

تخمین خط سیر شناور زیرسطحی با استفاده از بی‌هنجاری ژئومغناطیسی در آب‌های کم‌عمق

محمدامیر فلاح*

استادیار گروه فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، پست الکترونیکی: mfallah@shirazu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۶/۸/۲۳

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۲۴

چکیده

هدف از مقاله حاضر، ارزیابی روش جدید آشکارسازی شناورهای سطحی و زیرسطحی در آب‌های کم‌عمق، با استفاده از یک سنسور مغناطیسی هواپرد است. در این روش، آشکارسازی برپایه القاء یک بی‌هنجاری ژئومغناطیسی انجام شد که صرفاً با حرکت شناور در دریا ایجاد می‌شود. بدین منظور، در ابتدا یک مدل ریاضی جهت آشکارسازی هوایی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی در آب‌های کم‌عمق، ارزیابی گردید که رابطه این بی‌هنجاری با پارامترهای محیطی و فیزیک شناور را بیان می‌کند. سپس روی مدل ریاضی مذکور با استفاده از آنالیز فرکانسی نشان داده شد که بی‌هنجاری ژئومغناطیسی ناشی از حرکت شناور، دارای مؤلفه‌های فرکانسی خاصی است که آن را از نویز محیطی دریا قابل تفکیک می‌کند. همچنین، شبیه‌سازی برای یک شناور زیرسطحی در دریای کم‌عمق، انجام شد و مشخص گردید که امکان تشخیص این مؤلفه مغناطیسی حتی با وجود نویز شدید محیطی، وجود دارد. در نهایت، با استفاده از آنالیز فرکانسی، زاویه‌ای که خط سیر شناور با جهت حرکت سنسور هواپرد می‌سازد، در چند حالت مختلف تخمین زده شد و مشاهده گردید که خطای تخمین با افزایش زاویه، زیاد می‌شود.

کلمات کلیدی: بی‌هنجاری ژئومغناطیسی، خط سیر، زیردریایی، حسگر مغناطیسی، کم‌عمق.

۱. مقدمه

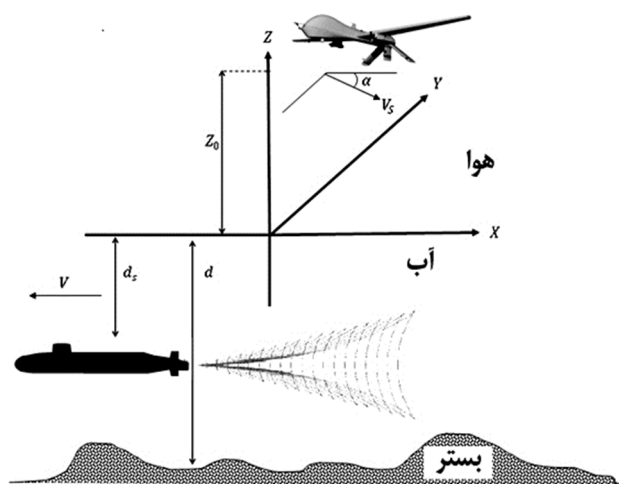
حوزه به طیف‌های فرکانسی است که امکان انتشار در فواصل بیشتر در دریا را دارند.

قدیمی‌ترین روش مورد استفاده در دریا، به‌کارگیری سیگنال‌های صوتی شناورها است. اما به تدریج و با پیشرفت کشتی‌ها و زیردریایی‌هایی با سکوت صوتی زیاد، این روند رو به نقصان است. از طرفی به دلیل افت انتشار بسیار کم سیگنال‌های الکترومغناطیسی فرکانس پایین در دریا و با پیشرفت‌های چشمگیر در بالا بردن حساسیت حسگرهای مغناطیسی، روند دورسنجی در دریا به سمت استفاده از امواج الکترومغناطیسی سوق یافته است (Kawai et al., 1999; Mizutani and Kobayashi, 2012; Han et al., 2012). تغییرات

کشف حضور اهدافی که با چشم غیرمسلح رؤیت نمی‌شوند، به‌طور غریزی مورد توجه بشر بوده است، زیرا باعث ایجاد آمادگی حداقلی برای مواجه شدن با آن هدف می‌گردد. این آمادگی در مرحله بعدی با شناخت هر چه بیشتر آن هدف و مشخصات آن، افزایش می‌یابد. به همین دلیل در حوزه آبی دریا و اقیانوس، ابزاری نظیر رادار و سونار و لیدار و... به‌وجود آمده است و پیشرفت کرده‌اند. در این میان هرچه بتوان از فاصله بیشتری وجود هدف را آشکار ساخت، فرصت بیشتری جهت ایجاد آمادگی برای مواجهه خواهیم داشت و بالطبع علاقه‌مندی در این

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق، فرض بر این است که سطح سیال کاملاً صاف بوده و سیستم مختصات دکارتی به نحوی قرار گرفته است که محور z عمود بر سطح سیال بوده و ناحیه $z > 0$ نیم‌صفحه بالایی سطح سیال باشد (شکل ۱).



شکل ۱: زیردریایی در عمق d_s و سنسور هوابرد در ارتفاع Z_0 از سطح آب

جهت مثبت محور x در خلاف جهت حرکت جسم شناور قرار داشته و جهت محور y نیز از قانون دست راست تبعیت می‌کند. بردار (i, j, k) ، بردار واحد مختصات دکارتی است. میدان ژئومغناطیسی زمین B_E در همه‌جا 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 می‌گردد.

محیط $z > 0$ دارای ضریب دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب رسانایی $(\sigma_a, \epsilon_a, \mu_a)$ است. محیط $-h < z < 0$ دریای کم‌عمق، 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. معادلات اصلی حاکم بر این محیط سه لایه، همان معادلات ماکسول حاکم بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی B, E و قانون اهم در مورد حرکت یک هادی الکتریکی است. اگر چگالی شار الکتریکی را با ρ_e نمایش دهیم، معادلات ماکسول در سه محیط به شکل رابطه ۱ خواهند بود (فلاح و عبیری، ۱۳۹۲).

سرعت سیال به واسطه حرکت یک جسم شناور در آن باعث ایجاد یک دنباله از اغتشاشات سیال در پشت جسم می‌گردد که به آن رد هیدرودینامیکی^۱ می‌گویند (Newman, 1977; Gu and Phillips, 1988; Gilman et al., 2011). از طرفی آب دریا به‌طور طبیعی دارای رسانایی الکتریکی ضعیفی است. حرکت آب دریا به‌عنوان یک رسانا در میدان ژئومغناطیس، باعث القا یک بی‌هنجاری ژئومغناطیسی ضعیف می‌گردد. در واقع رد هیدرودینامیکی در یک سیال رسانا نظیر آب دریا منجر به تولید یک بی‌هنجاری ژئومغناطیسی می‌گردد که خواصی شبیه به رد هیدرودینامیکی را دارا است (Madurasinghe, 1994). خصوصیت اصلی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی 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 (Madurasinghe, 1994; Madurasinghe and Tuck, 1994). تاکنون مطالعات زیادی در مورد نحوه تشکیل این نوع بی-هنجاری ژئومغناطیسی در دریاها عمیق و ارتباط آن با شرایط محیطی و پارامترهای فیزیکی شناور انجام شده است (Madurasinghe, 1994; Madurasinghe and Tuck, 1994; Madurasinghe and Haack, 1994; Zou and Nehorai, 2000; Yaakobi et al., 2011).

الگوی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی ایجاد شده در آب‌های کم‌عمقی نظیر خلیج فارس و نحوه تغییر آن با افزایش فاصله از شناور نیز به‌طور دقیق بررسی شده و با آنالیز طیف فرکانس نشان داده شده است که محتوی فرکانسی آن از محتوی فرکانسی نویز ژئومغناطیسی دریا قابل تشخیص است (فلاح و عبیری، ۱۳۹۲).

در این مقاله سعی بر این است که با استفاده از معادلات حوزه طیفی ارائه شده توسط فلاح و عبیری (۱۳۹۲) به بررسی مسیر حرکت شناور زیرسطحی از روی الگوی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی آن پرداخته شده و زاویه حرکت آن را تخمین بزنیم. در واقع تخمین زاویه حرکت شناور زیرسطحی نسبت به سنسور مغناطیسی این امکان را فراهم می‌کند که بتوان حتی در صورت عدم رؤیت شناور به تعقیب آن پرداخت. همین‌طور اثبات خواهد شد که روند تخمین زاویه معرفی شده در نویزهای شدید محیطی نیز بسیار مطمئن عمل کرده و مقاوم به نویز است.

¹ Hydrodynamic wake

رابطه ۱

$$\nabla \times B = \begin{cases} \mu_0 \epsilon_a \frac{\partial E}{\partial t}, & z > 0 & a) \text{ air} \\ \mu_w \epsilon_w \frac{\partial E}{\partial t} + \mu_w \sigma_w (E + U \times B_T) + \mu_w \rho_e U + \mu_w (\epsilon_w - \epsilon_0) \nabla \times (E + U \times B_T) \times U, & -h < z < 0 & b) \text{ fluid} \\ \mu_s \epsilon_s \frac{\partial E}{\partial t} + \mu_s \sigma_s E, & z < -h & c) \text{ soil} \end{cases}$$

شناسایی رد مغناطیسی شناور زیرسطحی با به‌کارگیری پهپاد بدین شکل است که با استفاده از یک سنسور مغناطیسی هواگرد (نصب‌شده بر روی پهپاد) و گرفتن یک اسکن خطی از رد حرکت مغناطیسی شناور اقدام به آشکارسازی شناور می‌شود.

اگر سنسور هواگرد در زمان $t=0$ در مکان (x_0, y_0) قرار داشته و با سرعت V_s و زاویه α نسبت به محور x شروع به حرکت کند، معادله پارامتری حرکت سنسور به شکل رابطه ۵ خواهد بود.

$$\begin{aligned} x_s &= x_0 + (V_s \cos \alpha - V)t \\ y_s &= y_0 + (V_s \sin \alpha)t \end{aligned} \quad \text{رابطه ۵}$$

حال با تکیه بر این واقعیت که سرعت حرکت سنسور بسیار بیشتر از سرعت شناور است ($V_s \gg V$)، می‌توان فرم مستقل از مکان میدان مغناطیسی بی‌هنجاری که توسط سنسور هواگرد ثبت می‌شود را به‌دست آورد:

$$\vec{H}(t) = \vec{H}(x_s, y_s, z_s, t) = \vec{H}[x_0 + (V_s \cos \alpha - V)t, y_0 + (V_s \sin \alpha)t, z_s] \quad \text{رابطه ۶}$$

که z_s فاصله سنسور مغناطیسی از سطح آب است (حرکت سنسور به موازات سطح آب در فاصله ثابت z_s است). تبدیل فوریه میدان مغناطیسی دریافت شده توسط سنسور هواگرد را می‌توان به‌صورت رابطه ۷ نوشت.

$$\vec{H}(\omega) = \sum_i \frac{1}{2} \left[\frac{\vec{F}_d^{\theta}(\theta)}{\Omega_d(\theta)} \right] \quad \text{رابطه ۷ (الف)}$$

که: (ب)، (ج)، (د)

$$\vec{F}_d^{\theta} = \begin{cases} \vec{h}_a e^{-\beta_a z} e^{ik_0(x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)} & \text{for } z > 0 \\ (\vec{a}^+ e^{k_0 z} + \vec{a}^- e^{-k_0 z} + \vec{h}_f^+ e^{\beta_f z} + \vec{h}_f^- e^{-\beta_f z}) e^{ik_0(x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)} & \text{for } -d < z < 0 \\ \vec{h}_b e^{-\beta_b z} e^{ik_0(x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)} & \text{for } z < -d \end{cases}$$

که در آن

$$\Omega_d(\theta) = \frac{dk_0}{d\theta} V_s \cos(\theta - \alpha) - k_0 V_s \sin(\theta - \alpha) \quad \text{رابطه ۸}$$

و θ ریشه حقیقی در رابطه ۹ است.

$$\Omega_d(\theta) = 0 \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن B_E میدان ژئومغناطیس و B بی‌هنجاری ژئومغناطیسی را نشان داده و $B_T = B + B_E$ است. حل هارمونیک تک مؤلفه‌ای بی‌هنجاری ژئومغناطیسی به شکل رابطه ۲ خواهد بود (فلاح و عبیری، ۱۳۹۲).

رابطه ۲

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

در نهایت با اعمال قانون جمع آثار بر تمام مؤلفه‌های هارمونیک، بی‌هنجاری ژئومغناطیسی کل به‌صورت رابطه ۳ خواهد بود.

رابطه ۳

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

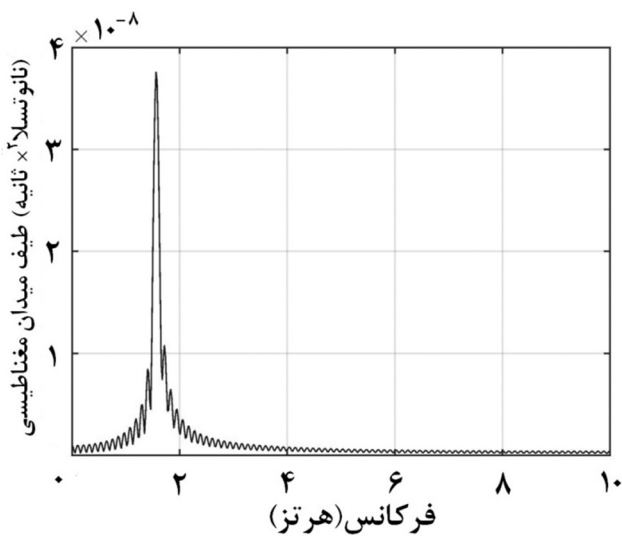
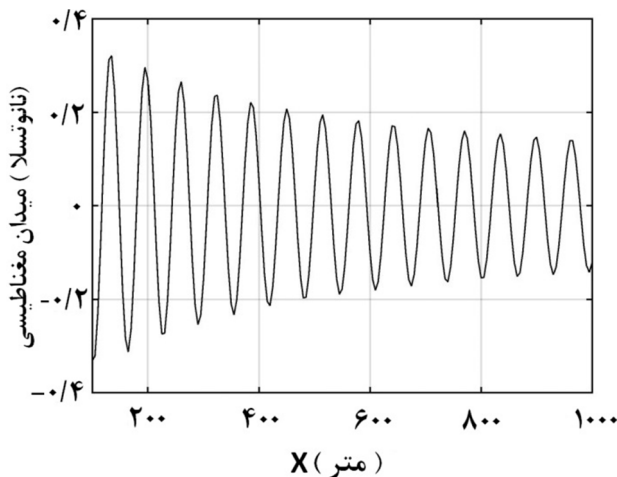
بر پایه مطالعات انجام‌شده توسط فلاح و عبیری (۱۳۹۲)، بی‌هنجاری ژئومغناطیسی در یک نقطه با مختصات (x_d, y_d, z_d) در حوزه طیفی به شکل رابطه ۴ نمایش داده می‌شود.

رابطه ۴

$$\vec{H}(f) = \left[\int_0^t H(x_d, y_d, z_d, t) e^{-i(2\pi f)t} dt \right] = \frac{h(\theta_0, z_d) A(\theta_0) e^{-\beta_a z_d} e^{-i\theta_0(\theta_0)}}{|\theta'(\theta_0)|}$$

طیف فرکانسی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی در مواردی که $|\theta'(\theta_0)| \rightarrow 0$ میل می‌کند، دارای نقطه (فرکانس) ویژه است و دامنه طیفی در این نقطه (فرکانس) یک قله بزرگ خواهد داشت که آن را از نویز محیطی متمایز می‌کند؛ بنابراین با داشتن تغییرات زمانی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی و بردن آن به حوزه طیفی می‌توان با داشتن یک قله فرکانسی به وجود شناور در حال حرکت در دریا یا زیردریا پی برد. با این وصف، روش آشکارسازی جهت

نشان‌دهنده سیگنال دریافت شده توسط سنسور هوابرد در زاویه قطع $\alpha = 0^\circ$ است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد فرکانس قله طیف در شکل ۲ $F_{01} = 1/56 \text{ Hz}$ است که کاملاً از نویز زمینه متمایز است. البته در این حالت میزان نویز، کم در نظر گرفته شده به نحوی که $SNR = +10 \text{ dB}$ است.



شکل ۲: شبیه‌سازی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی شناور زیرسطحی با نسبت سیگنال به نویز $SNR = +10 \text{ dB}$ (الف) سیگنال دریافت شده توسط سنسور هوابرد در بالای سطح آب در ارتفاع $z = 15 \text{ m}$ (ب) طیف فرکانسی سیگنال دریافت شده $\alpha = 0^\circ$ ، $V = 10 \text{ m/s}$ ، $d = 90 \text{ m}$

با تغییر زاویه حرکت پهپاد نسبت به راستای حرکت شناور زیرسطحی به میزان $\alpha = 7/50^\circ$ و هم‌زمان افزایش نویز محیطی به میزان $SNR = -10 \text{ dB}$ در شکل ۳ کماکان امکان تشخیص قله در فرکانس $F_{02} = 1/45 \text{ Hz}$ نسبت به نویز زمینه کاملاً وجود دارد. تغییر فرکانس قله نسبت به شکل ۲ کاملاً توسط معادلات ۱۰ و

اهمیت ریشه θ به این دلیل است که الگوی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی در حوزه طیفی $\vec{H}(\omega)$ ، در این نقاط دارای قله می‌گردد که آن را از طیف نویز محیطی متمایز می‌کند. از طرفی وابستگی ریشه‌های فوق به متغیر α نشان می‌دهد که با تغییر زاویه حرکت سنسور نسبت به شناور، محل قله‌های به‌وجود آمده در طیف فرکانسی $\vec{H}(\omega)$ تغییر می‌کند و با داشتن این ریشه‌ها می‌توان مشخصات حرکت شناور را محاسبه کرد.

۳. نتایج و بحث

در این قسمت بر پایه معادلات ریاضی ارائه شده حاکم بر محیط فیزیکی، امکان کشف یک شناور زیرسطحی با استفاده از یک سنسور مغناطیسی هوابرد را مورد بحث قرار دادیم. شکل بدنه شناور زیرسطحی یک بیضی‌گون افقی به شکل رابطه ۱۰ است.

$$S(x, z) = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{x}{L/2}\right)^2\right] - \left(\frac{z}{h_s}\right)^2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

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

که طول آن $L = 110 \text{ m}$ و شعاع بدنه در آن $h_s = 17 \text{ m}$ است و شناور زیرسطحی در عمق $d_s = 40 \text{ m}$ در زیر آب حرکت می‌کند (ابعاد فوق نزدیک به ابعاد زیردریایی‌های کلاس‌های Seawolf-class، USS Los Angeles و Virginia-class است).

سرعت سنسور مغناطیسی هوابرد ۱۰۰ متر بر ثانیه بوده و با زوایای مختلف α رد مغناطیسی شناور را قطع می‌کند. محیط دریا سه لایه فرض شده و پارامترهای الکترومغناطیسی لایه‌ها به‌قرار زیر هستند (Carmichael, 1989; Mavko, 1998).

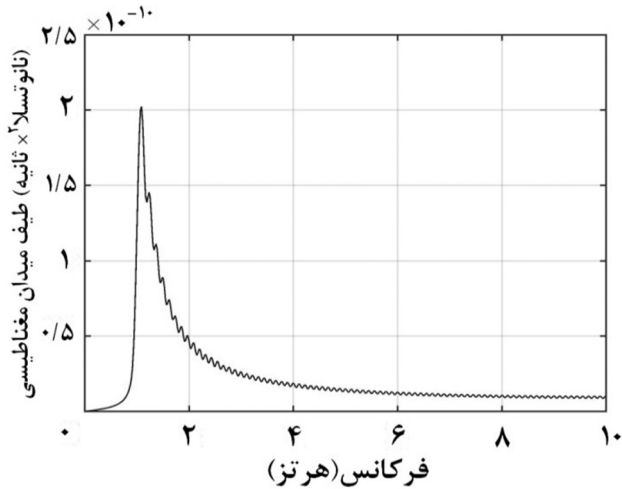
$$(\varepsilon_a, \varepsilon_f, \varepsilon_b) = (\varepsilon_0, 81\varepsilon_0, 10\varepsilon_0)$$

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

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

در ادامه با فرض وجود نویز سفید گوسی در پس‌زمینه سیگنال، جهت حرکت شناور را از روی سیگنال دریافت شده از سنسور مغناطیسی هوابرد تعیین کردیم. در ابتدا میدان مغناطیسی شبیه‌سازی شده در شکل ۲ مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۲ الف

زاویه قطع واقعی $\alpha = 7/5^0$ و $SNR = -10\text{ dB}$ میانگین زاویه تخمین زده شده برابر با $\alpha_{est2} = 7/6^0$ و برای شکل ۴ با زاویه قطع واقعی $\alpha = 18^0$ و $SNR = -10\text{ dB}$ مقدار $\alpha_{est3} = 18/5^0$ را به دست می‌دهد.



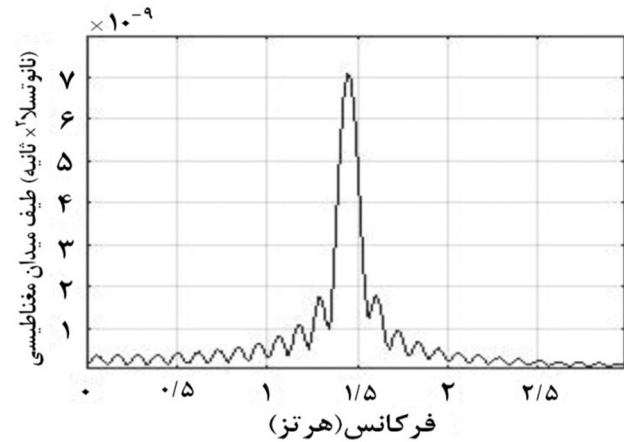
شکل ۴: شبیه‌سازی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی شناور زیرسطحی با نسبت سیگنال به نویز $SNR = -10\text{ dB}$ طیف سیگنال دریافت شده توسط سنسور هوابرد در بالای سطح آب در ارتفاع $Z = 15\text{ m}$ ، $\alpha = 18^0$ ، $V = 10\text{ m/s}$ ، $d = 90\text{ m}$

با مقایسه مقادیر زوایای تخمین زده شده α_{est1} ، α_{est2} ، α_{est3} مشاهده می‌شود که میزان خطا در برآورده زاویه α با افزایش این زاویه، زیاده‌تر شده است. بدین معنی که هرچه راستای سنسور هوابرد با راستای حرکت شناور بیشتر زاویه بگیرد، میزان خطا در تخمین زاویه سمت شناور افزایش می‌یابد.

۴. نتیجه‌گیری

با نگاهی اجمالی به سناریوهای شبیه‌سازی ارائه شده، می‌توان گفت مهم‌ترین مزیت روش آشکارسازی هوابرد جستجوی سریع منطقه جهت آشکارسازی شناور هدف است؛ اما در مقابل مشاهده گردید که به علت افزایش ارتفاع از سطح دریا و افت دامنه میدان القایی در محل سنسور هوابرد و بالطبع کاهش نسبت سیگنال به نویز، دامنه منطقه جستجو از این حیث محدود می‌گردد؛ اما حتی با وجود نویز پس‌زمینه، نشان داده شد که با انتقال به حوزه طیفی می‌توان وجود شناور را آشکار کرد. همچنین، زاویه خط سیر شناور زیرسطحی نیز نسبت به پهپاد نیز تخمین زده شد و مشاهده گردید که افزایش زاویه قطع سنسور نسبت به خط سیر شناور، باعث کاهش دامنه قله در طیف فرکانسی و افزایش خطای تخمین

۱۱ پیش‌بینی شده بود چراکه فرکانس قله کاملاً وابسته به زاویه α است.



شکل ۳: شبیه‌سازی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی شناور زیرسطحی با نسبت سیگنال به نویز $SNR = -10\text{ dB}$ طیف سیگنال دریافت شده توسط سنسور هوابرد در بالای سطح آب ارتفاع $Z = 15\text{ m}$ ، $\alpha = 7/5^0$ ، $V = 10\text{ m/s}$ ، $d = 90\text{ m}$

تفاوت دیگر منحنی طیف فرکانسی نسبت به شکل ۲ کاهش ارتفاع قله است که می‌تواند به دو دلیل باشد. دلیل احتمالی اول، کاهش نسبت سیگنال به نویز است و علت احتمالی دوم تغییر زاویه α است. جهت بررسی این دو مورد، در سناریوی بعدی نسبت سیگنال به نویز را بدون تغییر گذاشته و زاویه قطع را به مقدار $\alpha = 18^0$ افزایش می‌دهیم. همان‌طور که انتظار می‌رفت در اثر تغییر زاویه α فرکانس قله طیف نیز به مقدار $F_{02} = 1/0.9\text{ Hz}$ رسیده است (شکل ۴)، درعین حال بازهم ارتفاع قله نسبت به شکل ۳ کاهش یافته است که در این مورد به دلیل عدم تغییر سیگنال به نویز نسبت به شکل ۳، علت اصلی کاهش ارتفاع قله، افزایش زاویه α است. در واقع با افزایش زاویه حرکت سنسور نسبت به خط سیر شناور زیرسطحی، تشخیص قله طیف از نویز زمینه مشکل‌تر خواهد بود.

همان‌طور که بیان شد، بر اساس رابطه‌های ۸ و ۹، با داشتن سیگنال مغناطیسی سنسور هوابرد و تخمین قله موجود در طیف فرکانسی آن، می‌توان زاویه قطع α را تخمین زد. به علت وجود نویز گوسی پس‌زمینه که در هر بار اجرای شبیه‌سازی تغییر می‌کند، جهت تخمین دقیق‌تر، میانگین ۱۰ اجرا را در هر مورد ملاک تخمین قرار دادیم.

در سناریوی شکل ۲، با زاویه قطع واقعی $\alpha = 0^0$ و $SNR = +10\text{ dB}$ میانگین زاویه تخمین زده شده در ۱۰ اجرا برابر با $\alpha_{est1} = 0/0.5^0$ است. همین روند برای سناریوی شکل ۳ با

- detection in frequency domain with an optically pumped atomic magnetometer. *IEEE Transactions on Magnetic*, 48(11): 4096-4099.
- Madurasinghe, D., 1994. Induced electromagnetic fields associated with large ship wakes. *Wave Motion*, 20: 283-292.
- Madurasinghe, D.; Haack, GR., 1994. The induced electromagnetic field associated with wakes-signal processing aspects. *Proceedings of IGRASS 94*, Pasadena, CA, 2335-2357.
- Madurasinghe, D.; Tuck, E.O., 1994. The induced electromagnetic field associated with submerged moving bodies in an unstratified conducting fluid. *IEEE Journal of Ocean Engineering*, 19: 193-199.
- Mavko, G., 1998. *The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media*. Cambridge University Press. 414-436PP.
- Newman, J.N., 1977. *Marine hydrodynamics*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press. 270-281PP.
- Yaakobi, O.; Zilman, G.; Miloh, T., 2011. 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*, 70: 17-27.
- Zou, N.; Nehorai, A., 2000. Detection of ship wakes using an airborne magnetic transducer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38: 532-539.
- می‌شود. در نهایت، شبیه‌سازی میدان مغناطیسی با پس‌زمینه نویز نشان داد که روش سنسور هوابرد نسبت به وجود نویز تا حدود زیادی مقاوم بوده و امکان اشتباه در آشکارسازی اولیه و همچنین میزان خطا در تعیین زاویه قطع را کاهش می‌دهد.

منابع

- فلاح، م.؛ عبیری، ح.، ۱۳۹۲. مدل‌سازی بی‌هنجاری ژئومغناطیسی ناشی از حرکت جسم شناور در دریا. نشریه علمی- پژوهشی اقیانوس‌شناسی، دوره ۴، شماره ۱۶، صفحات ۱۰۸-۱۰۱.
- Carmichael, R.S., 1989. *Practical handbook of physical properties of rocks and minerals*. CRC Press. 301-314PP.
- Gilman, M.; Soloviev, A.; Graber, H., 2011. Study of the far wake of a large ship. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 28: 720-733.
- Gu, D.F.; Phillips, O.M., 1988. On narrow v-like ship wakes. *Journal of Fluid Mechanics*, 275: 301-321.
- Han, F.; Harada, S.; Sasada, I., 2012. Fluxgate and search coil hybrid: a low-noise wide-band magnetometer. *IEEE Transactions on Magnetic*, 48(11): 3700-3703.
- Kawai, J.; Uehara, G.; Kohrin, T.; Ogata, H.; Kado, H., 1999. Three axis squid magnetometer for low-frequency geophysical applications. *IEEE Transactions on Magnetic*, 35(5): 3974-3976.
- Mizutani, N.; Kobayashi, T., 2012. Magnetic field vector