

**MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII ȘI TINERETULUI
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
FACULTATEA DE HIDROTEHNICĂ
DEPARTAMENTUL DE HIDRAULICĂ ȘI PROTECȚIA MEDIULUI**

CONTRIBUȚII LA TERMOHIDRAULICA PROCESELOR HIPERBARE

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -



Conducător științific

Prof. Dr. Ing. Mircea DEGERATU

Doctorand

Ing. Elena Felicia COSTEA (ALBOIU)

București

2020

Nr. 2.159 / 05.03.2020.

Domnului/Doamnei,

Vă facem cunoscut că în ziua de 10.04.2020 ora 11,00 în Sala II-7, din Facultatea de Hidrotehnică, Bdul. Lacul Tei nr. 122-124, sector 2, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat cu titlul: „CONTRIBUȚII LA TERMOHIDRAULICA PROCESELOR HIPERBARE”, elaborată de ing. COSTEA (căs. ALBOIU) A. Elena – Felicia, în domeniul fundamental „Științe ingineresti”, domeniul de doctorat „Inginerie civilă și instalații”, cu următoarea comisie:

Președinte:	Conf.univ.dr.ing. DIMACHE Alexandru Nicolae	Decan - Facultatea de Hidrotehnică Universitatea Tehnică de Construcții București
Conducător de doctorat:	Prof.univ.dr.ing. DEGERATU Mircea	Facultatea de Hidrotehnică Universitatea Tehnică de Construcții București
Referenți oficiali:	C.S. II. dr.ing. RUS Simona Elena	Centru de scafandri Constanța (UM 02145)
	Prof.univ.dr.ing. SAFTA Carmen Anca	Universitatea Politehnică din București
	Prof.univ.dr.ing. GEORGESCU Andrei Mugur	Universitatea Tehnică de Construcții București

Vă trimitem rezumatul tezei de doctorat, cu rugămintea de a ne comunica în scris, aprecierile și observațiile dumneavoastră până la data de 09.04.2020, pe adresa scoala.doctorala@utcb.ro.

Vă invităm cu acest prilej să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,
Prof.univ.dr.ing. Radu Sorin VACĂREANU

SECRETAR ȘEF UNIVERSITATE,
Ing Mihaela VOICA

DIRECTOR ȘCOALA DOCTORALĂ,
Conf.univ.dr.ing. Ilinca NĂSTASE

Cuvânt înainte

Susținerea activităților subacvatice este condiționată de existența a două elemente esențiale inseparabile și anume echipamentul de scufundare și amestecul respirator. O serie de factori determinanți, dintre care se amintesc tipul și scopul scufundării, adâncimea de lucru, modul de efectuare a scufundării stau la baza alegerii amestecului respirator ce urmează a fi folosit de către scafandri și a echipamentului prin intermediul căruia acesta va fi livrat pentru consum.

Prezenta teză de doctorat tratează două teme majore pentru domeniul scufundărilor profesionale. Prima temă se referă la descrierea, printr-un model matematic analitic, a proceselor hiperbare aferente scufundărilor de sistem, scufundări de mare adâncime ce implică parcurgerea unor etape complexe din punctul de vedere al proceselor hiperbare ce au loc. Cea de a doua temă majoră abordată se referă la fabricarea de amestecuri respiratorii. În acest sens, a fost propusă o nouă metodă de fabricare, metodă bazată strict pe fenomene gazodinamice. De asemenea, s-a conceput, proiectat și testat o instalație experimentală prin care metoda de fabricare propusă să poată fi aplicată.

Un aspect important privind elaborarea prezentei teze de doctorat este reprezentat de îmbinarea activităților de cercetare derulate în cadrul stagiului doctoral cu activitățile derulate din postura de membră în echipa de cercetare a cinci contracte câștigate prin competiție ce au făcut parte din *Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Forțelor Navale Române* pentru anii 2015, 2016 și 2017. Din punct de vedere al articolelor rezultate din activitatea științifică derulată, până în prezent au fost elaborate patru articole cotate ISI, publicate în jurnale ale unor conferințe internaționale. De asemenea, trebuie amintit faptul că, în scopul dezvoltării instalației experimentale realizată în decursul stagiului doctoral, a fost depusă în cadrul PN-III-CERC-CO-PED-2-2019 o propunere de proiect ce are ca scop trecerea acestei instalații de la nivelul actual de maturitate tehnologică și anume TRL III, la nivelul superior, adică TRL IV.

Având în vedere deosebita atenție cu care am fost ghidată de-a lungul stagiului doctoral, permanenta preocupare pentru menținerea studiilor efectuate la un nivel științific cât mai înalt, implicarea mea în contracte de cercetare a căror echipe de elaborare au fost formate din membri cu o mare experiență în domeniul hidraulicii hiperbare, doresc să adresez mulțumirile mele domnului profesor dr. ing. Mircea Degeratu, conducătorul științific, de a cărui îndrumare m-am bucurat de-a lungul stagiului doctoral.

Doresc, de asemenea, să adresez mulțumirile mele doamnei dr. ing. Simona Rus Cercetător Științific II în cadrul laboratorului Cercetare Pătrundere Sub Apă (C.P.S.A.) care a făcut posibilă atât realizarea instalației experimentale de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii, concepută în cadrul stagiului doctoral, cât și testarea acesteia în cadrul „Laboratorului Hiperbar”, ambele laboratoare fiind parte a Centrului de Scafandri din Constanța, componentă a Forțelor Navale Române. Doresc să mulțumesc, de asemenea, și personalului ce activează în cadrul Laboratorului Hiperbar care a asigurat efectuarea studiilor experimentale în cele mai bune condiții și nu în ultimul rând conducerii Centrului de Scafandri Constanța care, în spiritul bunei colaborări de circa 40 de ani dintre Universitatea Tehnică de Construcții București și instituția pe care o conduc, au susținut și facilitat derularea activităților de cercetare prezentate anterior.

Doresc, de asemenea, să adresez mulțumirile mele membrilor comisiei de doctorat, pentru amabilitatea de a fi acceptat să analizeze teza de doctorat și să întocmească un referat asupra acestei lucrări.

Doctorand

Ing. Elena – Felicia ALBOIU

CUPRINS

Cuvânt înainte	3
Introducere	6
Capitolul 1	
Aspecte generale privind gazele și amestecurile de gaze respiratorii folosite în domeniul scufundărilor	8
Capitolul 2	
Procedee de scufundare, instalații și echipamente hiperbare folosite în domeniul scafandrierii	
2.1 Procedee de scufundare	9
2.1.1 Scufundările unitare	9
2.1.2 Scufundările în saturație	10
2.2 Echipamente hiperbare folosite în domeniul scafandrierii	10
Capitolul 3	
Modele matematice pentru descrierea proceselor hiperbare aferente scufundărilor de sistem, de mare adâncime	
3.1 Model matematic pentru descrierea proceselor hiperbare aferente unei scufundări de sistem, unitare, la adâncimea de 180 m, fără vidarea inițială a barocamerei (MMSS-BN)	11
3.1.1 Faza compresiei scafandrilor pentru modelul matematic MMSS-BN	12
3.1.2 Faza decompresiei scafandrilor pentru modelul MMSS-BN	15
3.1.3 Etapa finală de decompresie (EFD-BN)	18
3.2 Planul unei scufundări de sistem, reale, la adâncimea de 180 m, cu barocameră vidată (PSSR-BV) și modelul matematic pentru descrierea proceselor hiperbare aferente acestei scufundări de sistem (Modelul matematic - MMSS-BV)	18
3.2.1 Planul scufundării de sistem, reale, la adâncimea de 180 m, cu barocameră vidată (PSSR-BV)	18
3.2.2 Modelul matematic pentru descrierea proceselor hiperbare aferente scufundării de sistem, unitare, la adâncimea de 180 m, cu vidarea inițială a barocamerei (MMSS-BV)	19
3.3 Validarea modelului matematic al unei scufundări cu vidarea barocamerei printr-un test de scufundare reală de sistem, la adâncimea de 180 m	24

Capitolul 4

Fabricarea amestecurilor respiratorii folosite în domeniul scufundărilor

27

Capitolul 5

Instalație pentru prepararea în flux continuu a amestecurilor gazoase respiratorii, cu posibilitatea livrării directe spre consumator. Concept și principii generale de funcționare

28

Capitolul 6

Instalația experimentală destinată validării modelului de calcul aferent metodei de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare NITROX și HELIOX și ternare TRIMIX

31

Capitolul 7

Studii experimentale privind realizarea în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare NITROX, HELIOX și ternare TRIMIX utilizând instalația experimentală realizată

7.1 Relații de calcul utilizate pentru modelarea proceselor gazodinamice aferente instalației experimentale 33

7.2 Prelucrarea datelor rezultate din testele efectuate pe instalația experimentală 37

Capitolul 8

Contribuții și elemente de originalitate

45

BLIOGRAFIE

49

INTRODUCERE

Explorarea, studierea și exploatarea mediului subacvatic ocupă un rol important în ansamblul activităților umane atât din punct de vedere economic cât și ecologic. De asemenea, domeniul scufundărilor prezintă și un interes militar deosebit datorită faptului că, în cazul unor confruntări armate, acest mediu se poate transforma în teatru de operațiuni militare în desfășurarea cărora un rol important îl reprezintă stăpânirea tehnologiilor hiperbare și utilizarea echipamentului subacvatic. Pentru desfășurarea acestor activități subacvatice, omul trebuie să pătrundă într-un mediu ostil care exercită asupra sa acțiuni adverse, cele mai importante fiind adaptarea la presiuni cu valori mult mai mari decât presiunea atmosferică (hiperbarism) și la lipsa posibilității de a dispune nelimitat de oxigenul necesar vieții.

Procesele hiperbare sunt procese desfășurate în condiții de presiune superioară presiunii normale (atmosferice). Scufundările profesionale, efectuate pentru realizarea de studii științifice și intervenții industriale sau militare, reprezintă un domeniu care implică procese hiperbare.

Stadiul actual de dezvoltare al domeniului

Pătrunderea în mediul subacvatic a constituit pentru om, încă din cele mai vechi timpuri, o permanentă provocare. Inițial, această activitate se realiza în apnee, reușita incursiunii fiind asigurată așadar doar de abilitățile fizice ale scufundătorului. Ulterior, s-au utilizat clopote pentru scufundare. Pătrunderea în mediul acvatic cu aport de aer de la suprafață și aparatele autonome sunt tehnici de dată relativ recentă. Dezvoltarea de-a lungul ultimelor patru decenii a tehnologiilor cu aplicații în domeniul scufundărilor a dus la progrese considerabile, concretizate prin atingerea unor adâncimi și timpi de lucru în imersie tot mai mari.

În ceea ce privește conducerea și urmărirea proceselor hiperbare aferente scufundărilor simulate sau reale de sistem, în prezent acestea sunt realizate de o echipa „de suprafață” alcătuită din specialiști în inginerie hiperbată care urmăresc evoluția mărimilor fizice determinate asociate acestor procese (presiuni, presiuni parțiale, participații masice, participații volumice, etc.), tehnicieni chesonieri ce execută manevrele specifice acestor procese hiperbare de la panoul de comandă și medici specializați, ce intervin în cazul în care apar probleme medicale la scafandri supuși compresiei sau decompresiei.

Pentru a pătrunde la adâncimi din ce în ce mai mari și a asigura timpi de lucru din ce în ce mai lungi, lucru care din motive ce țin de fiziologia umană nu pot fi efectuate cu aer comprimat folosit ca gaz respirator, de-a lungul timpului au fost studiate diverse amestecuri de gaze realizate artificial. Unele dintre acestea s-au dovedit a răspunde dezideratelor, fiind la ora actuală folosite pe scară largă în scufundarea de mare adâncime. Aceste amestecuri reprezintă o compoziție gazoasă omogenă, formată din unul sau două gaze neutre și oxigen. Gazele cele mai folosite în scufundări sunt: oxigenul, azotul, heliul și hidrogenul în amestecuri precum NITROX (azot și oxigen), HELIOX (oxigen și heliu), TRIMIX (oxigen, azot și heliu). Compoziția amestecului respirator este strâns legată de o serie de factori precum adâncimea de scufundare și tipul/procedeul și strategia de scufundare aleasă.

La ora actuală, în ceea ce privește prepararea amestecurilor gazoase respiratorii, binare sau ternare, utilizate atât la scufundările de sistem cât și la scufundările autonome, acestea se fabrică printr-o injectare succesivă și controlată a gazelor componente în recipiente cu volum constant, urmărindu-se presiunea din recipiente. Prin această metodă se obțin amestecuri predeterminate ce vor putea fi folosite atât la umplerea recipientelor ce alimentează cu amestec gazos barocamerele sistemelor de scufundare, cât și la umplerea buteliilor scafandrilor autonomi.

Din experiența de peste 35 de ani de scufundări unitare și în saturație realizate la Centrul de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române, a apărut necesitatea realizării și urmăririi automate a proceselor specifice acestor scufundări de sistem pentru a elimina eventualele greșeli umane.

Dat fiind faptul că, în cazul în care adâncimile de scufundare sau tipul scufundării necesită alte amestecuri decât cele deja preparate, considerate ca optime, acest lucru nu poate fi îndeplinit, scufundarea fiind efectuată cu amestecuri deja fabricate și deci cu un randament al scufundării ceva mai redus. De aceea, s-a impus ca necesară conceperea unei alte metode constând într-o amestecare, în flux continuu, a componentelor gazoase cu injectarea simultană a gazelor componente la proporția dorită, utilizându-se pentru aceasta dispozitive prevăzute cu ajutoare calibrate lucrând în domeniul critic (sonic) ce asigură livrarea componentelor la debite masice constante, independente de adâncimea de scufundare.

Scopul lucrării

Scopul tezei de doctorat, intitulată „*Contribuții la termohidraulica proceselor hiperbare*” elaborată în cadrul departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului, Facultatea de Hidrotehnică, Universitatea Tehnică de Construcții București, este de a realiza un studiu menit să deschidă noi perspective în cercetarea fenomenelor specifice ingineriei hiperbare. Pentru aceasta, în cadrul lucrării sunt abordate două teme, ambele cu un puternic caracter de originalitate și o importanță deosebită pentru acest domeniu.

Primă temă abordată în cadrul tezei de doctorat se referă la conceperea unor modele analitice capabile să descrie matematic fazele unei scufundări unitare de sistem, efectuate la mare adâncime, aceste modele putând sta la baza elaborării altor modele matematice pentru scufundări la diferite adâncimi și folosind diferite amestecuri respiratorii.

A doua temă din cadrul tezei de doctorat are ca obiect realizarea și testarea unui nou tip de instalație pentru prepararea amestecurilor respiratorii folosite de către scufundatori, principiul de funcționare fiind bazat strict pe fenomene termohidraulice. Aceste principii au fost descrise, în prealabil, printr-un aparat matematic special creat, util atât pentru modelarea proceselor ce au loc în decursul preparării amestecurilor respiratorii cât și pentru dimensionarea corespunzătoare a elementelor principale ale instalației experimentale utilizată la efectuarea testelor experimentale.

Capitolul 1

ASPECTE GENERALE PRIVIND GAZELE ȘI AMESTECURILE DE GAZE RESPIRATORII FOLOSITE ÎN DOMENIUL SCUFUNDĂRILOR

Pentru desfășurarea activităților subacvatice, omul trebuie să pătrundă într-un mediu ce exercită asupra sa o serie de acțiuni la care organismul său trebuie să se adapteze. Dintre acestea, adaptarea sa la presiuni cu valori mult mai mari decât presiunea atmosferică (hiperbarism), lipsa posibilității de a dispune nelimitat de oxigenul necesar vieții cât și efectele gazelor folosite pentru scufundare asupra organismului uman supus unor presiuni ridicate, sunt cele mai importante aspecte ce trebuie avute în vedere în cadrul oricărei scufundări. Astfel, odată cu creșterea adâncimii la care operează și a timpilor de expunere la presiuni ridicate, scafandri se pot confrunta cu probleme de natură medicală (fizică și psihică) ce le influențează activitatea. Dintre acestea, bolile asociate fazelor scufundării, mai precis decompresiei, sunt cele mai întâlnite. Din acest motiv, la ora actuală în scufundarea profesională de mare adâncime, indiferent de tipul acesteia, de sistem sau autonomă, sunt folosite amestecuri artificiale de gaze. Aceste amestecuri respiratorii reprezintă o compoziție gazoasă omogenă, formată din unul sau două gaze inerte și oxigen. Gazele cele mai folosite în scufundări sunt: oxigenul, azotul, heliul și hidrogenul în amestecuri precum NITROX (azot și oxigen), HELIOX (oxigen și heliu), TRIMIX (oxigen, azot și heliu) și HIDROX (oxigen și hidrogen).

Prepararea oricărui amestec gazos respirator se realizează având în vedere teoriile și legile gazelor dar și o serie de ipoteze de lucru. Ca urmare, în capitolul 1 al tezei de doctorat, mai precis în subcapitolul 1.2 intitulat „Legile gazelor cu aplicații în domeniul hidraulicii hiperbare” sunt amintite teoriile privind cinetica moleculară și sunt prezentate legile gazelor și condițiile lor de aplicare, avute în vedere la prepararea amestecurilor respiratorii.

În subcapitolul 1.3 sunt trecute în revistă gazele cu implicații în domeniul scufundărilor, sunt prezentate proprietățile lor fizico-chimice, modul lor de obținere și este precizată natura și de asemenea și originea acestora în cadrul activităților derulate, fie pentru prepararea amestecurilor respiratorii, fie ca urmare a proceselor metabolice din ce au loc în perioada scufundării în corpul scafandrilor.

Subcapitolul 1.4 intitulat „Amestecuri respiratorii folosite în procesele hiperbare cu aplicații în domeniul scufundărilor” are ca scop prezentarea principalelor amestecuri respiratorii obținute în mod artificial, folosite la scară largă de către echipele profesioniste de scufundare. Fiecare din amestecurile luate în discuție este caracterizat prin domeniul său de utilizare, avantajele și dezavantajele ce le prezintă, raporturile uzuale dintre gazele constitutive și o serie de caracteristici fizice ce trebuie avute în vedere la prepararea acestor amestecuri.

Capitolul 2

PROCEDEE DE SCUFUNDARE, INSTALAȚII ȘI ECHIPAMENTE HIPERBARE FOLOSITE ÎN DOMENIUL SCAFANDRIERII

Cel de al doilea capitol al tezei de doctorat cuprinde o prezentare a procedeelor de scufundare folosite de către echipele de scafandri profesioniști (subcapitolul 2.1) și a principalelor echipamente hiperbare folosite de către aceștia (subcapitolul 2.2).

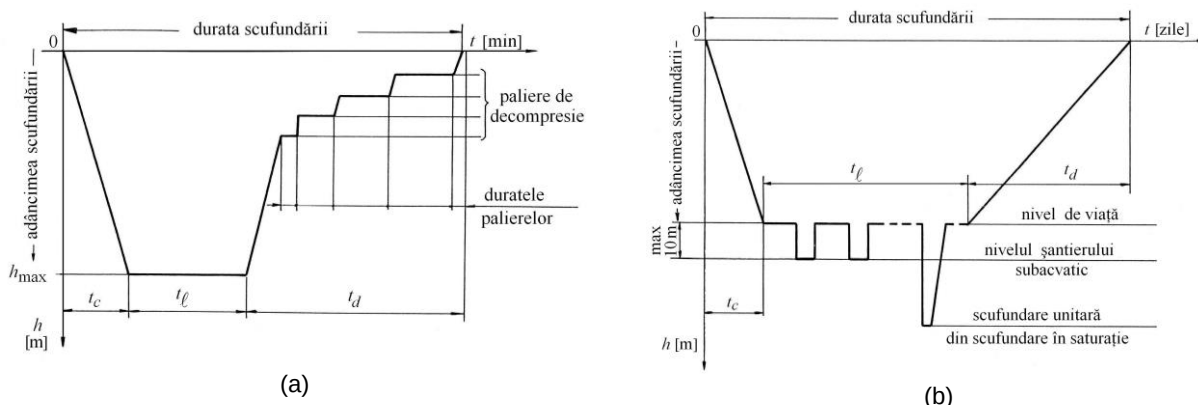
2.1. PROCEDEE DE SCUFUNDARE

Procedeelor de scufundare folosite de către echipele de scafandri profesioniști se clasifică în două categorii și anume:

- scufundări unitare;
- scufundări în saturație.

Scufundările unitare sunt acele scufundări la care fazele constituente se derulează în mod succesiv, adică compresia scafandrilor, lucrul în imersie și decompresia scafandrilor se derulează fără pauze între ele.

Scufundările în saturație presupun presurizarea scafandrilor, în barocamere, până la valori ale presiunii corespunzătoare adâncimii scufundării, transferul acestora în incinte presurizate (turele de scufundare) în vederea transportului la adâncimea de lucru. După efectuarea operațiunilor, pentru readucerea scafandrilor în barocamere, se reia în sens invers succesiunea de proceduri menționată.



t_c – durata de compresie; t_l – durata de lucru în imersiune; t_d – durata de decompresie

(a) scufundare unitară; (b) scufundare în saturație

Figura 2.1 Aspectul profilului scufundărilor corespunzătoare celor două procedee [46]

Durata scufundării este exprimată matematic prin relația: $t_s = t_c + t_l + t_d$, iar termenii ce o compun au semnificația dată în figura 2.1.

2.1.1 Scufundările unitare

Acest procedeu de scufundare poate să se desfășoare în două moduri și anume:

- scufundare unitară autonomă - pătrunderea scafandrilor în mediul acvatic cu echipament de respirat individual ce îi asigură pe întreaga durată a misiunii cantitatea amestecului respirator natural sau artificial la presiunea corespunzătoare adâncimii la care se află;
- scufundare unitară de sistem - amestecul respirator folosit de către scafandru este asigurat de la suprafață sau din echipamente și/sau vehicule submersibile; în cadrul acestui tip de scufundări este necesar un suport logistic complex, cu ajutorul căruia să se susțină scufundarea.

Adâncimile maxime ce pot fi atinse prin cele două moduri sunt de 60 - 70 m, pentru scufundarea autonomă și 180 - 200 m pentru scufundarea unitară de sistem pentru ambele cazuri duratele de lucru fiind reduse.

2.1.2 Scufundările în saturație

Acest procedeu presupune presurizarea inițială a scafandrilor în vederea saturării țesuturilor cu gazul sau gazele inerte din compoziția amestecului respirator. În acest scop se utilizează echipamente hiperbare complexe și personal auxiliar. Derularea scufundărilor în saturație presupune parcurgerea unor etape enumerate în continuare.

Compresia - se execută continuu sau discontinuu pe paliere, în barocamere, până la presiuni în general cu 1 bar mai mici decât valoarea corespunzătoare adâncimii de lucru.

Transportul la adâncimea de lucru – se execută cu turele de scufundare sau minisubmarine presurizate inițial la presiunea corespunzătoare nivelului de viață; ulterior transbordării scafandrilor se efectuează o nouă etapă de presurizare prin creșterea presiunii până la valoarea corespunzătoare adâncimii de lucru.

Părăsirea mijlocului de transport – după asigurarea echipresiunii dintre mediul interior și mediul exterior (presurizarea turelei), scafandru /scafandrii părăsesc incinta pentru a derula activitățile propuse; după expirarea duratei de lucru, scafandru sau echipa de scafandri este readusă în barocamera de la suprafață unde urmează o perioadă de odihnă în condiții de presiune corespunzătoare nivelului de viață; pentru o echipă de scafandri operațiunea se repetă; finalizarea intervenției subacvatice se încheie cu decompresia scafandrilor.

Decompresia – decurge în general continuu, vitezele de derulare a acestei etape sunt dictate, de natura gazului/ gazelor inerte din compoziția amestecului respirator și de presiunea corespunzătoare nivelului de viață.

Scufundările în saturație, se aplică în intervalul de adâncimi 48 ÷ 600 m și în mod obligatoriu în cazul intervențiilor reale pentru adâncimi de lucru ce depășesc 180 m.

2.2. ECHIPAMENTE HIPERBARE FOLOSITE ÎN DOMENIUL SCAFANDRIERIEI

Pentru efectuarea scufundărilor de sistem, unitare și în saturație, sunt necesare o serie de echipamente folosite pentru presurizarea și transportul scafandrilor la adâncimea de lucru.

Barocamerele - incinte închise, presurizabile, folosite pentru scufundări sau pentru simulări și teste de aptitudini sau pentru intervenții și studii medicale.

Turelele de scufundare - incinte uscate, presurizabile, mobile, prin intermediul cărora se efectuează transferul scafandrilor și al echipamentelor de la suprafață la adâncimea de lucru.

Laboratoarele submerse - sunt structuri subacvatice, locuibile, care asigură condițiile necesare vieții pe durata derulării activităților subacvatice ce se derulează pe mai multe zile (de exemplu prospecțiuni subacvatice sau observații și cercetări asupra habitatelor, faunei și florei subacvatice).

Submersibile purtătoare de scafandri - destinate transportului scafandrilor putând asigura totodată suport tehnic și logistic în derularea operațiunilor subacvatice de mare adâncime.



Figura 2.2 Turela de scufundare închisă - sistemului de scufundare al navei „Grigore Antipa” aparținând Centrului de Scafandri Constanța



Figura 2.3 Laboratorul submers LS - 1



Figura 2.4 Minisubmarinul tip SM - 358 deținut de Centrul de Scafandri Constanța

Capitolul 3

MODELE MATEMATICE PENTRU DESCRIEREA PROCESELOR HIPERBARE AFERENTE SCUFUNDĂRILOR DE SISTEM, DE MARE ADÂNCIME

În cel de al treilea capitol al tezei de doctorat, sunt prezentate două modele matematice, originale, concepute de autoarea tezei, cu ajutorul cărora pot fi descrise, cât mai fidel posibil, procesele hiperbare specifice celor două faze importante ale unei scufundări de sistem, de mare adâncime, și anume fazele de compresie a scafandrilor (presurizare a barocamerei) și de decompresie a scafandrilor (depresurizare a barocamerei), faze ce au loc în cazul oricărei misiuni de scufundare de sistem.

Primul model matematic, denumit „**Model Matematic pentru Scufundare de Sistem - cu Barocameră Nevidată inițial**” (**MMSS-BN**), se referă la o scufundare de sistem la adâncimea de 180 m, caracterizată prin lipsa vidării inițiale a barocamerei și prin asigurarea unei presiuni parțiale a oxigenului la decompresie de 600 mbar (abs.).

Cel de-al doilea model matematic, denumit „**Model Matematic pentru Scufundare de Sistem – cu Barocameră Vidată inițial**” (**MMSS-BV**), se referă la o scufundare de sistem la adâncimea de 180 m, caracterizată prin vidarea inițială a barocamerei și prin asigurarea unei presiuni parțiale a oxigenului la decompresie de 650 mbar (abs.). **Acest model matematic a fost validat prin programul de scufundare reală testat în cadrul Laboratorului Hiperbar din Centrul de Scafandri Constanța.**



Figura 3.1 Ansamblul hiperbar din dotarea Laboratorului Hiperbar al Centrului de Scafandri Constanța [70]



Figura 3.2 Scafandrii Centrului de Scafandri Constanța în timpul scufundării test la 180 m, cu amestec HELIOX 5/95 efectuate în barocamera Laboratorului Hiperbar

La elaborarea celor două modele matematice s-au considerat următoarele ipoteze simplificatoare:

- se neglijează participația volumică a dioxidului de carbon din amestecul de gaze din barocameră datorită valorilor foarte scăzute ale concentrației de CO_2 din amestec prin existența unui absorber performant de CO_2 ;
- se neglijează participația volumică a vaporilor de apă din amestecul de gaze din barocameră datorită valorilor foarte scăzute ale concentrației de vapori din amestec prin existența unui sistem foarte bun de reținere a vaporilor din barocameră;
- modelele matematice nu cuprind nici consumurile de oxigen și nici completările continue cu oxigen pentru completarea oxigenului consumat de scafandrii din barocameră.

3.1. Model matematic pentru descrierea proceselor hiperbare aferente unei scufundări de sistem, unitare, la adâncimea de 180 m, fără vidarea inițială a barocamerei (MMSS-BN)

Scufundarea modelată MMSS-BN este o scufundare de tip test, obligatorie pentru toți scafandrii de mare adâncime pe parcursul căreia se urmărește comportamentul și adaptarea scafandrilor la Sindromul Nervos al Înaltelor Presiuni (SNIP).

Compresia scafandrilor, respectiv presurizarea barocamerei, se realizează prin presurizare cu amestec gazos binar HELIOX 5/95 (cu concentrația de 5% pentru oxigen, și 95% pentru heliu) peste aerul aflat inițial în barocameră, la presiunea atmosferică.

Pentru modelarea matematică a scufundării, s-a impus ca, pe timpul decompresiei, presiunea parțială a oxigenului să fie constantă și egală cu 0,6 bara adică 600 mbar (abs.).

Fazele scufundării MMSS-BN cuprind:

- faza de compresie a scafandrilor, adică de presurizare a barocamerei, pentru cazul Barocamerei Nevidate (FC-BN);
- faza de decompresie a scafandrilor, adică de depresurizare a barocamerei, pentru cazul Barocamerei Nevidate (FD-BN).

Etapele de modelare și codificarea folosită în structura modelului matematic MMSS-BN sunt prezentate în schema 3.1.

Schema 3.1 Schema modelului matematic al scufundării MMSS-BN, cu fazele și grupurile de etape de calcul aferente

MMSS- BN			
18 etape	9 etape	16 etape	1 etapă
GECU-BN	GED1-BN	GED2-BN	EFD-BN
FC-BN		FD-BN	

În tabelul 3.1 abrevierile folosite au următoarea semnificație: GECU-BN - Grup de Etape de Compresie Unic; GED1-BN/ GED2-BN - Grupul de Etape de Decompresie 1 respectiv 2 pentru cazul Barocamerei Nevidate; EFD-BN - Etapa Finală de Decompresie pentru cazul Barocamerei Nevidate.

3.1.1 Faza de compresie corespunzător modelului matematic MMSS-BN

Grupul de etape GECU-BN din carul modelării scufundării de sistem, unitare, la adâncimea de 180 m se caracterizează prin următoarele:

- realizează legătura între cele 19 stări aparținând grupului;
- toate cele 18 etape de calcul se referă la presurizarea barocamerei cu amestec binar de gaze HELIOX 5/95 (5% Ox și 95% He), peste aerul aflat inițial în barocameră, la presiunea atmosferică, (la adâncimea echivalentă de 0 m), în barocameră rezultând practic un amestec ternar de gaze (Ox, Ni, He);
- stare inițială (C_1) se caracterizează prin presiunea totală $p_{C1am} = 1$ bara, prin adâncimea echivalentă $H_{C1} = 0$ m și prin presiunea parțială a oxigenului $p_{C1,Ox} = 0,2092$ bara = 209,2 mbar (abs.);
- stare finală (C_{19}) se caracterizează prin $p_{C19am} = 19$ bara, $H_{C19} = 180$ m și $p_{C19,Ox} = 1,1099$ bara = 1109,9 mbar (abs.), numită și Nivel de Viață (NV), la care scafandrii staționează (se efectuează diferite teste specifice urmăririi efectelor Sindromului Nervos al Înalteor Presiuni -SNIP).

Procedura urmată pentru determinarea relațiilor de calcul ale mărimilor caracteristice ale celor 19 stări ale amestecului de gaze din barocameră în timpul FC-BN, s-a realizat o procedură care ține cont de următoarele:

- se înlocuiește, imaginar, aerul (21% Ox și 79% Ni) existent în barocameră la presiunea atmosferică (adâncime de 0 m), cu amestec HELIOX 5/95 (5% Ox și 95% He), tot la presiunea atmosferică (1 bara);
- se presurizează barocamera, tot imaginar, cu amestec HELIOX 5/95 peste amestecul HELIOX 5/95 aflat la presiune atmosferică (1 bara) în barocameră până la o presiune curentă a amestecului p , notată ulterior cu p_{am} ;

- se determină, corespunzător presiunii p_{am} masele de Oxigen și de Helium corespunzător masei de amestec binar HELIOX cu care s-a făcut presurizarea de la presiunea atmosferică, la presiunea curentă, p_{am} ;
- se înlocuiește, apoi, masa de HELIOX aflată la presiunea atmosferică, cu aer la presiunea atmosferică, ajungându-se la situația reală;
- se determină masele de Oxigen și Azot din aerul aflat în barocameră la presiunea atmosferică (1 bara);
- se adună masele de oxigen și azot din aerul aflat la presiunea atmosferică cu masele de oxigen și heliu corespunzătoare masei de HELIOX cu care s-a presurizat barocamera, de la presiunea atmosferică (1 bara) la presiunea curentă p_{am} ; astfel, masa de oxigen provine atât din aerul aflat inițial în barocameră cât și din amestecul de HELIOX cu care s-a făcut presurizarea barocamerei, peste presiunea atmosferică, până la presiunea curentă p_{am} ;
- se determină relațiile de calcul, la presiunea curentă p_{am} , pentru participațiile masice ale componentelor, apoi pentru participațiile volumice ale acestora și, în final, pentru presiunile parțiale ale componentelor amestecului ternar (Ox, Ni, He).

Pornind de la relațiile de calcul pentru participațiile masice, participațiile volumice și presiunile parțiale ale celor 3 componente (He, Ni, Ox), funcție de p_{am} , au rezultat relațiile de calcul finale:

$$M_{HeOx95/5}^p = \rho_{HeOx95/5}^p \cdot V$$

$$\rho_{HeOx95/5}^p = \frac{p_{HeOx}^p}{R_{HeOx95/5} \cdot T} = \frac{p}{451466,4}$$

$$M_{HeOx95/5}^p = \frac{pV}{451466,4}$$

$$M_{Ox}^{0,05} = m_{Ox}^{0,05} \cdot M_{HeOx95/5}^p = \frac{pV}{1525224,3}$$

$$M_{He}^{0,95} = m_{He}^{0,95} \cdot M_{HeOx95/5}^p = \frac{pV}{641287,5}$$

Masa de HeOx 5/59, de He 95% și de Ox 5%, adăugate pentru a crește presiunea amestecului HeOx de la presiunea de 1 bara la p , notată ulterior cu p_{am} .

$$M_{HeOx95/5}^{1-p} = M_{HeOx95/5}^p - M_{HeOx95/5}^1 = \left(\frac{p}{451466,4} - 0,2215 \right) V$$

$$M_{He}^{1-p} = M_{He95}^p - M_{He95}^1 = \left(\frac{p}{641287,5} - 0,155936 \right) V$$

$$M_{Ox5}^{1-p} = M_{Ox5}^p - M_{Ox5}^1 = \left(\frac{p}{1525224,3} - 0,065564 \right) V$$

Aceste mase se suprapun peste masele de aer, Ni și Ox, relațiile rezultate fiind:

$$M_{TRIMIX}^p = M_{aer}^1 + M_{HeOx95/5}^{1-p} = 0,9629V + 0,2150045 \cdot 10^{-6} pV$$

$$M_{He}^p = M_{He95}^{1-p} = (1,559363 \cdot 10^{-6} p - 0,155936) V$$

$$M_{Ni}^1 = 0,9085532 V$$

$$M_{Ox}^p = M_{Ox5}^{1-p} + M_{Ox21}^1 = 0,65564127 \cdot 10^{-6} p V + 0,210282 \div V$$

Densitatea TRIMIX la presiunea p :

$$\rho_{TRIMIX}^p = \frac{M_{TRIMIX}^p}{V} = 0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p$$

Participații masice ale componentelor gazoase din TRIMIX la presiunea p :

$$m_{He}^p = \frac{M_{He}^p}{M_{TRIMIX}^p} = \frac{(1,559363 \cdot 10^{-6} \cdot p - 0,155936) \cdot V}{(0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p) \cdot V}$$

$$m_{Ni}^p = \frac{M_{Ni}^p}{M_{TRIMIX}^p} = \frac{0,9085532 \cdot V}{(0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p) \cdot V}$$

$$m_{Ox}^p = \frac{M_{Ox}^p}{M_{TRIMIX}^p} = \frac{(0,65564127 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,210282) \cdot V}{(0,9629 + 2,2150045 \cdot 10^{-6} \cdot p) \cdot V}$$

Pentru cazul particular în care $p = 1$ bara, ($1 \cdot 10^5$ N/m² (abs.)), $m_{He}^p = 0$, iar M_{TRIMIX}^1 devine M_{aer}^1 . Participații volumice ale componentelor gazoase din amestecul TRIMIX la presiunea p sunt:

$$r_{Ox}^p = m_{Ox}^p \cdot \frac{\mathcal{M}_{TRIMIX}^p}{\mathcal{M}_{Ox}} = \frac{0,65564127 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,210282}{3412,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,5672} \cdot \frac{8314,3}{31,999}$$

$$r_{Ox}^p = \frac{170,35525 \cdot 10^{-6} \cdot p + 54,637571}{3412,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,56512}$$

$$r_{Ni}^p = m_{Ni}^p \cdot \frac{\mathcal{M}_{TRIMIX}^p}{\mathcal{M}_{Ni}} = \frac{269,65994}{3412,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,56512}$$

$$r_{He}^p = m_{He}^p \cdot \frac{\mathcal{M}_{TRIMIX}^p}{\mathcal{M}_{He}} = \frac{3239,6331 \cdot 10^{-6} \cdot p - 323,96331}{3412,3824 \cdot 10^{-6} \cdot p + 0,56512}$$

Semnificația termenilor din relațiile anterioare este: p_{Ox} - presiunea parțială a oxigenului [bara]; p_{Ni} - presiunea parțială a azotului [bara]; p_{He} - presiunea parțială a heliului [bara]; m_{Ox} - participația masică a oxigenului [-]; m_{Ni} - participația masică a azotului [-]; m_{He} - participația masică a heliului [-]; r_{Ox} - participația volumică a oxigenului [-]; r_{Ni} - participația volumică a azotului [-]; r_{He} - participația volumică a heliului [-]; $\mathcal{M}_{Ox}$ - masa molară a oxigenului [kg/kmol]; $\mathcal{M}_{Ni}$ - masa molară a azotului [kg/kmol]; $\mathcal{M}_{He}$ - masa molară a heliului [kg/kmol]; $\mathcal{M}_{TRIMIX}$ - masa molară a amestecului ternar TRIMIX [kg/kmol]; V - volumul amestecului [m³]; ρ - densitatea [kg/m³].

Pe baza relațiilor anterioare au fost calculate pentru toate stările ($C_1 \div C_{19}$) ce descriu faza de compresie FC-BN valorile presiunilor parțiale ($p_{Cn,Ox}$, $p_{Cn,Ni}$, $p_{Cn,He}$), participațiilor masice ($m_{Cn,Ox}$, $m_{Cn,Ni}$, $m_{Cn,He}$), participațiilor volumice ($r_{Cn,Ox}$, $r_{Cn,Ni}$, $r_{Cn,He}$) ale componentelor amestecului de gaze. În cadrul tezei de doctorat rezultatele obținute sunt prezentate atât sub formă tabelară cât și sub forma grafică.

Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului ternar cu adâncimea, variația participațiilor masice ale componentelor amestecului ternar cu adâncimea de scufundare și variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului din barocameră cu adâncimea de scufundare în faza de compresie FC-BN, obținute cu modelul matematic MMSS-BN sunt prezentate în figura 3.3, figura 3.4 și respectiv în figura 3.5.

3.1.2 Faza de decompresie corespunzător modelului matematic MMSS-BN

Faza de Decompresie a scufundărilor, pentru cazul Barocamerei Nevidate (FD-BN), este alcătuită din Grupul de Etape de Decompresie 1 (GED1-BN), Grupul de Etape de Decompresie 2 (GED2-BN) și Etapa Finală de Decompresie (EFD-BN).

Grupul de Etape de Decompresie 1 (GED1-BN) este alcătuit din 9 etape de calcul ($D_1 - D_2$, $D_2 - D_3, \dots, D_9 - D_{10}$), care realizează legătura între cele 10 stări aparținând grupului de etape GED1-BN ($D_1, D_2, \dots, D_{10}$).

Modelul Matematic Scufundare de Sistem cu Barocameră Nevidată (MMSS-BN) - Faza de Compresie (FC-BN) Variația presiunilor parțiale cu adâncimea

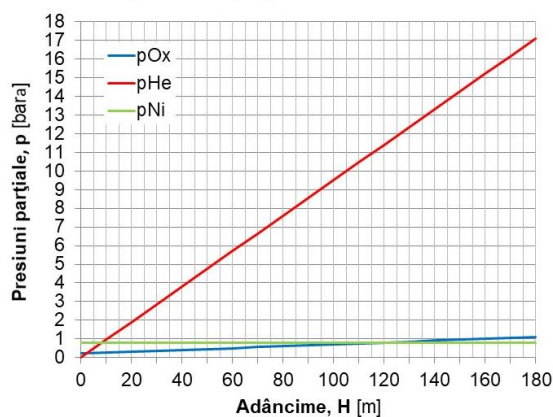


Figura 3.3 Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea, în faza de compresie, FC-BN. Presurizare cu amestec HELIOX 5/95 peste AER

Modelul Matematic Scufundare de Sistem cu Barocameră Nevidată (MMSS-BN) Faza de Compresie (FC-BN) Variația participațiilor masice cu adâncimea

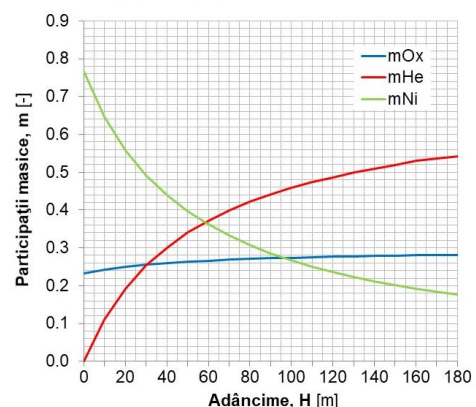


Figura 3.4 Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea în faza de compresie, FC-BN. Presurizare cu amestec HELIOX 5/95 peste AER

Modelul Matematic Scufundare de Sistem cu Barocameră Nevidată (MMSS-BN) Faza de Compresie (FC-BN) Variația participațiilor volumice cu adâncimea

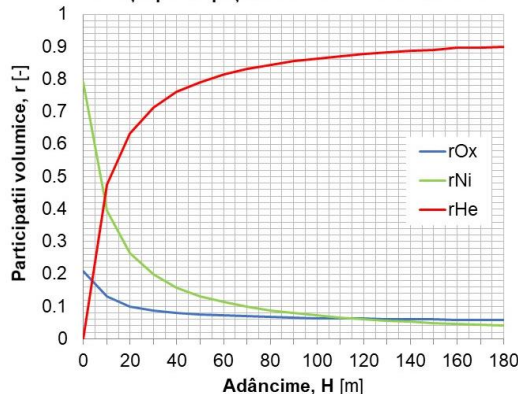


Figura 3.5 Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea în faza de compresie, FC-BN. Presurizare cu amestec HELIOX 5/95 peste AER

Toate cele 9 etape de calcul ale GED1-BN se referă la decompresia scafandrilor prin depresurizarea barocamerei, participațiile volumice ale celor trei componente ale amestecului de gaze (Ox, Ni, He) rămânând constante. Starea inițială D_1 este identică cu starea finală C_{19} din faza de compresie (FC-BN). Stare se caracterizată prin $p_{D1,am} = p_{C19,am} = 19$ bara, $H_{D1} = H_{C19} = 180$ m și $p_{D1,Ox} = p_{C19,Ox} = 1,1099$ bara = 1109,9 mbar (abs.). Stare finală D_{10} caracterizată prin $p_{D10,am} = 10,3$ bara, $H_{D10} = 93$ m și $p_{D10,Ox} = 0,6004$ bara = 600,4 mbar (abs.).

Relațiile generale de calcul pentru mărimile caracteristice stărilor $D_1, D_2, \dots, D_{10}$ aferente grupului de etape GED1-BN, sunt prezentate în continuare.

Presiunile parțiale ale celor trei componente din amestec:

$$p_{DnOx} = r_{DnOx} \cdot p_{Dnam}; \quad p_{DnNi} = r_{DnNi} \cdot p_{Dnam}; \quad p_{DnHe} = r_{DnHe} \cdot p_{Dnam}$$

Participațiile masice ale celor trei componente din amestec:

$$m_{DnOx} = \frac{r_{DnOx}}{R_{Ox}}; \quad m_{DnNi} = \frac{r_{DnNi}}{R_{Ni}}; \quad m_{DnHe} = \frac{r_{DnHe}}{R_{He}}$$

Participațiile volumice ale celor trei componente din amestec:

$$r_{DnOx} = m_{DnOx} \cdot \frac{\mathcal{M}_{am}}{\mathcal{M}_{Ox}}; \quad r_{DnNi} = m_{DnNi} \cdot \frac{\mathcal{M}_{am}}{\mathcal{M}_{Ni}}; \quad r_{DnHe} = m_{DnHe} \cdot \frac{\mathcal{M}_{am}}{\mathcal{M}_{He}}$$

în care: n - numărul stării aferente fazei respective; p_{Ox} - presiunea parțială a oxigenului [bara]; p_{Ni} - presiunea parțială a azotului [bara]; p_{He} - presiunea parțială a heliului [bara]; p_{am} - presiunea parțială a amestecului gazos [bara]; m_{Ox} - participația masică a oxigenului [-]; m_{Ni} - participația masică a azotului [-]; m_{He} - participația masică a heliului [-]; r_{Ox} - participația volumică a oxigenului [-]; r_{Ni} - participația volumică a azotului [-]; r_{He} - participația volumică a heliului [-]; $\mathcal{M}_{Ox}$ - masa molară a oxigenului [kg/kmol]; $\mathcal{M}_{Ni}$ - masa molară a azotului [kg/kmol]; $\mathcal{M}_{He}$ - masa molară a heliului [kg/kmol]; $\mathcal{M}_{am}$ - masa molară a amestecului [kg/kmol]; R_{Ox} - constanta caracteristică a oxigenului [J/kgK]; R_{Ni} - constanta caracteristică a azotului [J/kgK]; R_{He} - constanta caracteristică a heliului [J/kgK]; R_{am} - constanta caracteristică a amestecului [J/kgK].

Grupul de Etape de Decompresie 2 (GED2-BN) este alcătuit din 16 etape de calcul ($D_{10} - D_{11}, D_{11} - D_{12}, \dots, D_{25} - D_{26}$), care realizează legătura între cele 17 stări aparținând grupului de etape GED2-BN ($D_{10}, D_{11}, \dots, D_{26}$). Toate cele 16 etape de calcul ale GED2-BN se referă la decompresia scafandrilor, urmărindu-se menținerea constantă a presiunii parțiale a oxigenului la valoarea de 600 mbar (abs.). Pentru aceasta, fiecare din cele 16 etape de calcul sunt alcătuite din câte 2 subetape de calcul. În prima subetapă din cadrul unei etape de calcul, se decompresia scafandrii prin depresurizarea barocamerei cu o anumită scădere de presiune (ex.de circa 0,5 bar), prin aceasta menținându-se constante participațiile volumice ale celor trei componente ale amestecului din barocameră (Ox, Ni, He), dar scăzându-se presiunea parțială a oxigenului sub 600 mbar (abs.). În cea de-a doua subetapă din cadrul unei etape de calcul, se presurizează ușor cu oxigen pur până când presiunea parțială a oxigenului redevine de 600 mbar (abs.). Starea inițială D_{10} se caracterizează prin $p_{D10,am} = 10,3$ bara, $H_{D10} = 93$ m și $p_{D10,Ox} = 0,6004$ bara = 600,4 mbar (abs.). Starea finală este D_{26} caracterizată prin $p_{D26,am} = 2,445$ bara, $H_{D26} = 14,45$ m și $p_{D26,Ox} = 0,600$ bara = 600 mbar (abs.).

Relațiile generale de calcul pentru mărimile caracteristice stărilor $D_{10}, D_{11}, \dots, D_{26}$ sunt prezentate în cele ce urmează.

$$m_i = r_i \cdot \frac{\mathcal{M}_i}{\mathcal{M}_{am}}; \quad \mathcal{M}_{am} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \mathcal{M}_i$$

În relațiile anterioare indicele i se referă la Ox, Ni, He.

În prima subetapă, se păstrează constante participația volumică și participația masică obținute în etapa anterioară – cu ajutorul relațiilor scrise mai sus - și știind presiunea amestecului care se impune, se calculează presiunea parțială a celor trei componente: Ox, Ni, He.

$$p_{Dn'Ox} = r_{Dn'Ox} \cdot p_{Dn'am}; \quad p_{Dn'Ni} = r_{Dn'Ni} \cdot p_{Dn'am}; \quad p_{Dn'He} = r_{Dn'He} \cdot p_{Dn'am}$$

În a doua subetapă, este cunoscută presiunea amestecului - este egală cu cea din subetapa anterioară și presiunea parțială a oxigenului p_{Ox} , pe care, o impun la 0,6 [bara]. Astfel, cunoscând presiunea parțială a amestecului, respectiv presiunile parțiale ale celor trei componente, se pot calcula participațiile volumice, ale acestora. O dată aflate și acestea se pot calcula participațiile masice ale oxigenului, azotului și heliului, după ce se calculează și M_{am} .

Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului ternar cu adâncimea, variația participațiilor masice ale componentelor amestecului ternar cu adâncimea de scufundare și variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului din barocameră cu adâncimea de scufundare în faza de compresie FD-BN, obținute cu modelul matematic MMSS-BN sunt prezentate în figura 3.6, figura 3.7 și respectiv în figura 3.8.

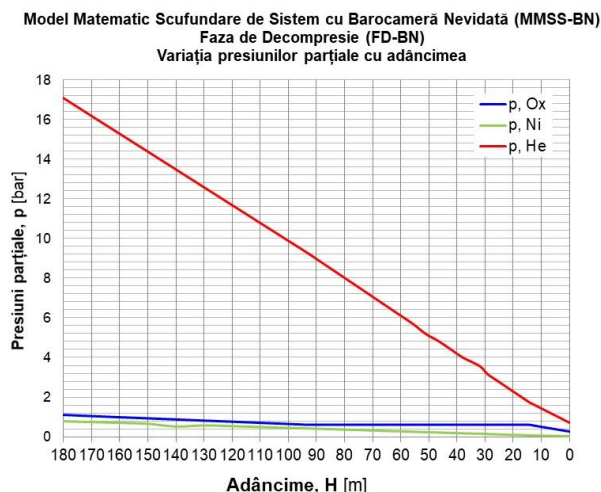


Figura 3.6 Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea, în faza de compresie, FD-BN. Presurizare cu amestec HELIOX 5/95 peste AER

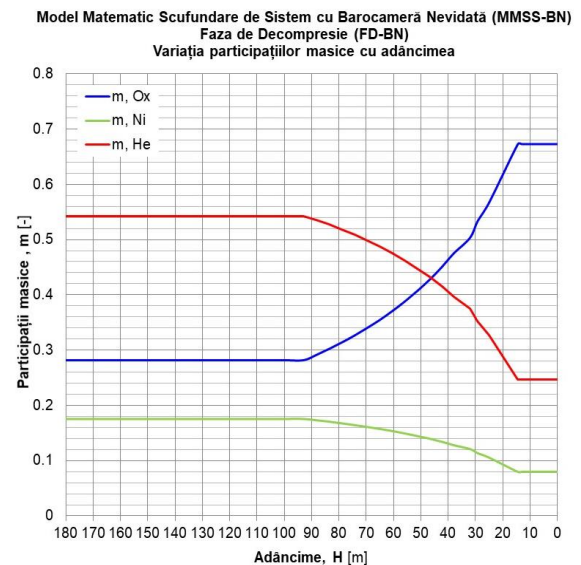


Figura 3.7 Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea în faza de compresie, FD-BN. Presurizare cu amestec HELIOX 5/95 peste AER

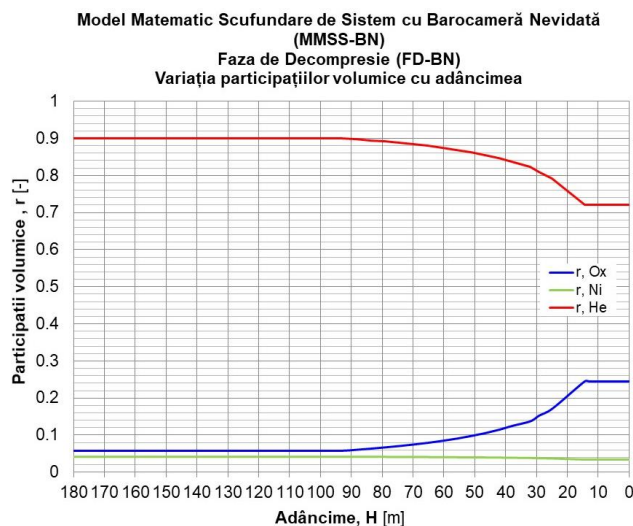


Figura 3.8 Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului ternar din barocameră, cu adâncimea în faza de compresie, FD-BN. Presurizare cu amestec HELIOX 5/95 peste AER

3.1.3 Etapa finală de decompresie (EFD-BN)

Etapa Finală de Decompresie (EFD-BN) constă în decompresia scafandrilor prin depresurizarea barocamerei cu amestecul existent în barocameră la starea D_{26} , participațiile volumice ale celor trei componente (Ox , Ni , He) rămânând constante până când se atinge presiunea atmosferică. În tot acest timp, pe ultimii 25 m, scafandrii respiră amestecul existent în barocameră caracterizat printr-o concentrație a oxigenului de 24,54 % ($r_{Ox} = 0.2454$).

3.2. Planul unei scufundări de sistem, reale, la adâncimea de 180 m, cu barocameră vidată (PSSR-BV) și modelul matematic pentru descrierea proceselor hiperbare aferente acestei scufundări de sistem (Modelul matematic - MMSS-BV)

Subiectul tratat în acest subcapitol se referă la o **Scufundare de Sistem, Reală, de tip test**, pentru cazul cu **Barocameră Vidată inițial (PSSR-BV)**, efectuată la adâncimea de 180 m. Amestecul folosit este HELIOX 5/95 (5% Ox , 95% He). Scufundarea are ca scop urmărirea comportamentului scafandrilor de mare adâncime la Sindromul Nervos al Înalțelor Presiuni (SNIP).

3.2.1 Planul scufundării de sistem, reale, la adâncimea de 180 m, cu barocameră vidată (PSSR-BV)

Planul de scufundare, prin elementele lui caracteristice, stă la baza realizării Modelului Matematic al unei Scufundări în Saturație pentru cazul Barocamerei Vidate (MMSS-BV), iar scufundarea reală s-a folosit pentru validarea acestui model.

Caracteristicile scufundării, amestecurile de gaze și gazele pure utilizate și pregătite, parametrii ce trebuie urmăriți și menținuți sunt prezentați sintetic în continuare.

Caracteristicile scufundării de sistem:

- adâncimea maximă: 180 metri;
- durata presurizării: 18 minute;
- viteza de presurizare: 10 m/min;
- durata staționării la adâncimea de 180 m: maxim 60 minute;
- durata decompresiei: 38,2 ore;
- tabela de decompresie utilizată - OXY- HELIUM DIVING DECOMPRESSION TABLES.

Amestecurile de gaze și gaze pure necesare:

- amestec de presurizare: HELIOX 5/95 %;
- amestec respirator la nivel de viață: HELIOX 5/95 %;
- amestec terapeutic pentru adâncimea de 180 m ÷ 103 m: HELIOX 10/90 %;
- amestec terapeutic pentru adâncimea de 102 m ÷ 58 m: HELIOX 18/82 %;
- amestec terapeutic pentru adâncimea de 57 m ÷ 25 m: HELIOX 23/77 %;
- amestec terapeutic pentru adâncimea de 24 m ÷ 10 m: HELIOX 50/50 %;
- amestec terapeutic pentru adâncimea de 10 m ÷ 0 m: Oxigen pur.

Parametri de trebuie menținuți în timpul scufundării:

- Oxigen
 - în intervalul de adâncime 180 m ÷ 120 m: $r_{Ox} = 0,05$ (concentrație de 5 %);
 - în intervalul de adâncime 120 m ÷ 16 m: $p_{Ox} = 650$ mbar (abs.);
 - în intervalul de adâncime 16 m ÷ 0 m: $r_{Ox} = 0,25$ (concentrație de 25 %).

- Dioxid de carbon
 - maximum 6 mbar (abs.).
- Temperatura din barocameră: se menține în jurul valorii de $25 \div 270$ C;
- Umiditatea din barocameră: $60 \div 80$ %;
- Viteza de decompresie: conform OXY-HELIUM DIVING DECOMPRESSION TABLES.

În figura 3.9 se prezintă profilul scufundării conform PSS-BV cu cele trei faze constituente și anume: compresia, staționarea la „nivelul de viață” și decompresia.

3.2.2 Modelul matematic pentru descrierea proceselor hiperbare aferente scufundării de sistem, unitare, la adâncimea de 180 m, cu vidarea inițială a barocamerei (MMSS-BV)

Modelul Matematic MMSS-BV, cuprinde două faze, și anume:

- Faza de Compresie a scafandrilor prin presurizarea barocamerei, pentru cazul Barocamerei Vidate (FC-BV);
- Faza de Decompresie a scafandrilor prin depresurizarea barocamerei, pentru cazul Barocamerei Vidate (FD-BV).

Faza de compresie (FD-BV)

- **Grupul de Etape de Compresie 1 pentru cazul Barocamerei Vidate (GEC1-BV)**, corespunzător etapelor de compresie la care, presiunea parțială a oxigenului din amestecul de gaze existent în barocameră fiind sub nivelul normoxiei (200 mbar abs.), scafandrii respiră amestec gazos normoxic la mască (de obicei, aer)
- **Grupul de Etape de Compresie 2 pentru cazul Barocamerei Vidate (GEC2-BV)**, corespunzător etapelor de compresie de la care scafandrii pot respira amestecul de gaze existent în barocameră, GEC2-BV având, ca final atingerea adâncimii de 180 m numită Nivel de Viață (NV)

Etapile de modelare și codificarea folosită în structura modelului matematic MMSS-BV sunt prezentate în schema 3.2.

Schema 3.2 Schema Modelului Matematic al Scufundării de Sistem pentru cazul cu Barocameră Vidată (MMSS-BV) cu fazele și etapele de calcul

MMSS- BV			
FC-BV		FD-BV	
GEC1-BV	GEC2-BV	GED1-BV	GED2-BV
3 etape	15 etape	6 etape	18 etape

Pentru modelarea matematică a fazei de compresie FC-BV, relațiile de calcul folosite pentru stabilirea valorilor participației masice, participației volumice și a presiunii parțiale ale celor două componente He și Ox sunt date în continuare. În cazul de față relații care în cazul de față sunt scrise pentru etapa 1 a fazei de compresie.

Participațiile masice ale celor două componente din amestec:

$$m_{C1Ox} = \frac{r_{C1Ox}}{\frac{R_{Ox}}{R_{HeOx}}} \quad m_{C1He} = \frac{r_{C1He}}{\frac{R_{He}}{R_{HeOx}}}$$

Participațiile volumice ale celor două componente din amestec:

$$r_{C1Ox} = m_{Ox} \frac{R_{Ox}}{R_{HeOx}} \quad r_{C1He} = m_{He} \frac{R_{He}}{R_{HeOx}}$$

Presiunile parțiale ale celor trei componente din amestec:

$$p_{C1Ox} = r_{C1Ox} \cdot p_{C1HeOx} \quad p_{C1He} = r_{C1He} \cdot p_{C1HeOx}$$

în care: $m_{C1Ox,He}$ - participația masică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape C1 [-]; $r_{C1Ox,He}$ - participația volumică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape C1 [-]; $R_{Ox,He}$ - constanta caracteristică a oxigenului și a heliului [J/kgK]; R_{HeOx} - constanta amestecului HELIOX [J/kgK]; $p_{C1Ox,He}$ - presiunea parțială a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape C1 [N/m²]; p_{HeOx} - presiunea amestecului binar HELIOX [N/m²].

Grupul de Etape de Compresie 1 (GEC1-BV) este alcătuit din 3 etape de calcul (C₁-C₂, C₂-C₃, C₃-C₄), care realizează legătura între cele 4 stări aparținând grupului de etape GEC1 - BV (C₁, C₂, C₃, C₄). Toate cele trei etape ale GEC1 - BV se referă la presurizarea barocamerei cu amestec HELIOX 5/95 de la nivelul vidului din barocameră (aproximativ 0 (abs.)) până la nivelul presiunii la care se atinge valoarea normooxică pentru presiunea parțială a oxigenului. După atingerea presiunii atmosferice, scafandrii intră în barocameră și respiră aer la mască până când presiunea parțială a oxigenului din amestecul HELIOX din barocameră, atinge valoarea normonoxică (200 mbar (abs.)). Această presiune parțială a oxigenului se întâlnește la adâncimea de 30 m, respectiv la presiunea din barocameră de 4 bara.

Grupul de Etape de Compresie 2 (GEC2-BV) este alcătuit din 15 etape de calcul (C₄-C₅, C₅-C₆, ..., C₁₈-C₁₉), care realizează legătura între cele 16 stări aparținând grupului de etape GEC2-BV se referă la comprimarea scafandrilor prin presurizarea barocamerei cu amestec binar HELIOX 5/95, de la nivelul presiunii din barocameră de la care scafandrii pot renunța la mască și pot respira direct amestecul din barocameră, la Nivelul de Viață (NV) corespunzător adâncimii de 180 m. Acest al doilea grup de etape de calcul (GEC2-BV), are ca stare inițială starea C₄ care este starea la care presiunea parțială a oxigenului atinge valoarea de 200 mbar (abs.), caracterizată prin $p_{C4,am} = 4$ bara, $H_{C4} = 30$ m și $p_{C4,Ox} = 0,2$ bara = 200 mbar (abs.) și ca stare finală starea C₁₉, corespunzătoare nivelului de viață (NV), caracterizată prin $p_{C19,am} = 19$ bara, $H_{C19} = 180$ m și $p_{C19,Ox} = 0,95$ bara = 950 mbar (abs.).

Corespunzător fazei de compresie FC-BV, rezultatele obținute cu modelul matematic MMSS-BV privind variația presiunilor parțiale ($p_{Cn,Ox}$, $p_{Cn,He}$), a participațiilor masice ($m_{Cn,Ox}$, $m_{Cn,He}$), a participațiilor volumice ($r_{Cn,Ox}$, $r_{Cn,He}$), a presiunii amestecului din barocameră ($p_{Cn,am}$) toate funcție de adâncimea echivalentă (H_{Cn}) sunt prezentate în figura 3.10, figura 3.11 și respectiv în figura 3.12.

Faza de decompresie (FD-BV)

Faza FC-BV este compusă din:

- **Grupul de Etape de Decompresie 1 (GED1-BV)** este alcătuit din 6 etape de calcul care realizează legătura între 7 stări; toate cele 6 stări se referă la decompresia scafandrilor prin depresurizarea barocamerei, participațiile volumice ale celor două componente ale amestecului de gaze (Ox, He), rămânând constante
- **Grupul de Etape de Decompresie 2 (GED2-BV)** este alcătuit din 18 etape care realizează legătura între cele 19 stări aparținând grupului de etape GED2-BV
- **Etapa Finală de Decompresie (EFD-BV)** constă în decompresia scafandrilor prin depresurizarea barocamerei cu amestecul existent în barocameră în starea finală aparținând grupului de etape GED2-BV.

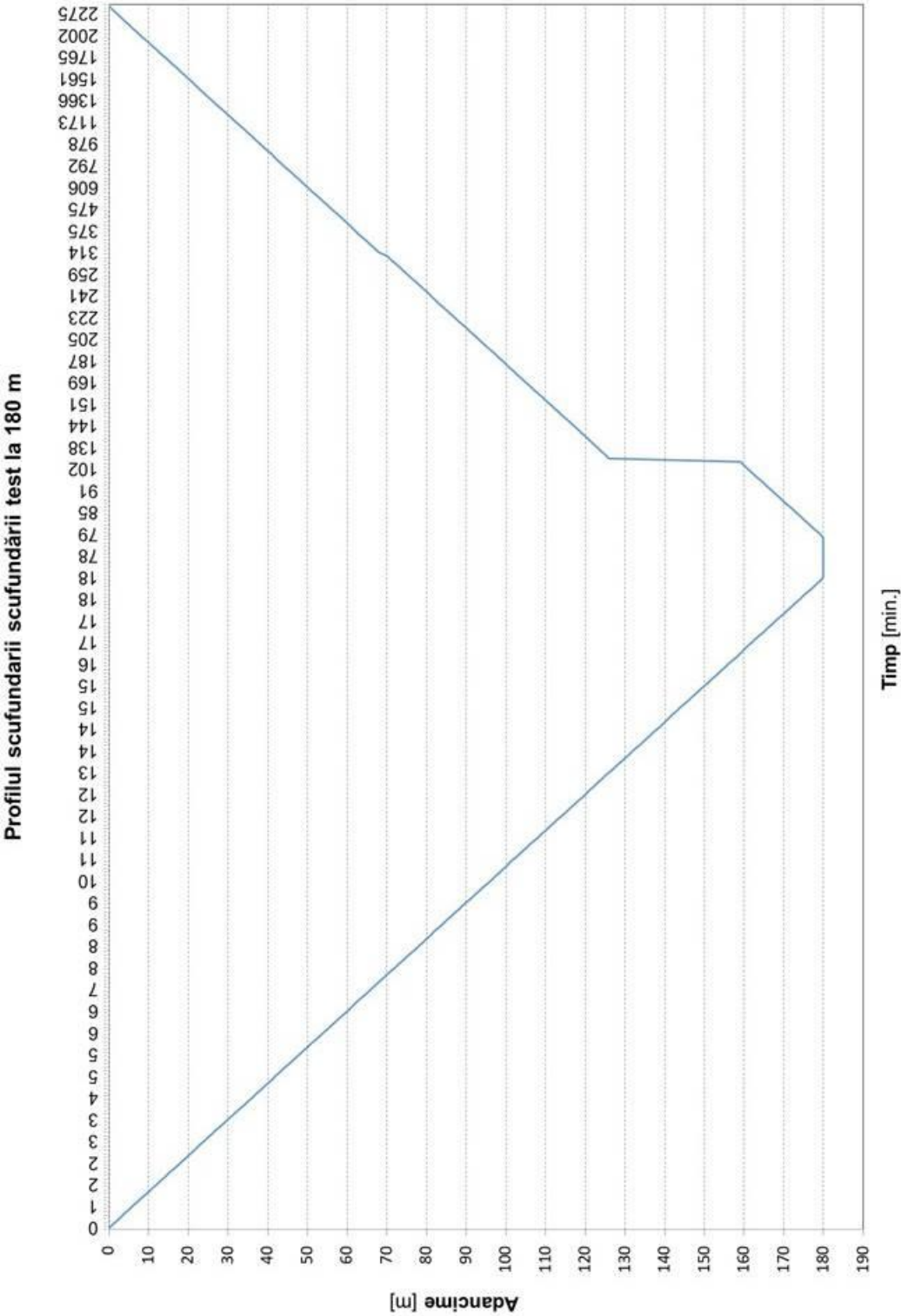


Figura 3.9 Profilul scufundării test la 180 m conform PSS-BV

Model Matematic Scufundare de Sistem cu Barocameră
Vidată (MMSS-BV)
Faza de Compresie (FC-BV)
Variația presiunilor parțiale cu adâncimea

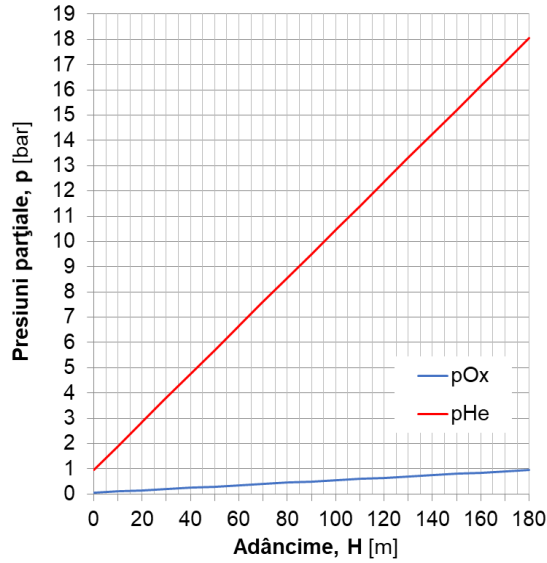


Figura 3.10 Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de compresie, FC-BV

Model Matematic Scufundare de Sistem cu Barocameră
Vidată (MMSS-BV)
Faza de Compresie (FC-BV)
Variația participațiilor masice cu adâncimea

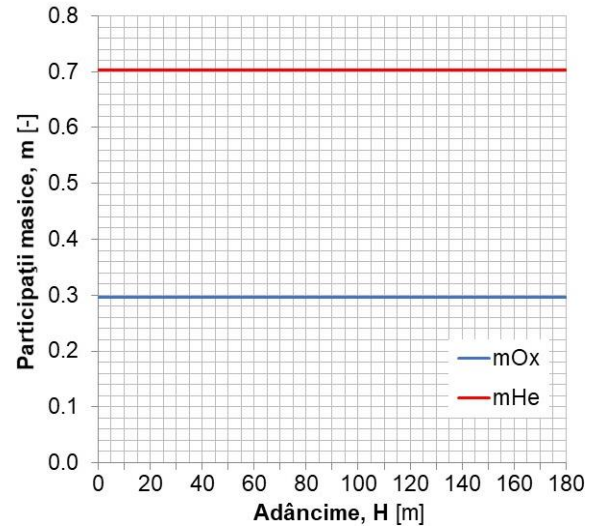


Figura 3.11 Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de compresie, FC-BV

Model Matematic Scufundare de Sistem cu Barocameră
Vidată (MMSS-BV)
Faza de Compresie (FC-BV)
Variația participațiilor volumice cu adâncimea

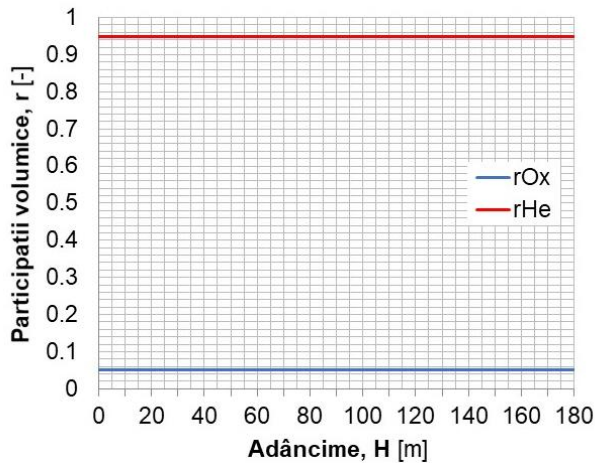


Figura 3.12 Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de compresie, FC-BV

Relațiile generale de calcul pentru mărimile caracteristice ale stărilor $D_1, D_2, \dots, D_7$ aferente grupului de etape GED1-BV, sunt:

Participațiile masice ale celor două componente din amestec:

$$m_{D1Ox} = \frac{r_{D1Ox}}{\frac{R_{Ox}}{R_{HeOx}}} \quad m_{D1He} = \frac{r_{D1He}}{\frac{R_{He}}{R_{HeOx}}}$$

Participațiile volumice ale celor două componente din amestec:

$$r_{D1Ox} = m_{D1Ox} \frac{R_{HeOx}}{R_{Ox}} \quad r_{D1He} = m_{D1He} \frac{R_{HeOx}}{R_{He}}$$

Presiunile parțiale ale celor trei componente din amestec:

$$p_{D1Ox} = r_{D1Ox} \cdot p_{D1HeOx} \quad p_{D1He} = r_{D1He} \cdot p_{D1HeOx}$$

în care: $p_{D1Ox,He}$ - presiunea parțială a oxigenului respectiv a heliului pentru grupul de etape D_1 [N/m^2]; p_{HeOx} - presiunea amestecului binar HELIOX [N/m^2]; $m_{D1Ox,He}$ - participația masică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape D_1 [-]; $r_{D1Ox,He}$ - participația volumică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape D_1 [-]; $R_{Ox,He}$ - constanta caracteristică a oxigenului și a heliului [J/kgK]; R_{HeOx} - constanta amestecului HELIOX [J/kgK].

Relațiile de calcul pentru mărimile caracteristice ale stărilor $D_7, D_8, \dots, D_{25}$ aferente grupului de etape GED2-BV, sunt:

Participațiile masice ale celor două componente din amestec, pentru grupurile de etape și grupurile de subetape de calcul:

$$m_{D2Ox} = \frac{r_{D2Ox}}{\frac{R_{Ox}}{R_{HeOx}}} \quad m_{D2He} = \frac{r_{D2He}}{\frac{R_{He}}{R_{HeOx}}}$$

$$m'_{D2Ox} = m_{D2Ox} = \frac{r_{D2Ox}}{\frac{R_{Ox}}{R_{HeOx}}} \quad m'_{D2He} = m_{D2He} = \frac{r_{D2He}}{\frac{R_{He}}{R_{HeOx}}}$$

Participațiile volumice ale celor două componente din amestec, pentru grupurile de etape și grupurile de subetape de calcul:

$$r_{D2Ox} = m_{D2Ox} \frac{R_{HeOx}}{R_{Ox}} \quad r_{D2He} = m_{D2He} \frac{R_{HeOx}}{R_{He}}$$

$$r'_{D2Ox} = r_{D2Ox} = m_{D2Ox} \frac{R_{HeOx}}{R_{Ox}} \quad r'_{D2He} = r_{D2He} = m_{D2He} \frac{R_{HeOx}}{R_{He}}$$

Presiunile parțiale ale celor două componente din amestec, pentru grupurile de etape și grupurile de subetape de calcul:

$$p_{DHeOx} = p_{D2Ox} + p_{D2He} \quad p_{D'_2Ox} = r'_{D'_2Ox} \cdot p_{D'_2HeOx} \quad p_{D'_2He} = r'_{D'_2He} \cdot p_{D'_2HeOx}$$

în care: $p_{D2Ox,He}$ - presiunea parțială a oxigenului respectiv a heliului pentru grupul de etape D_2 [N/m^2]; $p'_{D2Ox,He}$ - presiunea parțială a oxigenului respectiv a heliului pentru grupul de subetape D_2 [N/m^2]; p_{HeOx} - presiunea amestecului binar HELIOX [N/m^2]; $m_{D2Ox,He}$ - participația masică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape D_2 [-]; $m'_{D2Ox,He}$ - participația masică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de subetape D_2 [-]; $r_{D2Ox,He}$ - participația volumică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de etape D_2 [-]; $r'_{D2Ox,He}$ - participația volumică a oxigenului, respectiv a heliului pentru grupul de subetape D_2 [-]; R_{HeOx} - constanta amestecului binar HELIOX [J/kgK]; $R_{Ox,He}$ - constanta caracteristică a oxigenului și a heliului [J/kgK].

Etapă Finală de Decompresie (EFD-BV) constă în decompresia scafandrilor prin depresurizarea barocamerei cu amestecul existent în barocameră în starea D_{25} , **participațiile volumice ale celor două componente (Ox, He) rămânând constante până când se atinge**

presiunea atmosferică. În tot acest timp, pe ultimii 16 m, scafandrii respiră amestec HELIOX cu o concentrație a oxigenului de 24,72 % ($r_{Ox} = 0,2472$).

Corespunzător fazei de decompresie FD-BV, rezultatele obținute cu modelul matematic MMSS-BV pentru valorile presiunilor parțiale ($p_{Cn,Ox}$, $p_{Cn,He}$), a participațiilor masice ($m_{Cn,Ox}$, $m_{Cn,He}$), a participațiilor volumice ($r_{Cn,Ox}$, $r_{Cn,He}$), a presiunii amestecului din barocameră ($p_{Cn,am}$) toate aceste mărimi funcție de adâncimea echivalentă (H_{Cn}), sunt prezentate în figura 3.13, figura 3.14 și respectiv în figura 3.15.

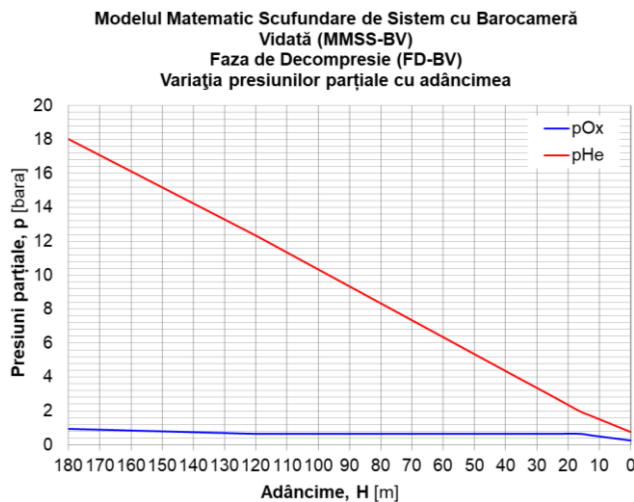


Figura 3.13 Variația presiunilor parțiale ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de decompresie, FD-BV

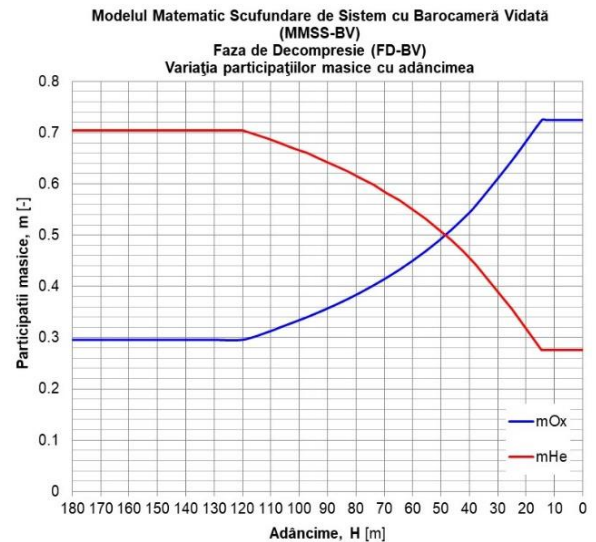


Figura 3.14 Variația participațiilor masice ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de decompresie, FD-BV

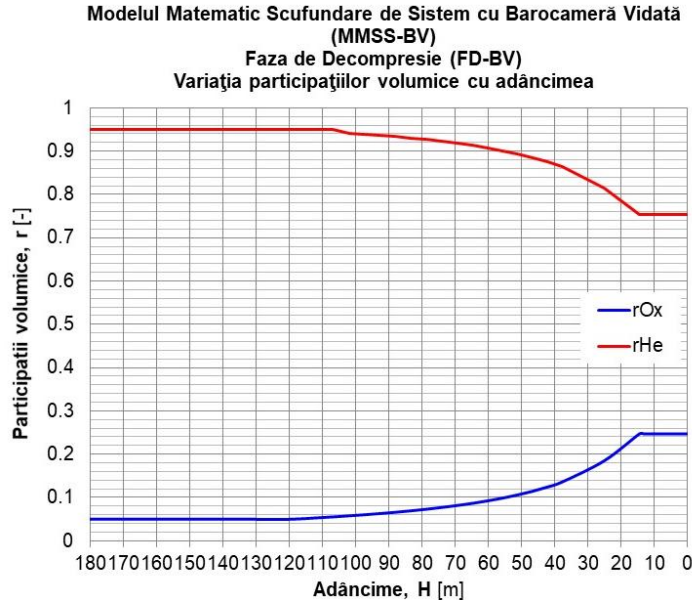


Figura 3.15 Variația participațiilor volumice ale componentelor amestecului binar din barocameră, cu adâncimea, în faza de decompresie, FD-BV

3.3. Validarea modelului matematic al unei scufundări cu vidarea barocamerei printr-un test de scufundare reală de sistem, la adâncimea de 180 m

Validarea Modelului Matematic pentru Scufundarea de Sistem cu Barocameră Vidată (MMSS-BV), la adâncimea de 180 m, a constat în compararea rezultatelor obținute prin modelare matematică, cu valorile mărimilor caracteristice din planul scufundării reale, tip test, la adâncimea de 180 (PSSR-BV), efectuată în Laboratorul Hiperbar din Centrul de Scafandri Constanța (CSC), plan prezentat în paragraful 3.2.1 al prezentului material. Trebuie precizat că această comparație s-a efectuat doar pentru faza de decompresie (FD-BV), fază pentru care planul a constat din tabelul

de decompresie OXY-HELIUM DIVING DECOMPRESSION TABLES, și care este prezentat în întregime în teza de doctorat, tabel completat cu mărimile caracteristice amestecului din barocameră pe timpul decompresiei.

În figurile 3.16, 3.17 și 3.18 se prezintă comparațiile grafice pentru variațiile presiunilor parțiale, participațiilor masice și participațiilor volumice pentru cazul barocamerei vidate inițial, în faza decompresiei (FD-BV), dintre valorile obținute prin modelul MMSS-BV și valorile din planul de scufundare reală PSSR-BV.

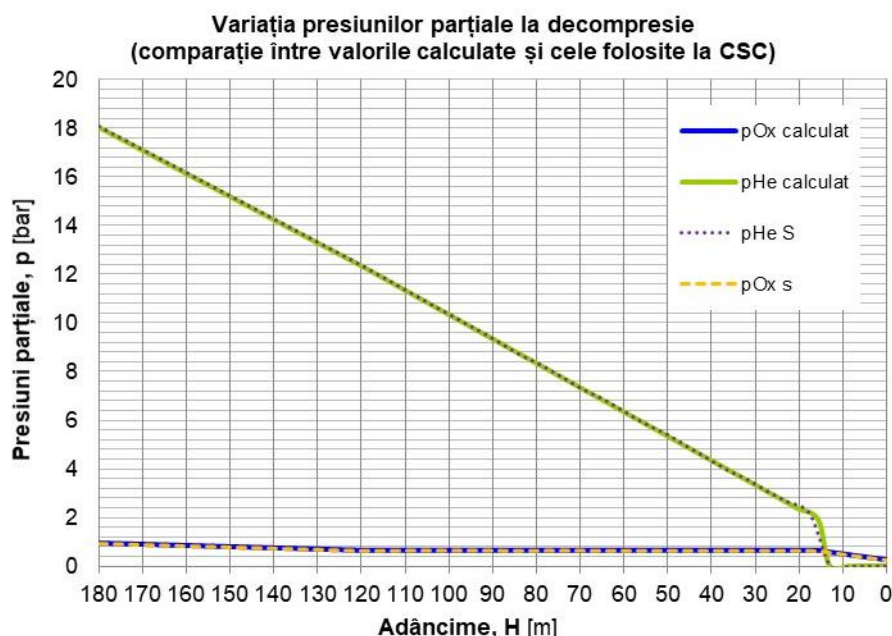


Figura 3.16 Comparație între variațiile presiunilor parțiale în faza decompresiei, pentru cazul barocamerei inițial vidate, (FD-BV), atât cu valorile obținute prin modelul MMSS-BV cât și din planul scufundării reale PSSR-BV efectuate la CSC

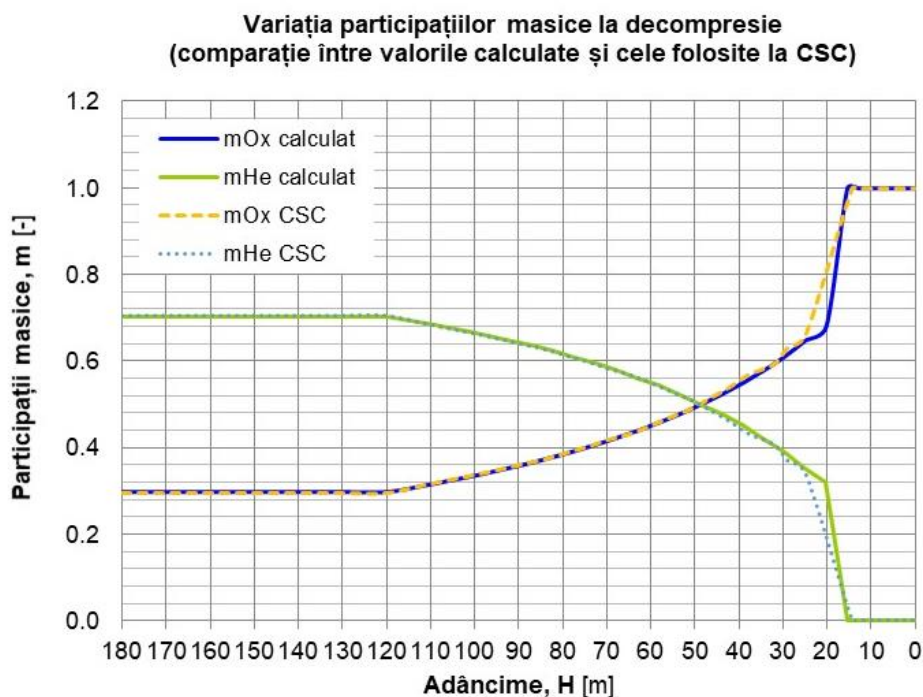


Figura 3.17 Comparație între variațiile participațiilor masice în faza decompresiei, pentru cazul barocamerei inițial vidate, (FD-BV), atât cu valorile obținute prin modelul MMSS-BV cât și din planul scufundării reale PSSR-BV efectuate la CSC

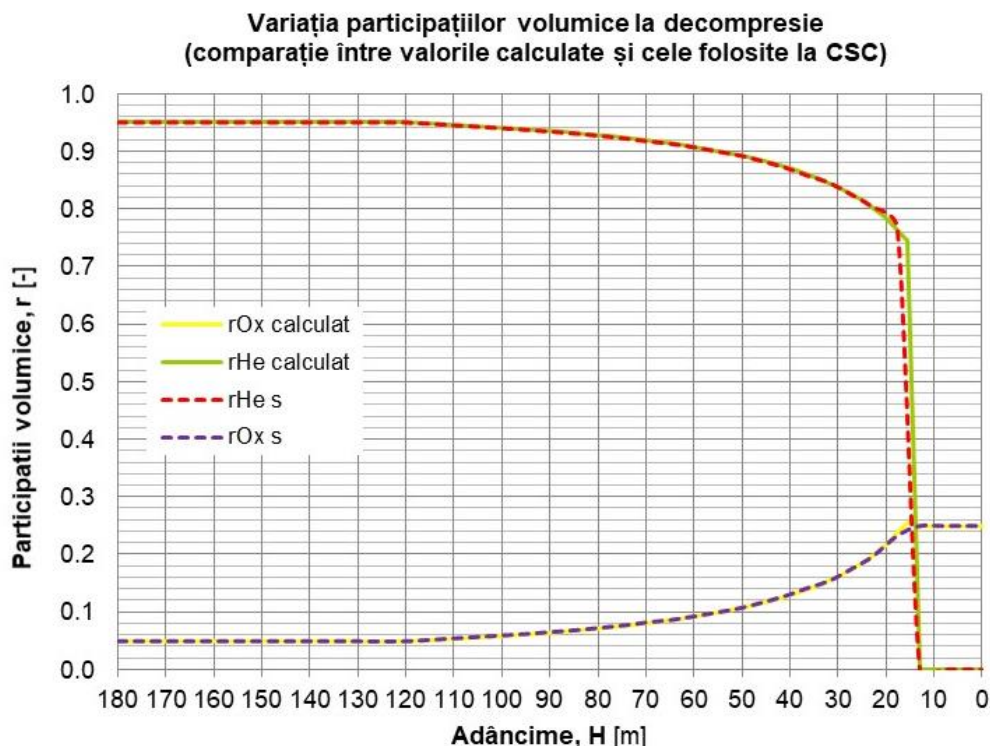


Figura 3.18 Comparație între variațiile participațiilor volumice în faza decompresiei, pentru cazul barocamerei inițial vidate, (FD-BV), atât cu valorile obținute prin modelul MMSS-BV cât și din planul scufundării reale PSSR-BV efectuate la CSC

Având în vedere analiza comparativă efectuată, se poate trage concluzia că Modelul Matematic pentru Scufundarea de Sistem la adâncimea de 180 m, considerându-se Barocamera Vidată inițial (MMSS-BV), este pe deplin validat de testul experimental efectuat la Laboratorul Hiperbar al Centrului de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române, efectuat conform Planului Scufundării Reale de Sistem (PSSR-BV).

Prin urmare, se poate admite faptul că, se pot elabora modele matematice complexe care pot descrie, cu o foarte bună precizie, fenomenele aferente proceselor hiperbare din cadrul diferitelor scufundări de sistem, de mare adâncime.

Capitolul 4

FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII FOLOSITE ÎN DOMENIUL SCUFUNDĂRILOR

În cadrul capitolului 4, sunt prezentate metodele cele mai folosite pentru prepararea amestecurilor respiratorii.

Subcapitolul 4.1 tratează „metoda injectării succesive”, care presupune injectarea succesivă și controlată a gazelor componente în recipiente cu volum constant, urmărindu-se presiunea din recipiente. Pentru exemplificarea modului în care se stabilește amestecurilor de gaze binare sau ternare, în lucrare este prezentată și exemplificată pentru NITROX, HELIOX și TRIMIX o metodă utilă în calculul a compoziției acestor amestecuri, metodă propusă în referința bibliografică [9].

În subcapitolul 4.2 sunt descrise o serie de procedee folosite în mod frecvent pentru fabricarea amestecurilor NITROX. În paragraful 4.2.1 este descris procedeul de preparare a amestecului NITROX cu considerarea presiunilor parțiale ale gazelor, care presupune injectarea de oxigen pur într-o butelie de scufundare unde, mai apoi, este introdus aer comprimat „curat”, numit și aer compatibil cu oxigenul (Oxygen Compatible Air) creându-se astfel amestecul dorit. În paragraful 4.2.2 este prezentat procedeul de preparare a amestecului NITROX cu ajutorul unui sistem de membrane. Acest procedeu presupune obținerea, prin separare din aer, a azotului și a unui amestec de oxigen îmbogățit. O altă metodă de preparare a amestecurilor NITROX este descrisă în paragraful 4.2.3. Aceasta presupune omogenizarea continuă a gazelor componente ce formează amestecul. Pentru aceasta este folosit un dispozitiv de o construcție specială, cunoscut sub denumirea de „NITROX Stick”, dispozitiv care conform [72] este folosit într-o variantă constructivă specifică și pentru prepararea amestecurilor TRIMIX din aer îmbogățit.

Conținutul subcapitolului 4.3 se referă la metodele și procedeele de fabricare ale amestecurilor respiratorii conform U.S. Navy. În paragraful 4.3.1 este prezentată metoda de preparare a amestecurilor respiratorii prin stabilirea presiunilor parțiale ale gazelor componente, presiuni parțiale pentru calculul cărora se pot aplica două procedee și anume unul bazat pe ipoteza gazului ideal, iar cel de al doilea în care gazele sunt tratate ca gaze reale. În ultimele două paragrafe și anume 4.3.2 și 4.3.3 sunt descrise metoda de preparare a amestecurilor respiratorii pe baza volumelor gazelor componente și respectiv metoda de preparare a amestecurilor respiratorii prin cântărirea componentelor.

În subcapitolul 4.4 este prezentată metoda de preparare a amestecurilor respiratorii în flux continuu, metodă ce utilizează instalații speciale, care distribuie individual, în cantitatea necesară gazele componente spre o cameră de amestec. Instalațiile actuale încadrate în această categorie dispun de sisteme de control și corecție automate care modifică prin acționarea organelor de reglaj cantitatea de gaze furnizată.

Parte din cercetările teoretice ce fac subiectul prezentei lucrări și cercetările experimentale derulate în cadrul tezei de doctorat sunt legate de preparare amestecurilor respiratorii printr-o metodă originală, ce se încadrează în categoria metodei de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii. Pentru aplicarea metodei propuse autoarea prezentei teze de doctorat a conceput o instalație originală pentru prepararea amestecurilor respiratorii binare și ternare, instalație pe care a testat-o în cadrul Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri din Constanța al Forțelor Navale Române.

Capitolul 4 al lucrării se încheie cu prezentarea metodelor care pot fi aplicate pentru a corecta amestecurile respiratorii preparate, și anume corectarea amestecurilor respiratorii prin creșterea cantității de oxigen și corectarea amestecurilor respiratorii prin reducerea cantității de oxigen.

Capitolul 5

INSTALAȚIE PENTRU PREPARAREA ÎN FLUX CONTINUU A AMESTECURILOR GAZOASE RESPIRATORII, CU POSIBILITATEA LIVRĂRII DIRECTE SPRE CONSUMATOR. CONCEPT ȘI PRINCIPII GENERALE DE FUNCȚIONARE

Instalația prezentată în cadrul acestui capitol a fost concepută în cadrul tezei de doctorat, este de concepție originală și are ca particularitate posibilitatea fabricării imediate a oricăror amestecuri gazoase respiratorii indiferent de concentrațiile componentelor.

Această instalație se deosebește de instalațiile existente prin următoarele caracteristici:

- prepararea amestecurilor se face din gaze pure;
- asigură prepararea prin injectare simultană a gazelor componente ce formează amestecul;
- dă posibilitatea livrării către consumator a amestecului format concomitent cu injectarea gazelor componente și implicit cu prepararea propriu zisă;
- nu necesită înmagazinarea amestecului spre a fi livrat consumatorului;
- nu necesită existența unor spații de stocare a amestecurilor;
- asigură posibilitatea modificării imediate a rapoartelor concentrațiilor gazelor componente ce formează amestecul și posibilitatea livrării imediate a noului amestec;
- presupune doar metode de preparare bazate pe fenomene termo-hidraulice;
- cuprinde elemente componente ale dispozitivelor de injecție ce nu conțin piese mecanice, electronice sau electromecanice care se pot deteriora cu sau fără o avertizare prealabilă.

În consecință această instalație poate fi adaptată în vederea livrării oricăruia dintre amestecurile binare sau a amestecurilor ternare, atât pentru aparate de respirat sub apă cât și pentru barocamere.

Alcătuirea constructivă a instalației cu injecție masică, destinată preparării amestecurilor binare și a amestecurilor ternare în flux continuu este redată sub forma unei scheme de principiu în figura 5.1.

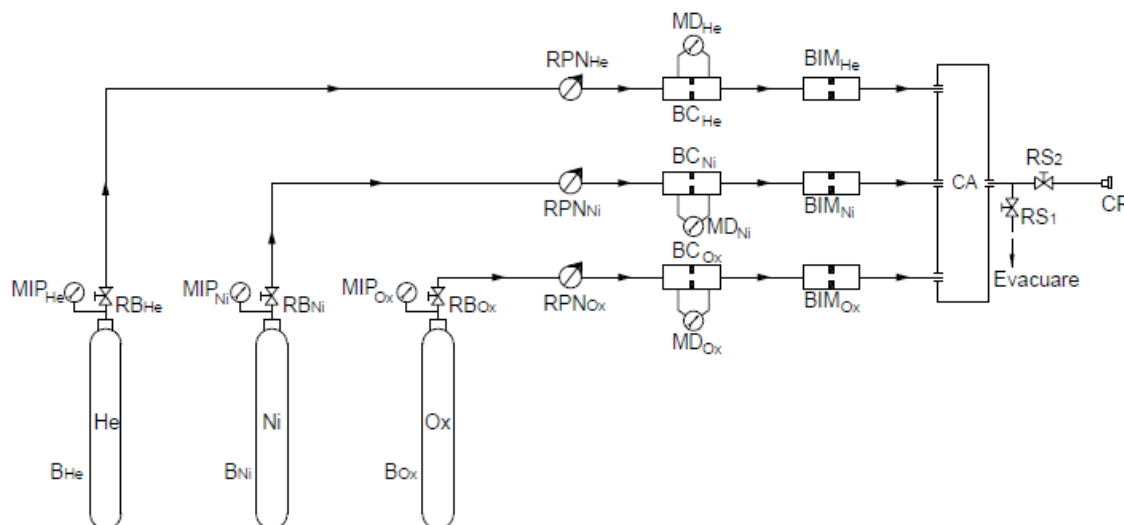
Pornind de la această schemă generală se precizează că pentru fabricarea amestecurilor binare HELIOX lina pentru distribuția și injectarea azotului este inactivă sau poate lipsi, iar pentru fabricarea amestecurilor binare NITROX linia heliului este inactivă sau poate lipsi. În cazul fabricării amestecurilor ternare TRIMIX este necesar ca toate cele trei linii să fie funcționale.

În continuare este prezentată, alcătuirea constructivă și modul de funcționare al instalației cu gradul cel mai mare de complexitate și anume instalația destinată fabricării amestecului respirator TRIMIX.

Alimentarea instalației cu heliu se face prin deschiderea robinetului RBHe. Presiunea de livrare a gazului este verificată prin citirea valorii indicate de manometrul MIPHe. În aval de robinetul RBHe este prevăzut un reductor de presiune nepilotat RPNHe. Rolul acestuia este de a modifica valoarea presiunii de la valori ce se încadrează în treapta de presiune înaltă la valori medii. Monitorizarea presiunii gazului după schimbarea treptei de presiune se realizează prin intermediul blocului de control BCHe, element la care este conectat manometrul diferențial MDHe. Ultimul element din alcătuirea liniei heliului îl reprezintă blocul de injecție masică BIMHe. Acesta asigură injectarea în camera de amestec CA a unui debit masic constant.

Linia azotului este alcătuită din elemente similare celor care compun linia heliului. Astfel presiunea la care azotul este stocat în butelia BNi, și care reprezintă și presiunea de alimentare, este verificată cu ajutorul manometrului de înaltă presiune MIPNi. Trecerea de la treapta

presiunilor înalte la valori medii este asigurată de reductorul de presiune nepilotat RPNNi, iar ansamblul format din blocul de control BCNi și manometrul diferențial MDNi poziționate în aval, facilitează determinarea debitului de azot pe această linie. Alimentarea cu azot la debit masic constant a camerei de amestec CA este asigurată de blocul de injecție masică BIMNi.



LEGENDA: B – butelie; MIP – manometru de înaltă presiune; RB – robinet butelie; RPN – reductor de presiune nepilotat; MD – manometru diferențial; BC – bloc de control; BIM – bloc injecție masică; CA – cameră de amestec; RS – robinet sferic; CR – cuplaj rapid

NOTĂ: Indicii He, Ni și Ox se referă la heliu, azot și respectiv la oxigen

Figura 5.1 Alcătuirea instalației cu injecție masică pentru prepararea amestecurilor respiratorii – schemă de principiu

Circuitul de injecție al oxigenului este alcătuit dintr-un regulator de presiune nepilotat RPN_{Ox} având ca referință presiunea atmosferică. Rolul regulatorului este de a reduce presiunea de la nivelul presiunii înalte existente în butelia de stocare B_{Ox} la cel al presiunii medii necesară alimentării blocului de control BC_{Ox} și în continuare, a blocului de injecție masică BIM_{Ox}. Pentru verificarea valorii presiunii, atât la ieșirea din butelia de stocare și implicit în secțiunea de alimentare a circuitului cât și în amonte de BIM_{Ox} au fost prevăzute manometre. Primul dintre acestea este un manometru de înaltă presiune MIPO_x, iar cel de al doilea este un manometru diferențial MDO_x asociat blocului de control BC_{Ox}, amplasat între reductorul de presiune RPN_{Ox} și blocul de injecție masică BIM_{Ox}. Toate cele trei linii converg către camera de amestec CA unde are loc prepararea propriu zisă a amestecului respirabil TRIMIX.

Cele trei gaze se află stocate separat în butelii, la valori ridicate ale presiunii p_B , ocupând volumul V_B la temperatura T_B și având cantitatea utilizabilă de gaz C_U (figura 5.2). Aceste valori se modifică în lungul celor trei linii. Injectarea celor trei gaze în instalație, se face separat pe cele trei linii, la debitul masic $Q_{m,He}^{inj}$, $Q_{m,Ni}^{inj}$ și $Q_{m,Ox}^{inj}$, valori menținute constante de-a lungul fiecărei linii, în final rezultând debitul total $Q_{m,am}^{inj}$. Presiunea reprezintă mărimea determinată, prin modificarea valorii sale asigurându-se un debit masic constant. De-a lungul unei linii de injecție au loc trei modificări ale presiunii. Prima modificare a presiunii are loc de la valorile înalte de stocare a gazelor în butelii $p_{B,He}$, $p_{B,Ni}$ și $p_{B,Ox}$ la valori medii $p_{0,He}$, $p_{0,Ni}$ și $p_{0,Ox}$, ca urmare a prezenței manometrelor diferențiale de pe cele trei linii de injecție (MD_{He}, MD_{Ni} și MD_{Ox}), iar apoi, ca urmare a prezenței blocului de injecție masică, la valori reduse notate conform schemei din figura 5.2. cu $p_{e,He}$, $p_{e,Ni}$ și $p_{e,Ox}$.

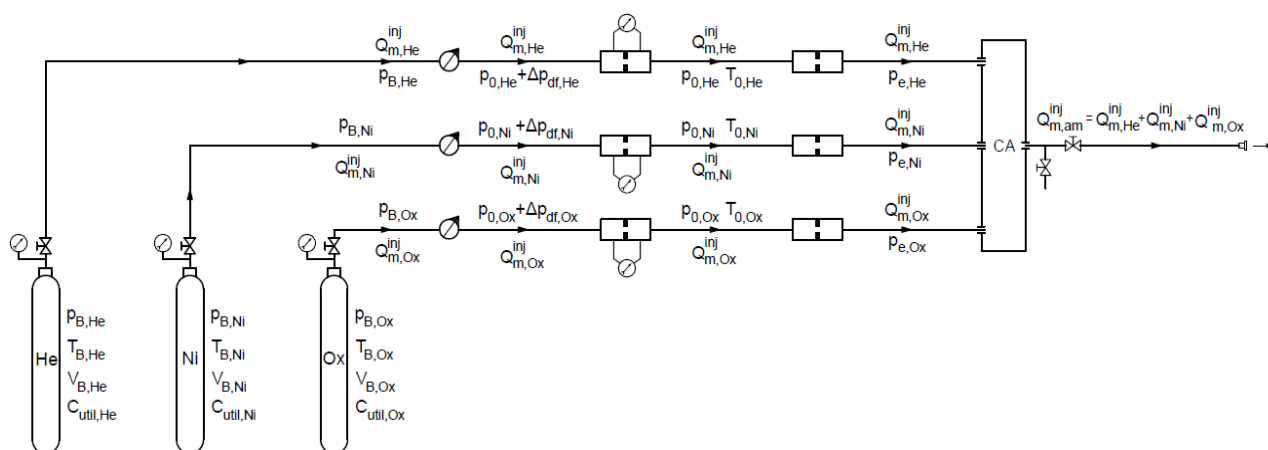


Figura 5.2 Parametri gazelor componente, heliu (He), azot (N₂) respectiv oxigen (O₂) și ai amestecului gazos TRIMIX în
lunghi instalatiei de preparare a amestecului ternar

În ceea ce privește temperatura celor trei gaze după secțiune de alimentare, notată $T_{0,\text{He}}, T_{0,\text{Ni}}$ și $T_{0,\text{Ox}}$, aceasta poate fi considerată ca fiind constantă de-a lungul liniilor.

Principiul de funcționare al elementelor principale din alcătuirea instalației de preparare în flux continuu propuse, este prezentat în paragraful 5.4 al lucrării, intitulat „Descrierea funcționării blocului de control BC și a blocului de injecție masică BIM”, iar relațiile matematice folosite pentru dimensionarea acestor elemente în capitolul 7, subcapitolul 7.3 intitulat „Relații de calcul utilizate pentru modelarea proceselor gazodinamice aferente instalației experimentale”.

În încheierea capitolului 5 al tezei de doctorat sunt prezentate două posibile variante constructive ale instalației concepute și anume:

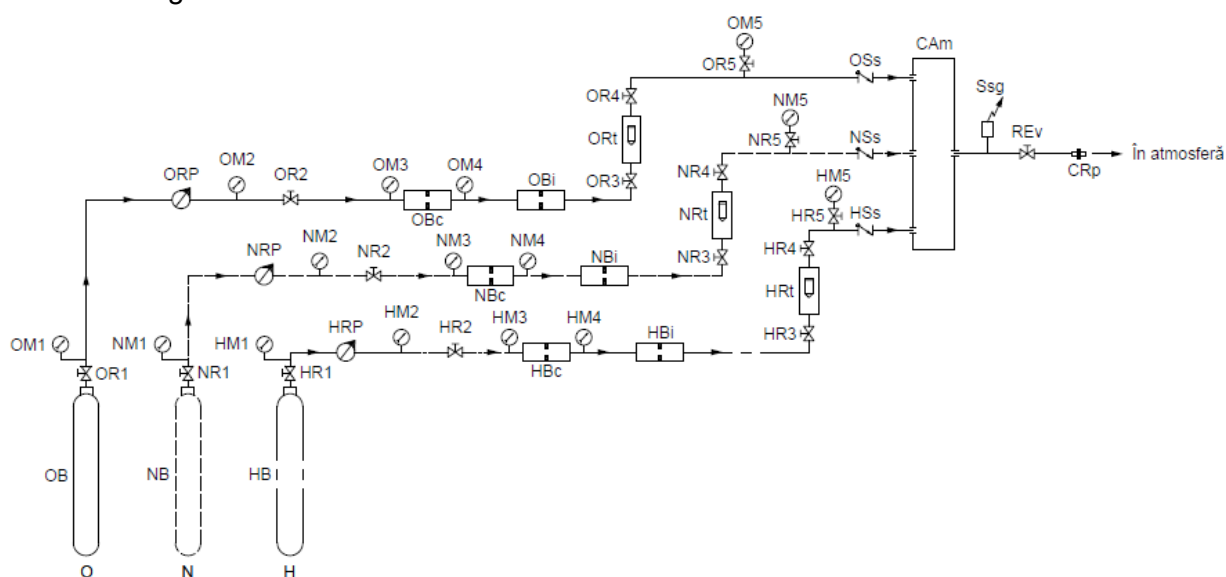
- Instalație de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii destinată scufundării autonome
- Instalație de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii destinată alimentării incintelor presurizate și scafandrilor cu alimentare de la suprafață

Capitolul 6

INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ DESTINATĂ VALIDĂRII MODELULUI DE CALCUL AFERENT METODEI DE PREPARARE ÎN FLUX CONTINUU A AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE NITROX ȘI HELIOX ȘI TERNARE TRIMIX

Pentru validarea prin experiment a modelului de calcul aferent metodei de preparare a amestecurilor respiratorii binare NITROX și HELIOX și ternare TRIMIX, model prezentat în detaliu în capitolul 7 și pentru verificarea modului de funcționare a instalației propuse, având principiul de funcționare descris în capitolul anterior, s-a conceput o instalație experimentală bazată pe schemele de principiu prezentate în capitolul 5.

Realizarea instalației s-a făcut în colaborare cu Centrul 39 Scafandri Constanța al Forțelor Navale Române, testele experimentale fiind derulate în cadrul Laboratorului Hiperbar de pe lângă instituția amintită anterior. Schema de principiu a instalației experimentale realizată, este prezentată în figura 6.1.



LEGENDA

O – Linia oxigenului
 N – Linia azotului
 H – Linia heliului
 OB – Butelie oxigen
 NB – Butelie azot
 HB – Butelie heliu
 OR1 ÷ OR5 – Robinete pe linia oxigenului
 NR1 ÷ NR5 – Robinete pe linia azotului
 HR1 ÷ HR5 – Robinete pe linia heliului
 OM1 ÷ OM4 – Manometre pe linia oxigenului
 NM1 ÷ NM4 – Manometre pe linia azotului

HM1 ÷ HM4 – Manometre pe linia heliului
 ORP – Reductor de presiune nepilotat pe linia oxigenului
 NRP – Reductor de presiune nepilotat pe linia azotului
 HRP – Reductor de presiune nepilotat pe linia heliului
 OBc – Bloc de control pe linia oxigenului
 NBc – Bloc de control pe linia azotului
 HBc – Bloc de control pe linia heliului
 OBi – Bloc de injecție pe linia oxigenului
 NBi – Bloc de injecție pe linia azotului
 HBi – Bloc de injecție pe linia heliului
 ORt – Rotametrul pe linia oxigenului

NRt – Rotametrul pe linia azotului
 HRt – Rotametrul pe linia heliului
 OSs – Supapă de sens pe linia oxigenului
 NSs – Supapă de sens pe linia azotului
 HSs – Supapă de sens pe linia heliului
 CAm – Camera de amestec
 Ssg – Supapă de siguranță
 REv – Robinet de evacuare
 CRp – Sistem/element cuplare

Figura 6.1 Schema instalației experimentale concepută și proiectată în cadrul tezei de doctorat executată și testată în cadrul Laboratorului Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri al Forțelor Navale Române

Instalația experimentală este alcătuită din trei linii distincte, fiecare destinată unui singur gaz și anume linia oxigenului notată cu „O”, linia azotului notată cu „N” și linia heliului notată cu „H”. Fiecare element al instalației și fiecare mărime fizică implicată în procesul de preparare al amestecurilor respiratorii a fost denumit și codificat pornind de la aceste notații. În figura 6.2 este prezentată instalația experimentală folosită în cadrul studiilor experimentale.



Figura 6.2 Instalația experimentală concepută, proiectată și executată în cadrul tezei de doctorat – amplasare în incinta Laboratorului hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri al Forțelor Navale Române

Fiecare element component din alcătuirea instalației experimentale realizate este prezentat în cadrul acestui capitol al tezei de doctorat. Prezentarea elementelor componente conține atât informații privind rolul și caracteristicile tehnice ale obiectelor cât și aspecte prin care se justifică alegerile făcute.

Capitolul 7

STUDII EXPERIMENTALE PRIVIND REALIZAREA ÎN FLUX CONTINUU A AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE NITROX, HELIOX ȘI TERNARE TRIMIX UTILIZÂND INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ REALIZATĂ

Studiile experimentale derulate au urmărit testarea funcționării instalației experimentale de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare, NITROX și HELIOX și ternare, TRIMIX și, totodată, a avut ca scop și validarea modelului de calcul, folosit pentru evaluarea proceselor gazodinamice ce au loc într-o astfel de instalație.

Testele experimentale s-au derulat în incinta Laboratorului Hiperbar al Centrului de Scafandrii 39 Constanța, unitate NATO a Forțelor Navale Române, care a fost colaborator al Universității Tehnice de Construcții București pe durata efectuării cercetărilor și în final beneficiar al rezultatelor obținute.

Capitolul 7 descrie procedurile urmate pentru derularea testelor experimentale, teste în cadrul cărora au fost fabricate opt amestecuri NITROX, șapte amestecuri HELIOX și cinci amestecuri TRIMIX (subcapitolul 7.1 „Proceduri urmate în cadrul testelor experimentale”).

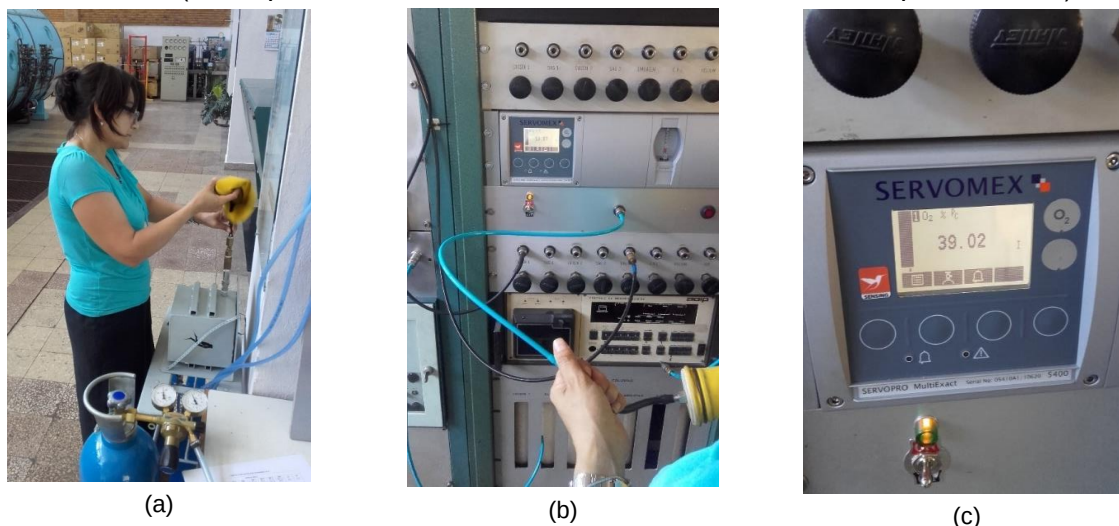


Figura 7.1 Prelevarea probei de amestec respirator preparat (a) și analizarea amestecului (b; c)

Rezultatele numerice obținute în cadrul testelor experimentale sunt prezentate in extenso în subcapitolul 7.2 al tezei de doctorat.

Pornind de la conceperea și proiectarea instalației experimentale, privită strict din perspectiva fluxului tehnologic de preparare al amestecurilor respiratorii elementele prezente în instalație sunt încadrate în două categorii și anume: elemente calculate și elemente selectate pe baza valorilor estimate ale mărimilor fizice implicate în procesul de preparare al amestecului respirator.

7.1 Relații de calcul utilizate pentru modelarea proceselor gazodinamice aferente instalației experimentale

Elementele ce au necesitat calcule de dimensionare sunt diafragma de măsură corespunzătoare blocului de control Bc și microajutajul de injecție masică corespunzător blocului de injecție masică Bi (figura 6.1). Pentru efectuarea calculelor de dimensionare necesare și pentru descrierea matematică a proceselor gazodinamice implicate în procesul de preparare au fost concepute grupuri de relații matematice ce sunt prezentate în paragrafele 7.3.1 ÷ 7.3.6 ale tezei de doctorat. În continuare aceste grupuri de relații matematice sunt prezentate sintetic într-o formă generală. Notațiile folosite în aceste relații matematice, semnificația acestora și unitățile de măsură corespunzătoare sunt prezentate în tabelul 7.1.

Tabelul 7.1 Mărimile fizice din alcătuirea relațiilor create pentru dimensionarea elementelor principale ale instalației experimentale și pentru descrierea proceselor gazodinamice aferente funcționării acesteia (prezentare în ordinea de apariție în text)

Mărime fizică	Denumire	Unitate de măsură
$Q_{m, gaz}^{inj}$	debitului masic de gaz injectat	kg/s
$Q_{m, gaz}^{cit}$	debitul volumic citit la rotametrul	cm_N^3/min
R_{gaz}	constanta gazului	J/(kg · K)
F_{gaz}	coeficient de corecție necesar a fi aplicați valorilor citite la rotametrele de pe cele trei linii	-
T_0	temperatura absolută a gazului	K
p_0	presiunea gazului la intrarea în ajutorul de injecție masică	bara (scară absolută)
k	exponentul adiabatic al gazului	-
$A_{1, gaz}$	aria colului ajutorului corespunzător unui bloc de injecție masică aferent unei linii de injecție	m ²
D_1	diametrul colului ajutorului corespunzător unui bloc de injecție masică aferent unei linii de injecție	mm
p_{df}	presiunea gazului la alimentarea diafragmei	bara (scară absolută)
A_{df}	ariei colului diafragmei de măsură	m ²
D_{df}	diametrului colului diafragmei de măsură	mm
m^{inj}	participația masică a fiecărui gaz din amestecul injectat	-
r^{inj}	participația volumică a fiecărui gaz din amestecul injectat	-
R_{am}^{inj}	constanta specifică a amestecului injectat	J/(kg · K)
p_e	presiunea la ieșirea din ajutorul de injecție masică	bara
p_{cr}	presiunea de funcționare a ajutorului în regim critic	bara
$\theta_{e, gaz}$	temperatura gazului la ieșirea din ajutorul de injecție masică	°C
ρ_{gaz}	densitatea gazului la temperatura de lucru	kg/m ³

Relații pentru calculul debitelor masice pe cele trei linii, funcție de citirile la rotametre

$$Q_{m, gaz}^{inj} = \frac{Q_{gaz}^{cit} \cdot F_{gaz}}{R_{gaz} \cdot 175896} \quad (7.1)$$

Relații pentru calculul ariei colului ajutorilor de injecție masică, funcție de citirile la rotametre

$$A_{1, gaz} = \frac{Q_{m, gaz}^{inj} \cdot \sqrt{R_{gaz}}}{\left(\frac{2}{k_{gaz} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{gaz} - 1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{gaz}}{k_{gaz} + 1}}} \cdot \frac{\sqrt{T_{0, gaz}}}{p_{0, gaz} \cdot 10^5} \quad (7.2)$$

Relații pentru calculul diametrelor ajutorilor de injecție de pe cele trei linii, funcție de citirile la rotametre

$$D_{1, gaz} = 1128,379 \cdot \sqrt{A_{1, gaz}}; \quad (7.3)$$

Relații pentru stabilirea debitelor masice, prin calculul termodinamic al ajutorilor

$$Q_{m,gaz}^{inj} = A_{1,gaz} \left(\frac{2}{k_{gaz} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{gaz} - 1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{gaz}}{k_{gaz} + 1}} \cdot \frac{p_{0,gaz} \cdot 10^5}{\sqrt{T_{0,gaz} \cdot R_{gaz}}} \quad (7.4)$$

Relații pentru stabilirea debitelor volumice, prin calculul termodinamic al ajutorajelor - exprimat în diferite unități de măsură în condiții normale și debitul volumic de gaz citit la rotametrul exprimat în aer

$$Q_{gaz}^{inj} = \frac{Q_{m,gaz}^{inj} \cdot R_{gaz}}{341,11} \left[\frac{m_N^3}{s} \right];$$

$$Q_{gaz}^{inj} = Q_{m,gaz}^{inj} \cdot R_{gaz} \cdot 175,896 \left[\frac{l_N}{min} \right]; \quad (7.5)$$

$$Q_{gaz}^{inj} = Q_{m,gaz}^{inj} \cdot R_{gaz} \cdot 175896 \left[\frac{cm_N^3}{min} \right];$$

$$Q_{gaz}^{cit} = \frac{Q_{gaz}^{inj}}{F_{gaz}} \left[\frac{cm_N^3}{min} \right].$$

Relații pentru stabilirea valorii presiunilor de alimentare a ajutorajelor de injecție masică, prin calculul termodinamic al ajutorajelor

$$p_{0,gaz} = \frac{Q_{m,gaz}^{inj} \cdot \sqrt{T_{0,gaz} \cdot R_{gaz}}}{10^5 \cdot A_{1,gaz} \left(\frac{2}{k_{gaz} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{gaz} - 1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{gaz}}{k_{gaz} + 1}}} \quad (7.6)$$

Relații pentru calculul ariei și diametrelor diafragmelor de măsură de pe cele trei linii funcție de aria colului ajutorajelor

$$A_{df,gaz} = \frac{Q_{m,gaz}^{inj}}{p_{df,gaz} \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{gaz}}{k_{gaz} - 1} \cdot \frac{1}{R_{gaz} \cdot T_{0,gaz}} \cdot \left[\left(\frac{p_{0,gaz}}{p_{df,gaz}} \right)^{\frac{2}{k_{gaz}}} - \left(\frac{p_{0,gaz}}{p_{df,gaz}} \right)^{\frac{k_{gaz} + 1}{k_{gaz}}} \right]}}} \quad (7.7)$$

$$D_{df,gaz} = 1128,379 \cdot \sqrt{A_{df,gaz}} \quad (7.8)$$

Relații pentru calculul debitelor masice pe cele trei linii funcție de aria colului ajutorajelor funcție de aria colului diafragmei de măsură de presiunea gazului la intrarea în diafragma de măsură, de presiunea și temperatura a gazului la ieșirea în diafragma de măsură, de constanta gazului și de exponentul adiabatic al gazului respectiv

$$Q_{m,gaz}^{inj} = A_{df,gaz} \cdot p_{df,gaz} \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_{gaz}}{k_{gaz} - 1} \cdot \frac{1}{R_{gaz} \cdot T_{0,gaz}} \cdot \left[\left(\frac{p_{0,gaz}}{p_{df,gaz}} \right)^{\frac{2}{k_{gaz}}} - \left(\frac{p_{0,gaz}}{p_{df,gaz}} \right)^{\frac{k_{gaz} + 1}{k_{gaz}}} \right]} \quad (7.9)$$

Relații pentru calculul debitului masic de amestec injectat și a participațiilor masice și volumice ale componentelor, pentru amestecurile NITROX, HELIOX și TRIMIX

Amestecuri binare (NITROX, HELIOX)

$$Q_{m,amestec}^{inj} = Q_{m,gaz\ 1}^{inj} + Q_{m,gaz\ 2}^{inj} \quad (7.10)$$

$$R_{amestec}^{inj} = m_{gaz\ 1}^{inj} \cdot R_{gaz\ 1} + m_{gaz\ 2}^{inj} \cdot R_{gaz\ 2} \quad (7.11)$$

Amestecuri ternare (TRIMIX)

$$Q_{m,amestec}^{inj} = Q_{m,gaz\ 1}^{inj} + Q_{m,gaz\ 2}^{inj} + Q_{m,gaz\ 3}^{inj} \quad (7.12)$$

$$R_{amestec}^{inj} = m_{gaz\ 1}^{inj} \cdot R_{gaz\ 1} + m_{gaz\ 2}^{inj} \cdot R_{gaz\ 2} + m_{gaz\ 3}^{inj} \cdot R_{gaz\ 3} \quad (7.13)$$

în care participația masică m_{gaz}^{inj} și participația volumică r_{gaz}^{inj} a componentelor amestecului gazos se calculează cu relațiile:

$$m_{gaz}^{inj} = \frac{Q_{m,gaz}^{inj}}{Q_{m,amestec}^{inj}} \quad (7.14)$$

$$r_{gaz}^{inj} = m_{gaz}^{inj} \cdot \frac{R_{gaz}}{R_{amestec}^{inj}} \quad (7.15)$$

Relații practice de calcul a ariei și diametrului colului ajutorului de injecție masică, a debitului masic injectat și a presiunii de alimentare a ajutorului, prin calculul ajutorului sonic și prin citirile la rotametrul, pentru cele trei linii

Condiția de funcționare a ajutorului de injecție în regim sonic:

$$\frac{p_e}{p_0} \leq \frac{p_{cr}}{p_0} \quad (7.16)$$

în care:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (7.17)$$

Valorile raportului $p_{cr, gaz} / p_{0, gaz}$ pentru asigurarea regimului critic de curgere în ajutoarele blocurilor de injecție masică ale celor trei linii:

$$\frac{p_{cr, Ox}}{p_{0, Ox}} = 0,525, \quad \frac{p_{cr, Ni}}{p_{0, Ni}} = 0,528, \quad \frac{p_{cr, He}}{p_{0, He}} = 0,488 \quad (7.18)$$

Pornind de la condiția (7.16) și valorile (7.18), stabilite cu relația (7.17) s-au determinat valoarea presiunii minime a gazului la intrarea în ajutorul de injecție masică (p_0), pentru ca funcționarea ajutorului de injecție să se producă în regim critic.

Relații practice de calcul a ariei și diametrului colului ajutorului de injecție masică, a debitului masic injectat și a presiunii de alimentare a ajutorului, prin calculul ajutorului sonic și prin citirile la rotametrul, pentru cele trei linii

Aceste relații au fost obținute prin înlocuirea în relațiile (7.2), (7.4) și (7.6) a valorii exponentului adiabatic (k_{gaz}), a valorii constantei gazului (R_{gaz}) și a valorii temperaturii absolute ($T_{0, gaz}$). Așadar au rezultat nouă relații, trei pentru fiecare linie de injecție, și anume una pentru aria colului ajutorului de injecție $A_{1, gaz}$ una pentru debitul masic injectat $Q_{m, gaz}^{inj}$ și una pentru presiunea de alimentare a ajutorului $p_{0, gaz}$.

Linia oxigenului	Linia azotului	Linia heliului
$A_{1,Ox} = \frac{404,845}{10^5} \cdot \frac{Q_{m,Ox}^{inj}}{p_{0,Ox}}$	$A_{1,Ni} = \frac{430,925}{10^5} \cdot \frac{Q_{m,Ni}^{inj}}{p_{0,Ni}}$	$A_{1,He} = \frac{1076,919}{10^5} \cdot \frac{Q_{m,He}^{inj}}{p_{0,He}}$
$Q_{m,Ox}^{inj} = 247,00 \cdot A_{1,Ox} \cdot p_{0,Ox}$	$Q_{m,Ni}^{inj} = 232,058 \cdot A_{1,Ni} \cdot p_{0,Ni}$	$Q_{m,He}^{inj} = 92,857 \cdot A_{1,He} \cdot p_{0,He}$
$p_{0,Ox} = \frac{404,845}{10^5} \cdot \frac{Q_{m,Ox}^{inj}}{A_{1,Ox}}$	$p_{0,Ni} = \frac{430,925}{10^5} \cdot \frac{Q_{m,Ni}^{inj}}{A_{1,Ni}}$	$p_{0,He} = \frac{1076,919}{10^5} \cdot \frac{Q_{m,He}^{inj}}{A_{1,He}}$

(7.19)

7.2 Prelucrarea datelor rezultate din testele efectuate pe instalația experimentală

Studiile experimentale au fost efectuate în condiții izoterme. Temperatura gazelor la ieșirea din ajutorajul de injecție masică a fost de $\theta_{e,gaz} = 20^\circ\text{C}$. Valoarea presiunii gazelor la ieșirea din ajutorajele de injecție masică a fost de $p_{e,gaz} = 1,013$ bara (scară absolută), iar valorile densității celor trei gaze $\rho_{Ox} = 1,42 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{Ni} = 1,25 \text{ kg/m}^3$ și $\rho_{He} = 0,18 \text{ kg/m}^3$.

Pornind de la aceste valori s-au calculat coeficienții de corecție necesari a fi aplicați valorilor citite la rotametrele de pe cele trei linii de injecție. Calculele s-au făcut cu relația generală:

$$F_{gaz} = \left(\frac{273,16}{\theta_{e,gaz} + 273,16} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{p_{e,gaz}}{1,013} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{1,292}{\rho_{gaz}} \right)^{0,5} \quad (7.20)$$

Calculele au urmărit:

- stabilirea valorilor debitelor masice și volumice injectate și a diametrelor ajutorajelor de injecție masică pe baza citirilor la rotametre pentru testele de preparare a amestecurilor NITROX, HELIOX și TRIMIX (paragraful 7.4.1 din cadrul tezei de doctorat);
- determinarea debitelor masice injectate prin calculul termodinamic al ajutorajelor de injecție lucrând în regim critic, pentru amestecurile NITROX, HELIOX și TRIMIX și compararea cu debitele obținute cu rotametrele (paragraful 7.4.2 din cadrul tezei de doctorat);
- calculul debitului de amestec injectat și calculul participațiilor masice și volumice ale amestecului, pentru amestecurile NITROX, HELIOX și TRIMIX și comparare cu participațiile volumice determinate prin analiza gazelor (paragraful 7.4.3 din cadrul tezei de doctorat).

Rezultatele numerice obținute în cadrul studiilor experimentale au fost sintetizate și se găsesc prezentate sub formă tabelară în cadrul capitolului 7 al tezei de doctorat. Pe baza acestor rezultate au fost elaborate reprezentări grafice comparative privind prepararea în flux continuu a celor trei tipuri de amestecuri respiratorii, aceste reprezentări fiind date în subcapitolul 7.5 al tezei de doctorat intitulat „Reprezentarea grafică și analiza comparativă a rezultatelor obținute în cadrul studiilor efectuate privind prepararea în flux continuu a amestecurilor NITROX, HELIOX și TRIMIX”.

În continuare sunt redată graficele obținute prin reprezentarea comparativă a rezultatelor studiilor experimentale cu cele obținute prin aplicarea relațiilor de calcul create pentru modelarea fenomenelor gazodinamice ce au loc la prepararea amestecurilor respiratorii dorite.

Amestecurile care au fost studiate în cadrul cercetărilor efectuate sunt redată în tabelul 7.2.

Tabelul 7.2 Compoziția amestecurilor NITROX, HELIOX și TRIMIX studiate

NITROX			HELIOX			TRIMIX	
Cod test	Ox	Ni	Cod test	Ox	He	Cod test	Ox
	[%]	[%]		[%]	[%]		[%]
1 NiOx	33,92	66,08	1 HeOx	19,14	80,86	1 TRi	16,03
2 NiOx	36,10	63,90	2 HeOx	21,21	78,79	2 TRi	18,92
3 NiOx	39,03	60,97	3 HeOx	23,91	76,09	3 TRi	22,03
4 NiOx	39,75	60,25	4 HeOx	27,03	72,97	4 TRi	24,62
5 NiOx	43,57	56,43	5 HeOx	32,58	67,42	5 TRi	28,02
6 NiOx	45,95	54,05	6 HeOx	35,10	64,90	-	-
7 NiOx	50,07	49,93	7 HeOx	39,52	60,48	-	-
8 NiOx	55,22	44,78	-	-	-	-	-

Primul set de rezultate reprezentate grafic se referă la valorile obținute prin calcul și prin măsurători pentru debitele masice ale componentelor ce alcătuiesc amestecurile gazoase NITROX, HELIOX și TRIMIX studiate.

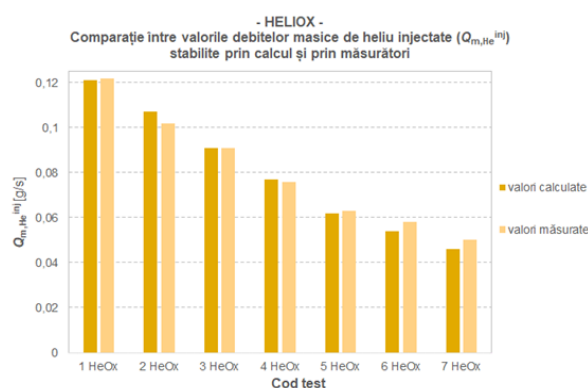
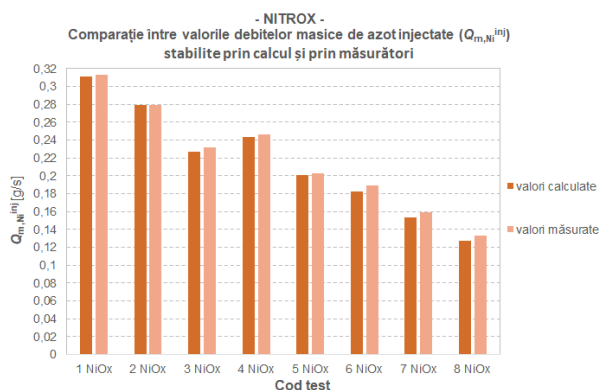
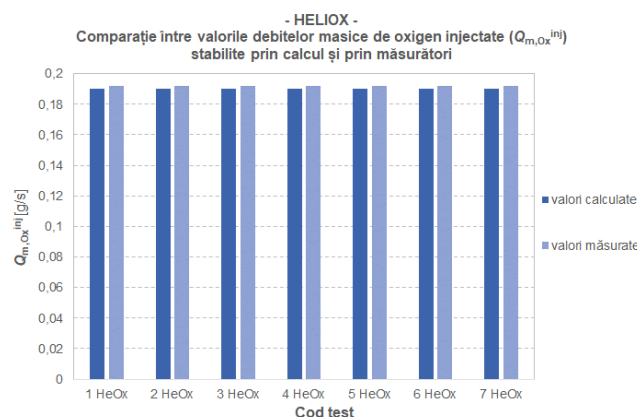
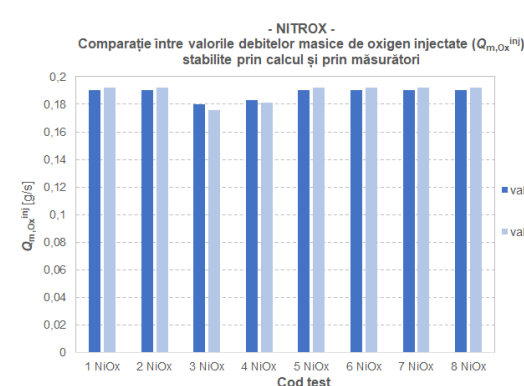


Figura 7.2 Reprezentare comparativă a valorilor debitelor masice injectate de oxigen $Q_{m,Ox}^{inj}$ și de azot $Q_{m,Ni}^{inj}$, obținute prin calcul și prin măsurători, pentru cele opt amestecuri respiratorii NITROX

Figura 7.3 Reprezentare comparativă a valorilor debitelor masice injectate de oxigen $Q_{m,Ox}^{inj}$ - (a) și de azot $Q_{m,He}^{inj}$ - (b), obținute prin calcul și prin măsurători, pentru cele șapte amestecuri respiratorii HELIOX

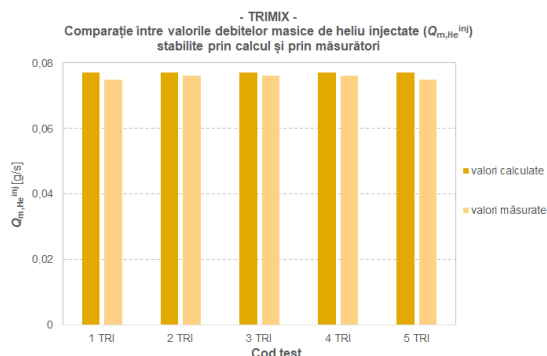
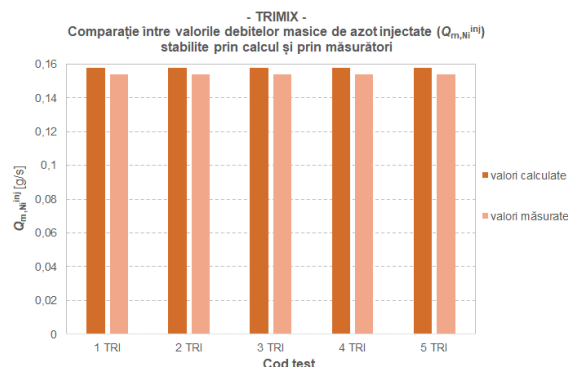
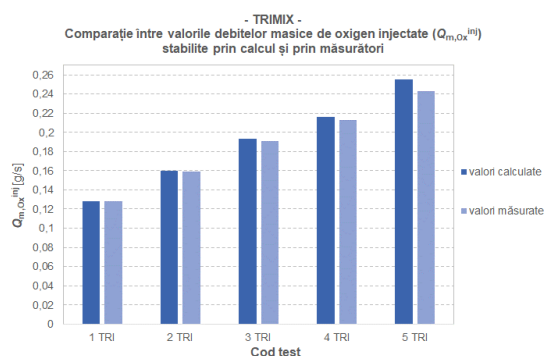
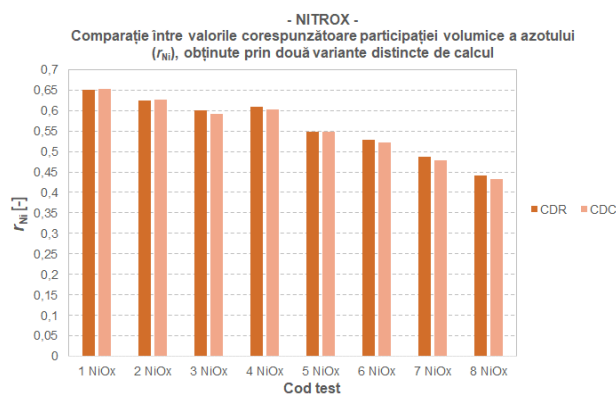
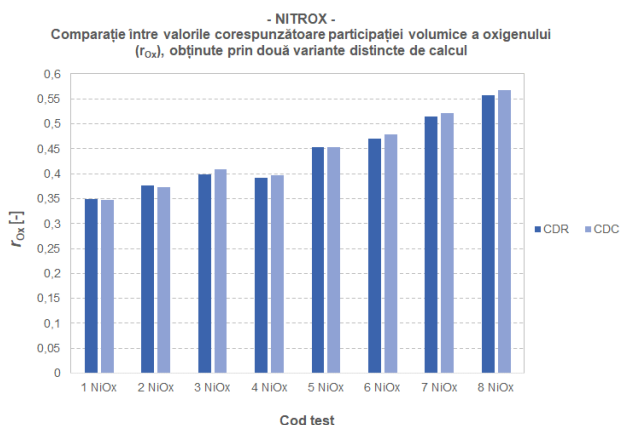


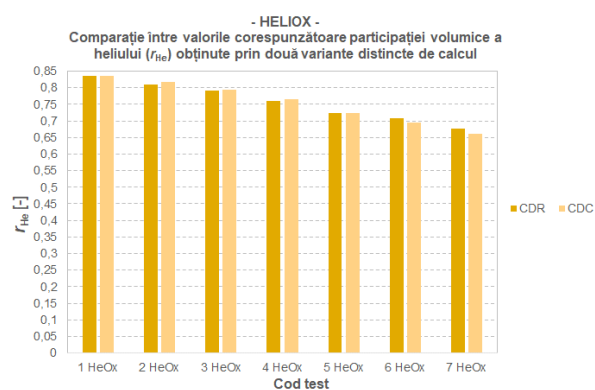
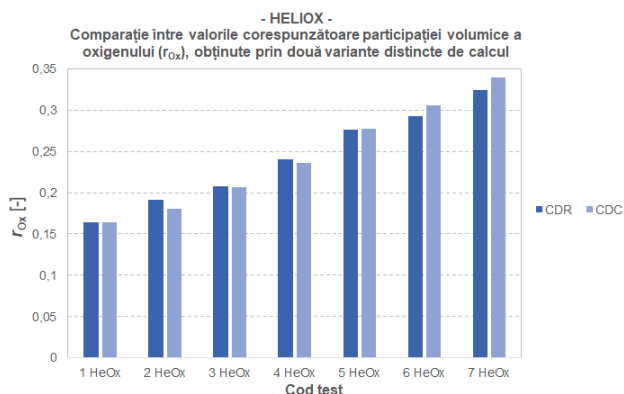
Figura 7.4 Reprezentare comparativă a valorilor debitelor masice injectate de oxigen $Q_{m,Ox}^{inj}$, de azot $Q_{m,Ni}^{inj}$ și de heliu $Q_{m,He}^{inj}$, obținute prin calcul și prin măsurători, pentru cele cinci amestecuri respiratorii TRIMIX

Un al doilea set de mărimi fizice analizate comparativ se referă la participațiile volumice ale gazelor din alcătuirea celor trei amestecuri respiratorii (figura 7.5, figura 7.6, figura 7.7).



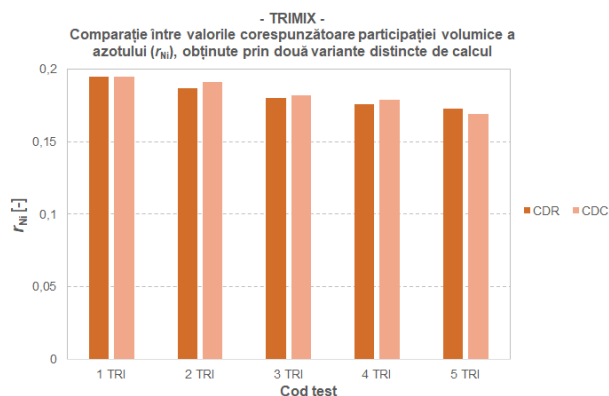
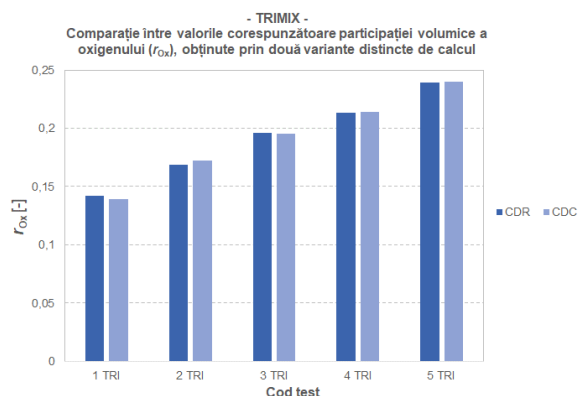
CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul

Figura 7.5 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) și a azotului (r_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecului respirator NITROX



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul

Figura 7.6 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) și a heliului (r_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecului respirator HELIOX



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul

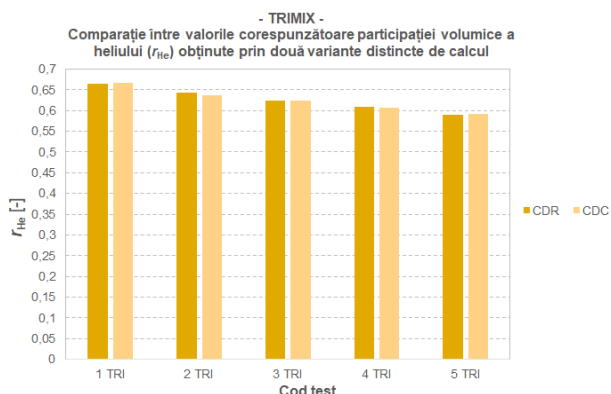
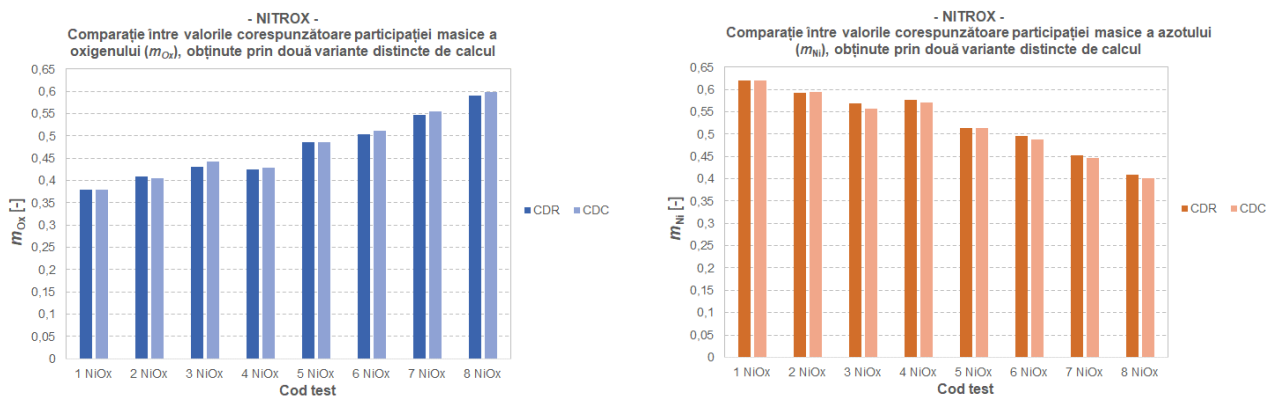


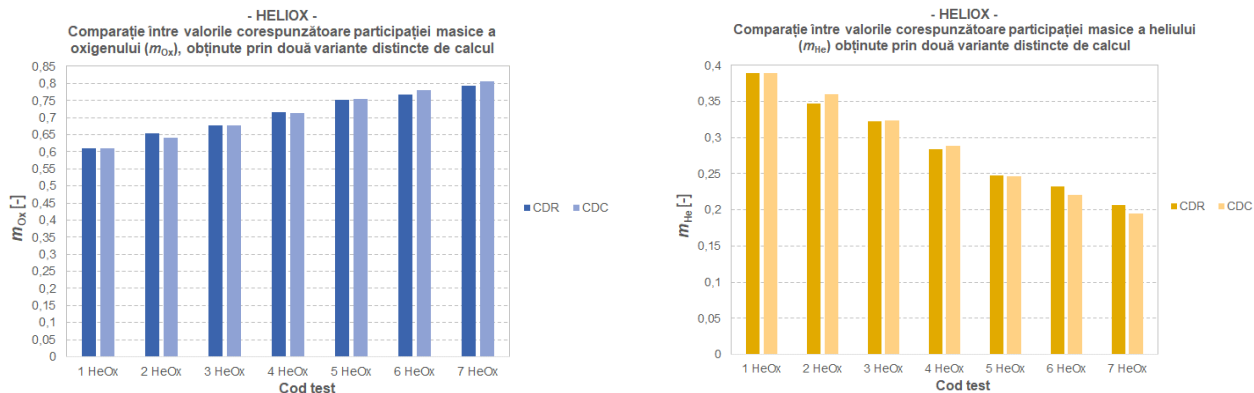
Figura 7.7 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}), a azotului (r_{Ni}) și a heliului (r_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX

Transpunerea grafică, comparativă, a valorilor obținute pentru participațiile masice ale oxigenului (m_{Ox}), azotului (m_{Ni}), și heliului (m_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru testele efectuate în vederea preparării celor trei tipuri de amestecuri respiratorii, sunt prezentate în figura 7.8 pentru cele opt amestecuri NITROX, în figura 7.9 pentru cele șapte amestecuri HELIOX și în figura 7.10 pentru cele cinci amestecuri TRIMIX.



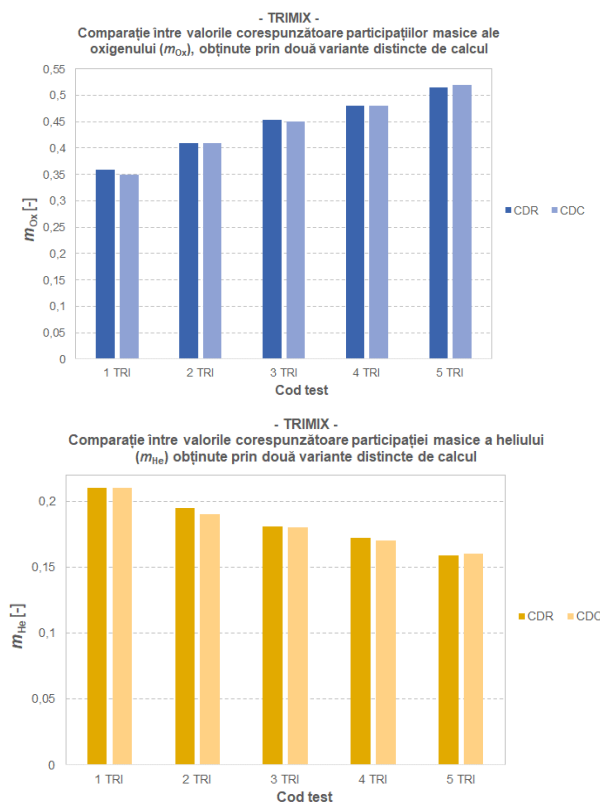
CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul

Figura 7.8 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}) și a azotului (m_{Ni}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecului respirator NITROX



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul

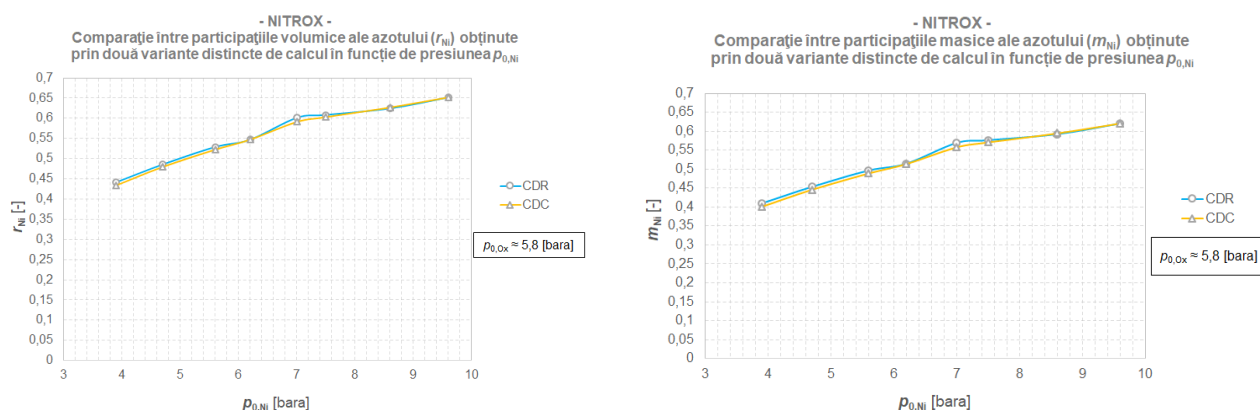
Figura 7.9 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}) și a heliului (m_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecului respirator HELIOX



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul

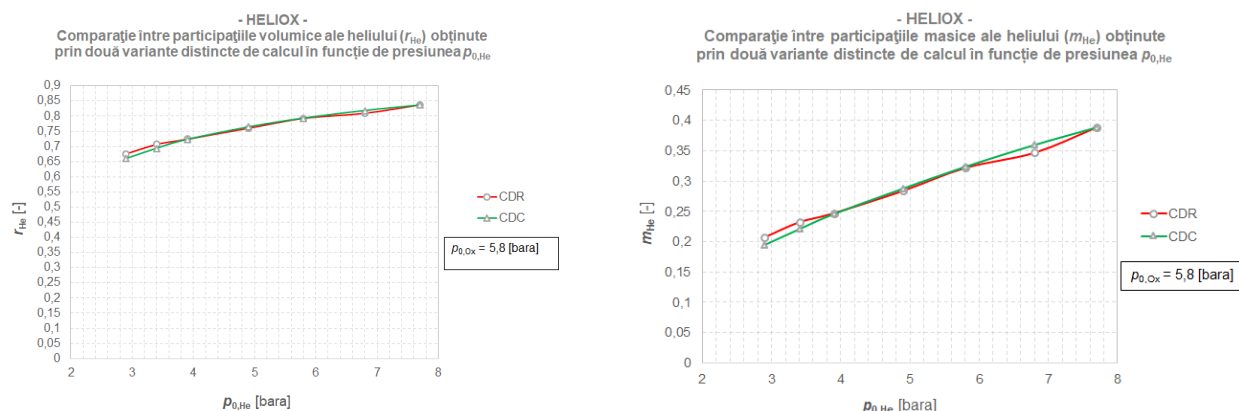
Figura 7.10 Reprezentare comparativă a valorilor participației masice a oxigenului (m_{Ox}), a azotului (m_{Ni}) și a heliului (m_{He}), obținute prin două variante de calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX

Un alt set de valori analizate comparativ sunt participațiile volumice (r_{gaz}) și participațiile masice (m_{gaz}) din amestecul fabricat, funcție de presiunea de alimentare a ajutorului de injecție, în condițiile în care presiunea de alimentare a ajutorului de injecție a gazului ($p_{0,gaz}$) pentru fabricarea amestecurilor NITROX, HELIOX și TRIMIX este menținută la o valoare constantă. Valorile obținute au fost calculate prin cele două variante și anume varianta folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre (CDR) și varianta folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul (CDC). Graficele comparative pentru amestecurile NITROX, HELIOX și TRIMIX sunt prezentate în figura 7.11, figura 7.12 și respectiv figura 7.13.



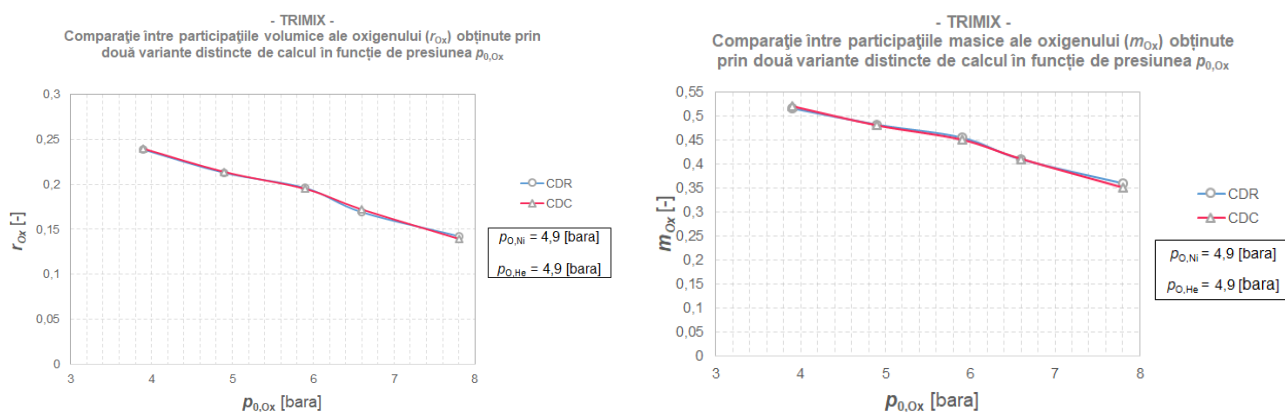
CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 7.11 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice (r_{Ni}) și a participației masice (m_{Ni}) a azotului, obținute prin două variante de calcul, în funcție de presiunea $p_{0,Ni}$ pentru amestec NITROX



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 7.12 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice (r_{He}) și a participației masice (m_{He}) a heliului, obținute prin două variante de calcul, în funcție de presiunea $p_{0,He}$ pentru amestec HELIOX



CDR – varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre; CDC - varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul.

Figura 7.13 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice (r_{Ox}) și a participației masice (m_{Ox}) a oxigenului, obținute prin două variante de calcul, în funcție de presiunea $p_{0,Ox}$ pentru amestec TRIMIX

Pentru a facilita compararea valorilor participațiilor volumice ale gazelor din compoziția celor trei tipuri de amestecuri respiratorii studiate în cadrul fiecărui test experimental, valori obținute prin analiză, cu valorile obținute prin calcul pe baza debitelor masice, au fost întocmite tabele în care sunt prezentate sintetic valorile obținute prin analiza oxigenului din amestec folosind un analizor specializat și valorile calculate pe baza debitelor masice ale componentelor determinate cu rotametrele. Aceste rezultate au fost transpuse grafic și sunt prezentate în figurile 7.14, 7.15 și 7.16.

Deoarece în cazul amestecurilor TRIMX, nu s-au putut determina separat valorile participației volumice ale azotului de valorile participației volumice ale heliului, acestea au fost stabilite ca valoarea cumulată a participației volumice a azotului și heliului ($r_{Ni+He} = r_{Ni} + r_{He}$). Reprezentarea grafică a rezultatelor obținute este dată în figura 7.16, atât pentru participația volumică a oxigenului cât și pentru valorile cumulate ale participației volumice a azotului și heliului.

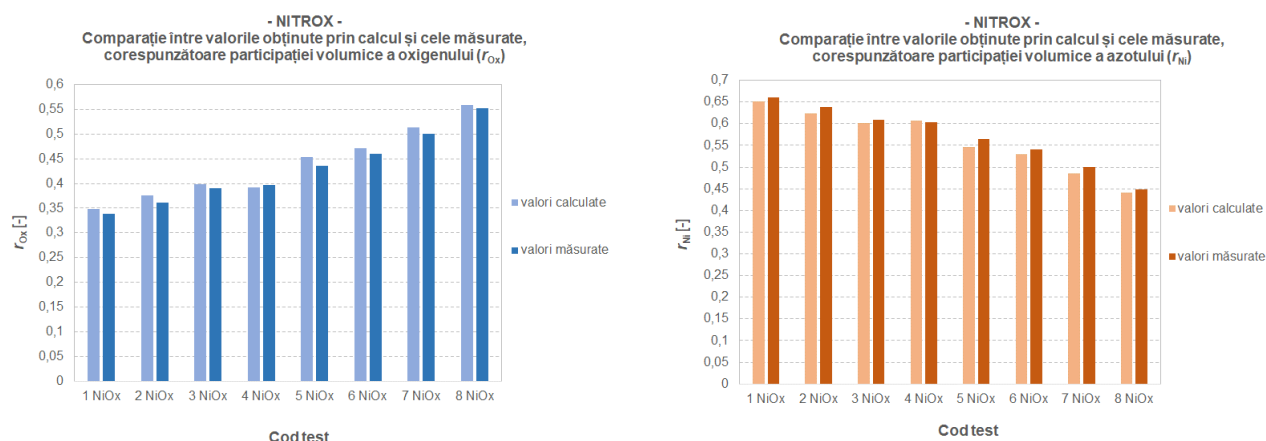


Figura 7.14 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) și a valorilor participației volumice a azotului (r_{Ni}) obținute prin măsurare, în cadrul testelor experimentale cu cele obținute prin calcul, pentru cele opt teste de preparare a amestecului respirator NITROX

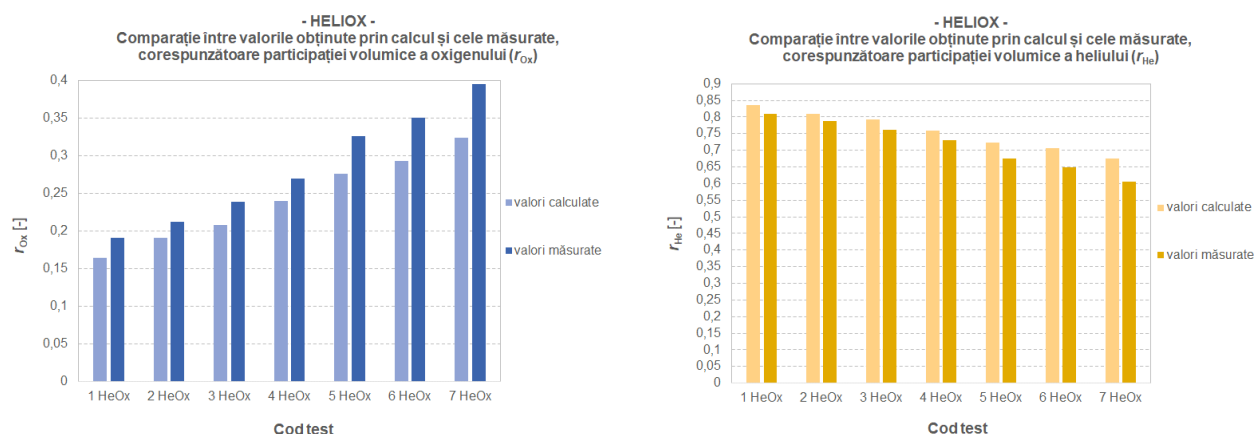


Figura 7.15 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) și a valorilor participației volumice a heliului (r_{He}) obținute prin măsurare, în cadrul testelor experimentale cu cele obținute prin calcul, pentru cele șapte teste de preparare a amestecului respirator HELIOX

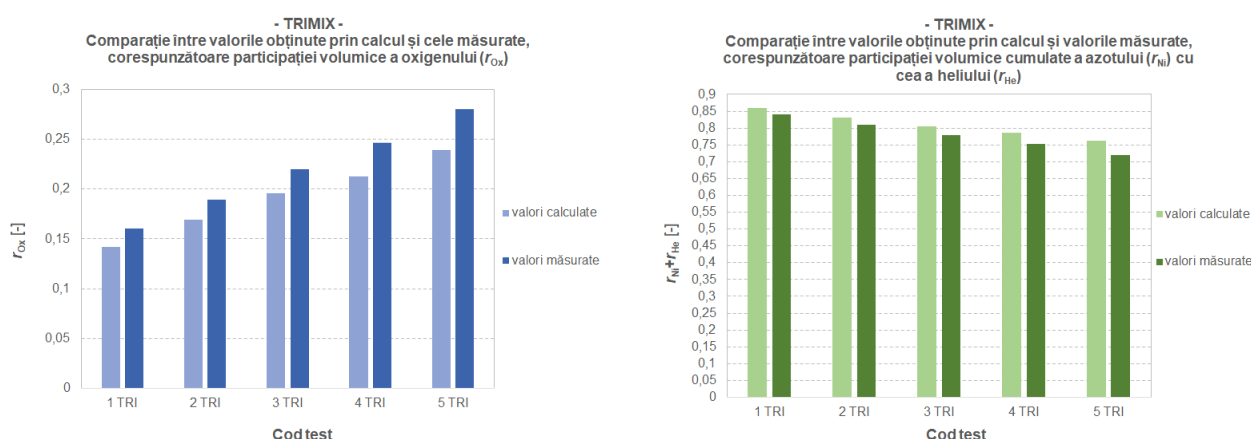


Figura 7.16 Reprezentare comparativă a valorilor participației volumice a oxigenului (r_{Ox}) și a participațiilor volumice ale azotului (r_{Ni}) și heliului (r_{He}) obținute, prin măsurare, în cadrul testelor experimentale cu cele obținute prin calcul, pentru cele cinci teste de preparare a amestecului respirator TRIMIX

Capitolul 8

CONCLUZII

Teza de doctorat intitulată „*Contribuții la termohidraulica proceselor hiperbare*” elaborată în cadrul departamentului de Hidraulică și Protecția Mediului, Facultatea de Hidrotehnică, Universitatea Tehnică de Construcții București, se înscrie în domeniul Inginerie Civilă și Instalații, specializarea Hidraulică și Mecanica Fluidelor, aducând contribuții la hidraulica hiperbară.

Prezenta lucrare și-a propus să realizeze un studiu menit să deschidă noi perspective în cercetarea fenomenelor specifice ingineriei hiperbare abordând două teme importante.

Primă temă abordată în cadrul tezei de doctorat se referă la conceperea unor modele analitice capabile să descrie matematic fazele unei scufundări unitare de sistem, la mare adâncime, aceste modele putând sta la baza elaborării altor modele matematice pentru scufundări la diferite adâncimi și cu diferite amestecuri respiratorii folosite.

A doua temă din cadrul tezei de doctorat are ca obiect realizarea și testarea unui nou tip de instalație pentru prepararea amestecurilor respiratorii folosite de către scafandri, principiul de funcționare fiind bazat strict pe fenomene termohidraulice. Aceste principii au fost descrise, în prealabil, printr-un aparat matematic special creat, util atât pentru modelarea proceselor ce au loc în decursul preparării amestecurilor respiratorii cât și pentru dimensionarea corespunzătoare a elementelor principale ale instalației experimentale utilizată la efectuarea testelor experimentale.

Pentru elaborarea lucrării a fost necesară consultarea unei bibliografii complexe, cu un puternic caracter interdisciplinar. Domeniile de studiu bibliografic au cuprins hidraulica, termohidraulica, termodinamica, termodinamica chimică, chimia și alte lucrări specifice tehnologiilor hiperbare cu aplicații în scufundarea profesională.

Teza de doctorat are un caracter complex, îmbinând latura teoretică a problematicii abordate cu cercetarea experimentală. În capitolele lucrării, alternează prezentarea noțiunilor teoretice, care creează fundamentul pentru elaborarea studiilor, cu secțiunile în care sunt prezentate contribuțiile în domeniu aduse de către lucrare, materializate prin modele analitice de calcul pentru scufundările de mare adâncime, unitare, de sistem și procedee de calcul, pe baza cărora a fost dimensionată o instalație originală de preparare a amestecurilor respiratorii, executată și testată ulterior în Laboratorul Hiperbar al Centrului de Scafandri din Constanța, din cadrul Forțelor Navale Române.

Lucrarea este structurată în **8 capitole** ce conțin **71 figuri** și **164 tabele**. Primele șapte capitole prezintă atât problematica studiată la nivel teoretic, cât și contribuțiile autoarei în domeniul hidraulicii hiperbare cu aplicații în scufundarea profesională. Capitolul opt al lucrării este un capitol de concluzii, în care sunt sintetizate aspectele cele mai importante ce se desprind din cercetările teoretice și experimentale desfășurate pe parcursul stagiului doctoral.

Primul capitol al lucrării are un rol introductiv, în cadrul său fiind prezentate stadiul actual de dezvoltare al domeniului, gazele și amestecurile respiratorii folosite de către scafandri și legile gazelor cu aplicații în domeniul hidraulicii hiperbare.

Cel de al doilea capitol tratează probleme specifice scufundărilor profesionale, în cadrul lui fiind făcută o trecere în revistă a procedeele de scufundare folosite de către echipele ce efectuează intervenții subacvatice la mare adâncime și o descriere a principalelor instalații și echipamente hiperbare folosite de către acestea.

În cel de al treilea capitol, se prezintă modelele matematice, analitice, concepute cu scopul de a descrie, printr-o serie de ecuații, procesele hiperbare ce au loc pe durata unor scufundări de sistem de mare adâncime. Utilitatea practică a acestui demers, este aceea că, prin aplicarea modelelor propuse, poate fi descrisă, din punct de vedere al variației valorilor mărimilor

caracteristice, orice altă scufundare unitară de sistem, indiferent de adâncimea de lucru și de tipul amestecului respirator utilizat. În final, rezultatele obținute pe baza modelelor concepute au fost comparate cu datele obținute prin monitorizarea unei scufundări reale tip „test” la adâncimea de 180 m, efectuate de o echipă de scafandri profesioniști în barocamera aferentă sistemului hiperbar aflat în dotarea Laboratorului Hiperbar al Centrului de Scafandri din Constanța, din cadrul Forțelor Navale Române.

Capitolul patru conține o prezentare a metodelor și procedeele utilizate pentru prepararea amestecurilor respiratorii și a instalațiilor și aparatelor folosite în acest scop. De asemenea, în acest capitol, sunt expuse, pe scurt, și relații de calcul aplicate în cazul fiecărei metode sau procedeu de fabricare.

În capitolul cinci al prezentei lucrări, se propune o instalație originală de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii, a cărei funcționare este bazată exclusiv pe fenomene termohidraulice. Descrierea instalației începe cu expunerea conceptului, urmată de prezentarea acestuia din puncte de vedere constructiv. Ulterior sunt analizate liniile de injecție a fiecărui gaz și sunt identificate mărimile fizice determinante asociate fiecărui element component. În cadrul capitolului sunt prezentate și o serie de scheme de principiu ce pot fi adoptate în funcție de modul în care consumatorul este alimentat și anume dacă este livrat către un sistem individual de respirat sau dacă amestecul preparat este livrat către o barocameră. Deoarece în cadrul tezei au fost luate în discuție cele mai utilizate amestecuri respiratorii și anume NITROX și HELIOX – amestecuri binare, și TRIMX – amestec ternar, schemele prezentate se referă strict la prepararea acestora.

Pornind de la schemele menționate anterior, în colaborare cu specialiștii Centrului de Scafandri Constanța al Forțelor Navale Române, s-a realizat o instalație experimentală în flux continuu pentru prepararea amestecurilor binare, NITROX și HELIOX și ternare TRIMIX. Aceasta este descrisă în detaliu **în capitolul șase** al prezentei lucrări.

Capitolul șapte, din punct de vedere al structurii sale, este organizat în patru subcapitole în care sunt urmărite două direcții principale de cercetare. Prima direcție de cercetare se referă la testele experimentale efectuate pe instalația experimentală din Laboratorul Hiperbar al Centrului de Scafandri Constanța, teste ce au avut ca scop prepararea mai multor amestecuri respiratorii, opt amestecuri NITROX, șapte amestecuri HELIOX și cinci amestecuri TRIMIX, folosind instalația concepută, proiectată și executată în cadrul stagiului doctoral. Cea de a doua direcție de cercetare urmărită se referă la modelarea matematică, analitică, a proceselor gazodinamice ce au loc în instalația experimentală. Relațiile matematice concepute, constituie, pe de o parte, baza teoretică prin care sunt stabilite mărimile fizice determinante în procesul de preparare al amestecurilor respiratorii, iar pe de altă parte, reprezintă aparatul matematic util pentru dimensionarea corespunzătoare a elementelor componente ale unei instalații de preparare de tipul celei propusă în cadrul prezentei teze de doctorat.

În finalul capitolului, sunt prezentate rezultatele studiilor ce au avut ca obiect prepararea amestecurilor respiratorii binare și a amestecului respirator ternar, folosind instalația experimentală de preparare. Pentru o reprezentare cât mai clară și sugestivă a rezultatelor obținute prin aplicarea metodelor de lucru și de determinare folosite, valorile mărimilor fizice de interes au fost prelucrate și ulterior transpuse sub formă grafică într-o manieră comparativă.

Elemente de originalitate

Teza de doctorat „Contribuții la termohidraulica proceselor hiperbare” conține o serie de elemente originale, acestea fiind propuse, dezvoltate și studiate pe parcursul stagiului doctoral. Aceste elemente de originalitate se referă la:

- elaborarea a două modele matematice, analitice, originale, general valabile, în cazul simulării unor scufundări de sistem, unitare, de mare adâncime, modele privind simularea a două scufundări de sistem, o scufundare de tip test la adâncimea de 180 m în condițiile inițiale de barocameră nevidată și o a doua scufundare de sistem tip test la adâncimea de 180 m în condițiile inițiale de

barocameră vidată; modelele au fost validate prin determinările efectuate la o scufundare reală simulată la 180 m adâncime, efectuată în barocamera Laboratorului Hiperbar din cadrul Centrului de Scafandri Constanța, aparținând Forțelor Navale Române;

- elaborarea unui model matematic, analitic, pentru modelarea proceselor gazodinamice ce au loc într-o instalație de concepție originală de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare și ternare;
- stabilirea relațiilor de calcul necesare pentru dimensionarea optimă a instalației de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare și ternare și a procedurii de calcul folosite pentru dimensionarea elementelor acestei instalații;
- conceperea și proiectarea unei instalații experimentale destinate preparării în flux continuu a amestecurilor binare și ternare, realizată în Laboratorul Hiperbar de pe lângă Centrul de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române și care a fost testată în cadrul unor studii experimentale ce au urmărit prepararea a opt amestecuri NITROX, șapte amestecuri HELIOX și cinci amestecuri TRIMIX.

Contribuții aduse domeniului

Contribuțiile aduse domeniului prin elaborarea prezentei teze de doctorat se remarcă prin realizarea unui studiu documentar privind gazele și amestecurile de gaze folosite în scufundarea profesională, a procedeele folosite în acest scop și a principalelor echipamente folosite de către scafandri profesioniști, elaborarea unor procedee de evaluare utile în procesul de preparare al amestecurilor respiratorii și realizarea unor reprezentări grafice comparative bazate pe rezultatele cercetărilor teoretice, realizate prin modelare matematică analitică, și concluziile ce decurg din studiile experimentale întreprinse. Astfel, se remarcă:

- efectuarea de cercetări de termohidraulica fluidelor compresibile care au condus la realizarea unor modele matematice privind desfășurarea proceselor termohidraulice ce au loc la scufundările unitare de sistem, cu urmărirea presiunilor parțiale, participațiilor volumice și participațiile masice ale componentelor gazoase;
- compararea rezultatelor modelelor matematice aferente proceselor hiperbare pentru scufundări unitare de sistem cu rezultatele unui test experimental efectuat în barocameră pentru o scufundare unitară de sistem;
- realizarea unor reprezentări grafice care să ateste validarea prin experiment a modelelor matematice privind fenomenele hiperbare din barocameră, pentru scufundări unitare de mare adâncime;
- realizarea unei sinteze asupra gazelor, amestecurilor artificiale de gaze folosite în domeniul scufundărilor, corelate cu metodele de preparare și aparatul matematic aferent, folosit la fabricarea acestora;
- propunerea unei noi metode de preparare a amestecurilor respiratorii de gaze, și anume prepararea în flux continuu, metodă ce se bazează strict pe fenomene termohidraulice;
- elaborarea unei proceduri pentru verificare funcționării instalației de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare și ternare;
- elaborarea unei proceduri de calcul utilă la fabricarea amestecurilor respiratorii binare și ternare;

- propunerea unor scheme de aplicare a instalației pentru prepararea în flux continuu a amestecurilor respiratorii binare și ternare, concepută, proiectată și testată în cadrul prezentei teze de doctorat;
- realizarea de grafice comparative care redau variațiile valorilor principalelor mărimi fizice pe durata etapelor de compresie și decompresie aferente scufundărilor de tip test studiate;
- elaborarea a două variante de calcul folosite în stabilirea valorii debitelor masice (Q_m^{inj}), a valorilor participațiilor masice (m_{Ox}^{inj} , m_{Ni}^{inj} , m_{He}^{inj}) și a participațiilor volumice (r_{Ox}^{inj} , r_{Ni}^{inj} , r_{He}^{inj}) ale componentelor, și anume varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat citite la rotametre (CDR) și varianta de calcul folosind valorile debitului masic injectat determinate prin calcul (CDC);
- realizarea de reprezentări grafice comparative ce redau variațiile valorilor principalelor mărimi fizice (debite masice injectate Q_m^{inj} , participații masice m_{Ox}^{inj} , m_{Ni}^{inj} , m_{He}^{inj} și participații volumice r_{Ox}^{inj} , r_{Ni}^{inj} , r_{He}^{inj}) ale componentelor implicate în procesul de fabricare al amestecurilor respiratorii sintetice, valori rezultate prin cele două procedee de calcul și cele rezultate din măsurători efectuate pe instalația experimentală.

BIBLIOGRAFIE

- [1] ALBU C-tin. D., BREZEANU M. - *Mică enciclopedie de chimie*. Editura Enciclopedică Română, București 1974
- [2] BADIU, G., ILIESCU, C., PETRU, A. - *Dynamic study of postural tremor in high pressure conditions*. Roumanian Journal of Physiology, Vol. 28, nr. 3-4, pp. 83-87, București, 1991
- [3] BENNETT, P.B. - *Atlantis III, an experimental deep dive to 686 m using TRIMIX 10*. Medicine Subaquatique et Hyperbare, vol. XX, nr. 80, pp. 320-322, 1981
- [4] BERRY, Y., GAVARRY, P., HUBERT, J.P., LE CHUITON, J., PARC, J. - *La plongée et l'intervention sous la mer*. Ed. Arthaud, Paris, 1977
- [5] BRUCE R., Wienke and Timothy R., O'Leary - *Mixed Gas Decompression Theory with Algorithms and Statistics*. RGBM Technical Series 6 NAUI Technical Diving Operations Tampa, Florida 33619
- [6] BÜHLMANN, A.A. - *Untersuchungen zur Dekompression bei erniedrigtem Luftdruck*. Schweizerische Medizinische Wochenschrift, nr. 114, 1984
- [7] BÜHLMANN, A.A. - *Decompression. Decompression sickness*. Springer Verlag, pp. 4-62, Berlin, 1984
- [8] DAVIS, R.H. - *Deep diving and submarine operations*. The Saint Catherine Press, London, 1938
- [9] DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Șt. - *Aparate de respirat sub apă*. Editura Matrix Rom, ISBN 973-685-558-9, București, 2003
- [10] DEGERATU, M. - *Analiza teoretică a curgerii gazelor prin ajutaje și conceperea unui stand experimental de preparare a amestecurilor de gaze în flux continuu*. Raport tehnic la C. C. Nr.A3312/11.09.2014, Contract UTCB Nr. 208/2014, București, 2014
- [11] DEGERATU, M. - *Calculul termohidraulic al circuitelor aferente echipamentelor de scufundare ASMAR-AMOX*. Catedra de Hidraulică și Protecția Mediului, Raport tehnic la C.C. nr. 108/1991, I.C.B., București, 1991
- [12] DEGERATU, M. - *Modelarea matematică a fenomenelor gazodinamice specifice unui sistem cu injecție la debit masic constant pentru amestecuri respiratorii binare*. A II-a Sesiune de Comunicări științifice cu tema Inginerie, tehnologie și medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanța, 1988
- [13] DEGERATU, M. - *Simularea teoretică a funcționării aparatului de scufundare ASMA cu amestec Helium-Oxygen*. A IV-a Sesiune de Comunicări Științifice cu tema Inginerie, tehnologie și medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanța, 1989
- [14] DEGERATU, M. - *Modelarea matematică a proceselor gazodinamice din cadrul aparatelor de scufundare utilizând oxigen pur și amestec binar*. Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 73/1989, I.C.B., București, 1989
- [15] DEGERATU, M. - *Studii de optimizare a activităților de scufundare prin utilizarea amestecurilor de gaze și a tabelor de decompresie tip NITROX*. Raport tehnic la C. C. Poziția 124 din Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale, București, 2013
- [16] DEGERATU, M. - *Studiu privind gazodinamica unui dispozitiv cu injecție masică constantă pentru amestecuri binare*. Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 45/1986, I.C.B., București, 1986

- [17] DEGERATU, M., PETRU A., GEORGESCU, Șt., ALBOIU N. (2006) - *Expunerea la presiune și decompresia scafandrilor militari*. Revista Tehnica Militară, Nr.1, pp.40-45, ISSN 1582-7321, Departamentul pentru Armamente, Direcția Cercetare- Dezvoltare, București
- [18] DEGERATU, M., PETRU A., GEORGESCU, Șt., ALBOIU N. (2006) - *Procesele respirației la scafandri militari. Respirația în hiperbarism*. Revista Tehnica Militară Nr. 2/ 2006, pp. 56 - 71 ISSN 1582-7321, Departamentul pentru Armamente, Direcția Cercetare- Dezvoltare, București
- [19] DEGERATU, M., PETRU A., GEORGESCU, Șt., ALBOIU N. (2005) - *Gaze și amestecuri de gaze utilizate în scufundarea militară*. Revista Tehnica Militară, Nr.4, pp.38-48, ISSN 1582-7321, Departamentul pentru Armamente, Direcția Cercetare-Dezvoltare, București
- [20] DEGERATU, M., PETRU, A., BEIU, V. - *Computer-aided Simulation of Theoretical Processes in Binary and Ternary Mixtures of Hyperbaric Systems Used in Deep Diving*. Chemical Abstracts, page 346, 9-Biochem. Methods, vol. 107, Columbus, Ohio, U.S.A., 1986
- [21] DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Șt., IONIȚĂ, S. - *Tehnologii hiperbare pentru scufundări unitare și în saturație*. Ed. Matrix Rom, ISBN 978-973-755-260-0, București, 2008
- [22] DEGERATU, M., PETRU, A., IONIȚĂ, S. - *Manualul scafandrului*. Editura "Per Omnes Artes", ISBN 973-97916-5-4, București, 1999
- [23] DINU, D., VLAD, C. - *Scafandri și vehicule subacvatice*. Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1986
- [24] FRUCTUS, X. - *HYDRA V: un succes au-dela des previsions*. Rev. Oceans nr. 144, pp. 46-48, 1985
- [25] FRUCTUS, X., SCIARLI, R.L. - *La plongée santé et sécurité*. Editions Maritimes et d'Outre-Mer, Paris, 1980
- [26] GARDETTE, B. - *HYDRA IV and HYDRA V, human deep hydrogen dives 1983-1985*. In hydrogen as a diving gas. 33-rd Under sea and Hyperbare Medical Society Workshop. Ed. BRAUER R. W., 1987
- [27] GRANEFF, S. - *L'homme et la mer*. Ed. Press de la Cité, Paris, 1975
- [28] HAUX, G. - *Subsea manned engineering*. Bailliere Tindall, London, 1982
- [29] HAUX, G. – *Tauchtechnik*. Band I. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1969
- [30] HEMPLEMAN, H.V., GARRARD, J.T., HARRIS, D.J., HAYES, P.A., HENNESSY, T.Y., NICHOLS, G., TOROK, Z., WINSBOROUGH, M.N. - *U.K. deep diving trials*. Phil. Trans. R. Soc. London, B304, pp. 119-141, London, 1984
- [31] IAMANDI, C., DEGERATU, M. - *Studiu teoretic privind circuitul de injecție a amestecului gazos aferent echipamentului de scufundare tip ASMA*. Sesiune de Comunicări Științifice cu tema „Contribuții românești în ingineria și tehnologia activităților subacvatice”, Centrul de Scafandri, Constanța, 1987
- [32] KIREEV V. A. - *Chimie fizică*. Editura Tehnică, București 1962
- [33] LAMBERTSEN, C.J. - *Effects of Excessive Pressure of Oxygen, Nitrogen, Helium, Carbon Dioxide and Carbon Monoxide*. Medical Physiology. Ed. V.B. Mountcastle, vol. II, 1980

- [34] LARN, R., WHISTLER, R. - *Commercial diving manual*. Ed. Davis & Charles, 1984
- [35] LEMAIRE, C. - *Utilisation de l'oxygène en plongée*. C.E.H. COMEX, Marseille, 1977
- [36] LOMAX H. - *The Commercial Diver's Handbook: Surface-Supplied Diving, Decompression and Chamber Operations Field Guide*. Best Publishing Company 2013 ISBN 978-1930536-71-5
- [36] LUBITZSCH, W. - *Aspekte der modernen Tauchgeräte-technik*. Drägerheft, nr. 301, Lübeck, 1975
- [37] MARTIN, R.C. - *The deep-sea diver yesterday, today and tomorrow*. Cornell Maritime Press, Cambridge, Maryland, 1978
- [38] NĂSTĂSESCU, GH. - *Omul sub apă și la altitudine*. Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1980
- [38] NEGOIU D. - *Tratat de chimie anorganică – Chimie generală*; Editura Tehnică, București 1972
- [39] PASTUCH, C.O. - *Testarea solicitării funcției respiratorii și circulatorii în cursul adaptării și muncii în mediul hiperbar*. Teză de doctorat, Institutul de Medicină și Farmacie Cluj-Napoca, 1987
- [40] PENZIAS, W., GOODMAN, M.V. - *Man Beneath the Sea - A Review of Underwater Ocean Engineering*. Ed. Wiley-Interscience, New York, 1973
- [41] PETRU, A. - *Aparate autonome de respirat sub apă*. Buletinul Marinei Militare, nr. 2, Constanța, 1985
- [42] PETRU, A., BEIU, V., DEGERATU, M. - *Studiu privind optimizarea rezervei de gaz pentru creșterea autonomiei în scufundare*. A II-a Sesiune de Comunicări Științifice cu tema "Inginerie, tehnologie și medicină subacvatică", Centrul de Scafandri, Constanța, 1985
- [43] PETRU, A. - *Amestecuri respiratorii*. Buletinul Tehnica Militară, nr. 3-4, București, 1987
- [44] PETRU, A. - *Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis*. Buletinul Tehnica Militară, nr. 4, București, 1989
- [45] PETRU, A., DEGERATU, M., IONIȚĂ, S. - *Seria Tehnologii hiperbare: Ghidul scafandruului autonom*. Editura Olimp-Press, București, 1992
- [46] PETRU A. - *Hidraulica proceselor hiperbare*. Teză de doctorat Universitatea tehnică de Construcții București 1993
- [47] PETRU, A., DEGERATU, M. - *Amestecuri respiratorii de gaze și utilizarea lor în scufundare*. Ministerul Apărării Naționale, Ed. Comandamentului Marinei Militare, Constanța, 1993
- [48] PETRU, A., DEGERATU, M. - *Echipamente pentru pătrunderea omului sub apă*. Ministerul Apărării Naționale, Ed. Comandamentului Marinei Militare, Constanța, 1994
- [49] PETRU, A., DEGERATU, M. - *Tehnologii de scufundare*. Ministerul Apărării Naționale, Ed. Comandamentului Marinei Militare, Constanța, 1994
- [50] POULET, G., BARINCOU, R. - *La plongée*. Ed. Denöel, Paris, 1988
- [51] SOMERS Lee H., NEMIROFF Martin J. - *Hyperbaric Chamber Attendant's Handbook*. The University of Michigan, 1978, MICHU-SG-79-603

- [52] ȘANDRU E., BIANCHI A.M., MIHĂILĂ C., CALUIANU V., ANTONESCU N. - *Termotehnică și aparate termice*. Editura Didactică și Pedagogică, București 1982
- [53] VANN, R.D. - *Decompression theory and applications*. The Physiology and Medicine of Diving. 3-th edition. Ed. P.B. BENNETT & D.H. ELLIOT, pp. 353-380, London, 1982
- [54] VLAD, C., DINU, D. - *Intervenții subacvatice*. Editura Tehnică, București, 1982
- [55] WILLIAMS, S. - *Underwater Breathing Apparatus. The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work*, Ed. P.B. Bennett & Elliot D.H. Bailliere Tindal and Cassell, London, 1969
- [56] WORKMAN, R.D. - *Calculation of decompression schedule for nitrogen-oxygen and helium-oxygen dives*. Report 6-65 US Navy Experimental Diving Unit, Washington D.C., 1965
- [57] *Modelarea matematică și testarea experimentală a proceselor gazodinamice aferente instalațiilor de preparare în flux continuu a amestecurilor de gaze binare și ternare utilizate în scufundarea profesională*. Contract nr. A 3794/26.08.2015 Centrul de Scafandri Constanța, Forțele Navale Române. Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale pentru anul 2015 (nr. UTCB 160/2015)
- [58] *Elaborarea bazei teoretice aferente modelării matematice a proceselor hiperbare și conceperea unei instalații pentru testări experimentale*. Contract Nr. A3313/11.09.2015, Contract UTCB Nr. 209/2015 din cadrul temei “Simularea teoretică și validarea experimentală a proceselor cu amestecuri de gaze din barocamerele aferente sistemelor de scufundare unitară și în saturatie”, din Planul Sectorial pentru anul 2015 al MAPN, faza: “Elaborare studiu tehnic - modelarea matematică a proceselor hiperbare”. Beneficiar: Centrul 39 Scafandri Constanța, Forțele Navale Române
- [59] *Analiza teoretică a curgerii gazelor prin ajutaje și conceperea unui stand experimental de preparare a amestecurilor de gaze în flux continuu*. Contract Nr.A3312/11.09.2014, Contract UTCB Nr. 208/2015 din cadrul temei “Modelarea matematică și testarea experimentală a proceselor gazodinamice aferente instalațiilor de preparare în flux continuu a amestecurilor de gaze binare și ternare utilizate în scufundarea profesională”, din Planul Sectorial pentru anul 2015 al MAPN, faza: “Elaborare studiu tehnic privind modelarea matematică a proceselor gazodinamice”. Beneficiar: Centrul 39 Scafandri Constanța, Forțele Navale Române
- [60] *Realizare instalație experimentală de preparare în flux continuu a amestecurilor respiratorii. Realizare în flux continuu de amestecuri respiratorii binare și ternare din cadrul temei “Modelarea matematică și testarea experimentală a proceselor gazodinamice aferente instalațiilor de preparare în flux continuu a amestecurilor de gaze binare și ternare utilizate în scufundarea profesională”*. Contract nr. 247/2016 (A 5119/28.09.2016) – Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale pentru anul 2016. beneficiar Ministerul Apărării Naționale – Forțele Navale Române, Centrul 39 Scafandri Constanța
- [61] *Modelarea proceselor hiperbare aferente scufundărilor de sistem*. din Planul intern al Centrului de Scafandri Constanța, UM 02145 Constanța. Contract nr. 267/2016 Centrul de Scafandri Constanța, Forțele Navale Române. Tema TS267.0. UM02145. Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale pentru anul 2016

- [62] *Modelarea matematică și testarea experimentală a proceselor gazodinamice aferente instalațiilor de preparare în flux continuu a amestecurilor de gaze binare și ternare utilizate în scufundarea profesională – Întocmire plan de testare evaluare. Testare evaluare a amestecurilor respiratorii obținute cu instalația experimentală. Validare experimentală a modelelor matematice concepute.* (Contract A 5233/08.08.2017). Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale pentru anul 2017. Beneficiar Ministerul Apărării Naționale – Forțele Navale Române, Centrul 39 Scafandri Constanța
- [63] * * * - *The NOAA Diving Manual-Diving for Science and Technology.* U.S. Government Printing Office, Washington, 1975
- [64] * * * - *U.S. Navy Diving Manual.* U. S. Government Printing Office, Washington, 1975
- [65] * * * - *Norme privind organizarea și desfășurarea activităților de scufundare.* Centrul de Scafandri Constanța, Comandamentul Marinei Militare, MAPN, Constanța, 1990
- [66] * * * - *U.S. Navy Diving Manual*; SUPERSEDES SS521-AG-PRO-010, REVISION 5, August 2005
- [67] * * * - The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), *NOAA Diving Manual* U.S. Department of Commerce and Best Publishing Company 2011
- [68] * * * - GHM Messtechnik - *Produktinformationen Durchflussmesser GRV – 150 GK*
- [69] * * * - *Linde Gasekatalog.* Linde AG, Werksgruppe Technische Gase, München
- [70] * * * - arhiva fotografică prof. dr. ing. Mircea Degeratu
- [71] <http://www.nitroxmadeeasy.com/Methods.htm>
- [72] http://www.boydski.com/diving/gear/compressor/mixing_stick.htm
- [73] <http://www.amigosdivecenter.com/stick.html>
- [74] <http://www-personal.umich.edu/~lpt/mixhistory.htm> - *Diving with Gas Mixes Other Than Air* by Larry "Harris" Taylor, Ph.D.
- [75] http://www.techdiver.ws/trimix_eng.shtml
- [76] <http://www.seasubsea.com/airquality/Air Quality Requirement for Nitrox Blending>