ve sněhu (křivka vlevo), nebo přímo do sněhu (křivka vpravo). V případě se vzduchovou kapsou 4 dochází v této oblasti k promíchávání exspirovaného plynu s relativně čerstvým plynem přítomným ve vzduchové kapse. Tento plyn má vůči vydechovanému nižší koncentraci CO₂ a vyšší koncentraci O₂. Na první pohled jsou si křivky CO₂ a O₂ velmi podobné. Z hlediska tvaru jsou v podstatě jedna vůči druhé osově překlopené podle horizontální osy.

Segment B

Křivka získaná při dýchání do sněhu

Křivka získaná při dýchání do
vzduchové kapsy



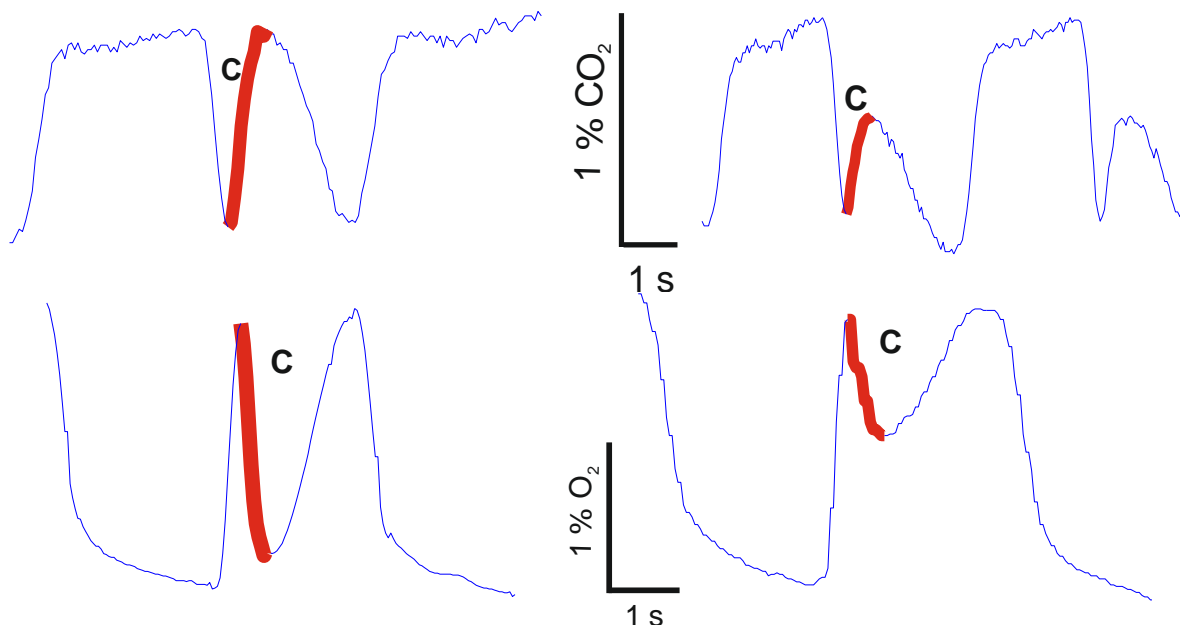
Obrázek 15: Segment B dechového cyklu pro koncentrace CO_2 a O_2 .

V tomto segmentu se od sebe levé a pravé křivky rovněž neliší. Participant se začíná nadechovat a do senzoru proudí plyn pouze z inspiračního ramene 5. Díky jednocestnému ventilu zde nedošlo při výdechu k žádnému promíchávání a plyn zde zůstal od konce posledního nádechu, má tudíž nízkou koncentraci CO_2 a vysokou koncentraci O_2 , následkem je rychlý pokles koncentrace na horní křivce CO_2 a rychlý nárůst koncentrace na spodní křivce O_2 . Zatímco senzorem prochází plyn z inspiračního ramene, na jeho místo je nasáván plyn z oblastí 3 a 4.

Segment C

Křivka získaná při dýchání do sněhu

Křivka získaná při dýchání do
vzduchové kapsy



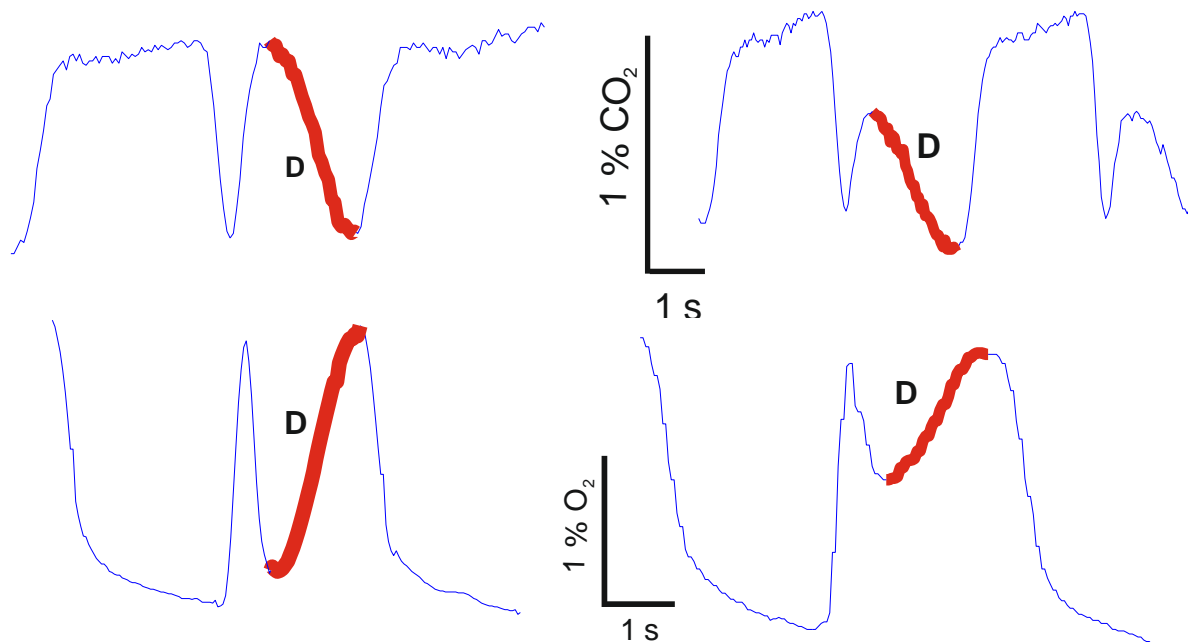
Obrázek 16: Segment C dechového cyklu pro koncentrace CO₂ a O₂.

V průběhu tohoto segmentu se participant stále nadechuje a do senzoru se dostává plyn, který se před nádechem nacházel v oblasti 3 a 4. Zde se od sebe křivky vpravo a vlevo liší. V případě dýchání přímo do sněhu se v oblasti 4, tedy ve sněhu, nachází plyn s vysokou koncentrací CO₂ a nízkou koncentrací O₂ z posledního výdechu. Ve sněhu nedochází k výraznému samovolnému promíchávání s čerstvějším plynem ve vzdálenějších oblastech sněhu a senzor zaznamenává obdobnou koncentraci CO₂ a O₂ jako při konci výdechu, tedy EtCO₂ a EtO₂. V případě se vzduchovou kapsou dochází v oblasti 4 k promíchávání vydechnutého plynu s čerstvým plynem, a když se tento plyn dostane do senzoru, není koncentrace CO₂ tak vysoká jako v případě bez kapsy.

Segment D

Křivka získaná při dýchání do sněhu

Křivka získaná při dýchání do
vzduchové kapsy



Obrázek 17: Segment D dechového cyklu pro koncentrace CO₂ a O₂.

Ke konci nádechu se do senzoru dostává nejčerstvější plyn z nejbližších míst, ve sněhu. Z toho vyplývá, že na křivkách se přítomnost tohoto plynu projeví jako oblast s nejnižší koncentrací CO₂ a nejvyšší koncentrací O₂. V tomto segmentu tedy senzor zaznamenává FiCO₂ a FiO₂. Po této poslední fázi cyklu nastává opět výdech účastníka a na křivkách se znovu objeví segment A.

Z této analýzy vyplývá, že přítomnost dýchacího okruhu s jednocestnými ventily způsobuje, že koncentrační křivka má v rámci jednoho dechového cyklu dvě maxima a dvě minima, tudíž nestandardní tvar. Tento jev je patrný jak pro případ se vzduchovou kapsou tak pro dýchání přímo do sněhu. V případě dýchání přímo do sněhu mají tato maxima a minima velmi podobnou hodnotu koncentrace, zatímco v případě dýchání do uměle vytvořené vzduchové kapsy se hodnoty koncentrace CO₂ a O₂ v těchto bodech liší.

Výskyt zjevné chyby, kdy určená hodnota EtCO₂ neodpovídá její skutečné hodnotě, je poměrně častý: v případě experimentu HyperAvaSM monitor ukazoval nižší hodnoty EtCO₂, než byly skutečné hodnoty v případě ve sněhu s uměle vytvořenou vzduchovou kapsou v 39 % času, po který probíhal experiment. V případě bez vzduchové kapsy v 30 % času. Tyto výsledky naznačují přítomnost značně dlouhých segmentů, kdy monitor neposkytoval zkoušejícím správné údaje.

V průběhu analýzy bylo navíc zjištěno, že četnost výskytu studované chyby určení EtCO₂ se liší u jednotlivých probandů. V případě, kdy probandi dýchali do vzduchové kapsy, se chyba určení tohoto parametru pohybovala v rozmezí 13 % až 71 % času stráveného při experimentu jedním probandem a v případě dýchání bez vzduchové kapsy se chyba určení tohoto parametru pohybovala v rozmezí 13 % až 52 % času stráveného při experimentu jedním probandem.

Obdobná situace jako s parametrem EtCO₂ nastávala i v případě parametru FiCO₂, avšak v tomto případě je samotné určení tohoto parametru z průběhu koncentrace CO₂ v čase problematické. Příčinou je, že koncentrace CO₂ v inspirovaném plynu se výrazně měnila v průběhu samotného inspiria tak, jak odpovídalo nasávání plynu ze sněhu, ve kterém byl již nahromaděn CO₂ z předcházejících dechů. V této studii byla jako správná hodnota FiCO₂ považována hodnota koncentrace CO₂ odpovídající plynu z nejbližších míst sněhu, tedy na obrázku 17 odpovídající segmentu D. To proto, že se lze domnívat, že monitor určuje hodnoty FiCO₂ tak, že na křivce koncentrace CO₂ hledá minima. Bohužel se nepodařilo zjistit, jak algoritmus určení hodnoty FiCO₂ v monitoru Datex-Ohmeda funguje.

Parametr FiCO₂ může být použit například k hodnocení úrovně zpětného vdechování CO₂, což v praxi při anestezii s volatilními anestetiky může nastat například při vyčerpání náplně absorberu CO₂ u polouzavřených nebo uzavřených anesteziologických okruhů. U nich lze však předpokládat, že křivka koncentrace CO₂ má stále podobný a očekávaný tvar. V případě experimentu HyperAvaSM je, jak již bylo uvedeno, interpretace parametru FiCO₂ obtížná, ale vzhledem k tomu, že rozhodujícím parametrem pro hodnocení stavu organismu je téměř výhradně EtCO₂, nepředstavuje obtížná interpretace parametru FiCO₂ v průběhu ventilačních experimentů závažný problém.

V případě obou parametrů charakterizujících koncentraci O₂, tedy EtO₂ a FiO₂, je četnost chyby větší než pro koncentraci CO₂ jak v případě dýchání do vzduchové kapsy, tak v případě dýchání přímo do sněhu. V případě se vzduchovou kapsou se chyba pro parametr

EtO₂ pohybuje v rozmezí 14 % až 92 % času stráveného při experimentu jedním probandem a v případě bez vzduchové kapsy v rozmezí 22 % až 60 % času stráveného při experimentu jedním probandem. V případě parametru FiO₂ je střední hodnota trvání chybného určení parametru opět vyšší, než v případě parametru FiCO₂. Opět to může být způsobeno z důvodu obtížné interpretace skutečné hodnoty tohoto parametru z koncentrační křivky O₂.

Statistické výsledky vyplývající z této studie získané Mann-Whitney-U testem je nutno považovat pouze za orientační, z důvodu nízkého počtu měření a vysokého rozptylu mezi měřeními u jednotlivých probandů.

2.9 Závěr

V této podkapitole bylo zjištěno, že se odchylka vypočtených hodnot EtCO₂ zobrazovaných na monitoru od skutečné hodnoty koncentrace CO₂ na konci výdechu vyskytuje ve značné míře a může ovlivnit výsledky experimentu. Monitor ukazoval nižší hodnoty EtCO₂, než byly hodnoty skutečné v případě ve sněhu uměle vytvořené vzduchové kapsy v 39 % času, po který probíhal experiment, a v případě bez vzduchové kapsy v 30 % času. Monitor ukazoval ve většině případů nižší hodnoty EtCO₂, než byly hodnoty správné. Příčinou této odchylky by mohla být deformace tvaru koncentračních křivek CO₂ a O₂, která je způsobena zpětným vdechováním již vydechnutého plynu, který se vyskytuje v části dýchacího okruhu při inspiriu. Pro ověření, zda výskyt této odchylky způsobuje nepravidelný tvar křivky dechového cyklu, způsoben přítomností dýchacího okruhu s jednocestnými ventily, byl v laboratorních podmínkách uskutečněn experiment s modelem sněhu simulující dýchání do sněhu skrze okruh použitý ve studii [3]. Tento experiment je předmětem následující kapitoly

3 Respirační experiment s dýcháním do modelu sněhu

3.1 Cíle experimentu

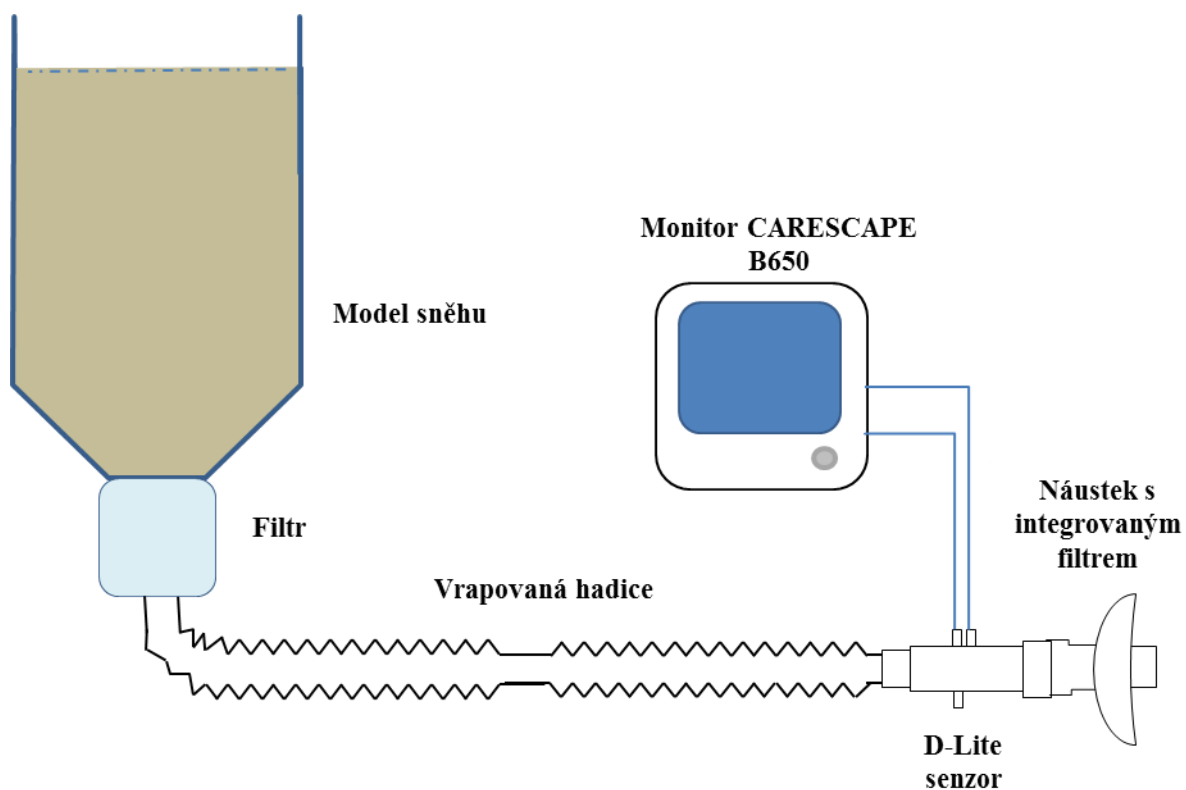
Cílem tohoto experimentu je zjistit, zda se vyskytne odchylka monitorem zobrazované hodnoty parametru EtCO₂ od skutečné hodnoty tohoto parametru i při použití dýchacího okruhu bez jednocestných ventilů. Tento okruh by neměl nezpůsobovat deformaci koncentračních křivek CO₂ a O₂ vůči očekávaným průběhům při standardním dýchání.

3.2 Metody

Okruh použitý v experimentu se skládal z náustku s integrovaným bakteriálním filtrem a 40 cm dlouhé vrapované hadice. Spirometrický senzor D-Lite byl umístěn mezi vrapovanou hadicí a náustek. Signál z tohoto senzoru byl zaznamenáván, zobrazován a vyhodnocován pomocí patientského monitoru CARESCAPE B650 (GE Healthcare, Helsinky, Finsko). Jedná se o novější verzi patientského monitoru Datex-Ohmeda S/5, který má kromě krytu stejný hardware i software. Díky použití tohoto monitoru bude možné vyloučit, že se jedná o chybu jediného přístroje použitého při experimentu HyperAvaSM. Jako model sněhu sloužily dva spojené plastové barely o objemech 5 L, do kterých byla nasypaná zahradnická mulčovací kůra simulující vlastnosti sněhu. Mezi model sněhu a dýchací okruh byl umístěn vzduchový filtr pro zamezení propadání nečistot z kůry do okruhu.



Obrázek 18: Fotografie dýchacího okruhu použitého při experimentu s modelem sněhu.



Obrázek 19: Schéma experimentu s modelem sněhu.

Na obrázku 18 je znázorněn okruh použití v experimentu a na obrázku 19 schéma zapojení jednotlivých komponentů a patientského monitoru CARESCAPE B650 při experimentu s modelem sněhu.



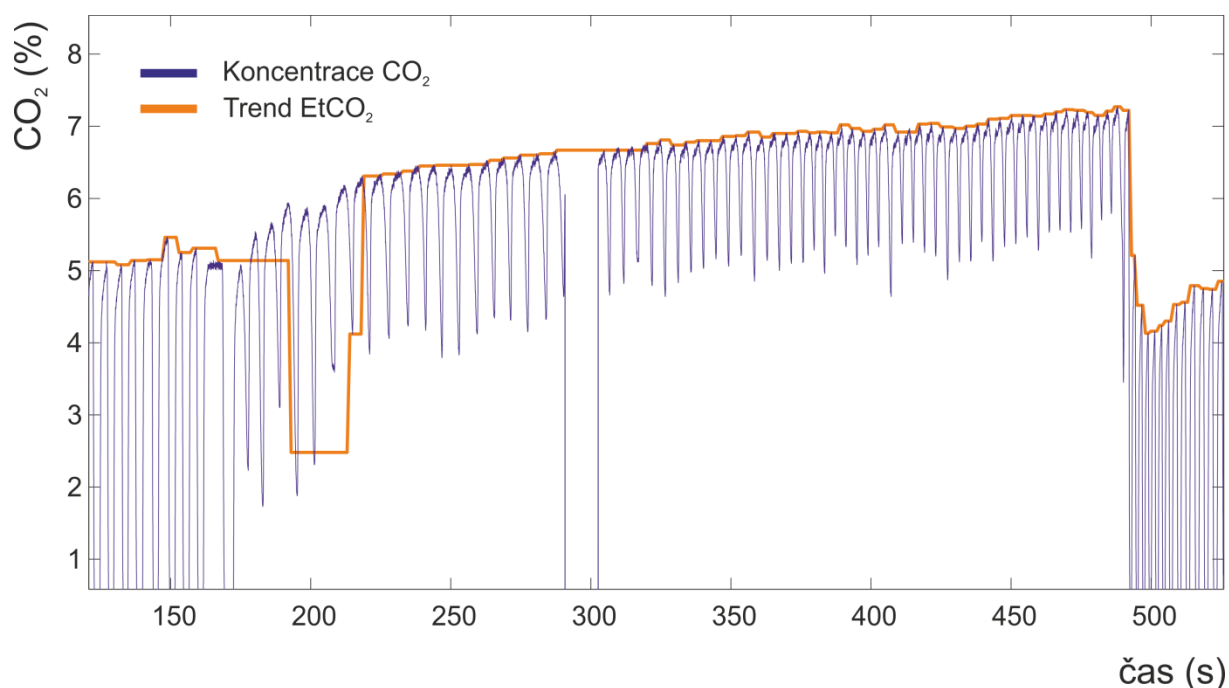
Obrázek 20: Fotografie z průběhu experimentu s modelem sněhu.



Obrázek 21: Fotografie modelu sněhu použitého při experimentu.

Tento experiment provedl autor práce sám na sobě. Před připojením dýchacího okruhu k modelu sněhu dýchal měřený asi tři minuty naprázdno z důvodu ustálení dechových parametrů. V průběhu měření byla u měřeného sledována saturace krve kyslíkem. Pokud klesla na hodnotu 85 %, byl okruh opět odpojen od modelu sněhu. Po připojení okruhu k modelu sněhu došlo téměř okamžitě ke zvětšení dechového objemu, růstu koncentrace CO_2 a poklesu koncentrace O_2 . Po odpojení došlo k rychlému návratu těchto parametrů na hodnoty podobné hodnotám před připojením k modelu sněhu. Data z monitoru byla zaznamenána pomocí softwaru Datex-Ohmeda S/5 Collect a následně zobrazena pomocí programu Matlab.

3.3 Výsledky



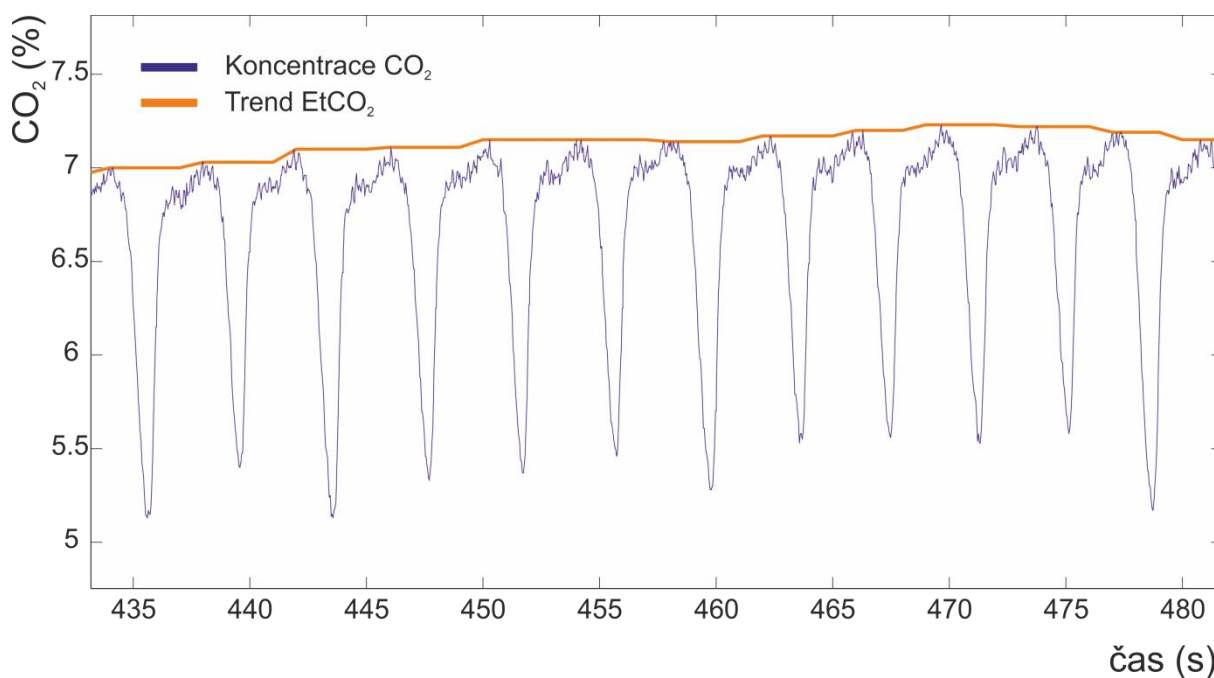
Obrázek 22: Koncentrace CO_2 při experimentu s modelem sněhu.

Na obrázku 22 je patrné, ve kterém okamžiku došlo k připojení a odpojení dýchacího okruhu k modelu sněhu. Dále lze z obrázku vyčíst, že se svými vlastnostmi model velice blíží skutečnému sněhu, neboť se tato koncentrační křivka chová velmi podobně jako v případě experimentů se skutečným sněhem (Obrázek 8). Z obrázku dále vyplývá, že monitor vyhodnotil hodnotu parametru EtCO_2 chybně pouze chvíli po připojení k modelu. Dále vyhodnocuje hodnotu parametru EtCO_2 bez jakýchkoliv odchylek. Při tomto měření nebyl monitor zapnut s dostatečným předstihem, takže v průběhu měření nastal již dříve zmíněný

proces automatického nulování senzoru, na obrázku patrný pokles koncentrace v okolí času 300 s.

3.4 Diskuse

Zásadním zjištěním tohoto experimentu je, že k odchylce mezi monitorem vypočtenou hodnotou parametru EtCO₂ a EtO₂ a skutečnou hodnotou koncentrace na konci výdechu dochází i při standardním tvaru koncentračních křivek. Dalším zjištěním tohoto experimentu je, že se nejedná o chybu jediného přístroje, který byl použit při experimentu HyperAvaSM.



Obrázek 23: Koncentrační křivka CO₂ při použití jednoduchého okruhu.

Na obrázku 23 je znázorněno několik dechových cyklů v průběhu experimentu s modelem sněhu. Je zřejmé, že v tomto úseku nemá algoritmus monitoru problém vyhodnotit hodnotu trendu parametru EtCO₂ bezchybně. Navzdory standardnímu tvaru koncentrační křivky CO₂, se po připojení okruhu k modelu sněhu objevila odchylka vypočtené hodnoty EtCO₂ od skutečné hodnoty koncentrace CO₂ na konci výdechu. Díky této skutečnosti nelze za příčinu této odchylky označit pouze nestandardní tvar koncentrační křivky.

Dalšími příčinami by mohly být výrazné změny dechových parametrů, jako jsou: dechový objem, dechová frekvence, tlak v dýchacích cestách, doba trvání expiria a inspiria a jejich poměr (I:E), jelikož během připojení a odpojení okruhu k modelu sněhu v tomto experimentu k takovým změnám skutečně došlo. Z tohoto důvodu byl naplánován další experiment, při kterém by participant měnil dechové vzory a parametry dýchání, z výsledků by mělo být patrné, v jakých případech k odchylce dochází.

3.5 Závěr

Během experimentu bylo zjištěno, že vznik odchylky monitorem vypočtených hodnot EtCO₂ od skutečné koncentrace CO₂ na konci výdechu nezpůsobuje pouze nestandardní tvar koncentrační křivky CO₂. Dále bylo zjištěno, že se nejedná o chybu jediného přístroje, který byl použit při experimentu HyperAvaSM. Pro další zjištění, z jakých důvodů k této odchylce dochází, byl navržen další experiment s dýcháním do modelu sněhu, při kterém bude participant měnit v průběhu měření dechový vzor.

4 Experiment se změnou dechového vzoru

4.1 Cíle experimentu

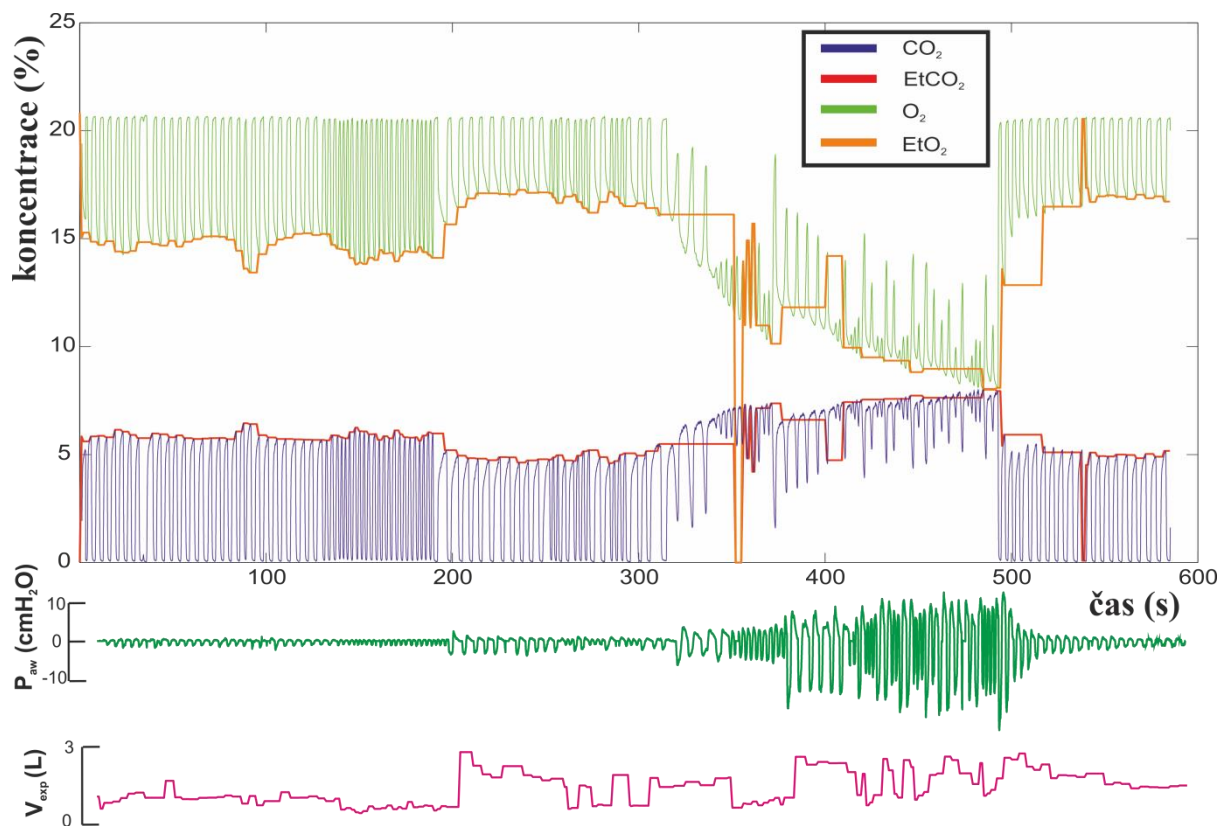
Cílem tohoto experimentu bylo provést měření, při kterém proband měnil v průběhu měření dechový vzor a dechové parametry tak, aby bylo možné zjistit příčinu odchylky monitorem vypočtených hodnot EtCO₂ od skutečné koncentrace CO₂ na konci výdechu.

4.2 Metody

V tomto experimentu byl použit stejný dýchací okruh a model sněhu, jako byl použit při předchozím experimentu (Obrázek 18 a 19). Tento experiment provedl autor práce sám na sobě. Před připojením dýchacího okruhu k modelu sněhu dýchal měřený zhruba dvě minuty naprázdno přirozeně. Poté jednu minutu mělce (malý dechový objem a vyšší dechová frekvence), jednu minutu hluboce (velký dechový objem a nižší dechová frekvence) a jednu minutu střídavě dva mělké dechové cykly a dva hluboké dechové cykly. Po připojení okruhu k modelu sněhu dýchal měřený půl minuty normálně, poté půl minuty mělce, půl minuty hluboce a nakonec střídavě dva dechové cykly mělce a dva hluboce, a to až do poklesu

saturace krve kyslíkem na hodnotu 85 %, poté byl okruh opět odpojen od modelu sněhu a proband dýchal asi minutu normálně. Data z monitoru byla zaznamenána pomocí softwaru Datex-Ohmeda S/5 Collect a následně zobrazena a analyzována pomocí programu Matlab.

4.3 Výsledky



Obrázek 24: Koncentrace O_2 a CO_2 při různých dechových vzorech.

Na obrázku 24 jsou zobrazeny koncentrační křivky O_2 a CO_2 společně s parametry EtO_2 a $EtCO_2$, tlakem v dýchacích cestách a expiračním dechovým objemem. Z těchto výsledků je zřejmé, že se monitorem chybný vypočet hodnoty $EtCO_2$ od skutečné koncentrace CO_2 na konci výdechu vyskytuje v případě EtO_2 a koncentrace O_2 ve stejných časových úsecích. Odchyłka se rovněž objevuje pouze u té části experimentu, kdy je k okruhu připojený model sněhu. Pokud model sněhu k okruhu připojený není, vyhodnocuje monitor parametr $EtCO_2$ i EtO_2 správně.

4.4 Diskuse

Hlavním zjištěním experimentu je, že ke vzniku odchylky mezi monitorem vypočtenou hodnotou parametru $EtCO_2$, EtO_2 a skutečnou hodnotou koncentrace na konci výdechu nedochází, pokud není připojen model sněhu, a to ani při změnách dechového objemu, tlaku v dýchacích cestách nebo frekvence. Po připojení modelu sněhu se odchylka objevuje okamžitě. Z tohoto výsledku můžeme usuzovat, že důvodem vzniku odchylky mezi hodnotami vypočtenými monitorem a skutečnými hodnotami na konci výdechu je nárůst koncentrace CO_2 a pokles koncentrace O_2 způsobený vdechováním vydechnutého plynu z modelu sněhu. Z tohoto důvodu byl navržen experiment, jehož cílem bylo porovnat měření s anesteziologickým přístrojem s absorbérem CO_2 s měřením bez absorberu CO_2 pro simulaci zvyšování koncentrace CO_2 .

4.5 Závěr

Při tomto experimentu bylo z naměřených dat zjištěno, že ke vzniku odchylky monitorem vypočtených hodnot $EtCO_2$ od skutečné koncentrace CO_2 na konci výdechu dochází pouze při dýchání do modelu sněhu. Změna dechového vzoru, tj. změna dechového objemu, dechové frekvence, doba trvání expiria a inspiria a jejich poměr (I:E) nebyla příčinou této odchylky. Nebyla však zjištěna přesná příčina vzniku odchylky monitorem vypočtených hodnot $EtCO_2$ od skutečné koncentrace CO_2 při dýchání do sněhu.

5 Experiment s anesteziologickým přístrojem

5.1 Cíle experimentu

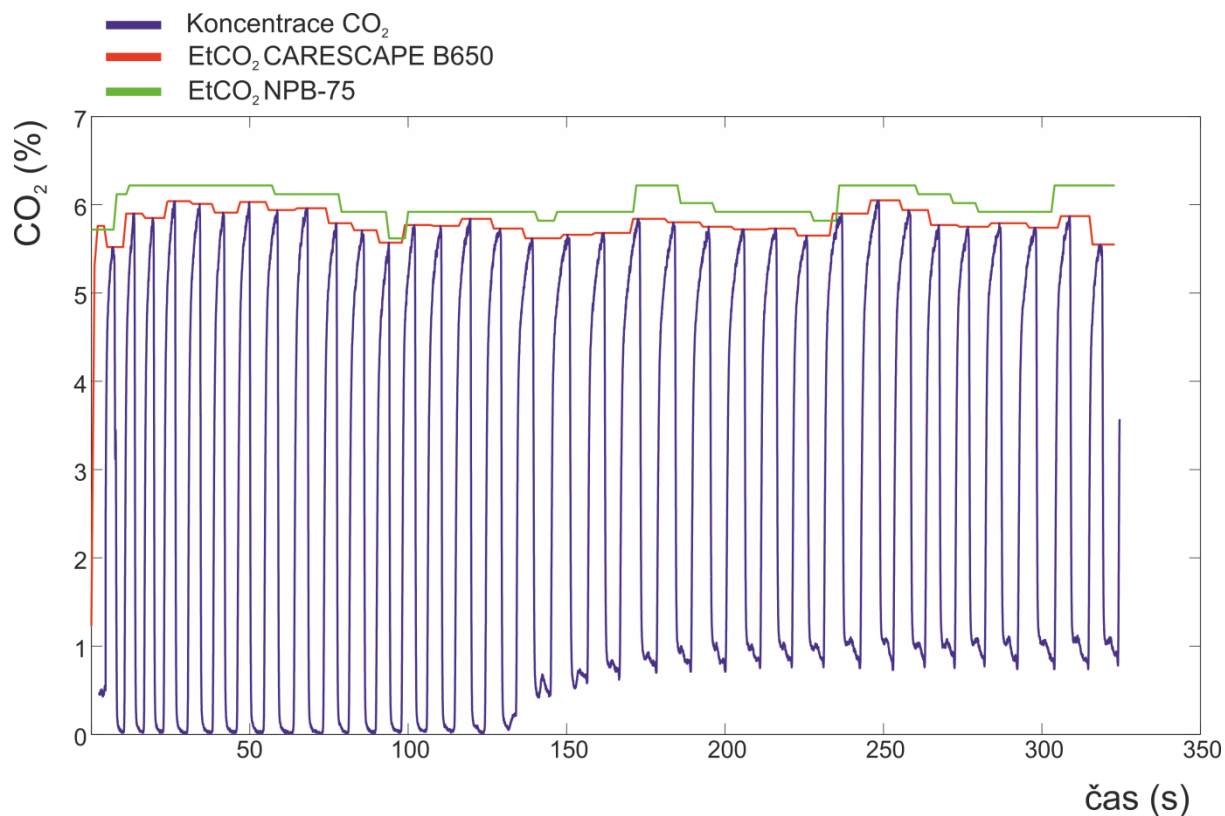
Cílem tohoto experimentu bylo ověřit, zda se odchylka mezi vypočtenou hodnotou parametru $EtCO_2$ a skutečnou hodnotou koncentrace CO_2 vyskytuje pouze u kapnometru patientského monitoru CARESCAPE B650, nebo i u jiných kapnometrů. Dalším z cílů experimentu bylo zjistit, zda se odchylka objeví i při měření za standardních podmínek s anesteziologickým přístrojem a v neposlední řadě, zda způsobí případnou chybu prosté zvýšení koncentrace CO_2 v anesteziologickém okruhu.

5.2 Metody

Při tomto experimentu byl jako dýchací okruh použit okruh, který je součástí anesteziologického přístroje Zeus Infinity Empowered (Dräger, Lübeck, Německo) společně se silikonovou anesteziologickou obličejovou maskou. Okruh se skládá ze dvou větví s jednocestnými ventily, dýchacího vaku o objemu 3 L a absorbéru CO₂. Tento přístroj umožňuje snadné vyjmutí absorbéru CO₂ z dýchacího okruhu. Mezi probanda a dýchací okruh byl umístěn respirační senzor D-lite, jehož signál vyhodnocoval patientský monitor CARESCAPE B650. Data z monitoru byla zaznamenána pomocí softwaru Datex-Ohmeda S/5 Collect. Dále byl mezi pacienta a dýchací okruh umístěn kapnograf Nellcor OxiMax NPB-75. Tento kapnograf neumožňuje export dat, z toho důvodu byla na tento přístroj nasměrována kamera zaznamenávající číselnou hodnotu parametru EtCO₂. Hodnoty EtCO₂ z kapnografu NPB-75 byly následně ze záznamu ručně přepsány do textového souboru pro možnost grafického zobrazení tohoto signálu. V první fázi experimentu byl v okruhu ponechán absorbér CO₂ s čerstvou náplní natronového vápna. V druhé fázi byl tento absorbér z okruhu vyjmut. V obou fázích experimentu byly zaznamenány signály EtCO₂ z patientského monitoru CARESCAPE B650 a kapnografu Nellcor OxiMax NPB-75. Před připojením dýchacího okruhu k dýchacímu okruhu dýchal měřený v obou fázích experimentu asi dvě minuty naprázdno.

5.3 Výsledky

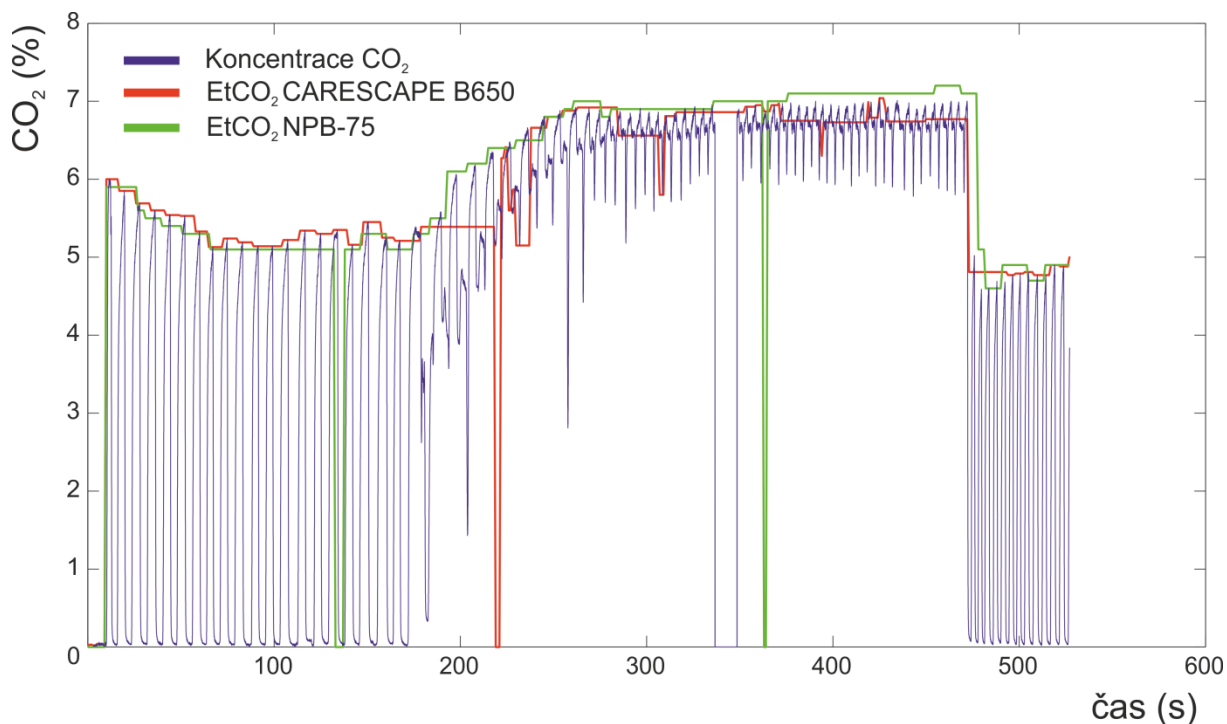
5.3.1 Fáze experimentu s přítomností absorbéru CO₂



Obrázek 25: Experiment s absorbérem CO₂.

Z obrázku 25 je zřejmé, že koncentrace inspirovaného CO₂ v okruhu nepřekročí díky absorbéru hodnotu 1 % a že nedochází k výrazným změnám parametru EtCO₂. Dále je patrné, že signály z obou přístrojů měřících tuto koncentraci se od skutečné hodnoty výrazně neliší.

5.3.2 Fáze experimentu bez absorbéru CO₂



Obrázek 26: Experiment bez absorbéru CO₂.

Na obrázku 26 je patrné, že patientský monitor CARESCAPE B650 vyhodnocuje parametr EtCO₂ s větší chybou než kapnograf NPB-75. Ihned po připojení obličejové masky se senzory k dýchacímu okruhu anesteziologického přístroje, ke kterému dochází zhruba v čase 190 s, ukazuje monitor hodnotu EtCO₂ výrazně nižší než je skutečná hodnota tohoto parametru. K chybnému určení parametru EtCO₂ monitorem CARESCAPE B650 dochází dále kolem času 300 s, 400 s a 450 s. Kapnograf NPB-75 neukazuje v průběhu experimentu výrazně nižší hodnotu EtCO₂ než je ta skutečná hodnota.

5.4 Diskuse

Hlavním zjištěním experimentu je, že odchylka mezi vypočtenou hodnotou parametru EtCO₂ a skutečnou hodnotou koncentrace CO₂ se vyskytuje v případě patientského monitoru CARESCAPE B650 ve větší míře než v případě kapnografu Nellcor OxiMax NPB-75. Signál z kapnografu NPB-75 věrněji kopíruje koncentraci CO₂ a v průběhu experimentu neukazuje hodnotu EtCO₂ výrazně nižší než skutečnou, jako je tomu u monitoru CARESCAPE, který se této chyby dopouští opět pouze při připojení k dýchacímu okruhu. Během fáze experimentu s přítomným absorbérem CO₂ vyhodnocují oba přístroje parametr EtCO₂ správně. Rozdílné určení parametru EtCO₂ je způsobeno metodou měření koncentrace těmito přístroji. Oba z přístrojů si nasávají z dýchacího okruhu malé množství plynu, které následně analyzují.

K tomuto nasávání dochází v jiných oblastech dýchacího okruhu, a proto každý z přístrojů pracuje s jinou koncentrační křivkou. Další příčinou rozdílného vyhodnocení parametru EtCO₂ může být rozdílná kalibrace přístrojů.

Uspořádání při experimentu bylo použito tak, aby co nejvíce odpovídalo reálné situaci při podávání inhalační anestezie. Z toho důvodu byla použita obličejová maska na rozdíl od doposud provedených experimentů, kde byl použit náustek. Dále byl na rozdíl od předešlých experimentů zařazen i kapnograf Nellcor OxiMax NPB-75. V první fázi experimentu, kdy byl v okruhu přítomen absorbér CO₂ (Obrázek 25) nedošlo k výraznému nárůstu koncentrace tohoto plynu v okruhu a oba přístroje, CARESCAPE B650 i Nellcor OxiMax NPB-75, vyhodnotily parametr EtCO₂ bez výrazné odchylky. V druhé fázi experimentu, kdy byl z okruhu vyjmut absorbér CO₂ (Obrázek 26), došlo k výraznému nárůstu koncentrace CO₂. Koncentrační křivka se při této fázi velmi podobá křivce z experimentu v lavinovém sněhu, a to jak z hlediska nestandardního tvaru, jenž je způsoben zpětným vdechováním vydechnutého plynu díky okruhu s jednocestnými ventily, tak z hlediska výrazně narůstajícího trendu koncentrace CO₂ v průběhu experimentu.

5.5 Závěr

Při tomto experimentu bylo z naměřených dat zjištěno, že ke vzniku odchylky přístrojem vypočtených hodnot EtCO₂ od skutečné koncentrace CO₂ na konci výdechu dochází v případě patientského monitoru CARESCAPE B650 i za standardních podmínek a použití standardního anesteziologického přístroje při zvýšení koncentrace CO₂. Kapnografu Nellcor OxiMax NPB-75 se v průběhu experimentu nedopustil výrazné odchylky, která by mohla ohrozit zdraví pacienta. Přesná příčina vzniku odchylky monitorem vypočtených hodnot EtCO₂ od skutečné koncentrace CO₂ však zjištěna nebyla.

6 Diskuse

Hlavním zjištěním této práce je, že pokud dochází v dýchacím okruhu ke zvýšení koncentrace CO_2 , dochází patientským monitorem Datex-Ohmeda S/5 a monitorem CARESCAPE B650 k nepřesnému vyhodnocení parametru EtCO_2 . Monitory ukazují ve většině případů nižší hodnotu parametru EtCO_2 , než je hodnota skutečná.

Chybný výpočet parametru EtCO_2 není způsoben nestandardním tvarem koncentrační křivky, který se může objevit při použití dýchacího okruhu s jednocestnými ventily, umožňujícího v malé míře zpětné vdechování již vydechnutého plynu. Zpětné vdechování takového plynu způsobuje, že na koncentrační křivce se v rámci jednoho dechového cyklu nacházejí dvě maxima a dvě minima koncentrace CO_2 . Tato skutečnost byla potvrzena provedením experimentu s modelem sněhu, který simuluje vlastnosti sněhu, za použití takového dýchacího okruhu, aby nedocházelo ke změně jeho standardního tvaru.

Další z příčin vzniku odchylky zobrazované hodnoty trendu EtCO_2 na patientských monitorech Datex-Ohmeda S/5 a CARESCAPE B650 od skutečné hodnoty tohoto parametru by mohla být výrazná změna dechových parametrů, jako jsou dechový objem, dechová frekvence, tlak v dýchacích cestách, doba trvání expiria a inspiria a jejich poměr (I:E). To však bylo rovněž vyvráceno uskutečněním respiračního experimentu s modelem sněhu, kdy proband měnil dechové vzory. V tomto experimentu se odchylka nevyskytla, pokud nebyl dýchací okruh připojen k modelu sněhu a, to ani při změně dechového vzoru, a tím i výše zmíněných dechových parametrů. Z toho autor usoudil, že za chybu monitoru při vyhodnocení parametru EtCO_2 z koncentrační křivky může právě nárůst koncentrace tohoto plynu v dýchacím okruhu. To by znamenalo, že k této chybě určení parametru EtCO_2 může dojít i při běžné anesteziologické praxi při vyčerpání nebo saturaci absorbéru CO_2 .

Proto byl proveden respirační experiment se standardním anesteziologickým přístrojem Zeus Infinity Empowered. Při tomto experimentu byl z dýchacího okruhu anesteziologického přístroje vyjmut absorbér CO_2 a parametr EtCO_2 byl měřen patientským monitorem CARESCAPE B650 a kapnografem Nellcor OxiMax NPB-75. Tento experiment dokázal, že parametr EtCO_2 je monitorem CARESCAPE B650 chybně vyhodnocován i za standardních podmínek a konfigurace okruhu, avšak při vyjmutí absorbéru z anesteziologického přístroje. Kpanograf Nellcor OxiMax NPB-75 vyhodnocoval tento parametr v průběhu experimentu bez výraznějších odchylek.

Podrobnější diskuse k jednotlivým experimentům byla provedena u jednotlivých kapitol. Z této studie byly odvozeny souhrnné závěry uvedené v následujících odstavcích.

7 Závěr

Cílem práce bylo zjistit, zda dochází k odchylkám mezi měřenou koncentrací CO_2 a hodnotou EtCO_2 zobrazovanou na displeji monitoru. V případě, že k této odchylce dochází, tak kvantifikovat s jakou četností, a v neposlední řadě vysvětlit, co je příčinou nesprávné funkce monitoru.

Bylo zjištěno, že při experimentech, kde dochází ke zvyšování koncentrace CO_2 , dochází k chybnému výpočtu parametru EtCO_2 , patientským monitorem Datex-Ohmeda S/5. K této odchylce od skutečné hodnoty dochází jak při použití staršího patientského monitoru Datex-Ohmeda S/5, tak při použití jeho novější verze CARESCAPE B650. Z této skutečnosti lze usoudit, že se nejedná o vadu jediného přístroje, ale o softwarovou chybu těchto monitorů.

Odchylka mezi hodnotou parametru EtCO_2 zobrazovanou na patientských monitorech Datex-Ohmeda S/5 a CARESCAPE B650 a skutečnou hodnotou koncentrace CO_2 na konci výdechu se objevila vždy ihned po zvýšení koncentrace CO_2 v inspirovaném plynu. Monitor ukazoval ve většině případů nižší hodnoty EtCO_2 , než byly hodnoty skutečné, což by v praxi mohlo zapříčinit špatnou diagnostiku až ohrožení probanda či pacienta.

Odchylka monitorem vypočtených hodnot trendu EtCO_2 od skutečné hodnoty koncentrace na konci výdechu se projevila při experimentech v extrémních podmínkách, ale i za standardních podmínek při zvýšení koncentrace CO_2 v okruhu. Tato situace může například nastat u uzavřených dýchacích okruhů anesteziologických přístrojů v případě nedostatečné funkce či absence absorbéru CO_2 .

Celková doba, po kterou monitor poskytoval chybné výsledky při experimentu v lavinovém sněhu, byla značná. V případě dýchání do sněhu s uměle vytvořenou vzduchovou kapsou nastávala chyba průměrně v 39 % času experimentu, v případě bez vzduchové kapsy v 30 % času, po který probíhal experiment.

Přesná chyba v algoritmu monitoru pro výpočet parametru EtCO_2 však zjištěna nebyla ani po sérii provedených experimentů se změnami ventilačních parametrů. Pro ověření těchto zjištění a zjištění přesné příčiny by bylo nutné provést další studii. Nejvhodnější možností se však jeví přímo kontaktovat výrobce a seznámit ho s výsledky a závěry této práce.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Závislost pravděpodobnosti přežití na délce zasypání lavinovým sněhem [2].....	10
Obrázek 2: Způsoby vyústění endotracheální kanyly [3].....	11
Obrázek 3: Závislost fyziologických parametrů na čase [4]. (Červená 2L černá 1L).....	12
Obrázek 4: Schéma fungování Avalungu [11].	13
Obrázek 5: Schéma dýchacího okruhu použitého při experimentu HyperAvaSM.	15
Obrázek 6: Fotografie dýchacího okruhu z přípravy experimentu HyperAvaSM.	15
Obrázek 7: Časový posun signálů.....	18
Obrázek 8: Zobrazení signálů.....	19
Obrázek 9: Odečítání času začátku a konce měření.	20
Obrázek 10: Vyznačení chyb v signálu trendu EtCO ₂	21
Obrázek 11: Krabicové grafy pro CO ₂	28
Obrázek 12: Krabicové grafy pro O ₂	28
Obrázek 13: Schémata okruhů z experimentu HyperAvaSM.	29
Obrázek 14: Segment A dechového cyklu pro koncentrace CO ₂ a O ₂	31
Obrázek 15: Segment B dechového cyklu pro koncentrace CO ₂ a O ₂	32
Obrázek 16: Segment C dechového cyklu pro koncentrace CO ₂ a O ₂	33
Obrázek 17: Segment D dechového cyklu pro koncentrace CO ₂ a O ₂	34
Obrázek 18: Fotografie dýchacího okruhu použitého při experimentu s modelem sněhu.	37
Obrázek 19: Schéma experimentu s modelem sněhu.	38
Obrázek 20: Fotografie z průběhu experimentu s modelem sněhu.	38
Obrázek 21: Fotografie modelu sněhu použitého při experimentu.	39
Obrázek 22: Koncentrace CO ₂ při experimentu s modelem sněhu.	40
Obrázek 23: Koncentrační křivka CO ₂ při použití jednoduchého okruhu.	41
Obrázek 24: Koncentrace O ₂ a CO ₂ při různých dechových vzorech.	43
Obrázek 25: Experiment s absorbérem CO ₂	46

Obrázek 26: Experiment bez absorbéru CO₂. 47

Reference

- [1] ROUBIK, Karel, SIEGER, Ladislav, SYKORA, Karel (2015) Work of Breathing into Snow in the Presence versus Absence of an Artificial Air Pocket Affects Hypoxia and Hypercapnia of a Victim Covered with Avalanche Snow: A Randomized Double Blind Crossover Study. *PLoS ONE* 10(12): e0144332. doi:10.1371/journal.pone.0144332
- [2] FALK, M; BRUGGER, Hermann; ADLER-KASTNER, Liselotte. Avalanche survival chances. *Nature*, 1994, 368.6466: 21-21.
- [3] PAAL, Peter, et al. Factors affecting survival from avalanche burial—A randomised prospective porcine pilot study. *Resuscitation*, 2013, 84.2: 239-243.
- [4] BRUGGER, Hermann, et al. Hypoxia and hypercapnia during respiration into an artificial air pocket in snow: implications for avalanche survival. *Resuscitation*, 2003, 58.1: 81-88.
- [5] PEKAŘ, Martin. Model difuze CO₂ v lavině. 2011. Diplomová práce, vedoucí Ing. Sieger L., CSc., Praha: ČVÚT, 2011.
- [6] GRISSOM, Colin K., et al. Hypercapnia effect on core cooling and shivering threshold during snow burial. *Aviation, space, and environmental medicine*, 2008, 79.8: 735-742.
- [7] GRISSOM, Colin K., et al. Respiration during snow burial using an artificial air pocket. *Jama*, 2000, 283.17: 2266-2271.
- [8] WINDSOR, Jeremy S., et al. The snow snorkel: A proof of concept study. *Wilderness & environmental medicine*, 2009, 20.1: 61-65.
- [9] RADWIN, Martin I.; GRISSOM, Colin K. Technological advances in avalanche survival. *Wilderness & environmental medicine*, 2002, 13.2: 143-152.
- [10] RADWIN, Martin I., et al. Normal oxygenation and ventilation during snow burial by the exclusion of exhaled carbon dioxide. *Wilderness & environmental medicine*, 2001, 12.4: 256-262.
- [11] AVALUNG. *blackdiamondequipment* [online]. [cit. 5. 5. 2016]. Dostupné z WWW: http://blackdiamondequipment.com/en/avalung-ii-sling-BD1500110000M_L1.html
- [12] GRISSOM, Colin K., et al. Hypercapnia increases core temperature cooling rate during snow burial. *Journal of Applied Physiology*, 2004, 96.4: 1365-1370.

[13] MAŠEK, Michal. *Hyperkapnie a difuze plynů ve sněžové lavině: Změny funkčních parametrů jedinců v krizové situaci*. Praha, 2013. Autoreferát disertační práce. UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE Fakulta tělesné výchovy a sportu.

[14] DATEX-OHMEDA. S/5TM Compact Anesthesia Monitor Technical Reference Manual. Dostupné z WWW:

[http://www.frankshospitalworkshop.com/equipment/documents/ecg/service_manuals/Datex-Ohmeda_S-5_Anaesthetic_Monitor_-_Technical_reference_manual_\(2006\).pdf](http://www.frankshospitalworkshop.com/equipment/documents/ecg/service_manuals/Datex-Ohmeda_S-5_Anaesthetic_Monitor_-_Technical_reference_manual_(2006).pdf)

[15] DATEX-OHMEDA. S/5™ Compact Airway Module, E-CAiOVX Technical Reference Manual.

Seznam příloh

CD obsahující

- Elektronickou verzi této práce
- Zadání této bakalářské práce
- Abstrakt česky
- Abstrakt anglicky
- Klíčová slova