

## کاربرد آشکارسازی غیرفعال ژئومغناطیسی در مراقبت دریایی

محمد امیر فلاح<sup>۱</sup>، استادیار

۱- گروه فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران - mfallah@shirazu.ac.ir

**چکیده:** حرکت شناور در آب دریا باعث ایجاد تغییرات هیدرودینامیکی می شود که به امواج کلونین معروفاند. از سوی دیگر، آب دریا به طور طبیعی دارای رسانایی الکتریکی ضعیفی است. حرکت آب دریا به عنوان یک رسانا در میدان مغناطیسی زمین باعث القاء یک میدان الکترومغناطیسی ضعیف شده که آن را بی هنجاری ژئومغناطیسی گویند. امواج این میدان الکترومغناطیسی قادرند در شرایط خاص تا چندین کیلومتر و تا ساعتها، همچنان به بقاء خود ادامه دهند که امکان مناسبی را جهت کشف حضور شناور توسط آشکارسازهای غیرفعال مغناطیسی ایجاد می کنند. بر این اساس، روش آشکارسازی بی هنجاری ژئومغناطیسی شناور توسط یک حس گر هوابرد، پیشنهاد شده است. معادلات ریاضی حاکم بر بی هنجاری ژئومغناطیسی در دریای با عمق محدود، رابطه این بی هنجاری با پارامترهای شناور نظیر سرعت و جهت حرکت را نشان می دهد. کاربرد بودن ایده پیشنهادی توسط شبیه سازی نشان داده شده و آشکارسازی شناور در حوزه فرکانس انجام شده است. با انجام شبیه سازی در حضور نویز محیطی نشان داده شده که امکان آشکارسازی شناور توسط طیف فرکانسی سیگنال دریافت شده از حس گر هوابرد وجود دارد و تأثیر پارامترهای فیزیکی شناور در تغییر طیف فرکانسی به خوبی مشهود است.

**واژه های کلیدی:** بی هنجاری ژئومغناطیسی، شناور، سرعت، جهت حرکت، مراقبت دریایی، کم عمق، آشکارساز غیرفعال مغناطیسی.

## Application of Geomagnetic Detection in Marine Surveillance

M.Amir Fallah, Assistant Professor<sup>1</sup>

1-Department of Engineering, Payame Noor University (PNU), P.O.Box 19395-4697, Tehran, Iran, Email: mfallah@shirazu.ac.ir

**Abstract:** Vessel traveling at sea causes hydrodynamic anomalies in sea water called Kelvin waves. Motion of conductive sea water due to Kelvin waves in natural Earth's magnetic field makes these waves visible using magnetic transducers. Geomagnetic anomaly induced by the motion of vessels may extend several kilometers and stay up long hours under certain conditions which consider this geomagnetic anomaly as a good candidate in marine surveillance. From remote sensing point of view in this work, we proposed a method for detecting vessel geomagnetic anomaly using an airborne magnetic sensor. Analytical formulations are derived and shown that physical properties of hydrodynamic Kelvin waves in shallow water are directly related to vessel parameters such as speed and traveling direction. Numerical simulations are used to demonstrate the applicability of our results. Vessel detection is performed in frequency domain. It is shown that the proposed detection method is noise robust and can be used to detect a vessel in a noisy ambient. Effect of vessel parameters such as velocity and traveling direction in frequency spectrum of received signal are investigated.

**Keywords:** Geomagnetic anomaly, vessel, velocity, traveling direction, marine surveillance, shallow water, passive magnetic detector.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۶/۱۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۹/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۹/۲۶

نام نویسنده مسئول: محمد امیر فلاح

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - شهرک گلستان - دانشگاه پیام نور.

## ۱- مقدمه

مراقبت دریایی و کنترل تردد عبورمورور از دلایل علاقه‌مندی به کشف حضور اهداف در دریا از زمان‌های دور بوده است. در این میان از زمان کاربردی شدن شناورهای سطحی و زیرسطحی با امکانات پیشرفته در جنگ‌ها و طبیعت مخفی این شناورها، انواع روش‌های کشف در حوزه آبی در دستور کار قرار گرفت.

ظهور و پیشرفت ادواتی نظیر سونار<sup>۱</sup> و لیدار<sup>۲</sup> و رادارهای ماهواره‌ای<sup>۳</sup> را می‌توان دستاورد همین نیاز دانست. اساس کار تمامی این روش‌ها بر این اصل استوار است که حرکت یک شناور در آب باعث ایجاد تغییراتی در محیط سیگنالی پیرامون می‌شود. این محیط سیگنالی می‌تواند طبیعی یا مصنوعی باشد. اگر محیط سیگنالی به‌طور طبیعی موجود باشد، عمل آشکارسازی از نوع غیرفعال<sup>۴</sup> بوده و در غیر این صورت آشکارسازی فعال<sup>۵</sup> خواهد بود.

در این میان گرایش به روش‌هایی نظیر رادارهای ماهواره‌ای سنجش‌ازدور بیشتر است که امکان آشکارسازی هدف را از فاصله دورتری محقق کند [۱]. انتشار امواج آکوستیکی در محیط آب تا فواصل زیاد، دلیل اصلی پیشرفت سونار در محیط زیرآب است، اما مشکل چنین روش‌های قدیمی وجود انواع تکنیک‌های مختلف فریب و اختفاء شناورها جهت مقابله با آن‌هاست [۲]. به تدریج و با پیشرفت کشتی‌ها و زیردریایی‌هایی با سکوت آکوستیکی بالا، سونار دیگر همچون گذشته ابزاری مورد اعتماد نیست و این حس عدم اعتماد، ورود به سایر حوزه‌های سیگنالی جهت کشف اهداف با قابلیت اطمینان بالا را غیرقابل اجتناب می‌سازد. با پیشرفت‌های چشمگیر در بالا بردن حساسیت حسگرهای غیرفعال مغناطیسی، روند دورسنجی در دریا به سمت استفاده از امواج الکترومغناطیسی سوق یافته است [۳-۵].

تشخیص وجود اهداف دریایی با به‌کارگیری ناهنجاری‌های مغناطیسی در کل به دو روش کلی است. در روش اول با استفاده از میدان مغناطیسی طبیعی زمین به‌عنوان یک میدان پیش‌فرض، اقدام به کشف تغییرات این میدان پیش‌فرض بر اثر وجود خاصیت آهنربایی در بدنه شناور می‌کنند [۶]. در واقع این روش که به آشکارسازی بی-هنجاری مغناطیسی (MAD)<sup>۶</sup> معروف است فقط امکان کشف شناورهایی با بدنه فلزی را فراهم می‌کند. از طرف دیگر این روش قدیمی بوده و تکنیک‌های ضد آن که به مغناطیس‌زدایی<sup>۷</sup> معروف‌اند، نیز بسیار پیشرفت کرده است [۷، ۸]. اساس روش دوم بر این اصل استوار است که تغییرات سرعت سیال به‌واسطه حرکت یک جسم شناور در آن باعث ایجاد یک دنباله از اغتشاش‌های سیال در پشت جسم می‌شود که به آن رد هیدرودینامیکی<sup>۸</sup> می‌گویند [۹-۱۱]. رد هیدرودینامیکی دارای دو نوع رژیم میدان نزدیک و میدان دور است. قاعدتاً جهت کشف هدف در فواصل دور، رژیم مدنظر، رژیم میدان دور است که به امواج کلونین معروف‌اند [۱۰، ۱۱].

از طرفی آب دریا به‌طور طبیعی دارای رسانایی الکتریکی ضعیفی است. حرکت آب دریا به‌عنوان یک رسانا در میدان ژئومغناطیس، باعث

القاء یک بی‌هنجاری ژئومغناطیسی ضعیف می‌شود [۱۲]. در واقع وجود امواج کلونین در یک سیال رسانا نظیر آب دریا منجر به تولید یک بی‌هنجاری ژئومغناطیسی می‌شود که خواصی شبیه به امواج کلونین را داراست [۱۳]. خصوصیت اصلی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی ایجادشده توسط شناور، بسط یافتن آن تا فواصل طولانی و تا مدت زیاد است که آن را ابزار مناسبی جهت تشخیص در دریا توسط آشکارسازهای غیرفعال مغناطیسی می‌سازد [۱۵-۱۳]. از طرفی، کشف این بی-هنجاری ژئومغناطیسی وابسته به جنس بدنه نبوده و امکان کشف شناورهایی مجهز به تجهیزات مغناطیس‌زدایی یا شناورهایی با بدنه غیرفلزی نظیر شناورهای فایبرگلاسی یا آلومینیومی را نیز فراهم می‌کند. تاکنون مطالعات زیادی در مورد نحوه تشکیل بی‌هنجاری ژئومغناطیسی در دریاهای عمیق و ارتباط آن با شرایط محیطی و پارامترهای فیزیکی شناور انجام‌شده است [۱۹-۱۳].

در این مقاله در ابتدا الگوی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی ایجادشده در آب‌های کم‌عمق نظیر خلیج فارس و نحوه تغییر آن با افزایش فاصله از شناور را ارائه می‌کنیم. سپس با ارائه الگوی طیفی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی، نشان داده می‌شود که محتوی فرکانسی آن از محتوی فرکانسی نویز ژئومغناطیسی دریا قابل تشخیص است. در ادامه بر اساس روابط تئوری ثابت می‌کنیم که الگوی طیفی این امواج مغناطیسی در آب‌های کم‌عمق با سرعت حرکت شناور رابطه‌ای غیرخطی دارد به‌نحوی که با داشتن این الگوی طیفی، امکان تخمین سرعت شناور وجود دارد. درنهایت با ارائه سناریوی شبیه‌سازی نشان خواهیم داد که به‌کارگیری یک پهپاد و جاروب نواحی حامل بی‌هنجاری ژئومغناطیسی شناور، می‌توان علاوه بر کشف شناور، برآوردی از سرعت آن نیز به دست آورد.

## ۲- مبانی تئوری

حرکت هر جسم شناور درون سیال، در حالت کلی دو رژیم میدان نزدیک و میدان دور از بی‌هنجاری هیدرودینامیکی را ایجاد می‌کند. در اینجا علاقه اصلی به اغتشاش‌های تولیدشده در فاصله زیاد از شناور یا امواج کلونین می‌باشد. تابع پتانسیل سرعت سیال که ناشی از حرکت جسم شناور با سرعت یکنواخت  $V$  بوده و متناظر با جبهه موج با زاویه  $\theta$  نسبت به محور  $x$  است را می‌توان به شکل رابطه ۱ نوشت [۱۱]:

$$\Phi(x, y, z, t, \theta) = \frac{A_0 g \cosh[k_0(z+h)]}{\omega_0 \cosh k_0 h} e^{-i(\omega_0 t + k_0 x \cos\theta + k_0 y \sin\theta)} \quad (1)$$

که در آن  $g$  شتاب جاذبه و  $h$  عمق دریاست. عدد موج  $k_0$  از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$k_0 \tanh k_0 h = \frac{\omega_0^2}{g}, \quad \omega_0 = k_0 V \cos\theta \quad (2)$$

ضریب  $A_0$  نیز از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$A_0 = \frac{2 \omega_0 g}{\cos^3 \theta \pi U^3} \frac{e^{k_0 h} - e^{-k_0 h}}{e^{2k_0 h} - e^{-2k_0 h} - 4k_0 h} K_0 \quad (3)$$

هادی الکتریکی است. اگر چگالی شار الکتریکی را با  $\rho_e$  نمایش دهیم، معادلات ماکسول در سه محیط به شکل معادله ۶ خواهند بود.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_a \epsilon_a \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad z > 0$$

a) air

$$\mu_w \epsilon_w \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_w \sigma_w (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}_T) + \mu_w \rho_e \mathbf{U} \quad -h < z < 0$$

b) fluid

$$\mu_s \epsilon_s \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_s \sigma_s \mathbf{E} \quad z < -h$$

c) soil

(۶)

که در آن  $\mathbf{B}_E$  میدان ژئومغناطیس و  $\mathbf{B}$  بی‌هنجاری ژئومغناطیسی را نشان داده و  $\mathbf{B}_T = \mathbf{B} + \mathbf{B}_E$  است و از آنجاکه بی‌هنجاری ژئومغناطیسی ایجادشده از نظر دامنه بسیار کوچک‌تر از اندازه میدان ژئومغناطیسی است، می‌توان با تقریب بسیار خوب  $\mathbf{B}_T \approx \mathbf{B}_E$  را نوشت. برای حل معادله‌های فوق می‌بایست به طبیعت هارمونیک پارامتر  $\theta$  در معادله ۱ و در نتیجه رفتار هارمونیک  $\mathbf{B}, \mathbf{E}, \mathbf{U}$  نیز توجه کرد. در واقع میدان‌های هارمونیک الکتریکی و مغناطیسی را می‌توان به شکل معادله ۷ نوشت.

$$\begin{aligned} H &= h(\theta, z) e^{-i(\omega_0 t + k_0 x \cos \theta + k_0 y \sin \theta)} \\ E &= e(\theta, z) e^{-i(\omega_0 t + k_0 x \cos \theta + k_0 y \sin \theta)} \end{aligned} \quad (۷)$$

حل هارمونیک تک مؤلفه‌ای بی‌هنجاری ژئومغناطیسی به شکل رابطه ۸ خواهد بود.

$$\begin{aligned} h(\theta, z) &= h^a(\theta, z) e^{-\beta_a z} \tau(z) \\ &+ h^s(\theta, z) e^{\beta_s(z+h)} \tau(-z-h) \\ &+ [h_w^+(\theta, z) e^{\beta_w z} \\ &+ h_w^-(\theta, z) e^{-\beta_w z} + a_w^+(\theta) e^{k_0 z} \\ &+ a_w^-(\theta) e^{-k_0 z}] \tau(z+h) \tau(-z) \end{aligned} \quad (۸)$$

که  $\tau(z)$  تابع پله واحد است و

$$\beta_a^2 = k_0^2 - \epsilon_a \mu_a \omega_0^2$$

$$\beta_w^2 = k_0^2 - \epsilon_w \mu_w \omega_0^2 - i \sigma_w \mu_w \omega_0 \quad (۹)$$

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

$$a_w^+(\theta) = \quad (۱۰)$$

که در آن تابع  $k_0$  معروف به تابع کوشین (Kochin) بوده و به شکل معادله ۴ تعریف می‌شود [۲۰].

$$k_0 = \iint_s I_k(x', y', z') e^{-ik_0(x' \cos \theta + y' \sin \theta)} \cosh k_0(z' + h) dx' dy' \quad (۴)$$

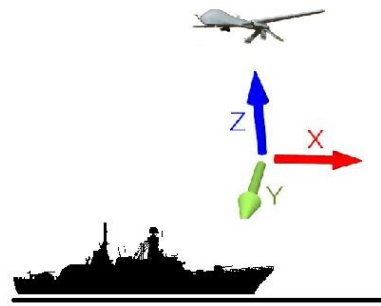
که در آن  $s$  سطح مقطع خیس جسم شناور بوده و  $I_k$  وابستگی تابع کوشین به شکل را بیان می‌کند.

در نهایت بردار سرعت سیال در اثر حرکت شناور را می‌توان از تابع پتانسیل زیر محاسبه کرد:

$$\mathbf{U} = \nabla \phi \quad (۵)$$

## ۲ بی‌هنجاری ژئومغناطیسی

فرض ما بر این است که سطح سیال کاملاً صاف بوده و سیستم مختصات کارتزین مطابق شکل ۱ به نحوی قرار گرفته باشد که محور  $z$  عمود بر سطح سیال بوده و ناحیه  $z > 0$  نیم‌صفحه بالایی سطح سیال باشد.



شکل ۱: آشکارسازی الگوی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی شناور توسط پهپاد

جهت مثبت محور  $x$  در خلاف جهت حرکت جسم شناور قرار داشته و جهت محور  $y$  نیز از قانون دست راست تبعیت می‌کند. بردار  $(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$  بردار واحد مختصات دکارتی است. میدان ژئومغناطیسی زمین  $\mathbf{B}_E$  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  $U$  می‌شود. محیط  $z > 0$  دارای ضریب دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب رسانایی  $(\sigma_a, \epsilon_a, \mu_a)$  است. محیط  $-h < z < 0$  دریای کم عمق دارای ضرایب  $(\sigma_w, \epsilon_w, \mu_w)$  بوده و در نهایت  $z < -h$  محیط بستر با پارامترهای  $(\sigma_s, \epsilon_s, \mu_s)$  خواهد بود. معادله‌های اصلی حاکم بر محیط ژئومغناطیسی سه لایه نامبرده، همان معادله‌های ماکسول حاکم بر میدان الکتریکی و مغناطیسی  $\mathbf{B}, \mathbf{E}$  و قانون اهم در مورد حرکت یک

تبدیل فوریه میدان مغناطیسی دریافت شده توسط حس گر هوابرد را می توان به صورت معادله ۱۵ نوشت:

$$\vec{H}(\omega) = \sum_i \frac{1}{2} \left[ \frac{\vec{F}_d^\theta(\theta)}{\Omega_d(\theta)} \right]$$

$$\vec{F}_d^\theta = \vec{h}_a e^{-\beta_a z} e^{ik_0(x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta)} \quad z > 0$$

a) air

$$\vec{F}_d^\theta = (\vec{a}^+ e^{k_0 z} + \vec{a}^- e^{-k_0 z}) e^{ik_0(x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta)} \quad -h < z < 0$$

b) fluid

$$+ (\vec{h}_f^+ e^{\beta_f z} + \vec{h}_f^- e^{-\beta_f z}) e^{ik_0(x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta)}$$

$$\vec{F}_d^\theta = \vec{h}_b e^{-\beta_b z} e^{ik_0(x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta)} \quad z < -h$$

c) soil

(۱۵)

که در آن

$$\Omega_d(\theta) = \frac{dk_0}{d\theta} V_s \cos(\theta - \alpha) - k_0 V_s \sin(\theta - \alpha) \quad (۱۶)$$

و  $\theta$  ریشه معادله ۱۷ است.

$$\Omega_d(\theta) = 0 \quad (۱۷)$$

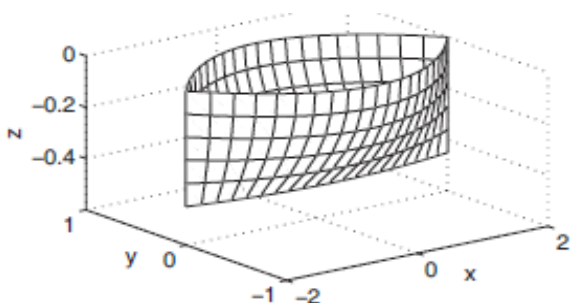
اهمیت ریشه  $\theta$  به این دلیل است که الگوی بی هنجاری ژئومغناطیسی در حوزه طیفی  $\vec{H}(\omega)$  در این نقاط دارای قله می باشد که آن را از طیف نویز محیطی متمایز می کند. از طرفی با توجه به وابستگی ریشه های فوق به متغیر  $k_0$  و ارتباط متغیرهای  $k_0$  و  $V$  در معادله (۲) می توان گفت که با تعیین محل قله های به وجود آمده در طیف فرکانسی  $\vec{H}(\omega)$ ، سرعت حرکت شناور قابل محاسبه است.

#### ۴- شبیه سازی

جهت تحلیل دقیق، در این قسمت میدان مغناطیسی القایی در اثر حرکت یک شناور سطحی در دریای کم عمق، توسط نرم افزار MATLAB شبیه سازی می شود. شکل بدنه شناور، یک سهمی به صورت معادله ۱۸ است که فرم نرمالیزه شده آن در شکل ۲ آمده است.

$$S(x, z) = S_0 \left[ 1 - \left( \frac{x}{L/2} \right)^2 \right] \quad (۱۸)$$

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



شکل ۲: سطح مقطع شناور با ابعاد نرمالیزه

$$\frac{k_0 \sigma_w}{(k_0^2 - \sigma_w^2)} \frac{e^{k_0 h}}{e^{k_0 h} + e^{-k_0 h}} [i(\mathbf{B}_E \cdot \mathbf{r})$$

$$- (\mathbf{B}_E \cdot \mathbf{k})][i \cos \theta, i \sin \theta, 1]$$

$$\mathbf{a}_w^-(\theta) =$$

$$\frac{k_0 \sigma_w}{(k_0^2 - \sigma_w^2)} \frac{e^{k_0 h}}{e^{k_0 h} + e^{-k_0 h}} [i(\mathbf{B}_E \cdot \mathbf{r}) \quad (۱۱)$$

$$- (\mathbf{B}_E \cdot \mathbf{k})][i \cos \theta, i \sin \theta, -1]$$

تمام ضرایب مجهول در معادله (۸) با اعمال شرط مرزی پیوستگی میدان مغناطیسی در مرزهای سه محیط، محاسبه می شوند. همان طور که از معادله (۸) دیده می شود جملات  $h^a(\theta, z)e^{-\beta_a z}$  و  $h^s(\theta, z)e^{\beta_s(z+h)}$  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 مؤلفه های هارمونیک، بی هنجاری ژئومغناطیسی به صورت رابطه ۱۲ خواهد بود.

$$H(x, y, z, t) = \Re \int_{-\pi/2}^{\pi/2} h(\theta, z) A_0 e^{-i(\omega_0 t + k_0 x \cos\theta + k_0 y \sin\theta)} d\theta \quad (۱۲)$$

در صورتی که در معادلات فوق  $h \rightarrow \infty$ ، کلیه جواب ها به جواب در آب-های عمیق میل می کند که معیار مناسبی جهت صحت سنجی است [۱۴].

#### ۳- سناریوی آشکارسازی هوابرد

روش آشکارسازی جهت شناسایی رد مغناطیسی شناور با به کارگیری پهپاد به صورت شکل ۱ است. با استفاده از یک حس گر غیرفعال مغناطیسی هوابرد (نصب شده بر روی پهپاد) و انجام یک جاروب خطی از رد حرکت مغناطیسی شناور، اقدام به آشکارسازی شناور می شود.

فرض کنید که حس گر هوابرد در زمان  $t=0$  در مکان  $(x_0, y_0)$  قرار داشته و با سرعت  $V_s$  و زاویه  $\alpha$  نسبت به محور  $x$  شروع به حرکت کند. معادله پارامتری حرکت حس گر به شکل معادله ۱۳ خواهد بود.

$$x_s = x_0 + (V_s \cos \alpha - V)t \quad (۱۳)$$

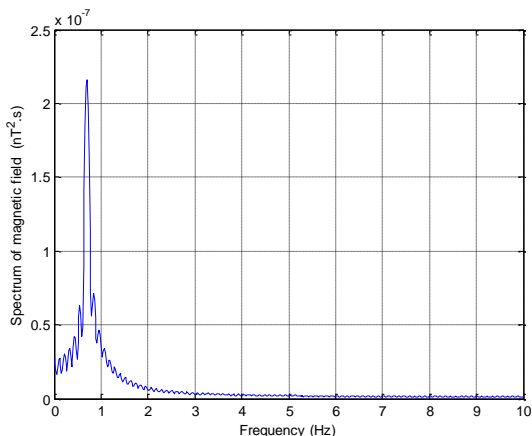
$$y_s = y_0 + (V_s \sin \alpha)t$$

حال با تکیه بر این واقعیت که سرعت حرکت حس گر بسیار بیشتر از سرعت شناور است ( $V_s \gg V$ )، می توان فرم مستقل از مکان میدان کلون الکترومغناطیسی که توسط حس گر هوابرد ثبت می شود را به دست آورد:

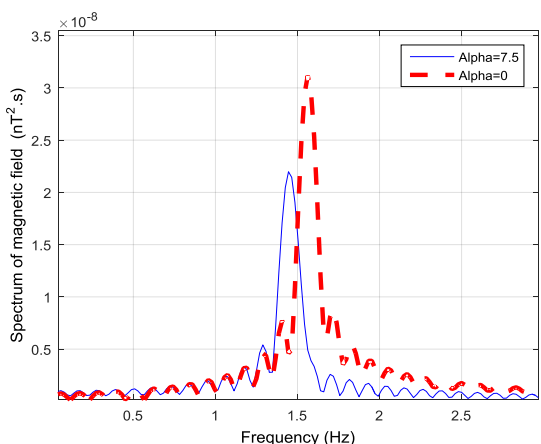
$$\vec{H}(t) = \vec{H}(x_s, y_s, z_s, t) = \vec{H}[x_0 + (V_s \cos \alpha - V)t, y_0 + (V_s \sin \alpha)t, z_s] \quad (۱۴)$$

که فاصله حس گر مغناطیسی از سطح آب است (حرکت حس گر به موازات سطح آب در فاصله ثابت  $z_s$  است).

سیگنال دریافتی در حوزه طیفی شده که موضوعی قابل انتظار است. از طرف دیگر، کاهش سرعت، باعث پخش فرکانس قله طیف به  $f_{02} = 1/56 \text{ Hz}$  شده است که این موضوع در بخش سناریوی آشکارسازی و با توجه به معادله‌های ۱۶ و ۱۷ که وابستگی قله طیف به سرعت شناور را بیان می‌کند، کاملاً قابل توجیه است.



شکل ۴: طیف فرکانسی سیگنال ژئومغناطیسی دریافت شده توسط حس گر  
 $V = 15 \text{ m/s}$  ,  $\alpha = 0^\circ$  ,  $SNR = 2 \text{ dB}$  هوابرد



شکل ۵: مقایسه طیف فرکانسی سیگنال ژئومغناطیسی دریافت شده توسط حس گر هوابرد در دو زاویه متفاوت  $7/5^\circ$  ,  $\alpha = 0^\circ$   
 $V = 10 \text{ m/s}$  ,  $SNR = 2 \text{ dB}$

نکته قابل تأمل دیگر، تأثیر تغییر راستای حرکت حس گر هوابرد بر روند آشکارسازی است که با مقایسه دو منحنی شکل ۵ قابل لمس است. افزایش زاویه  $\alpha$  باعث کاهش دامنه قله طیف از یک طرف و کاهش فرکانس قله طیف از طرف دیگر شده است. افزایش زاویه با راستای شناور در شکل ۵، باعث کاهش ۳۰ درصدی در دامنه دریافتی شده که به نوبه خود احتمال آشکارساز شدن هدف را کاهش می‌دهد؛ همچنین فرکانس قله به  $f_{03} = 1/45 \text{ Hz}$  تغییر یافته است. این تغییر با وجود پارامتر  $\alpha$  در معادله ۱۶ به وضوح قابل پیش بینی است.

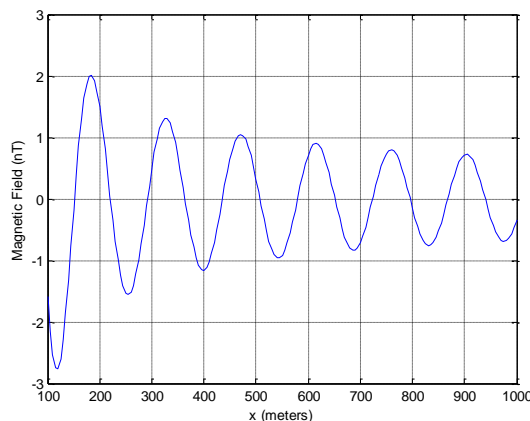
طول شناور  $L = 105 \text{ m}$  و عرض آن  $h_s = 17 \text{ m}$  است. سرعت حس گر مغناطیسی هوابرد ۱۰۰ متر بر ثانیه بوده و زاویه بین راستای حرکت پهپاد و راستای حرکت شناور  $\alpha$  است. محیط دریا سه لایه فرض شده و پارامترهای الکترومغناطیسی لایه‌ها به قرار زیرند:

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

$$(\mu_a, \mu_f, \mu_b) = (\mu_0, \mu_0, \mu_0) \quad (19)$$

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

بر مبنای اصول تئوری بیان شده در قسمت قبل و با فرض وجود نویز سفید گوسی در پس زمینه سیگنال، در ابتدا سعی می‌شود وجود شناور، آشکار گردد؛ آن هم صرفاً از طریق الگوی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی شناور که توسط حس گر مغناطیسی هوابرد ثبت شده است و در ادامه برآوردی از سرعت حرکت شناور را از روی سیگنال دریافت شده، ارائه می‌شود.



شکل ۳: سیگنال ژئومغناطیسی دریافت شده توسط حس گر هوابرد  
 $V = 15 \text{ m/s}$  ,  $\alpha = 0^\circ$  ,  $SNR = 2 \text{ dB}$

شکل ۳ سیگنال دریافت شده توسط حس گر نصب شده روی پهپاد را نشان می‌دهد. پهپاد، الگوی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی شناور را قطع کرده و میزان بزرگی الگو در هر نقطه را ثبت کرده است. مطابق معادله‌های (۱۷-۱۵) انتظار داریم طیف فرکانسی سیگنال  $(\bar{H}(\omega))$  در شکل ۳، در نقاطی که ریشه معادله  $\Omega_d = 0$  است، دارای قله (بستگی  $\omega = 2\pi f$ ) باشد که بر اساس معادله ۱۶، این قله به پارامتر  $k_0$  بستگی دارد. با دقت در معادله ۲، مشاهده می‌شود که پارامتر  $k_0$  به صورت غیرخطی به سرعت شناور وابسته است. همان طور که مشاهده می‌شود، شکل ۴ وجود قله در طیف فرکانسی را نشان می‌دهد. فرکانس قله طیف در شکل ۴ برابر با  $f_{01} = 0/7 \text{ Hz}$  است که کاملاً از نویز زمینه متمایز است و امکان آشکارسازی شناور را میسر می‌سازد. در شکل ۵ به طور هم زمان دو پارامتر نسبت به شکل ۴ تغییر کرده‌اند که عبارت‌اند از سرعت حرکت شناور که از  $V = 15 \text{ m/s}$  به  $V = 10 \text{ m/s}$  تغییر یافته و راستای حرکت پهپاد نسبت به شناور که از  $\alpha = 0^\circ$  به میزان  $7/5^\circ$  افزایش یافته است. مقایسه شکل ۴ با منحنی شکل ۵ (خط ممتد) نشان می‌دهد که کاهش سرعت شناور باعث کاهش دامنه

- [4] N. Mizutani and T. Kobayashi, "Magnetic Field Vector Detection in Frequency Domain with an Optically Pumped Atomic Magnetometer," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 11, pp. 4096 – 4099, Nov 2012.
- [5] F. Han, S. Harada, and I. Sasada, "Fluxgate and Search Coil Hybrid: A Low-Noise Wide-Band Magnetometer," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 11, pp. 3700 – 3703, Nov 2012.
- [6] A. Sheinker, L. Frumkis, B. Ginzburg, N. Salomonski and B. Z. Kaplan, "Magnetic anomaly detection using a three-axis magnetometer," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 160-167, Jan. 2009.
- [7] J. J. Holmes, "Application of models in the design of underwater electromagnetic signature reduction systems", Naval Eng. J., vol. 119, no. 4, pp. 19-29, Nov. 2007.
- [8] D. J. Bekers and E. S. Lepelaars, "Degaussing system design optimization," Proc. 8th Int. Marine Electromagn. Conf.-MARELEC, pp. 16-19, Jul. 2013.
- [9] M. Gilman, A. Soloviev and H. Graber, "Study of the Far Wake of a Large Ship," J. Atmos. Oceanic Technol., vol. 28, pp. 720-733, 2011.
- [10] D. F. Gu and O. M. Phillips, "On narrow V-like ship wakes," J. Fluid Mech., vol. 275, pp. 301-321, 1988.
- [11] J. N. Newman, *Marine hydrodynamics*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1977.
- [۱۲] محمدرضا خلیل آبادی، «مدل سازی عددی آنومالی مغناطیسی ناشی از پارامترهای هیدرو فیزیکی در خلیج فارس»، نشریه علمی پژوهشی الکترومغناطیس کاربردی، سال سوم، شماره ۱، صفحات ۱۳-۷، ۱۳۹۴.
- [13] D. Madurasinghe, "Induced electromagnetic fields associated with large ship wakes," Wave Motion, vol. 20, pp. 283-292, 1994.
- [14] D. Madurasinghe and E.O. Tuck, "The induced electromagnetic field associated with submerged moving bodies in an unstratified conducting fluid," IEEE Journal of Ocean Engineering, vol. 19, pp. 193-199, 1994.
- [15] D. Madurasinghe and GR. Haack, "The induced electromagnetic field associated with wakes-signal processing aspects," Proceedings of IGRASS 94, Pasadena, CA, pp. 2335-2357, 1994.
- [16] N. Zou and A. Nehorai, "Detection of ship wakes using an airborne magnetic transducer," IEEE GEOSCI, vol. 38, no. 1, pp. 532-539, 2000.
- [17] O. Yaakobi, G. Zilman and T. Miloh, "Detection of the electromagnetic field induced by the wake of a ship moving in a moderate sea state of finite depth," Journal of Engineering Mathematics, vol. 70, pp. 17-27, 2011.
- [18] J. T. Weaver, "Magnetic Variations Associated with Ocean Waves and Swell," Journal of Geophysical Research, vol. 70, no. 8, 1965.
- [19] T. B. Sanford, "Motionally Induced Electric and Magnetic Fields in the Sea," Journal of Geophysical Research, vol. 76, no. 15, pp. 3476-3492, 1971.
- [20] A. Kostyukov, *Theory of Ship Waves and Waves Resistance*, Effective Communications Inc., Iowa City, 1968.

## ۵ - نتیجه

مبانی تئوری کشف حضور شناور با استفاده از بی‌هنجاری ژئومغناطیسی تولیدشده در اثر حرکت شناور ارائه شد و با معرفی حوزه طیفی سیگنال الکترومغناطیسی فوق، نشان داده شد که امکان کشف شناور حتی با وجود نویز محیطی نیز وجود دارد. مزیت‌های این روش آشکارسازی نسبت به روش قدیمی MAD، در کشف شناورهایی با بدنه غیرفلزی مورد بحث قرار گرفت. بیان شد که با به‌کارگیری روش آشکارسازی هوابرد می‌توان در زمانی کوتاه، منطقه‌ای وسیع را پوشش داد. سناریوی آشکارسازی هوایی با به‌کارگیری حس‌گر مغناطیسی نصب‌شده روی پهپاد، شبیه‌سازی شد. نشان داده شد که با تعیین مکان قله ایجادشده در حوزه طیفی می‌توان به وجود شناور پی برد؛ به‌علاوه، دامنه و فرکانس قله طیف به پارامترهای شناور نظیر سرعت و جهت حرکت وابسته بود. مشاهده شد که افزایش سرعت شناور، باعث افزایش دامنه و کاهش فرکانس قله طیف سیگنال شده و زاویه‌گرفتن حس‌گر هوابرد از خط سیر شناور، باعث افت دامنه و جابجایی قله فرکانسی می‌شود.

## مراجع

- [۱] منیره کوشش و غلامرضا اکبری‌زاده، «الگوریتم حذف Speckle با قابلیت حفظ لبه برای تصاویر سنجش‌ازدور رادار روزنه ترکیبی با استفاده از تبدیل چندمقیاسه‌ی Curvelet و آستانه‌گذاری وفقی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۴، صفحات ۱۶۱-۱۵۳، ۱۳۹۴.
- [۲] جواد تقی‌زاده و سید علیرضا سیدین، «تصویرسازی در سونار روزنه مصنوعی معکوس چندپایه با استفاده از روش پس‌تابش فیلترشده»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحات ۵۲-۴۱، ۱۳۹۵.
- [3] M. Amir Fallah and Habibolah Abiri, "Multi-sensor approach in vessel magnetic wake imaging," Wave Motion, vol. 51, pp.60-76, 2014.

## زیرنویس‌ها

- <sup>1</sup> Sonar
- <sup>2</sup> Lidar
- <sup>3</sup> SAR
- <sup>4</sup> Passive
- <sup>5</sup> Active
- <sup>6</sup> Magnetic Anomaly Detection
- <sup>7</sup> Degaussing
- <sup>8</sup> Hydrodynamic wake