



ORIGINAL RESEARCH PAPER (Marine Science)

Detection of Submarines through the Processing of the Magnetic Wake Using a Single Sensor Scheme

Mohammad Amir Fallah ^{1*}, Mahdi Monemi ²

¹ Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Department of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical and Computer Engineering, Salman Farsi University of Kazerun, Kazerun, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2021/06/6

Revised: 2021/12/7

Accepted: 2021/09/22

Keywords:

Magnetic Anomaly

Wake

Submarine

Magnetometer

Finite Depth

Optimum Depth

*Corresponding author:

mfallah@shirazu.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objectives: The processing of the measured passive magnetic signal instigated from remote ships and submarines is one of the most effective and novel methods for the detection of remote traveling vessels. The geomagnetic field of the earth, the electrical conductivity of seawater, and the electromagnetic induction law are the three elements helping us to detect remote vessels in seawater. The traveling of a vessel in the seawater as an electrical conductor induces magnetic anomaly in the geomagnetic field of the earth whose processing and detection leads to the detection of the remote vessel.

Methods: In this paper, we present a mathematical structure for modeling the magnetic anomaly and its relation to the environmental parameters as well as the physical parameters of the traveling body such the vessel's shape and speed. We propose the detection process through a single magnetic sensor located at some specified depth under the sea surface. The proposed structure has many advantages to the currently available airborne sensors.

Findings: We will analytically show that there always exists an optimal depth wherein if the magnetic sensor is located, maximum detection probability is achieved. We will show through numerical results that the optimal depth gets higher if the travelling speed of the vessel is increased. We will also show that if the traveling speed is lower than 10m/s, the optimal depth is lower than 6m and is independent of the sea depth.

Conclusion: We will show that the amplitude of the magnetic wake above the sea surface and under the seabed suffers from severe attenuation, and there always exists an optimal depth under the sea surface wherein if the sensor is positioned, maximum magnitude of anomaly is captured. The impact of different parameters such as the location of the sensor, the depth of the sea, as well as the speed, length and traveling depth of the submerged traveling body are evaluated on the performance of our proposed scheme.



NUMBER OF TABLES

0



NUMBER OF FIGURES

6



NUMBER OF REFERENCES

22

بکارگیری روش تک سنسوری ثابت در آشکارسازی زیردریایی با استفاده از رد حرکت مغناطیسی

محمد امیر فلاح^{۱*}، مهدی منعمی^۲

^۱ استادیار گروه فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

^۲ استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه سلمان فارسی کازرون، کازرون

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۱۶</p> <p>تاریخ بازبینی: ۱۴۰۰/۹/۱۶</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۳۱</p>	<p>پیشینه و اهداف: پردازش سیگنال مغناطیسی غیر فعال ارسالی توسط شناورهای متحرک سطحی و زیر سطحی یکی از به روزترین و موثرترین روش‌های سنجش از دور جهت تشخیص وجود این شناورها می باشد. میدان مغناطیسی زمین، رسانایی الکتریکی آب دریا و قانون القای الکترومغناطیسی در اثر حرکت یک رسانا درون میدان مغناطیسی، سه مؤلفه هستند که توانایی آشکارسازی حرکت شناور در دریا را به ما می‌دهند. حرکت شناور در آب دریا که یک رسانای الکتریکی است، باعث ایجاد تغییراتی در الگوی میدان مغناطیسی زمین می‌گردد که به ناهنجاری ژئومغناطیسی معروفند و آشکار سازی این ناهنجاری منجر به آشکارش شناور متحرک می‌شود.</p>
<p>واژگان کلیدی:</p> <p>رد حرکت ناهنجاری مغناطیسی زیردریایی سنسور مغناطیسی عمق بهینه عمق محدود</p>	<p>روش‌ها: در این مقاله یک مدل ریاضی جهت بررسی تغییرات این نوع الگوی مغناطیسی در آب‌های با عمق محدود ارائه می‌شود که رابطه این ناهنجاری با پارامترهای محیطی و شکل هندسی جسم شناور را بیان می‌کند. آشکارسازی زیردریایی به روش تک سنسوری ثابت، معرفی شده و مزایای آن نسبت به تکنیک آشکارسازی هواپرد برشمرده می‌شود.</p>
<p>*نویسنده مسئول mfallah@shirazu.ac.ir</p>	<p>یافته‌ها: مقدار حداقل فرکانس نمونه برداری سنسور ارائه می‌شود و از آنجا که جهت آشکارسازی زیردریایی‌ها از فواصل بیشتر، دریافت بیشترین میزان ناهنجاری مغناطیسی لازم است، نشان داده می‌شود که همیشه یک عمق بهینه وجود دارد که با قرار دادن حسگر مغناطیسی در آن عمق، بیشترین میزان دامنه ناهنجاری مغناطیسی قابل دریافت است.</p>
	<p>نتیجه‌گیری: آنالیز عددی برای یک زیردریایی نشان می‌دهد که این عمق بهینه با افزایش سرعت زیردریایی، افزایش می‌یابد و برای سرعت‌های کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه، این عمق بهینه کمتر از ۶ متر بوده و به عمق دریا وابسته نمی‌باشد.</p>

مقدمه

نوع رد حرکت مغناطیسی شناورها در دریا‌های عمیق و ارتباط آن با شرایط محیطی و پارامترهای فیزیکی شناور انجام شده است (۸-۱۰). نحوه تشکیل رد حرکت مغناطیسی در آب‌های کم عمق توسط یاکوبی و همکاران در یک مطالعه (۱۱) و فلاح و عبیری در مطالعه‌ای دیگر (۱۲) برای میدان دور^۶ انجام شده است. جیائو و همکاران محاسبات را برای یک شناور باریک^۷ از نوع منبع نقطه‌ای هاولوک^۸ انجام دادند که در آن هم میدان نزدیک^۹ و هم میدان دور^{۱۰} مد نظر قرار گرفته است (۱۳). در این مقاله تمرکز اصلی بر رد حرکت در میدان دور است و الگوی رد حرکت مغناطیسی ایجاد شده را برای آب‌های با عمق محدود را ارائه می‌کنیم. در عین حال شکل هندسی شناور را نیز در محاسبات لحاظ کرده و محدود به منبع نقطه‌ای نخواهیم بود. در موضوع آشکار سازی شناور با استفاده از رد حرکت مغناطیسی، تنها روش سیستماتیک پیشنهاد شده برای آشکار سازی شناور از طریق رد حرکت در آب‌های کم عمق، توسط فلاح ارائه شد (۱۴). قبل از آن، زو و نه‌ورایی (۱۰) در حالت خاص و بدون در نظر گرفتن تر پارامتر عمق آب دریا در محاسبات، آشکار سازی شناور در آب‌های عمیق را پیشنهاد دادند. در این روشها، با استفاده از یک سنسور مغناطیسی که بر روی یک هواپیما نصب شده، در یک خط مستقیم، الگوی مغناطیسی رد حرکت شناور، اسکن شده و داده‌های میدان مغناطیسی در طول این خط حرکتی مستقیم، ذخیره می‌شود. سپس با پردازش داده‌های ذخیره شده، آشکار سازی شناور صورت می‌گیرد. از جمله مشکلات این روش، سرعت بالای اسکن و ذخیره داده است که نیاز به سرعت بالای نمونه برداری و در نتیجه پهنای باند زیاد برای سنسور مغناطیسی را به همراه دارد که این مسئله نیز منجر به افزایش قیمت و محدودیت در انتخاب سنسور مغناطیسی می‌گردد. در ثانی، ارتفاع زیاد هواپیما و فاصله از سطح آب، دامنه سیگنال دریافت شده را کمتر کرده که سنسور مغناطیسی با حساسیت بیشتر و قیمت بالاتر را طلب می‌کند و احتمال کشف هدف را کمتر می‌کند. بعلاوه، در روش اسکن با هواپیما امکان ردگیری هواپیما و انهدام آن وجود دارد ولی در روش سنسور ثابت این مشکل مرتفع می‌شود.

روش پیشنهادی در این مقاله جهت کشف شناور توسط الگوی مغناطیسی رد حرکت شناور، بکارگیری یک تک سنسور مغناطیسی در زیر سطح آب است. سنسور مغناطیسی به طور مداوم و با فرکانس نمونه برداری پایین اقدام به داده برداری از میدان مغناطیسی محیط می‌کند. این داده‌ها به صورت یک سری زمانی ذخیره شده و در یک

آشکار سازی در کل به دو روش صورت می‌گیرد. در روش اول یک الگوی^۱ مصنوعی ایجاد می‌گردد و تغییرات بوجود آمده در الگو به واسطه وجود هدف، باعث کشف هدف می‌شود. در روش دوم همین پروسه با یک پترن طبیعی انجام می‌گیرد. یکی از این الگوهای های طبیعی میدان مغناطیسی زمین است. میدان مغناطیسی زمین در یک محدوده کوچک (چند صد متری) مقدار ثابتی دارد و مقدار آن درون آب و هوا یکسان می‌باشد. از طرفی، حرکت یک رسانا در یک میدان مغناطیسی باعث ایجاد القای الکترومغناطیسی می‌شود و این القای الکترومغناطیسی را می‌توان به عنوان یک ناهنجاری در پترن میدان مغناطیسی زمین در نظر گرفت. آب دریا یک رسانای الکتریکی است. حرکت شناور در دریا باعث ایجاد تغییرات سرعت در آب دریا شده که به آن رد حرکت^۲ گفته می‌شود و این تغییرات هیدرودینامیکی به علت وجود میدان مغناطیسی زمین، منجر به ایجاد القای الکترومغناطیسی و نوعی رد حرکت مغناطیسی^۳ در میدان مغناطیسی زمین می‌شود. با آشکار سازی این ناهنجاری مغناطیسی، می‌توان به وجود شناور پی برد و بعضاً پارامترهای فیزیکی شناور نظیر سرعت و جهت حرکت شناور را تخمین زد. وجود اغتشاشات میدان مغناطیسی ناشی از رد حرکت، ماندگاری زیادی دارد و ساعت‌ها پس از عبور شناور نیز قابل ردیابی است و این خاصیت، آن را در دسته بندی روشهای سنجش از دور^۴ در دریا قرار می‌دهد. بخصوص در سالیان اخیر و با پیشرفت شناورهایی با سکوت آکوستیکی بالا از یک طرف و ایجاد پیشرفت‌های چشم‌گیر در بالا بردن حساسیت حسگرهای مغناطیسی این روند دورسنجی در دریا مورد توجه قرار گرفته است (۱-۳).

تغییرات سرعت سیال به واسطه‌ی حرکت یک جسم شناور یا رد هیدرودینامیکی^۵ در سال ۱۹۷۷ توسط نیومن، گیو و فیلیپ و گیلمن و همکارانش فرموله شد (۴-۶). پس از آن مادوراسینق حرکت آب دریا به عنوان یک رسانا در میدان ژئومغناطیس مورد بررسی قرار داد و نشان داد که رد هیدرودینامیکی در یک سیال رسانا نظیر آب دریا منجر به تولید یک ناهنجاری مغناطیسی می‌گردد که خواصی شبیه به ردهیدرودینامیکی را دارا است (۷). خصوصیت اصلی این نوع ناهنجاری مغناطیسی، ایجاد شده توسط شناور، بسط یافتن آن تا فواصل طولانی و تا مدت زیاد است که آن را ابزار مناسبی جهت تشخیص در دریا می‌سازد (۸، ۹). تاکنون مطالعات زیادی در مورد نحوه‌ی تشکیل این

⁶ Far field⁷ Slender body⁸ Havelock point source⁹ Near field¹⁰ Far field¹ Pattern² Wake³ Magnetic wake⁴ Remote sensing⁵ Hydrodynamic wake

$$\kappa_{\theta} = \iint_{S'} I_{\kappa}(x', y', z') e^{-i k_0(x' \cos \theta + y' \sin \theta)} \cosh k_0(z' + d) dx' dy'$$

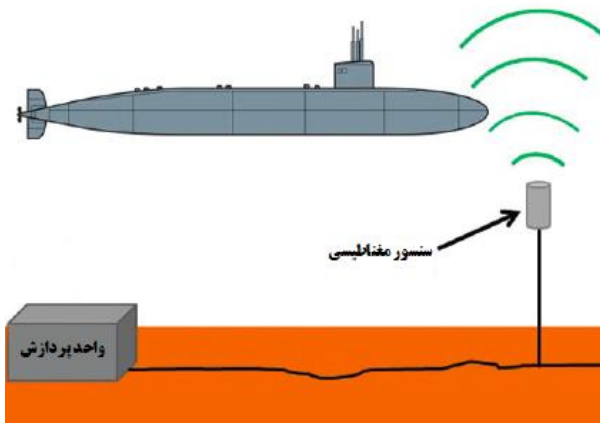
که در آن S سطح مقطع خیس جسم شناور بوده و I_{κ} وابستگی تابع کوشین به شکل را بیان می کند.

در نهایت بردار سرعت سیال در اثر حرکت شناور را، با فرض غیرچرخشی بودن سیال، می توان از تابع پتانسیل محاسبه کرد:

$$\mathbf{U} = \nabla \phi \quad (5)$$

۱-۲ مبانی ژئومغناطیسی

فرض ما بر این است که سطح سیال کاملاً صاف و بوده و سیستم مختصات کارتزین مطابق شکل (۱) به نحوی قرار گرفته باشد که محور Z عمود بر سطح سیال بوده و ناحیه $Z > 0$ نیم صفحه بالایی سطح سیال باشد. جهت مثبت محور X در خلاف جهت حرکت جسم شناور قرار داشته و جهت محور Y نیز از قانون دست راست تبعیت می کند. بردار (i', j', k') بردار واحد مختصات دکارتی است. میدان ژئومغناطیسی زمین B_E در همه جا ثابت فرض شده و شناور در لحظه $t = 0$ در مبدأ قرار داشته و با سرعت یکنواخت V در جهت $-X$ در حرکت است. این حرکت منجر به اغتشاش سیال با بردار سرعت \mathbf{U} می گردد. محیط $Z > 0$ دارای ضریب دی الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب رسانایی $(\sigma_a, \epsilon_a, \mu_a)$ است.



شکل ۱: سناریوی آشکارسازی تک سنسوری

Fig. 1: Single sensor detection scenario

محیط $-d < z < 0$ دریای کم عمق دارای ضرایب $(\sigma_w, \epsilon_w, \mu_w)$ بوده و در نهایت $z < -d$ محیط بستر با پارامترهای $(\sigma_s, \epsilon_s, \mu_s)$ خواهد بود. معادلات اصلی حاکم بر محیط ژئومغناطیسی سه لایه نامبرده همان معادلات ماکسول حاکم بر میدان های الکتریکی و مغناطیسی B, E و قانون اهم در مورد حرکت یک هادی الکتریکی

واحد پردازش، تحت آنالیز قرار می گیرند و با کشف ناهنجاری ایجاد شده در الگوی میدان مغناطیسی زمین ناشی از حرکت شناور، وجود شناور کشف می شود. در این روش فرکانس نمونه برداری مورد نیاز سنسور مغناطیسی زیاد نیست چرا که سرعت تغییرات پترن میدان مغناطیسی متناسب با سرعت شناور است و شناورهای سطحی و زیر سطحی معمولاً با سرعتی کمتر از 20m/s حرکت می کنند. از طرف دیگر با بکارگیری روابط ریاضی، طراحی بهینه ای برای این ساختار تک سنسوری پیشنهاد می گردد که منجر به دریافت بیشترین مقدار دامنه میدان مغناطیسی و افزایش نسبت سیگنال به نویز ساختار گردد. حداقل فرکانس نمونه برداری لازم برای سنسور مغناطیسی، فرموله می شود. کارآیی روش تک سنسوری برای کشف زیردریایی در سرعت های مختلف، عمق های متفاوت و حرکت یک زیردریایی بررسی می شود.

روش پژوهش

۱. اصول تئوری

۱-۱ مبانی هیدرودینامیکی

حرکت هر جسم شناور درون سیال در حالت کلی دو رژیم میدان نزدیک و میدان دور از بی هنجاری هیدرودینامیکی را ایجاد می کند. در اینجا علاقه اصلی به اغتشاشات تولید شده در فاصله زیاد از شناور بوده یا امواج کلونین می باشد. تابع پتانسیل سرعت سیال که ناشی از حرکت جسم شناور با سرعت یکنواخت V بوده و متناظر با جبهه موج با زاویه θ نسبت به محور X است را می توان به شکل زیر نوشت (۴):

$$\phi(x, y, z, t, \theta) = \frac{A_{\theta} g \cosh[k_0(z+d)]}{\omega_0 \cosh k_0 d} e^{-i(\omega_0 t + k_0 x \cos \theta + k_0 y \sin \theta)} \quad (1)$$

که در آن g شتاب جاذبه و d عمق دریاست. عدد موج k_0 از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$k_0 \tanh k_0 d = \omega_0^2 / g, \quad \omega_0 = k_0 V \cos \theta \quad (2)$$

ضریب A_{θ} نیز از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$A_{\theta} = \frac{2 \omega_0 g}{\cos^2 \theta \pi^2} \frac{e^{k_0 d} - e^{-k_0 d}}{e^{k_0 d} - e^{-2k_0 d} - 4k_0 d} K_{\theta} \quad (3)$$

که در آن تابع K_{θ} معروف به تابع کوشین (Kochin) بوده و به شکل زیر تعریف می شود (۱۵):

$$(4)$$

ژئومغناطیسی ایجاد شده از نظر دامنه بسیار کوچکتر از اندازه میدان ژئومغناطیسی است، می‌توان با تقریب بسیار خوب $B_T \approx B_E$ را نوشت. برای حل معادلات فوق می‌بایست به طبیعت هارمونیک \emptyset در معادله (۱) و در نتیجه رفتار هارمونیک B, E, U نیز توجه کرد. در واقع میدان‌های هارمونیک الکتریکی و مغناطیسی را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$H = h(\theta, z)e^{-i(\omega_0 t + k_0 x \cos \theta + k_0 y \sin \theta)} \quad (7)$$

$$E = e(\theta, z)e^{-i(\omega_0 t + k_0 x \cos \theta + k_0 y \sin \theta)}$$

حل هارمونیک تک مؤلفه‌ای بی‌هنجاری ژئومغناطیسی به شکل زیر خواهد بود:

$$h(\theta, z) = h^a(\theta, z)e^{-\beta_{az}\tau(z)} + h^s(\theta, z)e^{\beta_s(z+d)}\tau(-z-d) + [h_w^+(\theta, z)e^{\beta_{wz}} + h_w^-(\theta, z)e^{-\beta_{wz}} + a_w^+(\theta)e^{k_0 z} + a_w^-(\theta)e^{-k_0 z}]\tau(z+h)\tau(-z) \quad (8)$$

$$\beta_w^2 = k_0^2 - \varepsilon_w \mu_w \omega_0^2 - i\sigma_w \mu_w \omega_0$$

$$\beta_s^2 = k_0^2 - \varepsilon_s \mu_s \omega_0^2 - i\sigma_s \mu_s \omega_0$$

$$a_w^+(\theta) = \frac{k_0 \sigma_w}{(k_0^2 - \sigma_w^2)} \frac{e^{k_0 d}}{e^{k_0 d} + e^{-k_0 d}} [i(B_E \cdot r) - (B_E \cdot k)][i \cos \theta, i \sin \theta, 1] \quad (10)$$

$$a_w^-(\theta) = \frac{k_0 \sigma_w}{(k_0^2 - \sigma_w^2)} \frac{e^{k_0 d}}{e^{k_0 d} + e^{-k_0 d}} [i(B_E \cdot r) - (B_E \cdot k)][i \cos \theta, i \sin \theta, -1] \quad (11)$$

ناگفته پیداست که در صورتی که در معادلات فوق $d \rightarrow \infty$ کلیه جوابها به جواب معادلات در آبهای عمیق میل می‌کند که معیار مناسبی جهت صحت سنجی است (۷).

نتایج و بحث

۱. سناریوی آشکارسازی تک سنسوری

روش آشکارسازی جهت شناسایی رد مغناطیسی شناور مطابق شکل ۱، بدین صورت است که یک سنسور مغناطیسی نصب شده در زیر سطح شروع به داده برداری از میدان مغناطیسی محیط می‌کند و با گذشت زمان، یک سری زمانی از داده‌ها در یک آرایه ذخیره می‌شود. فرض کنید که در زمان $t = 0$ ، سنسور در مکان (x_0, y_0, z_s) قرار داشته و شناور در مبدأ قرار گرفته باشد و با سرعت V در جهت $-x$ در حال حرکت است. فرم مستقل از مکان میدان کلونین

است. اگر چگالی شار الکتریکی را با ρ_e نمایش دهیم، معادلات ماکسول در سه محیط به شکل معادله زیر خواهند بود:

$$\nabla \times B = (\rho_e) \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_a \varepsilon_a \frac{\partial E}{\partial t}, \quad z > 0 \quad a) \text{ air} \\ \mu_w \varepsilon_w \frac{\partial E}{\partial t} + \mu_w \sigma_w (E + U \times B_T) \\ \quad + \mu_w \rho_e U \\ + \mu_w (\varepsilon_w - \varepsilon_0) \nabla \times (E + U \times B_T) \times U, \quad -d < z < 0 \quad b) \text{ fluid} \\ \mu_s \varepsilon_s \frac{\partial E}{\partial t} + \mu_s \sigma_s E, \quad z < -d \quad c) \text{ soil} \end{array} \right.$$

که در آن B_E میدان ژئومغناطیس و B بی‌هنجاری ژئومغناطیسی را نشان داده و $B_T = B + B_E$ است و از آنجا که بی‌هنجاری

$$\tau(z) \text{ تابع پله واحد است و} \quad (9)$$

$$\beta_a^2 = k_0^2 - \varepsilon_a \mu_a \omega_0^2 \quad (9)$$

تمام ضرایب مجهول در معادله (۸) با اعمال شرط مرزی پیوستگی میدان مغناطیسی در مرزهای سه محیط محاسبه می‌شوند. همانطور که از معادله (۸) دیده می‌شود جملات $h^a(\theta, z)e^{-\beta_{az}\tau(z)}$ و $h^s(\theta, z)e^{\beta_s(z+d)}$ به ترتیب نشانگر حرکت موج سطحی در دو محیط هوا و بستر است، اما در محیط آب این رفتار به شکل مجموع دو موج رونده در دو جهت مخالف است. در نهایت با اعمال قانون جمع آثار بر روی تمام مؤلفه‌های هارمونیک، بی‌هنجاری ژئومغناطیسی به صورت زیر خواهد بود:

$$H(x, y, z, t) = \Re e \int_{-\pi/2}^{\pi/2} h(\theta, z) A_0 e^{-i(\omega_0 t + k_0 x \cos \theta + k_0 y \sin \theta)} d\theta \quad (12)$$

داده و سرعت و زاویه حرکت شناور را بدست آورد. نکته مهمی که در این بین مطرح است این است که فرکانس نمونه برداری سنسورهای مغناطیسی دارای محدودیت است (۱۰).

اگر فرکانس نمونه برداری سنسور f_{s0} بوده و طول موج میدان مغناطیسی القایی در حوزه مکان $\lambda_{spatial}$ باشد، خواهیم داشت:

$$\lambda_{spatial} = \frac{2\pi}{k_0} \quad (۱۸)$$

با توجه به سرعت حرکت سنسور شناور (V)، طول موج میدان مغناطیسی القایی در حوزه زمان λ_t را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{spatial}}{V} \quad (۱۹)$$

مطابق معیار نایکوئیست فاصله زمانی میان دو نمونه گرفته شده می بایست کوچکتر از نصف طول موج در حوزه زمان (λ_t) باشد:

$$T_{s0} = 1/f_{s0} \leq \lambda_t/2 \quad (۲۰)$$

و حداقل فرکانس نمونه برداری که سنسور مغناطیسی باید دارا باشد، برابر است با:

$$f_{s0}^{-min} = \frac{k_0 V}{\pi} \quad (۲۱)$$

دیده می شود که افزایش سرعت شناور منجر به افزایش حداقل فرکانس نمونه برداری سنسور می گردد. از طرف دیگر جهت کشف شناور، سنسور می بایست در محدوده زیر قرار داشته باشد (۱۰):

$$|\tan^{-1}(\frac{y_0}{x_0})| < \sin^{-1}(1/3) \quad (۲۲)$$

۲. شبیه سازی

جهت تحلیل دقیق، در این قسمت میدان مغناطیسی القایی در اثر حرکت یک شناور سطحی در دریای کم عمق شبیه سازی می شود. شکل بدنه شناور یک سهمی به شکل معادله زیر است:

$$S(x, z) = S_0 [1 - (\frac{x}{L/2})^2] \quad (۲۳)$$

$$x \in [-L/2, L/2], z \in [-h_s, 0]$$

که طول آن $L = 105m$ و عرض آن $h_s = 17m$ که با سرعت $10m/s$ در حال حرکت است. محیط دریا سه لایه فرض شده و پارامترهای الکترومغناطیسی لایه ها به قرار زیرند (۱۶-۲۰):

$$(\epsilon_a, \epsilon_f, \epsilon_b) = (\epsilon_0, 81\epsilon_0, 10\epsilon_0)$$

الکترومغناطیسی که توسط سنسور ثبت می شود را می توان به شکل زیر نوشت:

$$H(x, y, z, t) = H[x_0 + Vt, y_0, z_s] \quad (۱۳)$$

که Z_s عمق سنسور مغناطیسی زیرسطح آب است. تبدیل فوریه میدان مغناطیسی دریافت شده توسط سنسور را می توان به صورت زیر نوشت:

$$H(\omega) = \frac{1}{2} [\frac{F_d^{\theta^+}}{\sin(\theta^+)} + \frac{F_d^{\theta^-}}{\sin(\theta^-)}] \quad (۱۴)$$

$$F_d^{\theta} = \begin{cases} \tilde{n}_a e^{-\beta a z} e^{i k_0 (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)} & \text{for } z > 0 \\ (\alpha^+ e^{k_0 z} + \alpha^- e^{-k_0 z} + \tilde{n}_f^+ e^{\beta f z} + \tilde{n}_f^- e^{-\beta f z}) e^{i k_0 (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)} & \text{for } -d < z < 0 \\ \tilde{n}_b e^{-\beta b z} e^{i k_0 (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)} & \text{for } z < -d \end{cases}$$

که در آن

$$\Omega_d(\theta) = \frac{d k_0}{d\theta} V \cos(\theta) - k_0 V \sin(\theta) \quad (۱۵)$$

$$\frac{d k_0}{d\theta} = \frac{g \sin \theta \sinh(2k_0 d)}{V^2 \cos^3 \theta - g d \cos \theta}$$

که θ^+ و θ^- ریشه های معادله زیر است:

$$k_0 V \cos(\theta - \alpha) = \omega \quad (۱۶)$$

اهمیت ریشه θ به این دلیل است که الگوی بی هنجاری ژئومغناطیسی در حوزه طیفی $H(\omega)$ ، در نقاطی که $\Omega_d(\theta) = 0$ باعث ایجاد پیک در معادله (۱۴) می گردد که آن را از طیف نویز محیطی متمایز می کند. با حل همزمان معادلات (۱۵) و (۱۶) یک دستگاه معادلات غیرخطی بدست می آید که به روش عددی پارامترهای θ^+ ، θ^- و همچنین پارامترهای سرعت و زاویه حرکت شناور α ، V را نتیجه می دهند.

$$\tan(\theta^+ - \alpha) = \left(\frac{d k_0}{d\theta^+} / k_0 \right) \quad (۱۷)$$

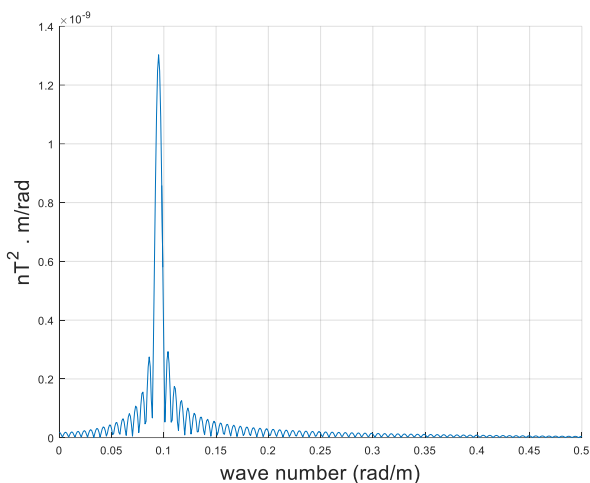
$$\tan(\theta^- - \alpha) = \left(\frac{d k_0}{d\theta^-} / k_0 \right)$$

$$\cos(\theta^+ - \alpha) = \frac{\omega_{01}}{k_0 V}$$

$$\cos(\theta^- - \alpha) = \frac{\omega_{02}}{k_0 V}$$

در واقع با دریافت میدان مغناطیسی القایی توسط رد حرکت شناور و انتقال آن به حوزه طیفی، می توان محل قله های ایجاد شده در طیف فرکانسی مذکور ($\omega = \omega_{01}, \omega_{02}$) را در دستگاه معادلات (۱۷) قرار

بتوان حسگر را در شرایطی قرار داد که بیشترین میزان دامنه ناهنجاری مغناطیسی ایجاد شده را حس کند و در نهایت، احتمال آشکارسازی شناور را بالا ببرد.



شکل ۳: طیف فرکانسی سیگنال ژئومغناطیسی دریافت شده توسط سنسور $z = 30$, $V = 10 \frac{m}{s}$, $f_s = 2\text{Hz}$

Fig. 3: Frequency spectrum of received geomagnetic signal $z = 30$, $V = 10 \frac{m}{s}$, $f_s = 2\text{Hz}$

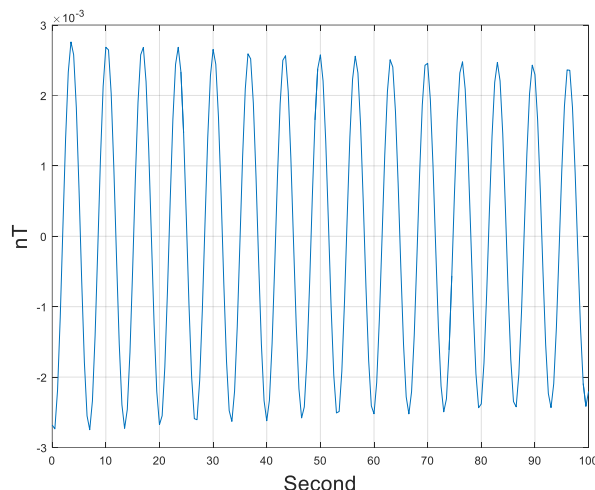
سناریوی پیشنهاد شده در این مقاله، مبتنی بر استفاده از یک سنسور ثابت در محل نصب خود است. مکان نصب سنسور در (X_0, Y_0, Z_0) مشخص و با توجه به میزان تردد شناورها و موقعیت جغرافیایی منطقه آشکارسازی تعیین می‌گردد و میزان فاصله شناور هدف از آن کاملاً به مکان شناور وابسته خواهد بود و پس از نصب سنسور، امکان کاهش فاصله با شناور هدف و دریافت سیگنال قوی‌تر وجود ندارد. در نتیجه تنها پارامتری که برای طراحی این سناریوی آشکارسازی، قابلیت مانور به طراح می‌دهد، تعیین Z_0 است. حال سؤال مهم این است آیا تغییر پارامتر Z_0 سنسور، اثری بر میزان سیگنال دریافتی سنسور دارد و اینکه قرار گرفتن سنسور در کدامیک از سه محیط، بالای سطح، روی سطح یا زیر سطح امکان آشکارسازی را افزایش می‌دهد؟

با نگاه به معادله‌ی (۱۲) پیداست که تغییرات دامنه‌ی ناهنجاری مغناطیسی رد حرکت شناور در جهات افقی X, Y به شکل هارمونیک بوده و با دور شدن شناور از حسگر کاهش می‌یابد. بدیهی است که با توجه به ثابت بودن حسگر (در سه جهت X, Y, Z ، فاصله‌ی افقی شناور از حسگر (در جهت‌های X, Y) کاملاً وابسته به مکان شناور است و از سیستم اندازه‌گیری مستقل است. بنابراین تنها پارامتر مکانی قابل دسترس و تاثیرگذار، فاصله‌ی عمودی حسگر از سطح آب (Z_0) است. از سوی دیگر در معادله‌ی (۱۲) تنها تابع متغیر با Z تابع $h(\theta, Z)$ است که توسط معادله‌ی (۸) تعیین می‌شود. همان‌طور که از رابطه‌ی (۸) پیداست، دامنه ناهنجاری مغناطیسی در محیط هوا به شکل نمایی به صورت $h^a(\theta)e^{-\beta a z}$ با افزایش ارتفاع کاهش یافته و در محیط بستر نیز به صورت $h^s(\theta)e^{\beta_s(z+d)}$ با افزایش عمق کوچک‌تر می‌گردد. اما

$$(\mu_a, \mu_f, \mu_b) = (\mu_0, \mu_0, \mu_0)$$

$$(\sigma_a, \sigma_f, \sigma_b) = (0, 5, 0.025)$$

اندازه میدان ژئومغناطیسی منطقه شبیه‌سازی $|B_E| = 50000 \text{ nT}$ است.



شکل ۲: سیگنال ژئومغناطیسی دریافت شده توسط سنسور $z = 30\text{m}$, $V = 10 \frac{m}{s}$, $f_s = 2\text{Hz}$, $d = 50\text{m}$

Fig. 2: Received geomagnetic signal $z = 30\text{m}$, $V = 10 \frac{m}{s}$, $f_s = 2\text{Hz}$, $d = 50\text{m}$

بر مبنای اصول تئوری بیان شده در قسمت قبل و با فرض وجود نویز سفید گوسی در پس زمینه سیگنال که معمولاً ناشی از جریان‌های داخلی دریا و باد است (۲۱، ۲۲)، در ابتدا سعی می‌کنیم وجود شناور را صرفاً از طریق الگوی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی آشکار کنیم که این الگوی بی‌هنجاری، توسط سنسور مغناطیسی زیرسطحی ثبت شده است. شکل ۲ سیگنال زمانی دریافت شده توسط سنسور در مختصات $(0, 0, 30)$ را نشان می‌دهد. زیردریایی در فاصله ۵ کیلومتری سنسور با سرعت 10m/s فاصله خود را با سنسور زیاد می‌کند. فرکانس نمونه برداری سنسور در این حالت 2Hz در نظر گرفته شده است.

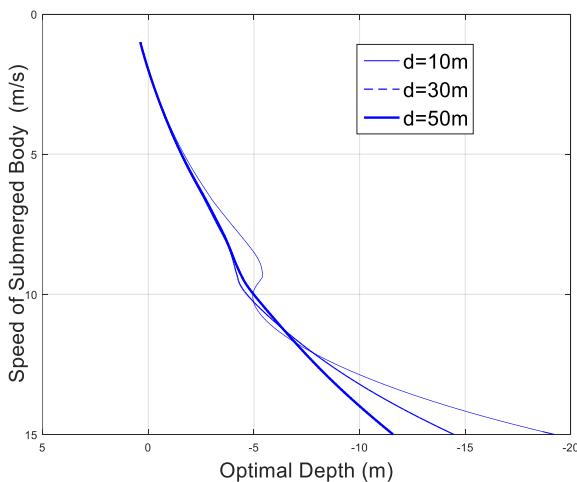
مطابق معادلات (۱۷-۱۵) انتظار داریم طیف فرکانسی $H(\omega)$ سیگنال شکل ۳ در نقاطی که ریشه معادله $\Omega d = 0$ است دارای قله $(\omega = 2\pi f)$ باشد که بر اساس معادله (۱۶) این قله به پارامتر k_0 بستگی دارد. با دقت در معادله (۲) مشاهده می‌گردد که پارامتر k_0 به صورت غیرخطی به سرعت شناور V وابسته است.

شکل ۳ طیف فرکانسی سیگنال ژئومغناطیسی دریافت شده توسط سنسور را نشان می‌دهد که به وضوح وجود قله در طیف، نشانگر وجود زیردریایی است. افت نمایی سیگنال دریافت شده توسط سنسور (معادله ۱۲)، باعث می‌گردد که در فواصل دور اندازه‌ی دامنه دریافتی، در حد چند ده میکروتسلا شود. بنابراین با این اندازه کوچک دامنه، بسیار مهم است که بتوان در یک فاصله معین بین حسگر و شناور،

عمق آب دریا، در یک عمق مشخص آب، رد حرکت مغناطیسی شناور، دارای یک بیشینه است.

به علت شیب تند منحنی رد حرکت مغناطیسی شناور و کاهش سریع آن در اطراف نقطه بهینه، قرار گرفتن حسگر با دقت هر چه تمام تر در این عمق بسیار مهم است.

با مشاهده شکل ۴ می توان نتیجه گرفت که با افزایش ارتفاع حسگر از سطح آب ($Z_0 > 20$) یا افزایش عمق نصب سنسور در بستر دریا ($Z_0 < -50$)، به علت افت سریع، میزان دامنه ی رد مغناطیسی دریافت شده توسط حسگر به حدی ناچیز است که نمی توان وابستگی چندانی بین محل قرارگرفتن حسگر در این محدوده ($Z_0 > 20$) و عمق آب دریا در منطقه (d)، متصور شد و تقریباً در هر سه عمق مد نظر در شکل ۴، ($d = 100m, d = 1500m, d = 5000m$)، دامنه ی رد مغناطیسی دریافت شده توسط حسگر در دو انتهای چپ و راست نمودار، با افت زیاد مواجه شده و به سمت یکدیگر میل می کنند. تأثیر سرعت شناور بر عمق بهینه در شکل ۵ برای یک زیردریایی هدف، نشان داده شده است. زیر دریایی در سه عمق ۱۰ و ۳۰ و ۵۰ متر در حال حرکت با سرعت های مختلف در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می گردد با افزایش سرعت شناور، عمق بهینه افزایش می یابد و برای دریافت بیشترین مقدار ناهنجاری مغناطیسی شناور، سنسور باید در عمق بیشتری قرار گیرد و این موضوع در هر عمق حرکت زیر دریایی، اتفاق می افتد.



شکل ۵: عمق بهینه در سرعت های مختلف حرکت زیردریایی

Fig.5: Optimal depth at different submarine speeds

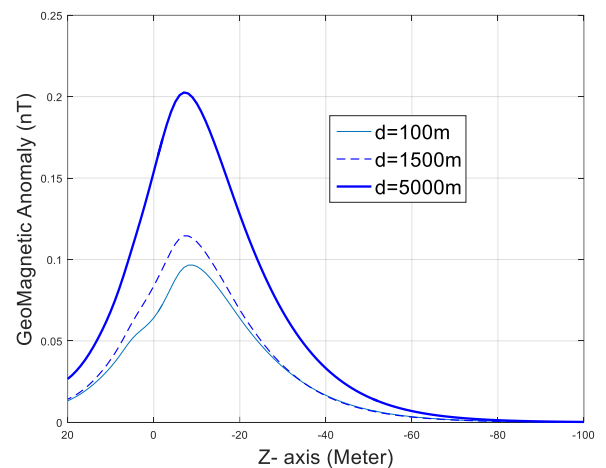
با توجه به اینکه سرعت معمول شناورها، چیزی کمتر از 15m/s است، می توان گفت که عمق بهینه برای کشف اکثریت شناورها، کمتر از ۱۵ تا ۲۰ متر خواهد بود. از طرفی هر چه زیردریایی بزرگتر باشد، اینرسی

در محیط آب دریا تغییرات دامنه ناهنجاری مغناطیسی رفتار یکنوا نداشته و به شکل مجموع دو موج رونده در دو جهت مخالف با ضرایب انتشار β_w و $-\beta_w$ است و انتظار می رود که یک بیشینه محلی داشته و قبل و بعد از آن با افزایش یا کاهش عمق دچار افت گردد. بنابراین عمق بهینه را می توان در محدوده $-d < z < 0$ به روش زیر محاسبه کرد:

$$\frac{\partial H(x,y,z,t)}{\partial z} = 0 \Rightarrow Z_{opt} = (Z_{opt_x}, Z_{opt_y}, Z_{opt_z}) \quad (24)$$

از آنجا که معادله ی (۲۴) برداری است برای هر کدام از مولفه های (H_x, H_y, H_z) یک Z_{opt} به دست می آید که بسته به مولفه ی مورد نظر جهت آشکارسازی، حسگر می بایست جهت دریافت بیشینه ناهنجاری مغناطیسی در این عمق بهینه نصب گردد.

جهت عینیت بخشیدن به این فرضیه، یک حسگر مغناطیسی را در نظر بگیرد که در فاصله ۵ کیلومتری از شناوری با سرعت ۱۰m/s قرار دارد و دریا نیز دارای عمق محدود باشد. مولفه ی B_z رد حرکت مغناطیسی شناور، در این حالت بر حسب فاصله از سطح آب (z) در سه عمق متفاوت دریا (d) هم برای آب های کم عمق و هم برای آب های عمیق در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: دامنه میدان مغناطیسی ناشی از رد حرکت زیردریایی که در فاصله ۵ کیلومتری از سنسور نصب شده در سطح، حرکت می کند. عمق دریا در سه حالت کم عمق (۱۰۰ متر)، عمق متوسط (۱۵۰۰ متر) و عمیق (۵۰۰۰ متر) در نظر گرفته شده است.

Fig. 4: Amplitude of the magnetic field due to submarine wake moving at a distance of 5 km from the sensor installed on the sea surface. The sea depth is considered in three modes: shallow (100 meters), medium depth (1500 meters) and deep (5000 meters).

همان طور که انتظار می رفت در بالای سطح آب ($z > 0$) و درون بستر ($z < -50$)، دامنه ناهنجاری مغناطیسی به شکل نمایی دچار افت می گردد. اما این مطلب در مورد محیط آب صادق نبوده و بسته به

نتیجه‌گیری

در این تحقیق بر اساس روابط هیدرومغناطیسی و با توجه به اینکه آب دریا رسانایی الکتریکی دارد، نشان دادیم که تغییرات میدان مغناطیسی زمین در اثر حرکت شناور درون این رسانای الکتریکی، تولید یک ناهنجاری مغناطیسی می‌کند.

رابطه‌ی این ناهنجاری با پارامترهای محیطی نظیر ضرایب الکتریکی و مغناطیسی آب و هوا و جنس بستر و پارامترهای فیزیکی شناور (نظیر ابعاد هندسی و سرعت) برای آب‌های با عمق محدود ارائه شد. قابلیت تفکیک الگوی این ناهنجاری مغناطیسی از نویز محیطی را در حوزه طیفی بررسی کرده و نشان دادیم طیف فرکانسی رد حرکت مغناطیسی شناور، در بعضی فرکانس‌ها دارای

یک قله است و امکان آشکارسازی شناورها با استفاده از این روش مرور شد. مشکلات روش آشکارسازی هوا برد بررسی شد و روش آشکارسازی تک سنسوری جهت کشف شناورهای زیرسطحی پیشنهاد شد. روند تغییرات دامنه‌ی سیگنال دریافتی در این روش بررسی شد و نشان داده شد برای بالا بردن احتمال کشف زیردریایی در این روش، سنسور مغناطیسی می‌بایست در یک ناحیه بهینه نصب گردد. این ناحیه بهینه در زیر سطح به نام عمق بهینه نامگذاری شد و نشان داده شد که این عمق بهینه با افزایش سرعت شناور، زیاد می‌گردد. اما برای شناورها با سرعت‌های کمتر از 15m/s عمق بهینه برای دریافت بیشترین سیگنال، کمتر از ۲۰ متر خواهد بود و برای شناورها با سرعت‌های کمتر از 10m/s این عمق بهینه کمتر از ۶ متر است. عمق بهینه در سرعت‌های کمتر از 10m/s به عمق حرکت زیردریایی بستگی ندارد.

مشارکت نویسندگان

مشارکت همه نویسندگان به یک میزان بوده است.

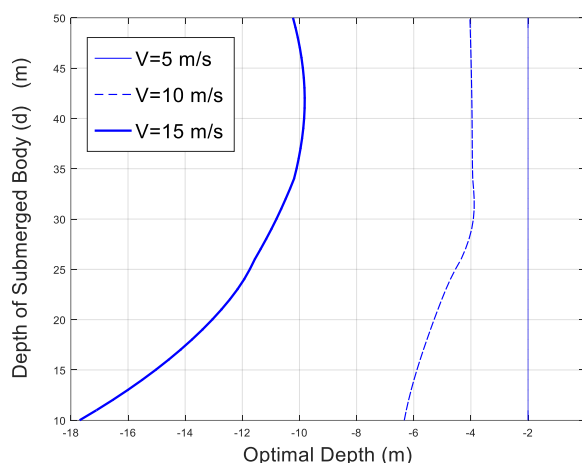
تعارض منافع

هیچ تعارض منافعی برای این مطالعه وجود ندارد.

References

- Chen Y, Feng P, Wu W, Zhu G, Fang. An Innovative Magnetic Anomaly Detection Algorithm Based on Signal Modulation IEEE Transactions on Magnetics. 2020;56(9):1-9. doi: 10.1109/TMAG.2020.3005896
- Han F, Harada S, Sasada I. Fluxgate and Search Coil Hybrid: A Low-Noise Wide-Band Magnetometer, IEEE Transactions on Magnetics. 2012;48:3700-3703. doi: 10.1109/TMAG.2012.2196762
- Mizutani N, Kobayashi T. Magnetic Field Vector Detection in Frequency Domain with an Optically Pumped Atomic Magnetometer, IEEE Transactions on

حرکتی زیاد شده و معمولاً زیردریایی‌های بزرگ با سرعت‌هایی کمتر 10m/s حرکت می‌کنند که این محدودیت، عمق بهینه قرارگیری سنسور را بدون توجه به عمق حرکت زیردریایی، به کمتر از ۶ متر محدود می‌کند. عدم وابستگی عمق بهینه به عمق حرکتی زیردریایی در سرعت‌های کمتر از 10m/s به وضوح در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: عمق بهینه در فواصل مختلف حرکت زیردریایی از سطح آب

Fig.6: Optimal depth at different distances of submarine from the sea surface

اهمیت قرارگیری سنسور در عمق بهینه در شکل ۷ تشریح شده است. برای آشکارسازی زیردریایی که در عمق ۵۰ متری با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در حال حرکت است، دو سنسور یکی در عمق بهینه ۵ متری و دیگری در عمق ۱۰ متری نصب شده‌اند. نویز محیطی دریا از نوع نویز سفید گوسی در نظر گرفته شده و

میزان SNR=-10 dB است. با وجود یکسان بودن تمام پارامترها همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود، با وجود بکارگیری تکنیک آشکارسازی فرکانسی، سنسور نصب شده در عمق ۱۰ متری موفق به کشف زیردریایی نشده در حالیکه سنسور نصب شده در عمق بهینه، زیردریایی را کشف کرده است. هر دو حالت با میزان دریافتی سنسور در ارتفاع ۳۰ متری (منحنی قرمز پررنگ) مقایسه شده‌اند.

- Magnetics. 2012;48:4096-4099. doi: 10.1109/TMAG.2012.2200657
- Newman JN. Marine hydrodynamics, Cambridge, Massachusetts 1977. 432 p.
- Gilman M, A. S, H. G. Study of the Far Wake of a Large Ship. *J Atmospheric Ocean Technol.* 2011;28:720-733. doi: 10.1175/2010JTECHO791.1
- Gu DF, Phillips OM. On narrow V-like ship wakes. *J Fluid Mech.* 1988;275:301-321. doi: 10.1017/S0022112094002375

7. Madurasinghe D. Induced electromagnetic fields associated with large ship wakes. *Wave Motion*. 1994;**20**:283-292. doi: 10.1016/0165-2125(94)90053-1
8. Madurasinghe D, Haack GR. The induced electromagnetic field associated with wakes-signal processing aspects. Proceedings of IGRASS 94, Pasadena, CA1994. 2335-2337 p.
9. Madurasinghe D, Tuck EO. The induced electromagnetic field associated with submerged moving bodies in an unstratified conducting fluid. *IEEE J Ocean Engineer*. 1994;**19**:193-199. doi: 10.1109/48.286641
10. Zou N, Nehorai A. Detection of ship wakes using an airborne magnetic transducer. *IEEE Trans Geoscience Remote Sens*. 2000;**38**:532-539. doi: 10.1109/36.823948
11. Yaakobi O, Zilman G, Miloh T. Detection of the electromagnetic field induced by the wake of a ship moving in a moderate sea state of finite depth. *J Engineer Mathemat*. 2011;**70**:17-27. doi: 10.1007/s10665-010-9410-z
12. Fallah A, Abiri H. Multi-sensor approach in vessel magnetic wake imaging. *Wave Motion*. 2014;**51**:60-76. doi: 10.1016/j.wavemoti.2013.06.004
13. Xu ZH, Du CP, Xia MY. Electromagnetic Fields Due to the Wake of a Moving Slender Body in a Finite-Depth Ocean with Density Stratification. *Sci Rep*. 2018;**8**(1):14647. doi: 10.1038/s41598-018-32789-1 pmid: 30279424
14. Fallah MA. Obtaining Submarine Heading Using Magnetic Wake in Shallow Waters (Persian). *JOC*. 2017;**8**(30):47-52. doi: 10.29252/joc.8.30.47
15. Kostyukov AA. Theory of Ship Waves and Waves Resistance, Effective Communications Inc., Iowa City. 1968. 400 p.
16. Carmichael, Robert S. Practical handbook of physical properties of rocks and minerals 1989.
17. Mavko G. The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media 1998.
18. Robert P. Electrical and Magnetic Properties of Materials, Artech House 1988. 472 p.
19. Sanford TB. Motionally Induced Electric and Magnetic Fields in the Sea. *J Geophysic Res*. 1971;**76**:3476-3492. doi: 10.1029/JC076i015p03476
20. Schon JH. Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics Calculated from field data at Otis MMR, Cape Cod, Massachusetts 1996. 600 p.
21. Akbarinasab M, Sadrinasab M, Bidokhti AA, Chegini V. Investigation of the Effect of Outflow Intrusion the Persian Gulf to the Gulf of Oman on Sound Propagation. (Persian). *JOC*. 2015;**5**(20):11-17.
22. Khalilabadi MR, Sadrinasab M, Chegini V, Akbarinasab M. Three Dimensional Modeling of Nonlinear Internal Waves in the Gulf of Oman Shelf Region. (Persian). *JOC*. 2015;**6**(22):19-28.

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Fallah MA, Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Department of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

mfallah@shirazu.ac.ir

 0000-0001-9799-2955

Monemi M, Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical and Computer Engineering, Salman Farsi University of Kezerun, Kazerun, Iran

monemimahdi@gmail.com

 0000-0003-0258-5156



HOW TO CITE THIS ARTICLE

Citation (Vancouver) Fallah MA, Monemi M, Detection of Submarines Through the Processing of the Magnetic Wake Using a Single Sensor Scheme, *J Oceanography*, 2022, 12(47): 71-80

 <http://doi.org/10.52547/joc.12.47.71>

 <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1671-fa.html>

 <https://orcid.org/0000-0002-8311-5238>

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

