



# الگوریتم کالیبراسیون پس گام برای مغناطیسسنج سه-محوره با کاربرد در روندههای زیرسطحی خودگردان همراه با انحرافات مغناطیسی

حسین نورمحمدی'، محمد تقی ثابت ۲

استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالکاشتر،مازندران، ایران Hnourmohammadi@mut.ac.ir استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالکاشتر،مازندران، ایران Sabet\_mt@mut.ac.ir

دريافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۸ ويرايش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴ پذيرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵

**چکیده**: تخمین زاویهی سمت یکی از چالشهای اساسی در سامانههای ناوبری اینرسی ارزانقیمت است. عدم مشاهدهپذیری زاویهی سمت از شمال با بردار شتاب جاذبه و همچنین عدم دسترسی به ناوبری رادیویی/ماهوارهای در روندههای زیرسطحی بر میزان این چالش میافزاید. استفاده از مغناطیس سنج سه-محوره و تخمین زاویهی سمت با میدان مغناطیسی زمین یکی از راهکارهای اساسی برای بهبود دقت سامانههای ناوبری اینرسی ارزانقیمت است. اما، برای دستیابی به تخمین دقیق از زاویهی سمت، کالیبراسیون مناسب مغناطیس سنج از نظر خطای اندازه گیری حسگر و همچنین حضور انحرافات مغناطیسی، ضروری است. هدف از این مقاله، طراحی یک الگوریتم پس گام برای کالیبراسیون مغناطیس سنج در اندازه گیری مولفههای میدان مغناطیسی زمین است. در الگوریتم پیشنهادی، نتایج روش رایج کالیبراسیون مغناطیسی کروی، با ارائهی راهکاری بر مبنای تفکیک کانال عمودی و مولفههای میدان در صفحهی تراز اصلاح خواهند شد. ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، در آزمونهای میدانی ییادهسازی شده روی یک روندهی زیرسطحی خودگردان انجام می گیرد.

**کلمات کلیدی**: مغناطیس سنج سه محوره، کالیبراسیون پس گام، روندههای زیرسطحی، ناوبری اینرسی ارزان قیمت.

# Back-stepping calibration algorithm for three-axial magnetometer applied to autonomous underwater vehicles with magnetic deviations

Hossein Nourmohammadi, Mohammad Taghi Sabet

**Abstract:** Heading estimation is one of the main challenges in low-cost inertial navigation systems (INSs). Non-observability of heading angle with gravitational acceleration vector as well as inaccessibility of radio/satellite navigation in underwater vehicles increases the value of this challenge. Applying three-axis magnetometer and heading estimation from earth magnetic field components is one of the main approaches to accuracy enhancement of the low-cost inertial navigation systems. However, in order to achieve accurate heading estimation, the magnetometer must be appropriately calibrated for both sensor errors and presence of magnetic deviations. This paper aims to develop back-stepping algorithm for magnetometer calibration applied to measure the earth magnetic field components. In the proposed algorithm, the results of the prevalent spherical magnetic calibration are corrected based on vertical channel decomposition and magnetic field components in the horizontal plane. The algorithm is evaluated in the field tests executed on an Autonomous Underwater Vehicle (AUV).

**Keywords:** Three-axis magnetometers, Back-stepping calibration, Underwater vehicles, Low-cost inertial navigation.

#### ۱- مقدمه

امروزه، روندههای زیرسطحی خودگردان نقش قابل ملاحظهای در انجام بسیاری از ماموریتهای دریایی آشکار یا پنهان از جمله عملیات جست وجو و بازرسی، نقشه برداری، بستر شناسی و جمع آوری اطلاعات ايفا مي كنند. بديهي است كه داشتن ناوبري دقيق يك مسألهي كليدي در این روندههای خودگردان و ماموریت آنها است. سامانهی ناوبری اینرسی یکی از روش های رایج در ناوبری رونده های بدون سرنشین زیرسطحی است؛ به ویژه زمانی که طراحی سامانهی ناوبری *ارزانقیمت* به عنوان یک الزام سیستمی مطرح باشد. پیشرفت فناوری در حوزهی سیستمهای میکروالکترومکانیکی و پیدایش حسگرهای اینرسی ارزانقیمت منجر به تحولات چشمگیری در سامانههای ناوبری اینرسمی شد. نکتهی حائز اهمیت این است که در صورت استفاده از حسگرهای اینرسی ميكروالكترومكانيكي، دقت تخمين وضعيت و موقعيت به شـدت تحت تاثیر خطای این حسـگرها قرار می گیرد. بنابراین، کاربرد سـامانههای ناوبري اينرسي منفرد" (غير تلفيقي) به شدت محدود مي شود [١]. اين موضوع، انگیزهی اصلی توسعهی سامانههای ناوبری اینرسی تلفیقی ٔ است که نوع رایج آن استفاده از سامانه های ناوبری ماهوارهای جهانی<sup>۵</sup> در کنار ناوبری اینرسمی است [۲]. اما، در برخی کاربریها نظیر روندههای زيرسطحي خودگردان امكان بكار گيري ناوبري راديوي/ماهوارهاي وجود ندارد و لازم است از راهکارهای دیگری برای جلوگیری از رشد خطای ناوبري اينرسي استفاده شود.

استفاده از مغناطیس سنج سه-محوره<sup>9</sup> راهکاری مناسب برای بهبود تخمین زاویهی سمت از شمال در سامانهی ناوبری اینرسی است. لازم به ذکر است که تخمین درست زاویهی سمت نقشی تعیین کننده در جلوگیری از رشد خطای ناوبری در الگوریتمهای بر پایهی محاسبات مرده<sup>۷</sup> خواهد داشت. اما، برای استخراج زاویهی سمت از شمال با دقت قابل قبول از یک مغناطیس سنج سه-محوره لازم است که:

اولاً، منابع خطای حسگر به درستی شناسایی و تخمین زده شوند.

ثانیاً، مولفههای میدان مغناطیسی زمین به درستی از منابع میدان خارجی و اغتشاشات مغناطیسی جداسازی شوند.

در صورت عدم اعمال کالیبراسیون مناسب برای بر آوردن موارد فوق، وجود خطا در تخمین زاویهی سمت با مغناطیس سنج، اجتناب ناپذیر است. این موضوع، محوریت اصلی پژوهش حاضر را تشکیل می دهد. در ادامهی این بخش، ابتدا مروری بر ادبیات موضوع و فعالیت های پیشین شده و سپس به بیان اهداف و جنبههای نو آوری مقاله پرداخته می شود. مسالهی کالیبراسیون مغناطیس سنج در پژوهش های متعددی مورد توجه قرار گرفته است. در اواخر قرن بیستم، روشی برای کالیبراسیون

زاویهی سـمت مغناطیسـی توسـط مرکز تصـویربرداری و نقشـهبرداری NIMA در آمریکا ارائه و تحت عنوان الگوریتم کالیبراسیون چرخشی^ منتشر شد [۳]. الگوریتم کالیبراسیون چرخشی به طور مستقیم روی زاویهی سمت اعمال می شود. لزوم در اختیار داشتن یک مقدار مرجع از زاویهی سمت از شمال، مهمترین محدودیت روش کالیبراسیون چرخشی است. برای این منظور، معمولاً از یک صفحهی مندرج شده از ۰ تا ۳۶۰ درجه استفاده میشود. نکتهی حائز اهمیت این است که برخی از ضرایب كاليبراسيون چرخشي تابع اندازهي ميدان مغناطيسي محلى هستند. به همين دلیل اگر روندهی تحت ناوبری در منطقهی دریایی وسیعی حرکت کند، شاید نیاز به چند مرحله کالیبراسیون در طول زمان شناوری باشد. از این رو، در کنار روش فوق، روش های کالیبراسیون میدان مغناطیسی (نه كاليبراسيون زاويهي سمت) نيز مطرح شدند. برخلاف روش كاليبراسيون چرخشمی، در روشهای کالیبراسیون میدان، مولفههای بردار میدان مغناطیسی اندازه گیری شده از مغناطیس سنج سه-محوره بر اساس مقادیر مرجع بردار میدان مغناطیسی زمین کالیبره می شوند. در دسته ی اول از روشهای کالیبراسیون مغناطیسسینج، بر کمینه کردن اختلاف بین اندازهی میدان اندازه گیری شده توسط مغناطیس سنج و اندازهی میدان مغناطیسی محلی زمین تمرکز شده است [۴]. در دستهی دوم از روشهای کالیبراسیون مغناطیس سنج، به جای اندازهی میدان به مولفه های میدان پرداخته شــد. منطق این روشها بر این اسـاس اســت که مکان هندســی مولفههای بردار میدان مغناطیسی در یک نقطه، یک کره به شعاع اندازهی میدان مغناطیسی محلی آن نقطه خواهد بود. بنابراین مسالهی کالیبراسیون به مسالهي انطباق بردار ميدان مغناطيسي از مكان هندسي بيضوي (كاليبره نشده) به کروی (کالیبره شده) خلاصه می شود [۵]، [۶] و [۷]. علاوه بر دو دستهی فوق، فعالیتهای متعدد دیگری نیز انجام شده است که به عنوان مثال مي توان به فرمولبندي هاي متنوع ارائه شده در مرجع [۸] در خصوص کالیبراسیون مغناطیسی اشاره کرد. در مرجع [۹] به ارائهی الگوریتمی با ساختارهای سری دو مرحلهای برونخط و برخط برای کالیبراسیون روی برد حسگر مغناطیسی پرداخته شده است. در رویکرد دیگری که برای کاربردهای بلادرنگ مناسب است، از فیلتر کالمن توسعهیافته برای استخراج پارامترهای کالیبراسیون مغناطیس سنج استفاده شده است [۱۰]. در مرجع [۱۱] نیز با تلفیق روش،های تخمین کمینه مربعات بازگشــتی و بيشينه احتمال به كاليبراسيون مغناطيس سنج سـه-محوره پرداخته شـده است. در برخی فعالیتها هم، به مسالهی هممحوری در کالیبراسیون مغناطیس سنج سه-محوره پرداخته شده است [۱۲] و [۱۳]. با توجه به اینکه به طور عمده از مغناطیس سنج سه-محوره در تخمین زاویهی سمت بدست آمده از ناوبری اینرسی استفاده می شود، هممحوری این حسگر با واحد اندازه گیری اینرسی از اهمیت بالایی برخوردار است. برخی دیگر

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Three-Axial Magnetometer (TAM)

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Dead Reckoning (DR)

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Swinging Calibration

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) <sup>2</sup> Micro-Electro Mechanical Systems (MEMS)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Stand-alone Inertial Navigation Systems

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Integrated Inertial Navigation Systems

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Global Navigation Satellite System (GNSS)

از فعالیت ها بر طراحی و ساخت سامانه های خود کار برای انجام کالیبراسیون مغناطیس سنج، البته با در نظر گرفتن الزاماتی نظیر استفاده از موتور پیزوالکتریک و انتخاب مواد از جنس پلاستیک، آلومینیوم، برنج و شیشه (موادی که فاقد خواص مغناطیسی هستند) متمرکز شدهاند، که از جملهی آنها می توان به مرجع [1۴] اشاره کرد.

مرور بر ادبیات موضوع حاکی از آن است که فعالیتهای متعددی در حوزهی کالیبراسیون مغناطیسی با هر دو روش کالیبراسیون چرخشی و کالیبراسیون مغناطیسی کروی صورت گرفته است. همچنین، استفاده از زاویهی سـمت بدست آمده از مغناطیسسنج به عنوان یک اندازه گیری کمکی در ساماًنههای ناوبری اینرسی مورد استفاده قرار می گیرد [1۵].

لازم به ذکر است که از نظر ترتیب، کالیبراسیون مغناطیسی کروی مقدم بر الگوریتم کالیبراسیون چرخشی است و به همین خاطر در برخی مراجع با عنوان کالیبراسیون اولیه نیز نام برده می شود. به عبارت دیگر، در صورتی که کالیبراسیون مولفه های میدان به درستی انجام نگیرد، کالیبراسیون چرخشی نیز ممکن است به نتایج نامطلوبی منجر شود. در مقالهی حاضر نیز بر الگوریتم کالیبراسیون مغناطیسی کروی تمرکز می شود. هدف اصلی از این مقاله، ارائه ی راهکاری برای بهبود عملکرد الگوریتم کالیبراسیون مغناطیسی کروی در شرایط میدانی و با در نظر گرفتن الزامات عملیاتی و در حضور تداخلهای مغناطیسی است. جنبه های اصلی نو آوری مقاله به شرح زیر هستند.

- الف) توســعـهی الگوریتم کـالیبراســیون پسگمام برای کـالیبراســیون مغناطیسسنج سه-محوره
- ب) اصلاح ضرایب کالیبراسیون مولفههای میدان مغناطیسسنج بر اساس پیکرهبندی چند-کاناله با تفکیک کانالهای عمودی و فراز
- ج) ارائهی ســناریوی عملی در جهت ارزیابی و بهبود نتایج کالیبراســیون مغناطیسی با در نظر گرفتن مسائل و محدودیتهای عملیاتی
- د) ارائهی الگوریتمی با عملکرد قابل قبول در شرایطی که امکان دوران کامل روندهی حامل حسگر مغناطیس سنج در جهتهای مختلف وجود ندارد.

ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در آزمون میدانی دریایی و با پیادهسازی در سامانهی ناوبری یک روندهی زیرسطحی بدون سرنشین انجام می گیرد. لازم به ذکر است که روندهی در نظر گرفته شده برای آزمون میدانی شامل انواع عوامل ایجاد اختلالهای مغناطیسی است.

#### ۲- مدل اندازه گیری مغناطیس سنج

در صورت اعمال کالیبراسیون دقیق، خروجی مغناطیسسنج سه-محوره، بردار میدان مغناطیسی محلی زمین خواهد بود. در چنین شرایطی، مکان هندسی بردار اندازه گیری شده توسط حسگر در دستگاه مختصات سه-بعدی، تشکیل یک کره به شعاع شدت میدان مغناطیسی محلی زمین

میدهد. مولفههای اصلی میدان مغناطیسی زمین شامل زاویهی شیب مغناطیسی'، زاویهی انحراف مغناطیسی<sup>۲</sup> و شدت میدان مغناطیسی<sup>۳</sup> هستند که در شکل ۱ نشان داده می شوند.



از آنجایی که خطوط میدان مغناطیسی زمین بر سطح زمین منطبق نیستند، همواره بین شدت میدان مغناطیسی زمین و سطح افقی (سطح تراز)، زاویه وجود دارد. به این زاویه ی بین بردار میدان مغناطیسی و سطح تراز، زاویه ی شیب مغناطیسی (۵) گفته می شود. ضمن حرکت از استوا به سوی قطبها، شیب مغناطیسی افزایش مییابد. مولفه ی دوم، زاویه ی انحراف مغناطیسی (۲) است که در واقع زاویه ی بین شمال مغناطیسی و شمال حقیقی (جغرافیایی) است. جهت شمال مغناطیسی نیز از تصویر بردار میدان مغناطیسی زمین در صفحه ی تراز حاصل می شود. زاویه ی انحراف مغناطیسی در نقاط مختلف روی زمین، متفاوت بوده و با زمان تغییر می کند. مولفه ی سوم، شدت میدان مغناطیسی ( $H_0$ ) است که برابر با اندازه ی بردار میدان مغناطیسی ( $H_0$ ) است که برابر بردار میدان مغناطیسی در دستگاه ناوبری ( $H_0$ )، به صورت زیر تشکیل بردار میدان مغناطیسی در دستگاه ناوبری ( $H_0$ )، به صورت زیر تشکیل می شود.

$$\boldsymbol{H}^{n} = \begin{bmatrix} H_{0} \cos \delta \cos \gamma \\ H_{0} \cos \delta \sin \gamma \\ H_{0} \sin \delta \end{bmatrix}$$
(1)

استخراج زاویهی سمت از شمال از مغناطیس سنج سه-محوره با استفاده از رابطهی انتقال بردار میدان مغناطیسی از دستگاه بدنه به دستگاه ناوبری انجام می گیرد.

$$\boldsymbol{H}^{b} = \boldsymbol{C}_{n}^{b} \boldsymbol{H}^{n}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_{x} \\ \boldsymbol{H}_{y} \\ \boldsymbol{H}_{z} \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{n}^{b} \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_{0} \cos \delta \cos \gamma \\ \boldsymbol{H}_{0} \cos \delta \sin \gamma \\ \boldsymbol{H}_{0} \sin \delta \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{H}_{0} = \sqrt{\left(\boldsymbol{H}_{x}^{2} + \boldsymbol{H}_{y}^{2} + \boldsymbol{H}_{z}^{2}\right)}$$

$$(\boldsymbol{\Upsilon})$$

که  $H^b$ ، بردار میدان مغناطیسی اندازه گیری شده توسط حسگر در دستگاه بدنه است. ماتریس  $C_n^b$ ، ماتریس انتقال از دستگاه ناوبری به دستگاه بدنه است و بر اساس ترتیب Z-Y-X از زوایای اویلر به صورت زیر بیان می شود [۱۶].

<sup>3</sup> Magnetic Field Intensity

- <sup>1</sup> Angle of Dip <sup>2</sup> Declination Anal
- <sup>2</sup> Declination Angle

حسين نورمحمدي، محمدتقي ثابت

	$\left(\pi/2\right)$	$M_1 = 0 \& M_2 < 0$	
	$3\pi/2$	$M_{_1} = 0 \& M_{_2} > 0$	
	0	$M_1 > 0 \& M_2 = 0$	(1)
$\psi_M = $	$\pi - \operatorname{atan}(M_2 / M_1)$	$M_{_{1}} < 0$	$(\mathbf{N})$
	$2\pi - \operatorname{atan}(M_2 / M_1)$	$M_{_1} > 0 \& M_{_2} > 0$	
	$-\operatorname{atan}(M_2/M_1)$	$M_{\star} > 0 \& M_{\star} < 0$	

مسالهی اصلی در تخمین زاویهی سمت با مغناطیس سنج این است که میدان مغناطیسی اندازه گیری شده توسط حسگر، باید همان میدان مغناطیسی زمین باشد. در صورت وجود اغتشاشات مغناطیسی خارجی و همچنین خطای اندازه گیری حسگر، تخمین زاویهی سمت با خطا مواجه خواهد شد. به همین خاطر، الگوریتمهای کالیبراسیون مغناطیسی در بهبود دقت تخمین زاویهی سمت از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

#### ۳- کالیبراسیون مغناطیسسنج سه-محوره

کالیبراسیون میدان مغناطیسی (که با نام کالیبراسیون مغناطیسی کروی رایج است) و کالیبراسیون چرخشی (برای تخمین زاویهی سمت از شمال) دو روش بنیادی در کالیبراسیون مغناطیسسنج سه-محوره هستند. در این بخش به شرح مبانی این روشها پرداخته میشود.

همان طوری که قبلاً نیز اشـاره شـد، مکان هندسـی بردار خروجی حسگر مغناطیسسنج سه-محوره در صورت اندازه گیری میدان مغناطیسی زمین، یک کره به شعاع شدت میدان مغناطیسی محلی زمین خواهد بود.  $H_x^2 + H_y^2 + H_z^2 = H^2 = cte$  (۹)

که H، شدت میدان مغناطیسی محلی زمین است. اما، وجود هر گونه خطا در حسگر یا قرار گرفتن در معرض اغتشاشات مغناطیسی، موجب خارج شدن این مکان هندسی از حالت کروی می شود. مهم ترین منابع خطا در اندازه گیری مغناطیسی، خطای آهن سخت<sup>3</sup>، خطای آهن نرم<sup>6</sup>، نویز پهنای باند اندازه گیری، ضریب مقیاس و ناهمترازی هستند. از موارد فوق، خطای آهن سخت و خطای آهن نرم مربوط اغتشاشات یا تداخل میدان مغناطیسی ناخواسته ناشی از تجهیزات پیرامون حسگر هستند که البته بیشترین تاثیر را نیز به خود اختصاص می دهند. با توجه به منابع خطای فوق، مدل خطای مغناطیس سنج سه محوره به صورت زیر بیان می شود [۸۱].

$$\hat{\boldsymbol{H}}^{b} = \boldsymbol{C}_{m} \boldsymbol{C}_{sf} \boldsymbol{C}_{si} \left( \boldsymbol{H}^{b} + \boldsymbol{b}^{b} + \boldsymbol{w}^{b} \right) \tag{1}$$

که  $\hat{H}^{b}$ ، میدان مغناطیسی اندازه گیری شده توسط حسگر و  $H^{b}$ ، میدان مغناطیسی واقعی زمین است. بردارهای  $T_{z}^{b} = b_{x}^{b} = b_{y}^{b} = b_{z}^{b}$  و  $T_{z}^{c} = b_{x}^{b} + b_{y}^{b} = b_{z}^{c}$  به ترتیب بردار بایاس آهن سخت و نویز پهنای باند هستند. ماتریسهای  $W^{b} = h_{x}^{c}$  و  $m_{z}^{c}$  به ترتیب ماتریسهای  $T \times T_{z}^{c}$  برای خطاهای آهن نرم، ضریب مقیاس و ناهمترازی هستند. در اثر خطای آهن سخت، کرهی مکان هندسی میدان مغناطیسی به یک مرکز غیر از

$$\begin{split} \boldsymbol{C}_{n}^{b} &= \boldsymbol{C}_{3}\boldsymbol{C}_{2}\boldsymbol{C}_{1} \\ \boldsymbol{C}_{1} &= \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{C}_{2} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (\boldsymbol{\Upsilon}) \\ \boldsymbol{C}_{3} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \end{split}$$

دستگاههای مختصات مورد استفاده شامل دستگاه مختصات اینرسی (i-frame)، دستگاه مختصات زمینی (e-frame)، دستگاه مختصات بدنه (b-frame) و دستگاه مختصات ناوبری (n-frame) هستند که در شکل ۲ معرفی می شوند [۱۷].



شکل ۲: دستگاههای مختصات در ناوبری اینرسی

در رابطهی ۳، متغیرهای  $\varphi$ ،  $\theta$  و  $\psi$  به ترتیب بیانگر زوایای غلت'، فراز<sup>۲</sup> و سمت<sup>۳</sup> از شمال هستند. در صورتی که بردار میدان مغناطیسی در دستگاه بدنه به صورت زیر نرمالسازی شود،

$$\begin{bmatrix} M_x & M_y & M_z \end{bmatrix}^T = \frac{1}{H_0} \begin{bmatrix} H_x & H_y & H_z \end{bmatrix}^T$$
(°)

و همچنین از زاویهی انحراف مغناطیسی (γ) صرف نظر شود، رابطهی ۲ با استفاده از روابط ۳ و ۴ به صورت زیر بازنویسی میشود.

$$\begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\varphi & -S\varphi \\ 0 & S\varphi & C\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\psi & S\psi & 0 \\ -S\psi & C\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta \\ 0 \\ \sin\delta \end{bmatrix}$$
( $\Delta$ )

توجه شود که در رابطهی ۵، C و ۲ به ترتیب بیانگر توابع cos و هستند. رابطهی ۵ را می توان به صورت زیر بسط داد.

$$\begin{split} M_x \cos\theta + M_y \sin\varphi \sin\theta + M_z \cos\varphi \sin\theta &= \cos\psi \cos\delta \\ M_y \cos\varphi - M_z \sin\varphi &= -\sin\psi \cos\delta \\ -M_x \sin\theta + M_y \sin\varphi \cos\theta + M_z \cos\varphi \cos\theta &= \sin\delta \\ e \ (\mathbf{\hat{f}}) \\ e \ (\mathbf{\hat{f}}) \\ \mathbf{\hat{f}} \\$$

$$\tan \psi = \frac{-M_2}{M_1}$$

$$M_1 = M_x \cos \theta + M_y \sin \varphi \sin \theta + M_z \cos \varphi \sin \theta \qquad (Y)$$

$$M_2 = M_y \cos \varphi - M_z \sin \varphi$$

$$\wedge \cos \varphi - M_z \sin \varphi = 0 \quad (I = 0 \quad 2\pi)$$

انجام مي گيرد.

<sup>4</sup> Hard Iron	<sup>1</sup> Roll	
<sup>5</sup> Soft Iron	<sup>2</sup> Pitch	
	<sup>3</sup> Yaw	

مبدا انتقال می یابد. همچنین، در اثر خطای ضریب مقیاس و خطای آهن نرم (با فرض حذف پارامترهای غیرقطری)، این کره به یک بیضی گون تبدیل میشود. بنابراین، در اثر وجود خطا و اغتشاشات مغناطیسی، رابطهی ۱۰ به صورت زیر تغییر می یابد.

$$\left(\frac{\hat{H}_x^b - b_x}{s_x}\right)^2 + \left(\frac{\hat{H}_y^b - b_y}{s_y}\right)^2 + \left(\frac{\hat{H}_z^b - b_z}{s_z}\right)^2 = H^2 \tag{(11)}$$

که  $b_x$ ،  $b_y$  و  $b_z$  ضرایب کالیبراسیون مربوط به خطای آهن سخت  $b_x$ و  $s_{v}$ ،  $s_{z}$  و  $s_{z}$  مربوط به ترکیب خطاهای آهن نرم و ضریب مقیاس هستند. لازم به ذکر است، برای جایگذاری H می توان از مدلهای موجود از میدان مغناطیسی مرجع زمین نظیر مدل 'IGRF استفاده نمود. برای تخمین ضرایب فوق، می توان از روش کمینه مربعات استفاده نمود. اما، ابتدا رابطهی ۱۱ باید به فرم استاندارد z = Ф x نوشته شود. برای این منظور، از بازنویسی زیر استفاده می شود.

$$(\hat{H}_{x}^{b})^{2} = -b_{x}^{2} + 2\hat{H}_{x}^{b}b_{x} - \left(\frac{s_{x}}{s_{y}}\right)^{2}(\hat{H}_{y}^{b})^{2} - \left(\frac{s_{x}}{s_{y}}\right)^{2}b_{y}^{2} + 2\left(\frac{s_{x}}{s_{y}}\right)^{2}\hat{H}_{y}^{b}b_{y}$$
(117)  

$$-\left(\frac{s_{x}}{s_{z}}\right)^{2}(\hat{H}_{z}^{b})^{2} - \left(\frac{s_{x}}{s_{z}}\right)^{2}b_{z}^{2} + 2\left(\frac{s_{x}}{s_{z}}\right)^{2}\hat{H}_{z}^{b}b_{z} + s_{x}^{2}H^{2}$$
(117)  

$$-\left(\frac{s_{x}}{s_{z}}\right)^{2}(\hat{H}_{z}^{b})^{2} - \left(\frac{s_{x}}{s_{z}}\right)^{2}b_{z}^{2} + 2\left(\frac{s_{x}}{s_{z}}\right)^{2}\hat{H}_{z}^{b}b_{z} + s_{x}^{2}H^{2}$$
(117)  

$$-\left(\frac{s_{x}}{s_{y}}\right)^{2}b_{y} - \left(\frac{s_{x}}{s_{z}}\right)^{2}b_{z}^{2} - \left(\frac{s_{x}}{s_{z}}\right)^{2}b_{z}^{2} + \left(\frac{s_{x}}{s_{y}}\right)^{2}b_{z}^{2} - s_{z}^{2}H^{2} \right]^{T}$$
(117)  

$$\Phi = \left[2\hat{H}_{x}^{b} - 2\hat{H}_{y}^{b} - 2\hat{H}_{z}^{b} - (\hat{H}_{y}^{b})^{2} - (\hat{H}_{z}^{b})^{2} - 1\right]$$
(117)  

$$\Phi = \left[2\hat{H}_{x}^{b} - 2\hat{H}_{y}^{b} - 2\hat{H}_{z}^{b} - (\hat{H}_{y}^{b})^{2} - (\hat{H}_{z}^{b})^{2} - 1\right]$$
(117)  

$$\mu_{z} + \mu_{z}, \quad \mu_{z}, \quad$$

و بر اساس روش کمینه مربعات، بردار حالت به صورت زیر تخمین زده می شود [۱۹].

$$\hat{\mathbf{x}} = \left(\boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{\Phi}\right)^{-1} \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{z} \tag{19}$$

در نهايت، ضـرايب كاليبراسـيون ميدان مغناطيسـي به صـورت زير استخراج مي شود.

$$b_{x} = \hat{x}_{1}, \quad b_{y} = \frac{\hat{x}_{2}}{\hat{x}_{4}}, \quad b_{z} = \frac{\hat{x}_{3}}{\hat{x}_{5}}$$

$$s_{x}^{2} = \frac{1}{H^{2}} \left( -\hat{x}_{6} + \hat{x}_{1}^{2} + \frac{\hat{x}_{2}^{2}}{\hat{x}_{4}} + \frac{\hat{x}_{3}^{2}}{\hat{x}_{5}} \right), \quad s_{y}^{2} = \frac{s_{x}^{2}}{\hat{x}_{4}}, \quad s_{z}^{2} = \frac{s_{x}^{2}}{\hat{x}_{5}}$$
(1V)

و مولفههای میدان مغناطیسی خروجی حسگر به صورت زیر کالیبره مىشوند.

$$H_{x}^{b} = \frac{\hat{H}_{x}^{b} - b_{x}}{s_{x}}, \quad H_{y}^{b} = \frac{\hat{H}_{y}^{b} - b_{y}}{s_{y}}, \quad H_{z}^{b} = \frac{\hat{H}_{z}^{b} - b_{z}}{s_{z}}$$
(1A)

به این فرآیند، کالیبراسیون مغناطیسی اولیه نیز گفته می شود. در شکل ۳ نقش الگوريتم كاليبراسيون اوليه در اصلاح مكان هندسي بردار ميدان مغناطیسی اندازه گیری شده توسط حسگر نشان داده می شود.

<sup>1</sup> International Geomagnetic Reference Field

شكل ٣: نتيجه الگوريتم كاليبراسيون اوليه در اصلاح بردار ميدان مغناطيسي اندازه گیری شده توسط مغناطیس سنج سه-محوره [۲۰]

در شکل ۳، بردار خروجی حسگر قبل از کالیبره در سمت چپ (با مکان هندسی بیضوی) و بعد از کالیبراسیون در سمت راست (با مکان هندسی کروی) نشان داده شده است. البته معایب و محدودیتهای برای این روش وجود دارد که در بخش های بعد به آن پرداخته شده و راهکار پیشنهادی نیز معرفی خواهد شد.

در ادامه به تشریح روش کالیبراسیون چرخشی پرداخته میشود. در روش کالیبراسیون چرخشی، از یک فرم استاندارد از خطای زاویهی سمت از شمال به عنوان مدل كاليبراسيون استفاده مي شود [١٨].

 $\delta \psi = A + B\sin(\psi) + C\cos(\psi) + D\sin(2\psi) + E\cos(2\psi) \quad (14)$ رابطهی ۱۹، یک سری فوریهی کوتاه شده است که در واقع ضرایب آن برای در نظر گرفتن خطاهای آهن نرم و سخت هستند. تخمین ضرایب فوریه بر اساس روشی به نام الگوریتم چرخشی انجام می گیرد. این فرآیند همچنان که در شکل ۴ نشان داده می شود، شامل تراز کردن و چرخاندن سامانهی حامل مغناطیس سنج برای قرار گرفتن در تعداد زیادی زاویهی سمت از شمال مشخص است.



شكل ۴: نمايش الگوريتم كاليبراسيون چرخشي

در k-مین مقداردهی زاویهی سمت، خطای  $\delta \psi_k$  محاسبه می شود و با استفاده از این مقادیر، دستگاه معادلات زیر تشکیل می شود.

$$\begin{bmatrix} \delta \psi_1 \\ \delta \psi_2 \\ \vdots \\ \delta \psi_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \hat{\psi}_1 & \cos \hat{\psi}_1 & \sin 2 \hat{\psi}_1 & \cos 2 \hat{\psi}_1 \\ 1 & \sin \hat{\psi}_2 & \cos \hat{\psi}_2 & \sin 2 \hat{\psi}_2 & \cos 2 \hat{\psi}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \sin \hat{\psi}_N & \cos \hat{\psi}_N & \sin 2 \hat{\psi}_N & \cos 2 \hat{\psi}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix}$$
(Y.)

رابطهی ۲۰ به فرم اســتاندارد z = 🏚 یا اســت و با اســتفاده از روش تخمين حداقل مربعات، ضرايب كاليبراسيون چرخشمي تعيين مي شوند. توجه شود که برای محاسبهی δψ نیاز به مقداردهی مرجع برای زاویهی سمت از شمال است.

(11)

$$\delta \psi = \psi_{ref} - \psi_{Mag}$$

-

که *\varphi\_ref*، مقدار مرجع زاویهی ســمت از شــمال و <sub>Mag</sub>، مقدار حاصـل از مغناطیسسـنج (طبق رابطهی ۸) اسـت. به روش کالیبراسـیون چرخشی، روش کالیبراسیون مغناطیسی ثانویه نیز گفته می شود.

## ٤- کالیبراسیون مغناطیسی پس گام چند-کاناله

در این بخش به معرفی الگوریتم کالیبراسیون مغناطیسی پس گام چند-کاناله پرداخته می شود، که به منظور بهبود دقت و عملکرد الگوریتم رایج کالیبراسیون مغناطیسی کروی (که در بخش ۳ تشریح شـد.) در محیط عملی و با در نظر گرفتن محدودیتهای عملیاتی توسعه داده می شود. موارد زیادی پیش می آید که ضرایب استخراج شده از آزمون کالیبراسیون، عملکرد مورد انتظار را در آزمونهای میدانی دیگر ندارند. براي آنكه الگوريتم كاليبراسيون ميدان مغناطيسي عملكرد قابل قبولي داشته باشد، موضوعات متعددي وجود دارد. مهم ترين مساله اين است كه سامانهی تحت ناوبری (بستر بکار گیری مغناطیس سنج) لازم است تحت دوران در محدودهی مناسب از زوایای وضعیت (غلت، فراز و سمت از شــمال) قرار گیرد. در صـورت عدم تامین دادههای غنی از خروجی مغناطیس سنج سے-محورہ در زوایای مختلف، دقت تخمین ضرایب کالیبراسیون میدان مغناطیسی نیز به شدت تحت تاثیر قرار می گیرد. اما در بسیاری از کاربردها، امکان دوران کامل سامانهی ناوبری در زوایای سه محور وجود ندارد. به ویژه در روندههای زیرسطحی خودگردان، این محدودیت به مراتب بیشــتر نیز خواهد بود. هدف از این بخش که بنیان اصلی پژوهش حاضر را تشکیل میدهد، ارائهی الگوریتمی برای دستیابی به دقت قابل قبول از کالیبراسیون میدان مغناطیسی با وجود محدودیتهای فوق است.

قبل از آنکه به تشریح الگوریتم کالیبراسیون مغناطیسی پس گام چند-کاناله پرداخته شود، فرضیات و قیود سیستمی مربوط به کالیبراسیون مغناطیس سنج روی یک روندهی زیرسطحی خودگردان بیان می شوند، که شامل موارد زیر هستند.

الف) امکان چرخش کامل بدنه در زوایای غلت و فراز وجود ندارد.

- ب) محل قرارگیری مغناطیسسنج سه-محوره داخل بدنهی رونده به گونهای است که در معرض فلزات با خاصیت مغناطیسی و به تبع تداخل یا اغتشاشات مغناطیسی قرار میگیرد.
- ج) دسترسی به میز کالیبراسیون مناسب و فاقد اثرات تداخلی وجود ندارد. بنابراین، فرآیند کالیبراسیون باید در محیط میدانی انجام گیرد.

قیود فوق ممکن است منجر به استخراج ضرایب کالیبراسیون با عملکرد مناسب محلی در الگوریتم کالیبراسیون رایج گردد. به عبارت دیگر، ممکن است ضرایب مطلوبی از آزمون کالیبراسیون استخراج شود، ولی استفاده از این ضرایب در آزمونهای دیگر نتایج مطلوبی به همراه نداشته باشد. الگوریتمی که در ادامه ارائه می شود، در واقع راهکاری برای پاسخ به این چالش است.

به طور معمول استخراج ضرايب كاليبراسيون مغناطيسي به صورت برون-خط انجام گرفته و از نتایج بدست آمده، در اصلاح خروجی مغناطیس سنج استفاده می شود. در الگوریتم پیشنهادی نیز روال کار به همین صورت انجام می گیرد. اما، نکته ی اساسی در این است که ابتدا سامانه اصلی (رونده زیر آبی خودگردان) در محیط واقعی قرار گرفته و دادهبرداریهای لازم انجام می گیرد. سپس با استفاده از دادههای بدست آمده، ضرایب کالیبراسیون مغناطیسی استخراج میشود. در آزمون واقعی (حين انجام ماموريت) رونده، تنها از ضرايب بدست آمده استفاده شده و ارزيابي مي شود كه آيا ضرايب كاليبراسيون بدست آمده عملكرد مناسب و قابل قبولی در ناوبری رونده دارند یا خیر. جنبهی اصلی نو آوری مقاله این است که در آن تنها به استخراج ضرایب کالیبراسیون میدان مغناطیسی در کالیبراسیون مغناطیسی کروی بسنده نمی شود. بلکه ضرایب در آزمون دوم (که یک حرکت رفت و برگشتی رونده را شامل میشود) در قالب یک الگوریتم چند-مرحلهای بازنگری و اصلاح می شوند. بعد از انجام مراحل فوق و نهایی شدن ضرایب کالیبراسیون، از نتایج بدست آمده در زیرسامانهی ناوبری رونده در حین انجام ماموریت در محیط واقعی استفاده می شود.

اساس کالیبراسیون مغناطیسی پس گام چند-کاناله این است که در قالب گامهای رو به عقب، ضرایب استخراج شده از روش رایج کالیبراسیون مغناطیسی کروی در چند مرحله اصلاح خواهند شد. گامهای اصلی الگوریتم پیشنهادی به شرح زیر هستند.

#### گام اول: تخمین اولیه ضرایب کالیبراسیون

شروع الگوریتم با همان الگوریتم رایج کالیبراسیون مغناطیسی (که در بخش ۳ تشریح شد.) است و تخمین اولیه از ضرایب کالیبراسیون در آزمون کالیبراسیون اول انجام می گیرد. لازم به ذکر است که در آزمون کالیبراسیون اول، روندهی شامل مغناطیس سنج سه-محوره در موقعیت مربوطه در دریا قرار گرفته و تحت دوران های مختلف قرار می گیرد. دوران در کانال سصت، کل بازهی ۲ تا ۳۶۰ را پوشش می دهد. اما در کانالهای فراز و غلت امکان دوران کامل وجود نداشته و تنها در بازههای محدود انجام می گیرد.

# گام دوم: اصلاح ضرایب در آزمون حرکت رفت و برگشتی رونده

در این گام، ارزیابی اول دقت ضرایب کالیبراسیون استخراج شده از الگوریتم رایج گام اول انجام می گیرد. آزمونی که در این گام ترتیب داده می شود، حرکت رونده ی بستر مغناطیس سنج سه-محوره در یک مسیر رفت و برگشتی با برد محدود (مثلا ۵ یا ۱۰ کیلومتر) است. ضرایب کالیبراسیون باید به گونه ای بازنگری و اصلاح شوند که در نقطه ی برگشت، پله یا اختلاف مقدار در اندازه ی میدان مغناطیسی اندازه گیری شده توسط حسگر وجود نداشته باشد. برای حذف این پله، بهتر است از اصلاح ضریب مقیاس کانال عمودی (Z) استفاده شود.

گام سوم: اصلاح ضرایب با تفکیک کانال تراز و عمودی

در این گام، اصلاح دوم روی ضرایب کالیبراسیون با مقایسهی اندازهی مولفههای میدان در صفحهی تراز و کانال عمودی با مقادیر مرجع انجام می گیرد. بردار میدان مغناطیسی زمین را (که در رابطهی ۱ تعریف شد.) می توان به دو مولفه در صفحهی تراز و کانال عمودی تفکیک کرد.  $\lceil m^n \rangle \rceil \lceil m$ 

$$\boldsymbol{H}^{n} = \begin{bmatrix} (\boldsymbol{H}^{n})_{h} \\ (\boldsymbol{H}^{n})_{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{0} \cos \delta \\ H_{0} \sin \delta \end{bmatrix}$$
(YY)

بنابراین، با در اختیار داشتن مقادیر مرجع میدان مغناطیسی (به عنوان مثال می توان از مدل IGRF استفاده نمود.)، مولفهی میدان مغناطیسی در صفحهی تراز و مولفهی میدان مغناطیسی در کانال عمودی به صورت تفکیک شــده وجود دارند. از طرف دیگر خروجی کالیبره شــده از مغناطیس سنج سه-محوره نیز در اختیار است. اگر بردار خروجی حسگر از دستگاه بدنه به دستگاه ناوبری انتقال داده شود، مقادیر متناظر با مولفههای میدان مغناطیسی زمین در صفحهی تراز و کانال عمودی حاصل میشوند. مقایسهی این مقادیر با مقادیر مرجع، معیار مناسبی برای ارزیابی و اصلاح ضرایب کالیبراسیون گام قبل است.

محاسبهی بردار خروجی مغناطیسسنج در دستگاه شامل صفحهی تراز و محور عمودی بر اساس رابطهی زیر انجام می گیرد.

که مقادیر  $C_2$  و  $C_3$  در رابطهی ۳ تعریف شــدهاند. همچنین، مولفهی میدان مغناطیسی در کانال عمودی برابر با  $H_z^n$  است و مولفهی میدان مغناطیسی در صفحهی تراز به صورت زیر بدست خواهند آمد.  $(H^n)_{\mu} = \sqrt{(H^n_x)^2 + (H^n_y)^2}$ 

بدين ترتيب، اصلاح ضرايب كاليبراسيون مغناطيسي با تفكيك كانال تراز و عمودي انجام مي گيرد.

#### گام چهارم: برآورد دقت کالیبراسیون در آزمون ارزیابی

در انتها، بعد از آنکه ضرایب کالیبراسیون میدان مغناطیسی استخراج شد و اصلاحات مربوطه در گامهای دوم و سوم انجام گرفت، لازم است که دقت و عملکرد الگوریتم کالیبراسیون در یک آزمون میدانی مجزا ارزيابي شود.

لازم به ذکر است که در حین فر آیند کالیبراسیون ممکن است نیاز به چند مرحله تکرار گامهای دوم و سوم باشد. توضیحات تکمیلی از الگوريتم پيشنهادي در بخش پيادهسازي و تحليل نتايج ارائه خواهد شد.

#### ٥- پیادەسازی و تحلیل نتایج

مجله کنترل، جلد ۱۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱

در این بخش، عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای بهبود دقت کالیبراسیون مغناطیس سنج سه-محوره، با پیادهسازی در آزمون میدانی مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای این منظور چند آزمون اجرا شده است و

نتايج حاصل از اين آزمونها در ادامه تشريح خواهند شد. ابتدا به معرفي بستر آزمون میدانی، تجهیزات و حسگرهای اصلی پرداخته می شود. در شکل ۵ نمای کلی از روندهی بستر مغناطیس سنج نشان داده می شود. جنس بدنهی این رونده از فولاد بوده که منجر به اغتشاشات مغناطیسی خواهد شـد. بنابراين، الگوريتم مغناطيسي بكار رفته بايد عملكرد مناسبي در محیط متاثر از تداخلهای مغناطیسی داشته باشد.



شکل ۵: نمایی از بدنهی روندهی زیرسطحی خودگردان

در سامانهی پیشنهادی از حسگر Honeywell HMC1001-1002 استفاده شده که از نوع اثر مقاوت مغناطیسی است. مشخصات فنی این حسگر در جدول ۱ ارائه می شود.

Honeywell HMC1001-1002	مغناطيس سنج	ل ۱: مشخصات فنی	جدول
	0 -	6	

اندازه	مشخصات
0.1 ~ 1000 Hz	نرخ دادەبردارى
$\pm \ 200000 \ nT$	محدوده اندازه گیری
0.1 %	خطای خطی
0.05 %	خطاى هيسترزيس
2.9 nT	رزولوشن
5 ~ 12 V	ولتاژ تغذيه

لازم به ذکر است که زوایای غلت و فراز مورد نیاز در الگوریتم پیشنهادی از یک سامانهی ناوبری AHRS بر اساس الگوریتم ارائه شده در مرجع [۲۱] تامين مي شوند.

در آزمون کالیبراسیون اول، روندهی حامل حسگر به داخل دریا منتقل شده و توسط غواص در زوایای مختلف تراز و سمت از شمال چرخانده میشود. سناریوی چرخش شامل حالتهای مختلف چرخش حول محور غلت، چرخش حول محورهای غلت- فراز و چرخش حول محورهای غلت-فراز-سـمت اسـت. در شـکل ۶ زوایای دوران بدنه در آزمون كاليبراسيون اول نشان داده مي شوند.

دوران در کانال سمت در کل بازهی ۱۸۰ - تا ۱۸۰ + درجه است. اما، در کانال غلت در بازهی ۵۵- تا ۵۵+ درجه بوده و در کانال فراز در بازهی ۱۰ - تا ۱۰+ درجه محدود شده است. نتایج بدست آمده از کالیبراسیون میدان مغناطیسی (بر اساس گام اول از بخش ۵) در جدول ۲ ارائه می شوند.



شکل ۶: زوایای تراز و سمت از شمال در آزمون کالیبراسیون اول

جدول ۲: نتایج کالیبراسیون اولیه میدان مغناطیسی در آزمون اول

حالت٤	حالت٢	حالت٢	حالت ۱	
كلى	دوران غلت-فراز- سمت	دوران غلت-فراز	دوران غلت	
-1865	-1613	-2068	-2541	$b_x$ (nT)
1385	1388	1302	1109	$b_y$ $(nT)$
-903	-9662	-618	-4379	$b_z$ (nT)
0.1956	0.2604	0.1978	0.1526	S <sub>x</sub>
0.09001	0.1208	0.0849	0.0919	Sy
0.1614	0.3379	0.1554	0.2408	S <sub>z</sub>
39875	44083	39580	41157	$\left(H^n\right)_z(nT)$
27618	20609	28345	31971	$\left(H^n\right)_h(nT)$
48505	48662	48683	31971	H(nT)

حالت ۱ مربوط به بازهی زمانی ۱۹۲۰ تا ۱۹۲۰ ثانیه بوده که بدنه در معرض دوران حول محور غلت قرار داشته است. حالت ۲ مربوط به بازهی زمانی ۱۹۲۰ تا ۲۳۵۰ ثانیه بوده که بدنه در معرض دوران حول محورهای غلت و فراز قرار داشــته اســت. حالت ۳ مربوط به بازهی زمانی ۲۳۵۰ تا ۲۹۵۰ ثانیه بوده که بدنه در معرض دوران حول محورهای غلت، فراز و سمت قرار داشــته و حالت ۴ هم مربوط به بازهی کلی ۹۷۵ تا ۲۲۷۰ ثانیه سمت قرار داشـته و حالت ۴ هم مربوط به بازهی کلی ۹۵۵ تا ۲۲۷۰ ثانیه است. نکتهی حائز اهمیت این است که میزان غنای دادههای آزمون، نقش قابل ملاحظهای در دقت ضر ایب کالیبراسـیون میدان خواهد داشـت. در بازههای زمانی که دادههای غنی از تغییرات مولفه های میدان مغناطیسـی تحت هر سه دوران در اختیار نباشـد (به عنوان مثال، فقط بدنه در معرض تغییر زاویهی سمت باشد.)، ممکن است حتی مقادیر غیر حقیقی (مختلط) برای ضرایب کالیبراسیون حاصل شود.

مقادیر مربوط به سه سطر انتهایی جدول ۲، به ترتیب میانگین مولفهی z از میدان مغناطیسی در دستگاه ناوبری، میانگین مولفهی افقی از میدان در دستگاه ناوبری و میانگین اندازهی میدان مغناطیسی هستند. با استفاده از مدل IGRF، مقادیر متناظر از مولفههای بردار میدان مغناطیسی زمین در مختصات طول و عرض جغرافیایی محل آزمون به شرح زیر هستند.

 $(H^n)_h = 27473 \ nT, \ (H^n)_z = 40247 \ nT, \ H = 48730 \ nT$  (YA) مقایسه ی مقادیر ارائه شده در سه سطر انتهایی جدول Y با مقادیر متناظر از مدل IGRF در رابطه ی Y۵ نشان می دهد که ضرایب کالیبراسیون بدست آمده از حالت ۲ بیشترین تطابق را با مقادیر مرجع دارند. در حالت

 $b_x = -1865 \ nT, \quad b_y = 1385 \ nT, \quad b_z = -903 \ nT$  (Y9)  $s_x = 0.19556, \quad s_y = 0.09001, \quad s_z = 0.16142$ 

در شکل ۷ اندازهی میدان مغناطیسی قبل و بعد از کالیبراسیون اول نشان داده میشود.



در گام بعد، به ارزیابی و اصلاح ضرایب کالیبراسیون میدان در آزمون حرکت رونده در یک مسیر رفت و برگشتی پرداخته می شود. فاصلهی بین نقطهی رفت و نقطهی برگشت در حدود ۱۰ کیلومتر است. مسیر رفت در زاویهی سمت ۶۲ درجه و مسیر برگشت در زاویهی سمت ۱۱۷- درجه است. خروجی مدل IGRF در وسط نقطهی رفت و نقطهی برگشت به شرح زیر خواهد بود.

(۲۷) H = 4752 nT , (H<sup>n</sup>)<sub>z</sub> = 40289 nT, H = 48752 nT (۲۷) ضرایب کالیبراسیون گام اول (ارائه شده در رابطهی ۲۶) روی خروجی حسگر مغناطیس سنج اعمال شده و دقت کالیبراسیون در آزمون دوم سنجیده می شود. در شکل ۸ اندازهی میدان مغناطیسی حسگر در آزمون دوم، قبل و بعد از اعمال ضرایب کالیبراسیون نشان داده می شود.



كاليبراسيون

با اعمال ضرایب کالیبراسیون رابطهی ۲۶، میانگین مولفهی z از میدان مغناطیسی در دستگاه ناوبری، میاَنگین مولفهی افقی از میدان در دستگاه ناوبری و میانگین اندازهی میدان مغناطیسی در بازهی زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ ثانیه برابر خواهند با:

 $(H^n)_h = 27999 \ nT$ ,  $(H^n)_z = 38810 \ nT$ ,  $H = 47856 \ nT$  (YA)

توجه شود که میزان تغییر شدت میدان مغناطیسی زمین با تغییر موقعیت مکانی در حدی است که در فاصله ۲۵ کیلومتر، اندازهی میدان، تنها در حدود ۸۰ نانوتسلا تغییر می کند. بنابراین، اندازهی میدان در حین آزمون فوق نباید تغییر چندانی داشته باشد. اما، همچنان که در شکل ۸ مشاهده می شود، بین مسیر رفت و مسیر برگشت پلهای به اندازهی ۱۴۰۰ نانوتسلا وجود دارد که ناشی از عدم کالیبراسیون مناسب است. اصلاح ضرایب کالیبراسیون میدان مغناطیسی در قالب سه گام زیر انجام می گیرد.

ضرایب مقیاس کانالهای x و y در کسر 27999 این کار مولفهی میدان در صفحه تراز به مقدار مطلوب ۲۷۴۵۱ نانو تسل رسانده می شود. جدول ۳ و شکل ۹ نتایج حاصل از این اصلاح را نشان میدهند. توجه شود که مقادیر ارائه شده برای مولفههای میدان در جدول ۳، مربوط به مقدار میانگین در بازهی زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ ثانیه هستند.

جدول ۳: ضرایب کالیبراسیون میدان مغناطیسی بعد از اصلاح اول

S <sub>Z</sub>	s <sub>y</sub>	S <sub>X</sub>	$(nT)b_z$	$(nT)b_y$	$(nT)b_x$
0.16142	0.09181	0.19947	-903	1385	-1865
H (nT)		$\left(H^n\right)_h (nT)$		$\left(H^n\right)_z$ (nT)	
47536		27450		38810	



گام اصلاحي دوم:

گام اصلاحي اول:

در این مرحله، به موضوع وجود پله در اندازهی میدان در مسیرهای رفت و برگشت پرداخته می شود. برای حل این مساله، از روش تغییر ضریب مقیاس در کانال z استفاده می شود. با تغییر ضریب مقیاس sz از مقدار 0.16142به 0.20642 نتایج ارائه شده در جدول ۴ و شکل ۱۰ حاصل می شود.

جدول ۴: ضرایب کالیبراسیون میدان مغناطیسی بعد از اصلاح دوم

S <sub>Z</sub>	s <sub>y</sub>	S <sub>X</sub>	$(nT)b_z$	$(nT)b_y$	$(nT)b_x$
0.20642	0.09181	0.19947	-903	1385	-1865
H(nT)		$\left(H^n\right)_h (nT)$		$\left(H^n\right)_z$	( <i>nT</i> )
40992		274	450	303	350



#### گام اصلاحي سوم:

شکل ۱۰ نشان می دهد که با گام اصلاحی دوم، پلهی موجود در اندازه میدان مغناطیسی در مسیرهای رفت و برگشت برطرف شد. اما، تطابق مولفهی عمودی میدان و همچنین اندازهی میدان با خروجی مرجع IGRF تحت تاثیر قرار گرفت. برای تطابق اندازهی میدان (البته، با این قید که مولفهی میدان در صفحهی افقی نباید تحت تاثیر قرار گیرد.)، تنها می توان از اصلاح پارامتر بایاس مغناطیس سنج (خطای آهن سخت) در کانال z استفاده نمود. بر اساس رابطهی ۱۱ و با توجه به ناچیز بودن زوایای غلت و فراز می توان نوشت:

$$\left(H^n\right)_h^2 + \left(\frac{\hat{H}_z^b - b_z}{s_z}\right)^2 = H^2 \tag{Y4}$$

$$(27450)^2 + \left(\frac{5362 - b_z}{0.20642}\right)^2 = 48752^2 \Rightarrow b_z = -2955 \, nT$$
 (**r**•)

با اصلاح ضریب بایاس در کانال z نتایج ارائه شده در جدول ۵ و شکل ۱۱ حاصل می شوند. قبل از انجام گامهای اصلاحی، پلهای در حدود ۱۴۰۰ نانوتسلا در اندازهی میدان مغناطیسی در مسیر رفت و برگشت وجود داشت. نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ نشان میدهد که این مقدار به ۶۰۰ نانوتسلا رسیده است.

	S <sub>Z</sub>	s <sub>y</sub>	S <sub>X</sub>	$(nT)b_z$	$(nT)b_y$	$(nT)b_x$
0.2	20642	0.09181	0.19947	-2955	1385	-1865
	H (nT)		$\left(H^n\right)_h$ $(nT)$		$\left(H^n\right)_z$	( <i>nT</i> )
	48752		274	450	402	290

سه م	يعد از اصلاح	مغناطيسه	مىدان	کالیہ اسبو ن	ضہ ایپ آ	حدول ۵:
سوم	بعلاءر أصارح	معتاحيسي	ميدان	فاليبراسيون	صرايب	بىدون 🕷



گامهای اصلاحی اول تا سوم تا جایی تکرار میشود که این اختلاف به مقدار مطلوب برسد. در هر بار تکرار، دقت و صحت ضرایب کالیبراسیون بهبود خواهد یافت. در نهایت پس از سه مرحله تکرار گامهای اصلاحی، ضرایب نهایی کالیبراسیون میدان مغناطیسی در جدول ۶ ارائه میشود. با اعمال ضرایب جدول ۶، نمودار شکل ۱۲ حاصل میشود که در آن اختلاف اندازهی میدان در مسیرهای رفت و بر گشت به ۲۰ نانوتسلا رسیده است.

جدول ۴: اصلاح نهایی ضرایب کالیبراسیون میدان مغناطیسی

	S <sub>Z</sub>	s <sub>y</sub>	S <sub>X</sub>	$(nT)b_z$	$(nT)b_y$	$(nT)b_x$
1	0.26142	0.09181	0.19947	-5171	1385	-1865
	H (nT)		$\left(H^n\right)_h (nT)$		$\left(H^n\right)_z$	( <i>nT</i> )
1	48753		27450		402	291



یکی از چالش های اساسی در کالیبراسیون مغناطیس سنج سه-محوره در بدنهی AUV این است که امکان دوران کامل بدنه در زوایای غلت، فراز و سمت وجود ندارد. بنابراین تشکیل مکان هندسی کروی به دلیل تغییرات محدود مولفه های خروجی مغناطیس سنج و در اختیار نبودن دادههای با غنای کامل امکانپذیر نیست. این موضوع عملکرد روش رایج کالیبراسیون مغناطیسی کروی را تحت تاثیر قرار میدهد. با در نظر گرفتن این موضوع، به منظور ارزیابی بهتر دقت و عملکرد الگوریتم کالیبراسیون مغناطیسی، آزمون حرکت رفت و برگشتی طراحی و اجرا شده است. یکی از شاخصهای معرفی شده در مقاله این است که در حین حرکت کیسول در یک مسیر رفت و بر گشتی نباید یلهای در اندازهی میدان مغناطیسی مشاهده شود. در صورت استفاده از الگوریتم رایج کالیبراسیون مغناطیسی کروی، همچنان که نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است، پلهای در حدود ۱۴۰۰ نانوتسلا در لحظهی تغییر جهت حرکت مشاهده می شود. این در حالی است که در اگوریتم پیشنهادی با انجام گامهای اصلاحی سه-گانه مقدار این پله به ۲۰ نانوتسلا کاهش یافته است. مقایسهی فوق به وضوح مزيت الگوريتم پيشنهادي را در قياس با الگوريتم رايج كاليبراسيون مغناطيسي كروى نشان مىدهد.

اساس نام گذاری پس گام در الگوریتم پیشنهادی این است که بعد از انجام گامهای اول تا سوم، یک برگشت به عقب صورت گرفته و دوباره

همان گامهای قبلی تکرار می شود و این روال تا جایی ادامه مییابد که دقت مناسب در نتایج هر سه گام حاصل شود. وجود این روند برگشت به عقب و تکرار گامهای فوق تا مرحلهی رسیدن به دقت مطلوب، منجر به استفاده از واژهی پس گام در عنوان الگوریتم کالیبراسیون مغناطیسی پیشنهادی شده است.

بعد از اتمام فرآیند کالیبراسیون میدان مغناطیسی که با روش کالیبراسیون مغناطیسی پس گام چند-کاناله انجام گرفت، به ارائه ینتایج کالیبراسیون چرخشی پرداخته می شود. برای استخراج ضرایب کالیبراسیون چرخشی نیاز به در اختیار داشتن مقادیر مرجع از زاویه ی سمت از شمال است. در اینجا، از خروجی زاویه ی سمت GPS (به بیان بهتر زاویه ی تعقیب GPS) در نقش مقادیر مرجع استفاده می شود، که مهم ترین چالش در آن وجود تاخیر زمانی در خروجی GPS است و اثر این تاخیر باید در کالیبراسیون منظور گردد. اعمال ضرایب کالیبراسیون چرخشی در قالب رابطه ی زیر انجام می گیرد.

$$\begin{split} \psi_{M} &= \hat{\psi}_{M} + A + B \sin\left(\hat{\psi}_{M}\right) + C \cos\left(\hat{\psi}_{M}\right) \\ &+ D \sin\left(2\hat{\psi}_{M}\right) + E \cos\left(2\hat{\psi}_{M}\right) \end{split} \tag{(11)}$$

که  $M \in M$  و M به ترتیب مقدار کالیبره شده و مقدار کالیبره نشده از زاویه ی سمت بدست آمده از مغناطیس سنج هستند. ضریب A نقش مهمی در الگوریتم کالیبراسیون چرخشی دارد. برای ارزیابی ضرایب کالیبراسیون چرخشی، می توان بقیه ی ضرایب را صفر در نظر گرفت و سعی شود که فقط با ضریب A زاویه ی سمت بدست آمده از مغناطیس سنج را روی مقدار مرجع منطبق نمود. با انجام این کار به مقداری در حدود 7.5 درجه که معادل با 2000 رادیان است، خواهیم رسید. بعد از استخراج ضرایب کالیبراسیون چرخشی، در صورتی که در ضرایب بدست آمده، ضریب A اختلاف قابل ملاحظه ای با مقدار 2010 رادیان داشته باشد، اعتبار آن کالیبراسیون جای سوال دارد. در چنین شرایطی باید روال کالیبراسیون بازنگری شده و از داده های با غنای کافی استفاده شود.

لازم به ذکر است، الگوریتم هدایت در کانال عمق در آزمون دوم (با مسیر رفت و برگشتی) به صورت یک حرکت دلفینی است. به این صورت که به ازای هر ۱۰۰۰ ثانیه حرکت در عمق، یک حرکت سطحی به مدت ۵۰ ثانیه وجود خواهد داشت. تنها، در زمانهای مربوط به مود حرکت سطحی، دسترسی به GPS امکان پذیر است، که می توان از دادههای آن در کالیبراسیون استفاده نمود.

با در نظر گرفتن تاخیر دو ثانیهای در خروجی زاویهی ســمت GPS، ضـرایب کالیبراسـیون چرخشـی برابر با مقادیر ارائه شــده در جدول ۷ استخراج میشوند.

جدول ۷: ضرایب کالیبراسیون چرخشی در آزمون دوم

E (rad)	D (rad)	C (rad)	B (rad)	A (rad)
0.05528	0.00610	0.01071	-0.01101	0.14199

در شکل ۱۳ نمودار زاویهی سمت از شمال بدست آمده از مغناطیس سنج، قبل و بعد از کالیبراسیون ارائه می شُوند. همچنین، این مقادیر با مقدار متناظر در سمانهی GPS (زاویهی تعقیب GPS) مقایسه خواهند شد.



نتایج ارائه شده در شکل ۱۳، عملکرد مناسب الگوریتم کالیبراسیون چرخشی را تایید می کند. در زمان های حرکت رونده در سطح که دسترسی به GPS وجود دارد، انطباق قابل قبولی بین زوایه ی سمت مغناطیس سنج بعد از کالیبراسیون و مقدار متناظر در GPS وجود دارد. نکته ی حائز اهمیت در ارزیابی عملکردی الگوریتم کالیبراسیون مغناطیسی این است که سه موضوع ۱) دقت و صحت کالیبراسیون، ۲) میزان تاخیر GPS و ۳) تفاوت ماهیتی زاویه ی سمت و زاویه ی تعقیب GPS باید در کنار هم مورد بررسی قرار گیرند. در آزمونهای با مسیر دایروی، لزوماً زاویه ی سمت از شمال منطبق بر زاویه ی تعقیب GPS نیست.

### مراجع

 [1] H. Nourmohammadi and J. Keighobadi, "Integration scheme for SINS/GPS system based on vertical channel decomposition and in-motion alignment," AUT Journal of Modeling and Simulation, vol. 50(1), pp. 13-22, 2018.

[۲] ح. نورمحمدی و ج. کیقبادی، "الگوریتم ناوبری تلفیقی ارزان قیمت SINS/GPS تقویت شده با تخمین وضعیت از روش AHRS، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، جلد ۱)۴۷، ص. ۳۳۱–۳۳۵، ۲۰۱۷.

- [3] N. Bowditch, "The American Practical Navigator," National Imagery and Mapping Agency, Bethesda, Md, USA, 9<sup>th</sup> edition, 1995.
- [4] R. Alonso and M. D. Shuster, "Complete linear attitude-independent magnetometer calibration,"

#### ۲- نتیجه گیری

دو منبع اصــلي خطای موقعیتیابی در ســامانهی ناوبری اینرســی (به ویژه نوع ارزانقیمت آن)، از خطای تخمین زاویهی سمت از شمال و

خطای تخمین سرعت ناشی میشوند. در پژوهش حاضر، در راستای بهبود عملکرد سامانهی ناوبری اینرسی، بر کنترل خطای تخمین زاویهی سمت از شمال تمرکز شده است. روشهای مختلفی برای بهبود تخمین زاویهی سمت وجود دارند و از میان آنها، در پژوهش حاضر با توجه به محدودیتهای موجود در ناوبری روندههای زیرسطحی به موضوع استفاده از مغناطیسسنج سه-محوره پرداخته شده است. اما، لازمهی دستیابی به تخمین قابل قبول زاویهی سمت با روشهای مغناطیسی این است که مغناطیس نج از نظر خطای اندازه گیری حسگر و همچنین وجود اغتشاشات مغناطیسی خارجی به گونهی مناسبی کالیبره شود.

مسالهی اساسی در کالیبراسیون میدان مغناطیسی این است که فراهم آوردن دادههای غنی برای کالیبراسیون دقیق در کانال عمودی Z دشوار بوده و شاید در برخی موارد امکانپذیر نباشد. برای آنکه مولفهی میدان در کانال Z به طور کامل تحریک شود، لازم است که بستر مربوطه در معرض غلت کامل یا فراز کامل قرار گیرد، که امکان آن در بسیاری از فوارد فراهم نیست. از این رو، ممکن است کالیبراسیون صورت گرفته، فرار گیرد. به عبارت دیگر، عموماً نیاز به ارزیابی های مجدد در آزمونهای قرار گیرد. به عبارت دیگر، عموماً نیاز به ارزیابی های مجدد در آزمونهای متعدد است. یکی از روشهای مناسب برای ارزیابی و اصلاح ضرایب صورت مجزا است که در پژوهش حاضر به آن پرداخته شده است. الگوریتم پیشنهادی بر پایهی کالیبراسیون مغناطیسی پس گام چند –کاناله بوده که نتایج بدست آمده از آزمونهای میدانی، دلالت بر دقت و عملکرد قابل قبول آن دارد.

Journal of the Astronautical Sciences, vol. 50(4), pp. 477-490, 2002.

- [5] M. J. Caruso, "Applications of magnetic sensors for low cost compass systems," In Position Location and Navigation Symposium, IEEE, pp. 177-184, 2000.
- [6] V. Renaudin, M. H. Afzal, and G. Lachapelle, "Complete tri-axis magnetometer calibration in the magnetic domain," Journal of Sensors, doi:10.1155/2010/967245, 2010.
- [7] N. Hadjigeorgiou, K. Asimakopoulos, K. Papafotis, and P. P. Sotiriadis, "Vector magnetic field sensors: operating principles, calibration and applications," IEEE Sensors Journal, vol. 21, pp. 12531-12544, 2020.

[8] Y. Wu and W, Shi, "On calibration of three-axis magnetometer," IEEE Sensors Journal, vol. 15(11), pp. 6424-6431, 2015.

[١٠] ز. لبيبيان، ا. طالبي و ح. سليمي، تخمين وضعيت تجربي با استفاده از

## دادەھاي بلادرنگ كاليبرە شدە مغناطيسسنج. فصلنامه علوم، فناورى

#### و کاربردهای فضایی، جلد ۱(۲)، ص. ۷۸–۸۷، ۲۰۲۲.

- [11] G. Cao, X. Xu, and D. Xu, "Real-time calibration of magnetometers using the RLS/ML algorithm," Sensors, vol. 20(2), pp. 535, 2020.
- [12] S. Bonnet, C. Bassompierre, C. Godin, S. Lesecq, and A. Barraud, "Calibration methods for inertial and magnetic sensors," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 156(2), pp. 302–311. 2009.
- [13] Y. Wu, D. Zou, P. Liu, and W. Yu, "Dynamic magnetometer calibration and alignment to inertial sensors by Kalman filtering," IEEE Transaction on Control System Technology, vol. 26, pp. 716-723, 2018.
- [14] V. Petrucha, P. Kaspar, P. Ripka, and M. G. Merayo, "Automated system for the calibration of magnetometers," Journal of Applied Physics, vol. 105(7), 2009.
- [15] H. Milanchian, J. Keighobadi, and H. Nourmohammadi, "Magnetic calibration of three-

axis strapdown magnetometers for applications in MEMS attitude-heading reference systems," AUT Journal of Modeling and Simulation, vol. 47(1), pp. 55-65, 2015.

- [16] D. Titterton and J. L. Weston, "Strapdown inertial navigation technology," IET, vol. 17, 2004.
- [17] H. Nourmohammadi and J. Keighobadi, "Fuzzy adaptive integration scheme for low-cost SINS/GPS navigation system," Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 99, pp. 434-449, 2018.
- [18] D. Gebre-Egziabher, G. H. Elkaim, J. D. Powell, and B. W. Parkinson, "Calibration of strapdown magnetometers in magnetic field domain," Journal of Aerospace Engineering, vol. 19(2), pp. 87–102, 2006.
- [19] D, Simon, "Optimal state estimation: Kalman, H∞ and nonlinear approaches," New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [20] M. Kok, J. D. Hol, T. B. Schon, F. Gustafsson, and H.Luinge, "Calibration of a magnetometer in combination with inertial sensors," 15<sup>th</sup> International Conference on Information Fusion, IEEE, Jul 9, pp. 787–793, 2012.

[۲۱] ۱. علیزاده، ح. نورمحمدی، م. ت. ثابت، و م. زرینی، "طراحی و پیادهسازی الگوریتم ناوبری AHRS/GPS/DR برای روندههای زیرسطحی خودگردان با برد بلند و ماندگاری بالا در زیر آب،" مجله مهندسی دریا، جلد ۱۳(۲۶)، ص. ۴۷–۵۷، ۲۰۱۸.