

UTILIZAREA MODELELOR FIZICE ÎN ANALIZA AMPRENTEI MAGNETICE NAVALE

CS ing. Georgiana MARIN ROȘU¹, Prof. dr. ing. Gheorghe SAMOILESCU²,
Prof. em. dr. Octavian BALTAG³

¹ Centrul de Cercetare Științifică pentru Forțele Navale – Constanța,

² Academia Navală „Mircea cel Bătrân” – Constanța,

³ Universitatea de Medicină și Farmacie „Gr. T. Popa” – Iași

REZUMAT. Lucrarea prezintă studiul amprentei magnetice a unei nave particulare prin utilizarea unui model la scara 1:100. Modelul este mai întâi analizat prin prisma criteriilor de similitudine fizică și geometrică. Instalația de măsură este alcătuită dintr-o cameră ecranată înconjurată de un sistem triaxial de bobine Helmholtz, un sistem de compensare automată a câmpului magnetic exterior și o platformă cu mobilitate în plan orizontal. Au fost realizate măsurătorile de amprentă magnetică în plan orizontal sub corpul modelului de navă, la adâncimea de referință. O parte din rezultate au fost comparate cu un set de măsurători efectuate pentru nava propriu-zisă.

Cuvinte cheie: amprentă magnetică, magnetometru, model fizic la scară, similitudine.

ABSTRACT. This paper presents the study of a particular ship regarding its magnetic signature by employing a physical model at scale 1:100. The model is firstly analyzed in terms of physical and geometric similarity criteria. The experimental setup is mainly comprised of a shielded room surrounded by a triaxial Helmholtz coil system, an automatic compensation system, and a mobile platform moving horizontally. There were performed triaxial measurements of the model's magnetic signature, in horizontal plane below the model ship's hull at reference depth. Some of the results were compared to a set of measurements performed on the original ship.

Keywords: magnetic signature, magnetometer, physical scale model, similarity.

1. INTRODUCERE

Primul pas necesar în reducerea prezenței magnetice a navelor în mediul subacvatic îl constituie determinarea modului de distribuție a câmpului magnetic propriu navei. Cea mai importantă sursă este magnetizarea sub acțiunea câmpului magnetic terestru, a oțelului feromagnetic folosit în construcția corpului navei și a instalațiilor și echipamentelor de la bord. Această amprentă feromagnetică a navei este dominantă în comparație cu toate celelalte surse de câmp magnetic de la bord [1].

Întrucât măsurarea amprentei magnetice este extrem de laborioasă și costisitoare, presupunând un număr mare de senzori dispuși pe fundul mării sau imersați la o adâncime de siguranță față de corpul navei, se pot folosi modele fizice la scară [5, 8].

Astfel, pentru analiza amprentei magnetice a unei nave particulare s-a folosit un model fizic la scară [1, 5, 8]. Pe baza măsurătorilor s-a determinat și analizat amprenta magnetică a navei la adâncimea normală de măsurare [3].

2. CRITERII DE SIMILITUDINE SPECIFICE AMPRENTEI MAGNETICE

În cadrul analizei a fost aleasă o navă având următoarele caracteristici: lungime $L = 60$ m, lățime $l = 10$ m, pescaj $T = 3$ m, înălțime de construcție $D = 5$ m. Corpul navei este construit din oțel naval de rezistență mare, grosime 12 mm, permeabilitate magnetică relativă $\mu_r = 180$ și conductivitate electrică $\sigma = 4.8$ MS/m.

Criteriile de similitudine se referă la similitudinea geometrică și la cea fizică [8]. Similitudinea geometrică este asigurată prin respectarea formei corpului și menținerea raportului între dimensiunile navei și ale modelului, astfel încât se poate exprima șirul de rapoarte:

$$\frac{L}{L'} = \frac{l}{l'} = \frac{h_k}{h_k'} = m \quad (1)$$

unde: L' , l' sunt lungimea, respectiv lățimea modelului; h_k , h_k' – adâncimea de la chila navei, respectiv a modelului, până la planul de măsură; factorul de scalare $m = 100$.

Prin alegerea parametrilor fizici ai modelului la scară se urmărește să se asigure proporționalitatea cu cea ai navei propriu-zise. Criteriile de similitudine fizică se obțin pornind de la ecuația lui Maxwell [3]:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

Se aplică operatorul rotor ecuației (2) și se calculează fiecare termen. Astfel se obține:

$$\nabla^2 \vec{H} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} + \sigma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3)$$

Pentru a obține criteriile de similitudine, ecuația (3) trebuie exprimată într-un sistem adimensional. Astfel, se introduc mărimile unitare: H_0 , x_0 , y_0 , z_0 , μ_0 , σ_0 , ε_0 , l_0 și T . Mărimile implicate în ecuația (3) se exprimă în unități relative, rezultând un set de mărimi adimensionale corespunzătoare mărimilor menționate mai sus. Înlocuind mărimile adimensionale și simplificând, ecuația (3) devine:

$$\nabla^2 \vec{H}^0 = \left[\frac{\varepsilon_0 \mu_0 l_0^2}{T^2} \right] \varepsilon^0 \mu^0 \frac{\partial^2 \vec{H}^0}{\partial \tau^2} + \left[\frac{\sigma_0 \mu_0 l_0^2}{T} \right] \sigma^0 \mu^0 \frac{\partial \vec{H}^0}{\partial \tau} \quad (4)$$

Pentru a se asigura similitudinea câmpului magnetic, produsele din parantezele pătrate trebuie să rămână constante pentru cele două sisteme: nava și modelul la scară. Primul criteriu de similitudine este dat de prima paranteză [3]:

$$\Pi_1 = \frac{\sigma_0 \mu_0 l_0^2}{T} \quad (5)$$

Iar al doilea criteriu se obține din cea de-a doua paranteză, ținând cont și de primul criteriu:

$$\Pi_2 = \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0 T} \quad (6)$$

Dacă se neglijează curenții de deplasare, trebuie respectat doar primul criteriu de similitudine. Sistemul original, nava propriu-zisă, are drept caracteristici: permeabilitatea magnetică relativă $\mu_r = 180$ și conductivitate electrică $\sigma = 4,8$ MS/m. Întrucât câmpul magnetic propriu al navei este lent variabil în timp, se consideră că variația câmpului magnetic are aceeași perioadă T pentru navă și model și aceasta se neglijează.

Modelul la scară, ilustrat în figura 1, este construit din tablă zincată, de grosime 0,4 mm, respectând forma corpului și suprastructura navei. Nu au fost reproduse la scară instalațiile și echipamentele navei. Materialul din care este construit modelul are următoarele caracteristici: permeabilitate magnetică relativă $\mu' = 285$ și conductivitate electrică $\sigma' = 5.2$ MS/m.

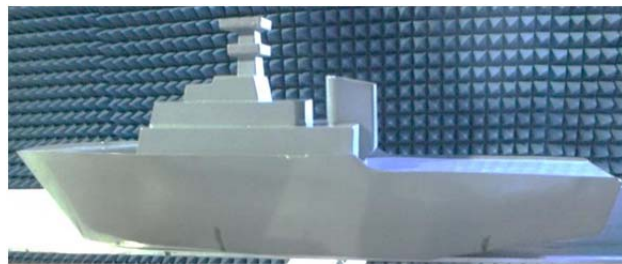


Fig. 1. Modelul navei la scară 1 : 100.

Raportul dintre dimensiunile liniare caracteristice ale celor două sisteme l/l' reprezintă raportul dintre dimensiunile navei și ale modelului la scară $m = 100$.

Există de fapt două scări pentru reprezentarea navei: o scară pentru dimensiunile principale și una pentru grosime. În numeroase cazuri, grosimea corpului navei este prea mică pentru a fi reprodusă la scară, fără deformarea corpului pe durata construcției și testării modelului. În aceste condiții se utilizează o metodă de scalare, în care se menține raportul dimensiunilor principale, deși modelul poate fi confecționat din materiale cu proprietăți magnetice și mecanice diferite de cele ale navei modelate [5].

Dacă grosimea plăcilor și permeabilitatea magnetică a modelului la scară sunt date de d' și μ' , atunci produsul lor se poate calcula din ecuația:

$$d' \cdot \mu' = \frac{d \cdot \mu}{m} \quad (7)$$

unde d și μ sunt grosimea și permeabilitatea magnetică ale plăcii metalice la scară reală, iar m este factorul de scalare a modelului.

Trebuie avută în vedere îndeplinirea simultană a două condiții, obținute din primul criteriu de similitudine și din condiția de proporționalitate a produsului grosime-permeabilitate. Astfel se obține al treilea criteriu de similitudine:

$$\Pi_3 = \sigma_0 \cdot d_0^2 \cdot \mu_0^3 \quad (8)$$

unde d_0 este dimensiunea caracteristică referitoare la grosimea plăcilor corpului navei sau al modelului.

Criteriul de similitudine Π_3 se referă atât la câmpul magnetic, cât și la proporționalitatea dimensiunilor principale și a grosimii plăcilor din care este confecționat corpul navei, respectiv al modelului. Pe baza acestuia se obține relația:

$$\frac{\sigma'}{\sigma} \cdot \left(\frac{d'}{d} \right)^2 \cdot \left(\frac{\mu'}{\mu} \right)^3 = 1 \quad (9)$$

unde σ , d și μ sunt conductivitatea electrică, grosimea plăcii și respectiv, permeabilitatea magnetică a corpului navei, în timp ce mărimile σ' , d' și μ' caracterizează modelul la scară. Înlocuind în relația (9) valorile mărimilor caracteristice ale celor două

sisteme studiate, obținem un raport de 0.00477, valoare diferită de 1.

Atingerea similitudinii fizice în cazul analizat este dificilă, fiind necesară utilizarea unor materiale cu proprietăți magnetice și electrice mult diferite față de sistemul inițial, astfel încât să se țină cont și de proporționalitatea grosimii corpurilor.

Modelul ales nu reproduce fidel comportamentul magnetic al navei din punct de vedere al ordinului de mărime ale amprente magnetice. Acesta este însă extrem de util în analiza variației amprente, pe cele trei componente, deoarece forma corpului joacă un rol important în dezvoltarea componentelor amprente magnetice.

3. INSTALAȚIA DE MĂSURARE

Măsurătorile au avut loc în cadrul Laboratorului de Bioelectromagnetism din incinta Facultății de Bioinginerie Medicală Iași. Instalația de măsurare este ilustrată în figura 2 și este alcătuită din [2, 4, 9]:

- camera ecranată de dimensiuni mari, realizată în totalitate din materiale neferomagnetice;
- sistem triaxial de bobine Helmholtz de mari dimensiuni;
- sistemul de control și compensare automată a câmpului magnetic;
- platformă din materiale neferomagnetice cu mobilitate în plan orizontal, pe axele O_x , O_y .

Modelul navei este fixat pe o grindă de aluminiu, legată de platforma mobilă, după cum se observă în figura 2 (dreapta). Platforma mobilă se deplasează liniar prin glisare, de-a lungul unui suport calibrat astfel încât axele sale de coordonate să își păstreze paralelismul cu sistemul de coordonate al camerei și al magnetometrului triaxial. Magnetometrul este montat pe o grindă de lemn transversală și independentă față de platforma mobilă, astfel încât să se afle

în centrul camerei și a sistemului Helmholtz, între platforma mobilă și modelul de navă.

Măsurarea câmpului magnetic se înregistrează pe axa longitudinală, marcată din cm în cm. Sistemul se mută la o distanță fixă pe axa O_y , urmând o altă linie de măsură, paralelă cu cea dintâi. Se efectuează astfel un set de treceri pe axa longitudinală care generează o matrice de puncte de măsură în plan orizontal, situat la adâncimea de referință corespunzătoare modelului navei, egală cu 7 cm.

Prin intermediul sistemului triaxial de bobine Helmholtz și a sistemului de control al compensării, s-a realizat compensarea automată a câmpului magnetic terestru în interiorul camerei ecranate. În vederea eliminării efectului datorat variației locale a câmpului magnetic terestru, măsurătorile s-au efectuat după-amiaza, într-o perioadă de calm magnetic [1].

4. ORGANIZAREA ȘI REZULTATELE MĂSURĂTORILOR

Pentru înregistrarea valorilor celor trei componente ale câmpului magnetic, s-a adoptat sistemul de coordonate rectangulare $Oxyz$, care coincide cu sistemul de coordonate legat de corpul navei, astfel: axa O_x coincide cu axa longitudinală a navei, fiind orientată spre prova, deci coincide și cu sensul de deplasare în cadrul măsurătorilor; axa O_y este orientată înspre bordul tribord (spre dreapta față de sensul de înaintare), iar axa O_z este orientată vertical în jos.

În continuare (Fig. 3-5) sunt ilustrate cele trei componente ale amprente magnetice pentru adâncimea de referință. Rezultatele sunt date în nT. În plan longitudinal, sunt 103 puncte de măsură, în sens crescător dinspre prova spre pupa, cu distanța dintre două puncte consecutive de 1 cm, acoperind de aproape 2 ori lungimea modelului navei, de 60 cm.

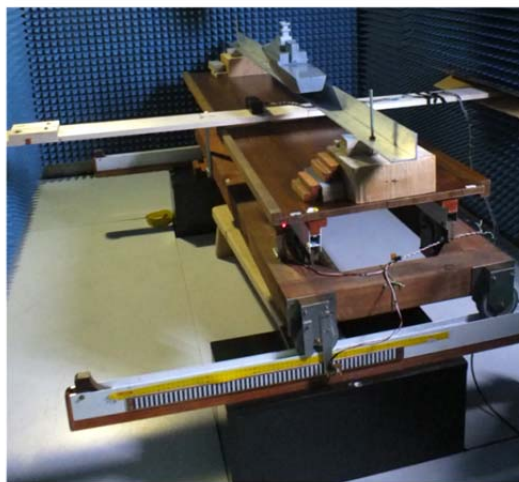


Fig. 2. Camera ecranată – vedere din exterior (stânga) și instalația de măsurare în interiorul camerei ecranate (dreapta).

5. DISCUȚIA REZULTATELOR

Forma de variație a componentelor amprentei navei este caracterizată prin numărul de semiunde. O semiundă se definește ca porțiunea de aceeași polaritate a componentei amprentei magnetice.

Prezentată în figura 3, componenta longitudinală B_x prezintă trei semiunde de polaritate alternantă. Semiunde de polaritate pozitivă se află în exteriorul extremităților prova-pupa ale modelului, iar semiunda de polaritate negativă corespunde jumătății pupa. Forma componentei longitudinale respectă forma teoretică a componentei tangențiale/ orizontale a dipolului magnetic, întrucât măsurătorile sunt efectuate la o adâncime suficient de mare de corpul navei [3].

Componenta verticală B_z (fig. 4) prezintă două semiunde de polaritate opusă. Forma componentei verticale a amprentei modelului navei respectă forma teoretică a componentei normale/ verticale a dipolului magnetic. Se observă că valorile extreme sunt atinse aproximativ în dreptul extremităților prova – pupa ale modelului.

Semiunde de componentei transversale (fig. 5) sunt dispuse simetric față de planul longitudinal. Valorile extreme sunt situate aproximativ în dreptul extremităților prova-pupa ale modelului, la o distanță transversală de aproximativ 1 – 1,5 lățimi de navă, ceea ce corespunde indicațiilor teoretice [3].

Dintre cele trei componente, cea verticală (B_z) este dominantă, atingând valori în intervalul 2,84 – 5,27 nT, datorită magnetizării modelului navei în câmpul magnetic terestru, care are de asemenea componenta verticală dominantă. Componenta longitudinală (B_x) variază de la 1,24 nT la 2,61 nT, pe când cea transversală (B_y) este redusă față de celelalte două.

Numărul de semiunde ale componentelor amprentei respectă în totalitate considerațiile privind aspectul amprentei navei.

Modelul navei este viabil în ceea ce privește variația și raportul relativ al componentelor amprentei, deși valorile acestora sunt mult mai reduse în comparație cu componentele amprentei magnetice a navei sistem inițial.

6. COMPARAREA MĂSURĂTORILOR AMPRENTII MODELULUI CU AMPRENTA NAVEI

Pentru nava sistem inițial, pentru care a fost construit modelul la scară, există un set de măsurători ale componentei verticale ale amprentei magnetice, sub chila navei, la adâncimea normală de măsurare. Setul de măsurători a fost efectuat de la prova la pupa navei, după se observă în figura 6. Distanțele între punctele de măsură, au fost convertite și asociate cu abscisele

punctelor longitudinale din măsurătorile asupra modelului. Rezultatele reprezintă componenta verticală a amprentei magnetice a navei B_{z_nava} , în nT.

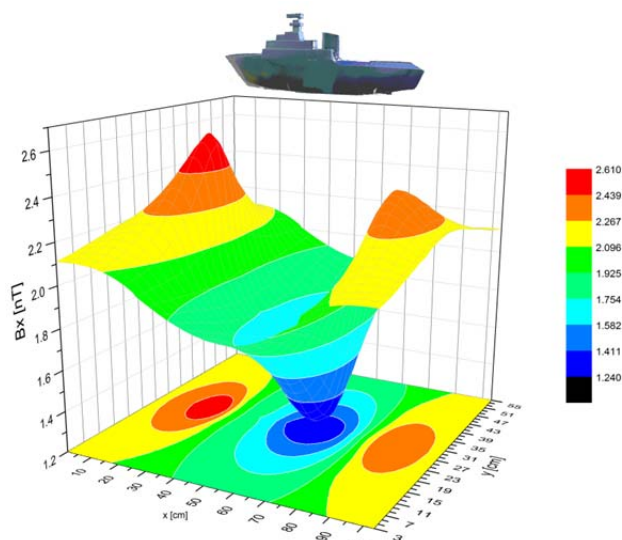


Fig. 3. Componenta longitudinală B_x a amprentei magnetice a modelului la adâncimea $z = 7$ cm și reprezentarea modelului de nava ca referință.

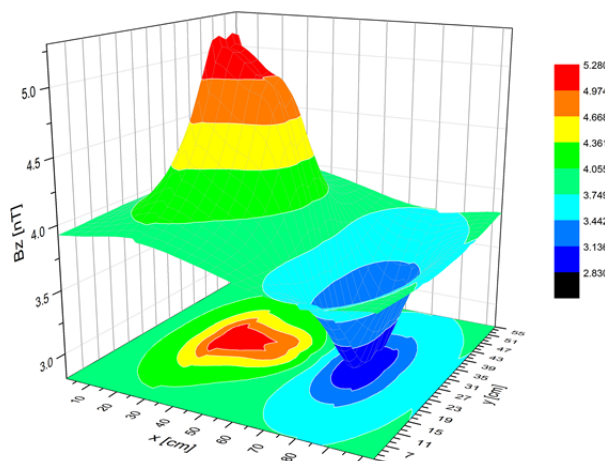


Fig. 4. Componenta verticală B_z a amprentei magnetice a modelului la adâncimea $z = 7$ cm.

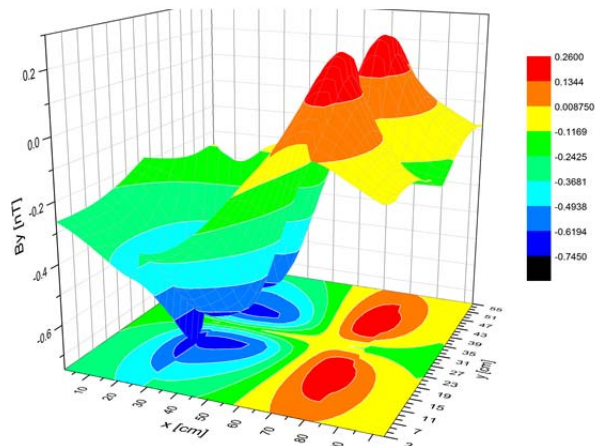


Fig. 5. Componenta transversală B_y a amprentei magnetice a modelului la adâncimea $z = 7$ cm.

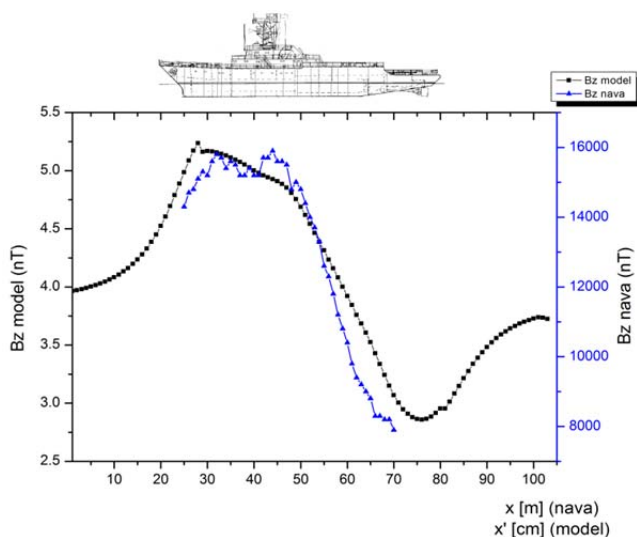


Fig. 6. Componenta verticală a amprentei modelului, respectiv a câmpului magnetic al navei.

Măsurătorile efectuate asupra navei au fost apoi normate, pentru a fi comparate cu valorile componente verticale B_z model, înregistrate sub chila modelului. S-a respectat factorul de scară de 1 : 100 în privința adâncimii normale de măsurare.

Se observă că există un grad ridicat de corelație între valorile amprentei magnetice verticale ale modelului și cele ale navei. Diferențele se pot explica prin existența la bordul navei a instalațiilor și echipamentelor generatoare de câmp magnetic.

7. CONCLUZII

În cadrul lucrării a fost efectuată o analiză extinsă asupra unui model la scară al unei nave particulare. Modelul a fost construit la scara 1:100, respectând proporționalitatea principalelor dimensiuni și în consecință criteriul de similitudine geometrică. Din punct de vedere al similitudinii fizice, este de greu de realizat un model la scară care să genereze același nivel al amprentei magnetice ca și sistemul original.

În urma măsurătorilor de amprentă magnetică pentru modelul de navă, se desprind câteva concluzii referitoare la forma acestora. Forma de variație a tuturor componentelor amprentei corespund informațiilor teoretice și experimentale despre amprenta magnetică a navelor.

Componenta verticală B_z este dominantă, datorită magnetizării modelului navei în câmpul magnetic terestru, care are de asemenea componenta verticală

dominantă. Componenta longitudinală B_x are un ordin mărime de două-trei ori mai mic decât cea verticală, pe când cea transversală (B_y) este redusă în comparație cu primele două componente. Ordinul de mărime al componente longitudinale se datorează formei alungite a corpului navei, care poate fi aproximat cu un elipsoid alungit. În acest caz, magnetizarea corpului elipsoidal se face după axa principală a elipsoidului.

Componentele amprentei modelului respectă în totalitate caracteristicile generale privind forma amprentei navelor și proporționalitatea componentelor câmpului magnetic relativ la ordinul de mărime.

Au fost comparate datele rezultate din măsurarea componente verticale a amprentei modelului cu un set de măsurători corespondente, efectuat asupra navei. S-a observat un nivel ridicat de corelație între cele două seturi de măsurători. Micile diferențe se pot explica prin faptul că modelul constituie o reprezentare la scară a corpului și suprastructurii navei, fără instalațiile și echipamentele de la bord.

BIBLIOGRAFIE

- [1] O. Baltag, D. Costandache, O. Robu, V. Ignat, *Magnetometrie*, Ed. Inventica, Iasi, 2001.
- [2] O. Baltag, D. Costandache, M. Rău, A. Ifrim, I. Rău, *Dynamic shielding of magnetic fields*, Advances in Electrical and Computer Engineering, 10, 4, pp. 135 – 142 (2010).
- [3] M. Constantinescu, *Amprenta magnetică a navei*, Ed Academiei Navale „Mircea cel Bătrân”, Constanța, 2010.
- [4] D. Costandache, *Contribuții la studiul unor magnetometre de înaltă rezoluție cu aplicații în domeniul biomedical*, Teză de doctorat, Universitatea „Alexandru Ioan Cuza”, Iași, 2009, pp. 32–43, 63–77.
- [5] J. Holmes, *Modeling a Ship's Ferromagnetic Signatures*, Morgan & Claypool, 2007.
- [6] G. Marin, O. Radu, *The assessment of the dipole array method in modeling the ship magnetic signature*, Tehnica Militara, 2, pp. 39–46 (2013)
- [7] J.E. McFee, R.O. Ellingson, and Y. Das, *A Total-Field Magnetometer System for Location and Identification of Compact Ferrous Objects*, IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, 43, 4, pp. 613 – 619 (1994).
- [8] D. Nanu, A. Sotir, G. Samoilescu, M. Constantinescu, *Considerații privind teoria similitudinii și modelării fizice în sinteza înfășurărilor de compensare magnetică a navelor*, NAV.MAREDU Conference Proceedings, pp. 325–330, Constanța, 2005.
- [9] M. Rău, *Cercetări privind măsurarea câmpurilor biomagnetice*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Gh. Asachi, Iași, 2012, p. 53–72.
- [10] G. Samoilescu, G. Marin, *Ship's magnetic field characteristics in normal depth plane*, Buletinul Științific al Academiei Forțelor Tereste „Nicolae Bălcescu”, vol.XV, nr. 1, pp. 80–84, 2010.

Despre autori

CS ing. **Georgiana MARIN ROȘU**

Centrul de Cercetare Științifică pentru Forțele Navale, Constanța

Absolventă a Academiei Navale „Mircea cel Bătrân”, Constanța, specializarea Inginerie navală, promoția 2006, cu titlul de șef de promoție. A obținut diploma de master în Inginerie electrică din partea Universității „Politehnica” din

UTILIZAREA MODELELOR FIZICE ÎN ANALIZA AMPRENTEI MAGNETICE NAVALE

București, în anul 2009. În prezent urmează ciclul de studii doctorale în cadrul Academiei Tehnice Militare din București, cu domeniul de studiu privind amprenta magnetică a navei. Începând cu 2009 lucrează ca cercetător științific la Centrul de Cercetare Științifică pentru Forțele Navale din Constanța. Simultan, în perioada 2011- 2013 a avut activitate didactică în cadrul Academiei Navale „Mircea cel Bătrân”, specializarea inginerie electrică. Membră AGIR din 2010, este autor a peste 40 de articole și studii de cercetare, în domeniul amprentei magnetice navale, sistemelor navale și metode software de optimizare a proceselor.

Prof. dr. ing. **Gheorghe SAMOILESCU**

Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța

Ofiter de marină, inginer, absolvent al Institutului de Marină, promoția 1984, specializarea Inginerie electromecanică. Doctor în Electrotehnică din 1998, începând cu anul 1991 a avut activitate didactică în cadrul Academiei Navale „Mircea cel Bătrân”. Din anul 2007 este profesor universitar în cadrul aceleiași instituții, iar până în 2013 a ocupat funcția de Prorector pentru Cercetare. Are o invenție, 4 premii pentru cărți în domeniul Știința și Tehnica, a scris 4 tratate și 24 cărți, a participat cu 157 lucrări la conferințe internaționale, 74 lucrări la conferințe naționale și 94 lucrări în reviste/aneale, a finalizat 57 contracte de cercetare. Este conducător de doctorat la Academia Tehnică Militară – București, domeniul Inginerie electrică. Membru AGIR și vicepreședinte al Filialei AGIR Constanța, precum și membru al următoarelor asociații: Societatea Română pentru Protecția față de Radiațiile Electromagnetice Ne-Ionizante (SRPRNI), Asociația Internațională a Inginerilor din Construcția de Mașini (SAE – S.U.A.), Asociația Balcanică de Mediu (B.E.N.A), Asociația de Compatibilitate Electromagnetică din România (ACER), Liga Navală Române (L.N.R.) etc.

Prof. em. dr. **Octavian BALTAG**

Universitatea de Medicină și Farmacie „Gr. T. Popa”, Facultatea de Bioinginerie Medicală, Iași

Absolvent al Facultății de Fizică a Universității „A. I. Cuza” din Iași, promoția 1971. A dobândit titlul de doctor în 1982, cu o lucrare în domeniul magnetometriei câmpurilor slabe. Pana în anul 2000 a lucrat în cercetare la Institutul de Fizică Tehnică Iași, în domeniul senzorilor magnetici cu aplicații în detecția magnetică. Începând cu anul 2001 este profesor al Universității de Medicină și Farmacie „Grigore T. Popa” din Iași, Facultatea de Bioinginerie Medicală. Este autorul a 11 cărți, a mai mult de 400 de articole publicate în reviste științifice sau comunicate la conferințe și simpozioane naționale și internaționale și a 22 de invenții. Este conducător de doctorat în Fizică, la Școala Doctorală a Facultății de Fizică, Universitatea „Al. I. Cuza” din Iași. Deținător al titlului profesor emeritus al Universității de Medicină și Farmacie „Grigore T. Popa” din Iași, precum și al medaliei „Henry Coandă” pentru activitatea de inventică, al premiului Academiei Române „Traian Vuia”. Este membru a numeroase asociații profesionale, precum: IEEE, IET, New York Academy of Science, Societatea Română de Bioinginerie Medicală, Societatea Română de Compatibilitate Electromagnetică etc.