

طراحی و ساخت نرم افزار شبیه ساز برخط مشخصه جبرانی شناورهای فرومغناطیس با استفاده از حلقه های جریان الکتریکی

میرمحمد رضا سیدحبشی^۱، محسن حسامی^۲، داوود رهی^{۳*}، محسن صفی خانی^۴

m.seyedhabashy@gmail.com

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان

mohsen.hesami@gmail.com

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان

davood.rahi@gmail.com

^{۳*} نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان

mohsensafikhani65@gmail.com

^۴ کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۲۷

چکیده

یکی از روش های تشخیص حضور شناورهای سطحی و زیرسطحی، آشکارسازی تغییرات میدان مغناطیسی در محیط اطراف شناور است. روش معمول برای کاهش تغییرات میدان مغناطیسی ایجاد شده در اطراف شناور، استفاده از مجموعه حلقه های حامل جریان الکتریکی است. جریان الکتریکی هر مدار بسته، باید طوری تنظیم شود که میدان مغناطیسی حاصل از مجموعه مدارهای الکتریکی برابر با میدان مغناطیسی اطراف شناور ولی در خلاف جهت آن باشد. در این تحقیق نرم افزاری در زبان سی شارپ به اسم جبران ساز مغناطیسی ساخته شده که هندسه حلقه های بسته جریان الکتریکی، محل نصب و اندازه مؤلفه های میدان مغناطیسی را دریافت کرده و جریان الکتریکی مربوط به هر مدار بسته را محاسبه می نماید که با این کار میدان مغناطیسی در اطراف شناور، کاسته می شود. صحت و دقت نرم افزار ساخته شده با استفاده از روابط تحلیلی میدان مغناطیسی بررسی شده، سپس یک زیردریایی در نرم افزار کامسول شبیه سازی شد و از داده های آن برای شبیه سازی در نرم افزار جبران ساز مغناطیسی، استفاده شد. نتایج به دست آمده از نرم افزار جبران ساز مغناطیسی توافق بسیار خوبی با نتایج حاصل از نرم افزار کامسول داشت و توانسته بود میدان مغناطیسی را به خوبی پیش بینی نماید.

واژه های کلیدی: میدان مغناطیسی، زیردریایی، مغناطیس زدایی، جریان الکتریکی، سی شارپ

۱. مقدمه

یکی از راه های مؤثر در شناسایی و انهدام شناورهای آبی و دریایی، شناسایی تغییرات میدان مغناطیسی در اطراف آنها است. این فناوری، جزء فناوری های نظامی محسوب شده و

تحقیقات زیادی برای حذف میدان مغناطیسی مین روباتها انجام شده است [۴،۳،۲،۱]. این فناوری، در اختیار کشورهای با صنایع نظامی پیشرو در عرصه دریا قرار دارد و کاربرد اصلی آن در شناورهای نظامی است.

۲. روش کار

۲-۱. معادله‌های میدان مغناطیسی

مواد فرومغناطیس را می‌توان مجموعه‌ای از سیم‌های حامل جریان الکتریکی در نظر گرفت. برای این منظور فرض می‌شود که ماده فرومغناطیس شامل N مدار بسته حامل جریان الکتریکی است که باید در M مکان، میدان مغناطیسی آن را محاسبه کرد. میدان مغناطیسی حلقه جریانی الکتریکی i در نقطه j برابر است با [۶،۵]:

$$\vec{B}_{ji} = \frac{\mu_0 I_i}{4\pi} \int \frac{d\vec{l}_i \times (\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^3} = I_i \vec{R}_{ji} \quad (1)$$

$$\vec{B}_j = I_i \vec{R}_{ji} \quad (2)$$

با تفکیک معادله‌های جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی رابطه (۳) به دست می‌آید.

همان‌طور که در معادله (۳) مشاهده می‌شود، این معادله دستگاه معادلاتی خطی $3M*N$ با N مجهول است.

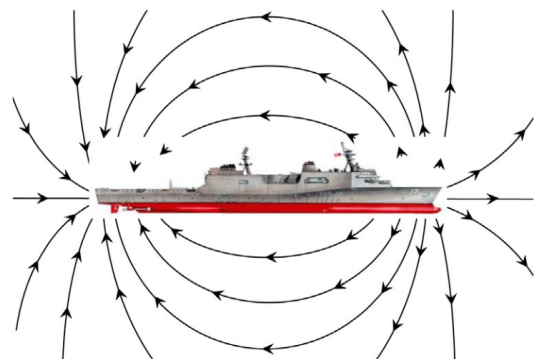
$$\begin{aligned} B_{1x} &= I_1 R_{11x} + I_2 R_{12x} + \dots + I_N R_{1Nx} \\ B_{1y} &= I_1 R_{11y} + I_2 R_{12y} + \dots + I_N R_{1Ny} \\ B_{1z} &= I_1 R_{11z} + I_2 R_{12z} + \dots + I_N R_{1Nz} \\ &\vdots \\ B_{jx} &= I_1 R_{j1x} + I_2 R_{j2x} + \dots + I_N R_{jNx} \\ B_{jy} &= I_1 R_{j1y} + I_2 R_{j2y} + \dots + I_N R_{jNy} \\ B_{jz} &= I_1 R_{j1z} + I_2 R_{j2z} + \dots + I_N R_{jNz} \\ &\vdots \\ B_{Mx} &= I_1 R_{M1x} + I_2 R_{M2x} + \dots + I_N R_{M Nx} \\ B_{My} &= I_1 R_{M1y} + I_2 R_{M2y} + \dots + I_N R_{M Ny} \\ B_{Mz} &= I_1 R_{M1z} + I_2 R_{M2z} + \dots + I_N R_{M Nz} \end{aligned} \quad (3)$$

با حل عددی دستگاه معادلات (۳)، مجهول‌های این معادله که جریان الکتریکی حلقه‌های جریانی است محاسبه می‌شود تا بتوان مواد فرومغناطیس را به خوبی با مجموعه سیم‌های حامل جریان الکتریکی تقریب زد.

۲-۲. روش حل عددی برای حل دستگاه‌های معادلات خطی

یک دستگاه معادلاتی خطی بسته به تعداد معادله‌ها و مجهول‌ها می‌تواند دارای بی‌نهایت جواب، یک جواب یکتا یا بدون جواب باشند. برای به دست آوردن جواب یکتا باید از روش کرامر یا روش‌های تکرار استفاده کرد [۸،۷]. در حین کار متوجه شدیم که با افزایش تعداد سیم‌های حامل جریان

سازوکار شناسایی به این صورت است که یک حسگر حساس به میدان مغناطیسی با توجه به میزان تغییرات میدان مغناطیسی ایجاد شده نسبت به میدان مغناطیسی زمین، عمل شناسایی را انجام داده و فرمان انهدام شناور را صادر می‌کند. میدان مغناطیسی در اطراف شناور متشکل از میدان مغناطیسی القایی و مغناطیسی پسماند است [۳،۲،۱]. میدان مغناطیسی القایی در اثر برهم کنش میدان مغناطیسی زمین و بدنه شناور تولید شده و قابل محاسبه است. میدان مغناطیسی پسماند در اثر تنش، گرما و فشار مکانیکی به جسم فرومغناطیس در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی (میدان مغناطیسی زمین) ایجاد می‌شود و راهی برای محاسبه آن وجود ندارد. برای جلوگیری از شناسایی شناور، باید سازوکاری در نظر گرفته شود که میدان مغناطیسی القایی و پسماند در اطراف شناور از بین برود. برای حذف میدان‌های مغناطیسی ناشی از حضور شناور، می‌توان کل سازه شناور فرومغناطیس را با مجموعه‌ای از سیم‌های حامل جریان الکتریکی معادل‌سازی کرد؛ به طوری که میدان مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی درون سیم‌ها اندازه‌ای برابر و در خلاف جهت میدان مغناطیسی القایی و پسماند داشته باشد. با این روش می‌توان میدان مغناطیسی را تا حدود زیادی کاهش داده و احتمال شناسایی شناور را کاهش داد (شکل الف) [۳،۲،۱]. در این تحقیق، نرم‌افزاری در زبان سی شارپ طراحی شده که می‌توان هندسه مجموعه سیم‌های حامل جریان الکتریکی را به عنوان ورودی به آن داد و بر اساس مشخصه القایی و پسماند اندازه‌گیری شده برای شناور، جریان‌های الکتریکی جبران‌ساز برای هر حلقه بسته را محاسبه کرد. در ادامه این موضوع بیشتر بحث شده است.



شکل الف: نمایی از میدان مغناطیسی در اطراف یک سازه شناور فرومغناطیس [۲]

الکتریکی، دترمینان ماتریس \vec{R} به سمت صفر میل می کند؛ بنابراین روش کرامر قابل استفاده نبوده و باید از روش های تکرار برای حل دستگاه معادله های خطی (۳) استفاده کرد. بهترین، معروف ترین و قوی ترین روش های تکرار برای حل عددی دستگاه معادله های خطی، روش های گرادیان مزدوج مربع^۱ و باقی مانده کمینه جهانی^۲ هستند [۵،۴]. ولی مشکل اساسی در استفاده از این روش های عددی، بدشرط بودن دستگاه های معادلات خطی ساخته شده است. به عبارت دیگر دستگاه های معادلات خطی ساخته شده، حتی با روش باقی مانده کمینه جهانی هم قابل حل نبوده و جواب ها واگرا می شود؛ زیرا دستگاه های بدشرط دارای جواب های غیر دقیق و یا نرم^۳ بسیار بزرگ هستند [۷،۸،۹،۱۰].

یک راه بسیار ساده و موفق در مسائل بدشرط، استفاده از روش تنظیم تیخونوف^۴ است. در این روش دستگاه معادله های خطی به این صورت فرض می شود [۷،۸،۹،۱۰].

مجهولات است، روش حداقل مربعات رگرسیون درجه دوم^۵ است. این روش دقت مورد نظر مسئله حال حاضر را تأمین نمی کند؛ بنابراین با استفاده از روش تیخونوف و باقی مانده کمینه جهانی این دستگاه معادلات با دقت مورد انتظار حل شده و جواب یکتا برای این مسائل محاسبه می شود. به زبان ساده تر می توان بیان کرد که اگر تعداد معادلات بیشتر از تعداد مجهولات باشد، دستگاه معادلات خطی مستطیلی با روش تنظیم تیخونوف به دستگاهی مربعی تبدیل شده و جواب هایی نزدیک به جواب یکتا محاسبه می شود. یکی از مواردی که باید بسیار دقت شود، تعداد نقاط میدان مغناطیسی است. هرچقدر از سیستم مورد بررسی اطلاعات بیشتری در ارتباط با تعداد مکان های اندازه گیری میدان مغناطیسی القایی و پسماند در دسترس باشد، جواب های بسیار بهتر و نزدیک تر به جواب یکتا به دست می آید؛ بنابراین اگر روش تنظیم تیخونوف مورد استفاده قرار گیرد، هیچ اطلاعاتی از سیستم مورد استفاده از دست نمی رود و از همه آن ها برای یافتن جواب نهایی استفاده می شود. البته باید اذعان داشت که با افزایش تعداد مکان های اندازه گیری میدان مغناطیسی، ابعاد دستگاه معادلات خطی افزایش یافته، زمان اجرای برنامه و محاسبه جریان الکتریکی طولانی تر می شود. از این جهت که این برنامه برای محاسبه برخط جریان های الکتریکی نوشته شده است، لازم است با حداقل ابعاد سیستم، حداکثر دقت در کمترین زمان محاسبات به دست آید.

یک راه بسیار ساده و موفق در مسائل بدشرط، استفاده از روش تنظیم تیخونوف^۴ است. در این روش دستگاه معادله های خطی به این صورت فرض می شود [۷،۸،۹،۱۰].

$$(\vec{A} + \rho \vec{I})q = b \quad (4)$$

کمیت I ماتریس واحد است و کمیت ρ را کمیت تنظیم^۵ می نامند که دارای مقدار بزرگ تر از صفر است. روش تنظیم تیخونوف همان روش حل عددی حداقل مربعات^۶ را دنبال می کند [۷،۸،۹،۱۰].

برای حل عددی معادله (۴)، باید معادله (۵) از روش های معمول تکرار مثل باقی مانده کمینه جهانی حل شود.

$$(\vec{A}^T \vec{A} + \rho \vec{I})q = \vec{A}^T b \quad (5)$$

معادله (۵)، یک دستگاه خوب شرط^۷ است؛ بنابراین برای یافتن مقدار مجهول q ، از معادله (۵) با روش های تکرار معمول و قدرتمند باقی مانده کمینه جهانی استفاده می شود [۷،۸،۹،۱۰]. همچنین اگر تعداد معادلات بیشتر از تعداد مجهولات باشد، با به کار بردن روش تنظیم تیخونوف دستگاه معادله ها به یک دستگاه مربعی تبدیل شده و با روش باقی مانده کمینه جهانی قابل حل می شود.

از طرفی دیگر معروف ترین روش حل عددی برای حل دستگاه معادلات خطی که تعداد معادلات بیشتر از تعداد

۲-۳. ساخت برنامه جبران ساز مغناطیسی در زبان سی شارپ

برای شبیه سازی میدان مغناطیسی سیم حامل جریان الکتریکی، معادلات ارائه شده در زبان سی شارپ نوشته شده و برنامه جبران ساز مغناطیسی ساخته شد. در این برنامه هندسه سیم پیچ های حامل جریان الکتریکی، مکان و اندازه مؤلفه های میدان مغناطیسی وارد می شود. سپس با انتخاب یک روش حل عددی مناسب، جریان الکتریکی برای هر سیم پیچ محاسبه می شود (شکل های ب و ج).

۳. نتایج

۳-۱. بررسی صحت و دقت نرم افزار در مقایسه با یک مسئله تحلیلی

صحت و دقت اولیه نرم افزار ساخته شده با استفاده از نتایج حل تحلیلی یک نمونه بررسی شد. میدان مغناطیسی یک

حلقه دایروی روی محور عمود بر مرکز آن از رابطه (۶) به دست می آید [۶].

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{a^2}{(z^2 + a^2)^{3/2}} \hat{k} \quad (6)$$

The screenshot shows the software interface for defining current loops. It is divided into three sections: 'current loops in xy plane and z0', 'Electrical current loops in xz plane and y0', and 'Electrical current loops in xz plane and x0'. Each section has a table with columns for x0 (m), y0 (m), z0 (m), Radial (m), and Intervals. The first table has 6 rows, the second has 6 rows, and the third has 5 rows. To the right, there are 3D diagrams: two circular loops in the xy and xz planes, and a pentagonal loop in the xz plane with vertices labeled (x0,y0,z0) through (x4,y4,z4). The text 'شکل ب: نمایی از نرم افزار ساخته شده در زبان سی شارپ و قسمت ورود اطلاعات هندسه سیم های حامل جریان الکتریکی' is located below the diagrams.

شکل ب: نمایی از نرم افزار ساخته شده در زبان سی شارپ و قسمت ورود اطلاعات هندسه سیم های حامل جریان الکتریکی

The screenshot shows the 'Components of Measured Magnetic Field' section. It has two tables: one for 'مکان اندازه گیری مولفه های میدان مغناطیسی' with columns x (m), y (m), z (m) and 8 rows of data; and another for 'اندازه مولفه های میدان مغناطیسی اندازه گیری شده' with columns Bx (nT), By (nT), Bz (nT) and 8 rows of data. Below these are 'Calculation of Electrical Current' options (LSQR, CGS, GMRES, GMRES with Tokhonov Regularization) and 'CPU Time= Used Loops=' section with three tables for 'جریان الکتریکی در هر حلقه موازی با صفحه X-Y', 'جریان الکتریکی در هر حلقه موازی با صفحه X-Z', and 'جریان الکتریکی در هر حلقه موازی با صفحه Y-Z'. The text 'شکل ج: نمایی دیگر از نرم افزار ساخته شده در زبان سی شارپ و قسمت وارد کردن اطلاعات میدان مغناطیسی اندازه گیری شده و انتخاب روش محاسبه جریان الکتریکی و نمایش نتیجه های به دست آمده' is located below the tables.

شکل ج: نمایی دیگر از نرم افزار ساخته شده در زبان سی شارپ و قسمت وارد کردن اطلاعات میدان مغناطیسی اندازه گیری شده و انتخاب روش محاسبه جریان الکتریکی و نمایش نتیجه های به دست آمده

اگر میدان مغناطیسی اندازه گیری شده در مرکز مختصات برابر با $1(\hat{i} + \hat{j} + \hat{k})$ نانو تسلا باشد، جریان الکتریکی هر حلقه

سه حلقه دایره ای به ترتیب روی محور x، y و z به شعاع ۰/۱ متر و در فاصله ۱- متری از مرکز مختصات فرض می شوند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، این محاسبات تا رقم پنجم اعشار صحیح بوده و تفاوت در رقم‌های بعدی حاکی از خطا در تقریب دوقطبی مغناطیسی است.

این موضوع حاکی از صحت و دقت بسیار عالی محاسبات در نرم‌افزار ساخته شده است.

۲-۳. بررسی صحت و دقت نرم‌افزار ساخته شده با استفاده از نرم‌افزار کامسول

در قسمت قبل، یک مسئله با ۳ حلقه و در شرایط کاملاً مستقل از یکدیگر بررسی شد، از صحت و دقت اولیه نرم‌افزار ساخته شده اطمینان حاصل شد. برای بررسی و مقایسه دقت نرم‌افزار ساخته شده در مسائل و هندسه‌های بسیار پیچیده‌تر، باید از نتایج نرم‌افزار کامسول به‌عنوان یک مرجع محاسباتی معتبر و شناخته شده علمی استفاده شود.

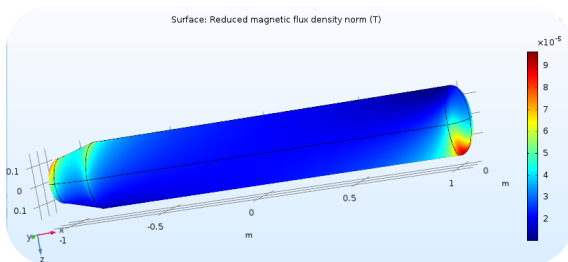
میدان مغناطیسی تعریف شده در این نرم‌افزار، میدان مغناطیسی زمین در مکان مورد بحث در نظر گرفته شده است:

$$B_x = -29662 \text{ (nT)}$$

$$B_y = 2035 \text{ (nT)}$$

$$B_z = -36574 \text{ (nT)}$$

برای این منظور، یک شناور استوانه‌ای شکل به طول ۲۱۶ سانتی‌متر و شعاع ۱۶ سانتی‌متر و در راستای محور X فرض شد که در یک میدان خارجی قرار دارد (شکل د).



شکل د: هندسه و میدان مغناطیسی در نرم‌افزار کامسول

هندسه و تعداد حلقه‌های بسته حامل جریان الکتریکی به این شرح است:

(الف) ۱۴ حلقه دایره‌ای شکل در راستای محور طولی

زیردریایی یعنی محور X؛

(ب) ۱۰ سیم پیچ مستطیلی که دو به دو روبه‌روی یکدیگر و

در حدود ۰/۱۶۱۵ آمپر است. این مسئله به نرم‌افزار ساخته شده داده شد و با هر ۴ روش حل عددی و خطای نسبی کوچک‌تر از 10^{-14} ، جریان حلقه‌ها برابر با ۰/۱۶۱۵۴۸۲۲۵۶۳۸۵۷۵ آمپر به دست آمد.

با این مسئله تحلیلی صحت و دقت محاسبات برای حلقه‌های دایروی اثبات شد. ولی برای چندضلعی‌ها اغلب یک فرمول ریاضی کلی وجود ندارد؛ بنابراین صحت و دقت محاسبات چندضلعی‌ها با توجه به حلقه‌های دایره‌ای بررسی می‌شود.

از طرفی دیگر، یک سیم بسته حامل جریان الکتریکی در فواصل دور نسبت به اندازه خود، مانند دوقطبی مغناطیسی رفتار می‌کند. سه حلقه دایروی به شعاع ۱ سانتی‌متر و روی محورهای مختصات و در فاصله ۲- متر از مرکز مختصات در نظر گرفته می‌شود. همچنین در همین فاصله از مرکز، سه حلقه مربعی به ابعاد ۱ سانتی‌متر فرض می‌شود. اگر میدان مغناطیسی در مرکز مختصات برای این دو حالت به‌طور یکسان فرض شود، باید گشتاورهای دوقطبی‌های مغناطیسی در دو حالت سیم پیچ دایروی و مربعی با یکدیگر برابر باشند. اگر میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در مرکز مختصات برابر با $1(\hat{i} + \hat{j} + \hat{k})$ نانو تسلا باشد، برای حلقه‌های مربعی، جریان الکتریکی برابر با ۴۰۰/۰۰۵۰۰۰۲۵۷۱۷۱ آمپر محاسبه می‌شود.

همچنین اگر میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در مرکز مختصات برابر با $1(\hat{i} + \hat{j} + \hat{k})$ نانو تسلا باشد، جریان الکتریکی برای حلقه‌های دایروی با خطای نسبی کمتر از 10^{-15} برابر با ۱۲۷/۳۲۸۷۲۹۱۵۱۶ آمپر محاسبه می‌شود.

گشتاور دوقطبی مغناطیسی برای حلقه‌های مربعی برابر است با:

$$m = IA = 400.00500002571(A) * 0.01(m) \quad (7)$$

$$*0.01(m) = 0.04000050002571(Am^2)$$

از طرفی دیگر گشتاور دوقطبی مغناطیسی برای حلقه‌های دایروی نیز برابر است با:

$$m = IA = 127.3287291516(A) * 3.141592 \quad (8)$$

$$*0.01^2(m^2) = 0.0400015000093(Am^2)$$

جدول ۱: جریان الکتریکی محاسبه شده

صفحه x-y	I (A)	صفحه x-z	I (A)	صفحه y-z	I (A)
۱۱)	۱۱/۳۶	۱۱)	-۰/۱	۱۱)	۲۰/۹
۱۲)	۹/۵۸	۱۲)	-۰/۸	۱۲)	۱۸/۰
۱۳)	۱۱/۹۰	۱۳)	۰/۸۱	۱۳)	۱۴/۳
۱۴)	۹/۲۲	۱۴)	۰/۲۵	۱۴)	۱۵/۴
۱۵)	۹/۲۱	۱۵)	-۰/۳	۱۵)	۲۱/۰
۱۶)	۱/۴۰	۱۶)	۶/۷۲	۱۶)	۲۷/۴
۱۷)	۱۱/۵۲	۱۷)	۶/۱۳	۱۷)	۲۹/۶
۱۸)	۲۵/۷۲	۱۸)	۶/۰۵	۱۸)	۲۰/۲
۱۹)	-۴۶/۸	۱۹)	۰/۶۴	۱۹)	۸/۹۲
۱۱۰)	۱۰۳/۴	۱۱۰)	-۲/۷	۱۱۰)	۱۲/۵
۱۱۱)	-۸۹/۵			۱۱۱)	۲۱/۲
۱۱۲)	۶۷/۳۶			۱۱۲)	۲۷/۲
۱۱۳)	-۱۶/۴			۱۱۳)	۲۳/۱
۱۱۴)	۵۵/۳			۱۱۴)	۱۴/۱

جدول ۲: میزان کاهش میدان مغناطیسی در عمق‌های مختلف و با توجه به

عمق مرجع ۴۵ سانتی‌متر

مکان (متر)	کاهش (%)
-۰/۴۵	۹۹/۷۷۲۹۱
-۰/۵	۹۸/۴۶۶۸۹
-۰/۵۵	۹۷/۵۵۳۲۹
-۰/۶	۹۶/۹۶۳۴۴
-۰/۶۵	۹۶/۵۷۴۶۴
-۰/۷	۹۶/۳۰۳۴۱
-۰/۹	۹۵/۸۴۸۶۷
-۱/۲	۹۵/۷۳۱۱۳
-۱/۷	۹۵/۴۹۸۶۵
-۲	۹۴/۹۵۴۲۸
-۲/۵	۹۳/۷۱۲۲۲
-۳	۹۱/۹۳۹۲۰

روی محور Y قرار دارند؛

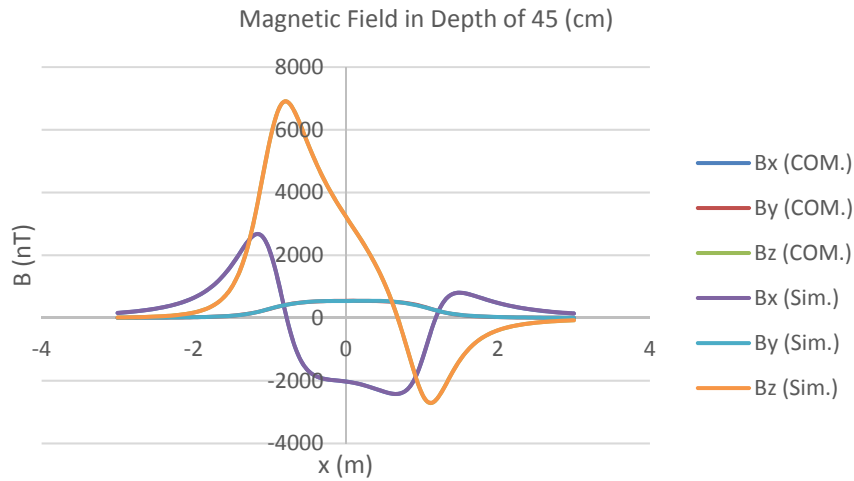
(ج) ۱۴ سیم مستطیلی که دو به دو روبه‌روی یکدیگر و روی محور Z قرار دارند.

مکان اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در فاصله ۳۰ سانتی‌متر از زیر پوسته زیردریایی و از بازه ۳- تا ۳ متر فرض می‌شود. داده‌های ورودی، مقادیر مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در ۱۲۱ نقطه است.

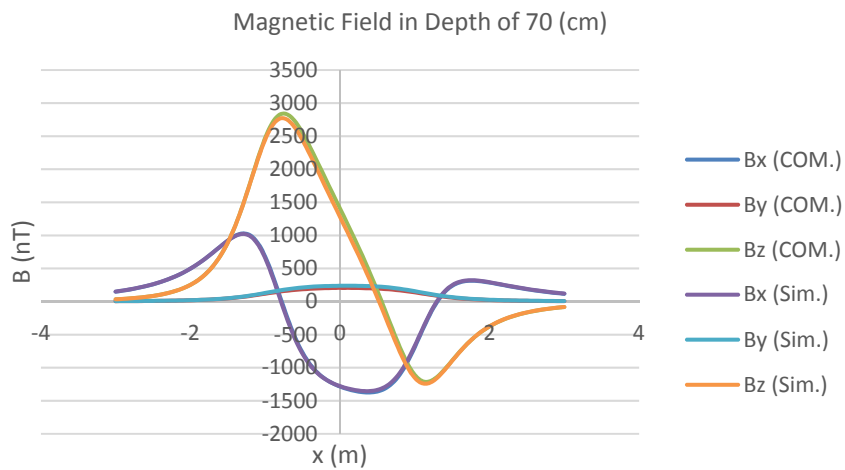
با استفاده از این داده‌های ورودی و با استفاده از روش حل عددی باقی‌مانده کمینه جهانی با تنظیم تیخونوف جریان الکتریکی در هر حلقه محاسبه شد (جدول ۱). همچنین ضریب تنظیم تیخونوف هم با بررسی مقادیر مختلف و جواب‌های نهایی، برابر با صفر در نظر گرفته شد. سپس جریان الکتریکی در حلقه‌ها محاسبه و میدان مغناطیسی حاصل از آن‌ها در زیر زیردریایی محاسبه و با نتایج کامسول مقایسه شد.

در ادامه پروفایل میدان مغناطیسی در عمق‌های ۴۵، ۷۰، ۱۲۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ سانتی‌متر نشان داده شده و میزان اختلاف با نتایج کامسول در جدول ۲ ارائه شده است (شکل ه و، ز، ح، ط).

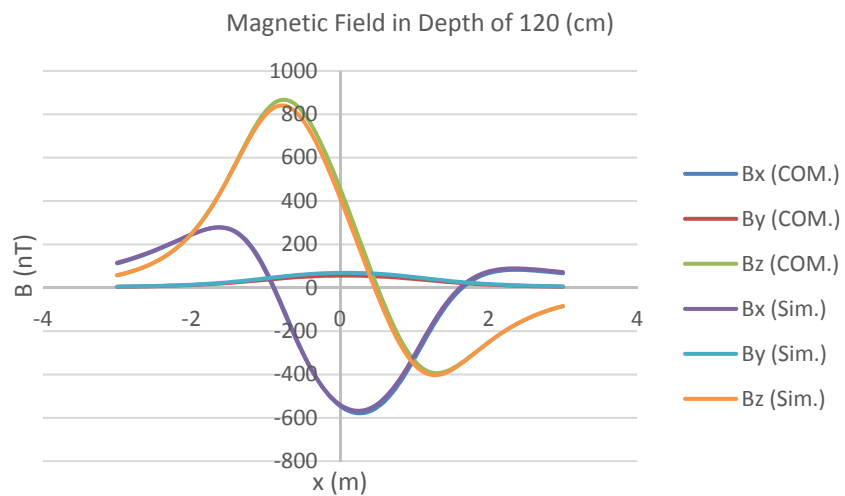
منظور از کاهش در جدول دو این است که سیستم طراحی شده قابلیت حذف میدان مغناطیسی را با این دقت دارد. همچنین، همان‌طور که در شکل‌های ه تا ط مشاهده می‌شود، میدان مغناطیسی با دقت مطلوب محاسبه شده است. این نتایج حاکی از آن است که جریان الکتریکی بسیار نزدیک به جواب یکتا به دست آمده است و این نشان‌دهنده صحت و دقت نرم‌افزار ساخته شده است.



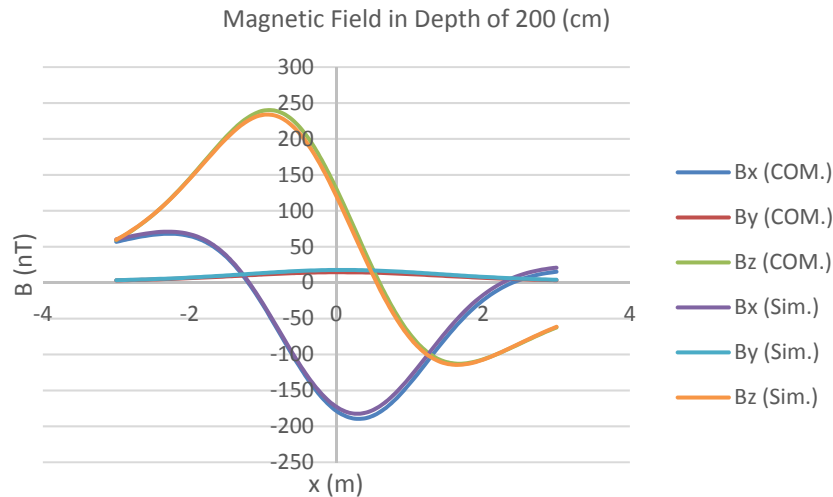
شکل ه: میدان مغناطیسی به دست آمده با نرم افزار ساخته شده در عمق ۴۵ سانتی متر دارای مطابقت بسیار عالی با نتایج کامسول است.



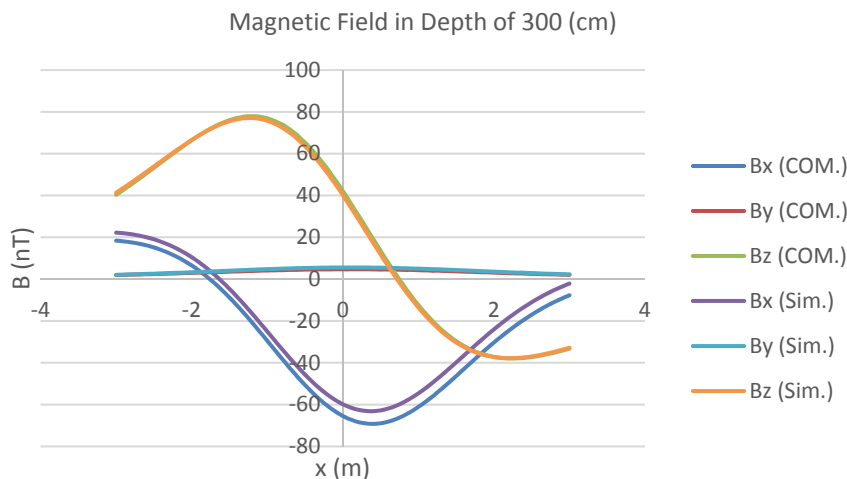
شکل و: میدان مغناطیسی به دست آمده با نرم افزار ساخته شده در عمق ۷۰ سانتی متر دارای مطابقت بسیار عالی با نتایج کامسول است.



شکل ز: میدان مغناطیسی به دست آمده با نرم افزار ساخته شده در عمق ۱۲۰ سانتی متر دارای مطابقت بسیار خوبی با نتایج کامسول است.



شکل ح: میدان مغناطیسی به دست آمده با نرم افزار ساخته شده در عمق ۲۰۰ سانتی متر دارای مطابقت بسیار خوبی با نتایج کامسول است.



شکل ط: میدان مغناطیسی به دست آمده با نرم افزار ساخته شده در عمق ۳۰۰ سانتی متر دارای مطابقت خوبی با نتایج کامسول است.

پیش بینی میدان مغناطیسی کمی کاسته شده است. ولی به طور کلی، با توجه به جدول ۲، میدان مغناطیسی با دقتی بیش از ۹۰٪ پیش بینی شده است. علت کاسته شدن دقت محاسبات با افزایش عمق در این است که جواب معادلات به دست آمده به طور دقیق یکتا نبوده و میزان انحراف بسیار کمی از جواب یکتا دارند و این اختلاف با افزایش عمق بیشتر می شود. همچنین باید خطای محاسباتی نرم افزار کامسول هم در نظر داشت که به طور قطع در محاسبات وجود دارد.

از مزیت های برنامه ساخته شده جبران ساز مغناطیسی می توان به حجم کم برنامه (۴۶۰ کیلوبایت) و مدت زمان بسیار کوتاه برنامه (در حدود ۱ ثانیه) برای انجام محاسبات اشاره نمود.

۴. نتیجه گیری

با استفاده از این نرم افزار، می توان تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از حضور شناورهای فرومغناطیس را شبیه سازی و جریان الکتریکی حلقه های جریان معادل شناور را به دست آورد، از نتایج آن و با اعمال جریان مخالف برای حذف تغییرات میدان مغناطیسی در اطراف شناورها استفاده نمود. همان طور که در شکل های ه تا ط مشاهده می شود، تغییرات میدان مغناطیسی بسیار خوب پیش بینی شده است و در عمق مرجع که سنسورهای میدان مغناطیسی در همان جا قرار دارد، نتایج شبیه سازی در عمل با نتایج خروجی کامسول یکسان به دست آمده است. همچنین با افزایش عمق، از دقت

- [9] Maziar Salahi. On regularization of ill-conditioned linear systems. *Journal of Applied Mathematics*. 2008;5(17):43-49.
- [10] Calvetti D, Morigi S, Reichel L, Sgallari F. Tikhonov regularization and the L-curve for large discrete ill-posed problems. *Journal of computational and applied mathematics*. 2000 Nov 1;123(1-2):423-46.

پی‌نوشت

1. Conjugate Gradient Squared Method
2. Generalized Minimal Residual
3. Norm
4. Tikhonov Regularization
5. Regularization Parameter
6. Least Square
7. Well-Conditioned
8. Least Square Quadratic Regression

۵. جمع‌بندی

هدف اصلی در این تحقیق، به صفر رساندن میدان مغناطیسی القایی و پسماند در اطراف شناورهای آبی به منظور جلوگیری از شناسایی و انهدام آن‌هاست. در ابتدا، شناور مجموعه‌ای از مدارهای بسته حامل جریان الکتریکی فرض شد. این مدارهای الکتریکی باید حامل جریان الکتریکی باشند که میدان مغناطیسی دقیقاً برابر با میدان مغناطیسی القایی و پسماند ولی در خلاف جهت آن‌ها تولید کنند. روش حل این مسئله به آن صورت است که مجموع میدان مغناطیسی هر مدار در هر نقطه برابر با میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده باشد. با این فرض، یک دستگاه معادلات خطی ساخته شده که مجهولات آن جریان الکتریکی هر مدار بسته است. روش حل عددی دستگاه معادلات، باقی‌مانده کمینه جهانی با تنظیم تیخونوف بود. نتایج حاکی از پیش‌بینی بسیار خوب میدان مغناطیسی در عمق‌های مختلف در مقایسه با نتایج نرم‌افزار کامسول بود.

مراجع

- [1] Holtham PM, Lucas CE. *New Approaches to Magnetic Modelling, I: Prolate Spheroids, II: One-spike-at-a-time Fitting*. Department of National Defence, Research & Development Branch, Defence Research Establishment Pacific; 1993.p.66.
- [2] Holmes JJ. Reduction of a ship's magnetic field signatures. *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*. 2008 Jan 1;3(1):1-68.
- [3] Holmes JJ, Steffey S. *Advanced Degaussing Coil System*. Washington DC: Department of the NAVY; 1996. US PATENT No. PAT-APPL-217 908.
- [4] Wingo RA, Holmes JJ, Lackey MH. Test of Closed Loop Degaussing Algorithm on a Minesweeper Engine. *Naval Engineers Journal*. 1992 May;104(3):219-27.
- [5] Jackson JD. *Classical electrodynamics*. New York: John Wiley & Sons, Inc; 1999.
- [6] Reitz JR, Milford FJ. *Foundations of Electro Magnetic Theory*. Addison; 1960.p. 276
- [7] Hager WW. Iterative methods for nearly singular linear systems. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 2000; 22(2):747-66.
- [8] Barrett R, Berry MW, Chan TF, Demmel J, Donato J, Dongarra J et al. *Templates for the solution of linear systems: building blocks for iterative methods*. Siam; 1994.