

شبیه‌سازی امضای مغناطیسی کشتی‌ها با استفاده از آرایه آهنربایی هالباخ به‌عنوان مولد میدان مغناطیسی استاتیک یکنواخت

سینا محمودنژاد ماکویی^{۱*}، ایاز قربانی^۲

۱- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۹۳/۱۱/۲۰، پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۷)

چکیده: در این مقاله روشی برای شبیه‌سازی امضای مغناطیسی کشتی‌ها ارائه شده است. در این روش آرایه‌ای از آهنرباها به نام آرایه هالباخ به‌عنوان مولد میدان مغناطیسی استاتیک یکنواخت برای ایجاد میدان مغناطیسی زمین مورد استفاده قرار گرفته است. سادگی این ساختار در کنار یکنواختی مناسب میدان تولیدی آن، امکان انجام شبیه‌سازی امضای مغناطیسی شناورها با دقتی قابل قبول را فراهم می‌سازد. به منظور حصول اطمینان از صحت روش و تعیین خطای آن، دو ساختار ساده پوسته‌کروی و پوسته‌کروی کشیده که امضای مغناطیسی آن‌ها قابل تحلیل بوده، شبیه‌سازی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تحلیلی مقایسه شده است. سازگاری مناسب نتایج حاصله، صحت روش را تایید می‌کند. بعد از حصول اطمینان از صحت روش ارائه‌شده، دو مدل ساده کشتی با ابعاد ۲۰ m و ۱۳۰ m شبیه‌سازی شده و امضای مغناطیسی مربوط به آن‌ها در عمق ۱۰ m آرایه شده است.

واژگان کلیدی: میدان‌های مغناطیسی زمین، مواد فرومغناطیس، امضای مغناطیسی، آرایه هالباخ

۱. مقدمه

هنگامی که یک ماده فرومغناطیس در معرض میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد حوزه‌های مغناطیسی ماده فرومغناطیس در جهت میدان خارجی هم‌راستا شده و در نتیجه این عمل، میدانی افزون بر میدان خارجی در محیط ایجاد می‌شود. این میدان اضافی در حقیقت به صورت یک اختلال اضافی در محیط محسوب شده و می‌توان با استفاده از سنسورهای مغناطیسی حضور آن را آشکارسازی کرد. اکثر شناورها نیز از مواد فرومغناطیسی مانند فولاد ساخته شده و در نتیجه حضور آن‌ها در میدان مغناطیسی زمین، بدنه آن‌ها مغناطیسه شده و میدانی اختلالی در محیط اطرافشان به وجود می‌آید. یکی از مهم‌ترین دلایل آسیب‌پذیری شناورها در مواجهه با مین‌های دریایی، امضای مغناطیسی^۱ آن‌هاست. علاوه بر این، امضای مغناطیسی با استفاده از تجهیزات شناسایی اختلالات مغناطیسی، قابل آشکارسازی بوده و در شناسایی زیردریایی‌ها به کار می‌رود. در تمامی روش‌های حفاظتی که برای جبران این اختلالات معرفی شده‌اند، از جمله

دگوسینگ^۲ و دیپرمنینگ^۳، دانستن امضای مغناطیسی شناور از الزامات اصلی است. بیش‌تر روش‌هایی که برای به دست آوردن امضای مغناطیسی شناور ارائه شده‌اند، بر اساس روش عددی اجزا محدود هستند [۱-۳] و نرم افزار Ansoft Maxwell [۴] برای تحلیل مسایل سه‌بعدی الکترومغناطیسی از روش اجزا محدود بهره می‌برد. درحالت کلی برای تعیین امضای مغناطیسی یک شناور دو راه کار کلی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی وجود دارد. با وجود اینکه اندازه‌گیری مستقیم امضای مغناطیسی شناور دقت بیشتری داشته و قابل اعتمادتر است، ولی محدودیت‌های عملیاتی و هزینه‌های چنین سیستم اندازه‌گیری، انجام این فرایند را برای تمامی کشتی‌ها و زیردریایی‌های ناوگان یک کشور غیرممکن می‌کند. در کنار این امر، در مراحل طراحی اولیه یک شناور و هنگامی که شناور هنوز ساخته نشده است، تنها روش تعیین دقیق امضای مغناطیسی آن، شبیه‌سازی خواهد بود. در مقایسه با سیستم‌های اندازه‌گیری، شبیه‌سازی سریع و کم هزینه بوده و برای تمامی شناورها در دسترس خواهد بود. البته در کنار

2. Degaussing
3. Deperming

* رایانامه نویسنده پاسخگو: sina.mm@aut.ac.ir
1. Magnetic signature

یابد، بایستی ناحیه حل مساله کوچک‌تر فرض شده و در نتیجه شناورهایی با ابعاد کوچک‌تر قابل شبیه‌سازی خواهند بود. در مرجع [۶]، دامنه امضای مغناطیسی یک شناور 20 m ، در عمق 25 m برابر 600 nT گزارش شده است. در مراجعی مانند [۷، ۸] بر اساس مدل مورد مطالعه و ابعاد شناور، دامنه‌های متفاوتی برای امضای مغناطیسی شناورها گزارش شده ولی در تمامی آن‌ها برای یک شناور فولادی دامنه‌ای به بزرگی 1000 nT و حتی بیشتر در نظر گرفته‌اند. اگر دامنه‌های گزارش شده، با حداکثر تغییرات 20 nT و یا 100 nT میدان تولیدی آرایه هالباخ مقایسه شود، مشخص خواهد شد که این میزان غیریکنواختی در میدان اولیه قابل اغماض می‌باشد.

گام دوم در انجام شبیه‌سازی امضای مغناطیسی شناور، انتخاب مدلی برای بدنه شناور است که مشخصات کلی یک شناور را دارا بوده و در عین حال ساده باشد تا زمان اجرای شبیه‌سازی‌ها طولانی نشود. بدین منظور در مقاله حاضر دو مدل 20 m و 130 m برای شناور انتخاب شده است. مدل اول با استفاده از ابزارهای موجود در داخل نرم‌افزار Maxwell طراحی شده و مدل دوم، مدلی است که در کتابخانه نرم‌افزار CST STUDIO SUITE [۹] برای انجام مطالعات سطح مقطع راداری آرایه شده است. با توجه به تفاوت‌های تحلیل مساله سطح مقطع راداری و مساله امضای مغناطیسی، مدل ارائه‌شده نیازمند اصلاحاتی است تا ضخامت بدنه شناور در آن لحاظ شود. در مساله سطح مقطع راداری ضخامت بدنه، اهمیتی نداشته و به همین دلیل اکثر مدل‌های مورد استفاده در این‌گونه تحلیل‌ها، به صورت پوسته بوده و ضخامتی ندارند و این درحالی است که در مساله امضای مغناطیسی، ضخامت بدنه، نشان دهنده میزان ماده فرومغناطیسی است که در اثر میدان مغناطیسی زمین، مغناطیسه می‌شود و به همین دلیل، این عامل در چنین تحلیلی بسیار تاثیرگذار خواهد بود. در شکل (۱) مدل‌های مورد استفاده در این مقاله نشان داده شده‌اند. ضخامت در نظر گرفته شده برای این مدل‌ها به صورت میانگین در حدود $3\text{--}4\text{ cm}$ است ولی در مدل 20 m و در قسمت فوقانی روسازه، سازه‌ای به ضخامت 20 cm نیز وجود دارد. ضریب گذردهی نسبی مغناطیسی برای هر دو مدل نیز 80 فرض شده است.

در مرجع [۱۰] دو مدل اولیه پوسته کروی و پوسته کروی کشیده به‌عنوان ساختارهایی که امضای مغناطیسی آن‌ها قابل تحلیل هستند، معرفی شده است. شبیه‌سازی این ساختارهای ساده و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تحلیلی ارائه‌شده در [۱۰]، صحت روش پیشنهادی برای انجام شبیه‌سازی را تایید و میزان خطای آن را مشخص خواهد کرد.

این مزایا، مشکلاتی نیز برای انجام شبیه‌سازی‌های آن وجود خواهد داشت.

با وجود این که میدان مغناطیسی زمین در تمامی نقاط کره زمین ثابت نیست، می‌توان در محیط اطراف شناور، آن را به‌عنوان یک میدان یکنواخت در نظر گرفت. یکی از مشکلات انجام شبیه‌سازی امضای مغناطیسی شناور این است که در بسیاری از نرم‌افزارهای در دسترس محققان داخلی، تحریک میدان مغناطیسی یکنواخت در رژیم استاتیک تعریف نشده و به همین دلیل برای شبیه‌سازی مغناطیسی‌شدگی بدنه فرومغناطیسی شناورها در اثر میدان مغناطیسی زمین، ساختاری مورد نیاز است تا این میدان مغناطیسی یکنواخت را در ناحیه‌ای به بزرگی حداقل دو برابر ابعاد شناور ایجاد کند. اجرای شبیه‌سازی‌ها برای مسایلی با ابعاد چند صد متری با رایانه‌های معمولی زمان‌بر بوده و بایستی ساختارهای موجود در مساله تا حد ممکن ساده باشند. برای رفع این مشکل، ترکیبی جدید از آرایه آهنربایی هالباخ^۱ که در مرجع [۵] معرفی شده، برای تولید میدان مغناطیسی اولیه مورد استفاده قرار گرفته است. سادگی این ساختار باعث می‌شود که بتوان میدانی یکنواخت در ناحیه‌ای به بزرگی 200 m نیز تولید کرد. میزان غیریکنواختی میدان تولیدی این ساختار در بدترین شرایط برابر با 100 nT خواهد بود. با مقایسه میزان این غیریکنواختی و دامنه میدان مغناطیسی زمین که در محدوده $67000\text{--}22000\text{ nT}$ قرار دارد، مشخص می‌شود که استفاده از این آرایه برای تولید میدان مغناطیسی اولیه، البته با پذیرفتن مقداری خطا، قابل قبول خواهد بود. در مقاله حاضر دامنه میدان مغناطیسی اولیه 55000 nT فرض شده است که با در نظر گرفتن این دامنه، نرخ غیریکنواختی میدان تولیدی آرایه هالباخ $0/2$ درصد خواهد بود. نرخ غیریکنواختی مناسب برای انجام چنین شبیه‌سازی‌هایی به ابعاد شناور، دامنه اختلالات تولیدی شناور و عمق اندازه‌گیری اختلالات بستگی دارد. برای این که بتوان از غیریکنواختی میدان اولیه صرف‌نظر کرد بایستی حداکثر میزان غیریکنواختی در مقایسه با دامنه امضای مغناطیسی کشتی بسیار کمتر باشد. میزان یکنواختی میدان تولیدی آرایه هالباخ در مرکز آرایه بهترین وضعیت را دارد و برای رسیدن به نرخ غیریکنواختی کمتر، می‌توان ناحیه کوچک‌تری را در نظر گرفت. به‌عنوان مثال اگر ناحیه 50 m مرکزی آرایه، به‌عنوان محیط اطراف شناور در نظر گرفته شود، حداکثر میزان غیریکنواختی 20 nT خواهد بود که نرخ غیریکنواختی آن $0/4$ درصد است. البته کاملاً بدیهی است که هرچه میزان یکنواختی میدان اولیه افزایش

¹ Halbach magnet array

$$H_{y,III} = \frac{3D_1 yz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (2)$$

$$H_{z,III} = H_0 + \frac{D_1(2z^2 - x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (3)$$

$$D_1 = \left[\frac{(2\mu' + 1)(\mu' - 1)}{(2\mu' + 1)(\mu' + 2) - 2\frac{a^3}{b^3}(\mu' - 1)^2} \right] (b^3 - a^3)H_0 \quad (4)$$

و برای مدل پوسته کروی کشیده، نتایج به صورت زیر خواهد بود [۱۰].

$$H_{x,III} = \frac{D'_1 x \eta}{r_1 r_2 (\xi^2 - 1)} \quad (5)$$

$$H_{y,III} = \frac{D'_1 y \eta}{r_1 r_2 (\xi^2 - 1)} \quad (6)$$

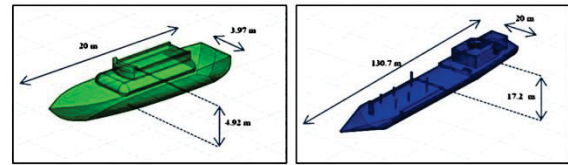
$$H_{z,III} = H_0 + \frac{D'_1}{2} \left[-\frac{1}{2} \ln\left(\frac{\xi + 1}{\xi - 1}\right) + \frac{c^2 \xi}{r_1 r_2} \right] \quad (7)$$

$$D'_1 = \frac{\xi_1 \xi_2 \mu' (a_3 - a_4) + a_2 \xi_1 - \xi_2 a_1}{\mu'^2 a_2 \xi_1 (a_3 - a_4) + \mu' (\xi_1 a_4 (2a_2 - \xi_2 a_3)) + a_4 (\xi_2 a_1 - \xi_1 a_2)} (\mu' - 1) c H_0 \quad (8)$$

در رابطه (۸) ضرایب a_4, a_3, a_2, a_1 در [۱۰] تعریف شده است.

۳- آرایه آهنربایی هالبخ

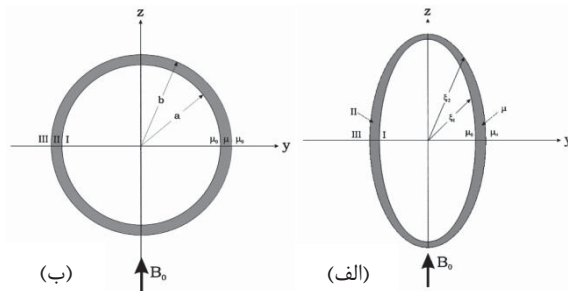
همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، یکی از مشکلات انجام شبیه‌سازی امضای فرومغناطیسی شناور، ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت در یک ناحیه بزرگ است که در نرم‌افزاری مانند Maxwell 16.0 چنین تحریکی برای مسایل مغناطیس ساکن (مگنتواستاتیک) در نظر گرفته نشده است. به همین دلیل برای شبیه‌سازی این مساله، ساختاری نیاز است که بتواند چنین میدانی را تولید نماید. برای حل این مشکل، ترکیبی جدید از آرایه آهنربایی هالبخ که در مرجع [۵] معرفی شده، استفاده شده است. این ساختار که در شکل (۳) نشان داده شده است، شامل ۸ قطعه آهنربا است که هر یک در راستایی خاص، مغناطیسه بوده و در کنار هم یک ساختار استوانه‌ای را ایجاد می‌کنند. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد این ساختار در کنار تولید میدان یکنواخت، سادگی آن است که این امکان را فراهم می‌کند که حتی آهنرباهایی با ابعاد 800×960 m نیز قابل شبیه‌سازی باشند. چنین ابعاد بزرگی به این دلیل انتخاب شده‌اند که میزان یکنواختی میدان مغناطیسی در مرکز ساختار تا حد ممکن



شکل (۱): مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی امضای مغناطیسی
الف: مدل اصلاح شده نرم افزار CST ب: مدل طراحی شده در نرم افزار Maxwell

۲- مدل‌های اولیه

یکی از ابتدایی‌ترین روش‌هایی که دانشمندان برای محاسبه امضای مغناطیسی شناورها ارائه داده‌اند، مدل‌های ساده‌ای است که بتوان میدان اختلالی آن‌ها را به صورت تحلیلی و بدون نیاز به انجام آنالیزهای عددی محاسبه کرد. بدین منظور، در مرجع [۱۰] دو مدل ساده پوسته کروی و پوسته کروی کشیده معرفی شده‌اند. ویژگی بارز این دو مدل که باعث می‌شود در چنین تحلیل‌هایی مورد استفاده قرار گیرند این است که شرایط مرزی در چنین ساختارهایی منطبق بر محورهای دو دستگاه مختصات کروی و کروی کشیده است که موجب می‌شود تحلیل آن‌ها به سادگی انجام شود. این مدل‌ها که به مدل‌های اولیه معروف هستند در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.



شکل (۲): مدل‌های اولیه الف: مدل پوسته کروی کشیده ب: مدل پوسته کروی [۱۰].

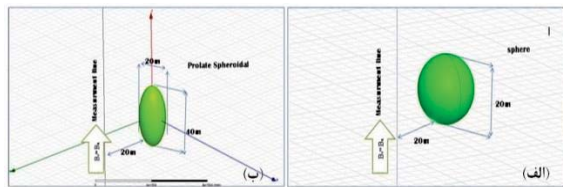
جزئیات دقیق محاسبه امضای مغناطیسی این دو مدل در مرجع [۱۰] به صورت کامل شرح داده شده است. در این محاسبات، میدان مغناطیسی زمین در جهت محور Z و به صورت H_0 فرض شده است. برای مدل پوسته کروی میدان مغناطیسی کل سیستم در ناحیه بیرونی ساختار به صورت زیر خواهد بود [۱۰].

$$H_{x,III} = \frac{3D_1 xz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (1)$$

می‌رسد. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، با نزدیک‌تر شدن به ناحیه مرکزی آرایه، یکنواختی میدان تولیدی آن بهتر می‌شود. با توجه به میزان غیریکنواختی میدان تولیدی آرایه می‌توان چنین گفت که برای مدل شناور ۲۰ m، انجام شبیه‌سازی با دقت بسیار خوب و برای مدل ۱۳۰ m، شبیه‌سازی با مقداری خطای قابل قبول، همراه خواهد بود.

۴- شبیه‌سازی مدل‌های اولیه

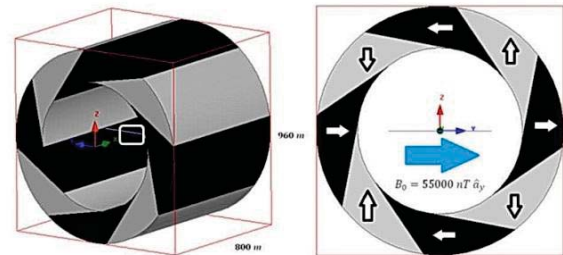
با در اختیار داشتن میدان مغناطیسی یکنواخت، انجام شبیه‌سازی امضای مغناطیسی ممکن خواهد بود، ولی قبل از انجام شبیه‌سازی‌ها بایستی از صحت این روش اطمینان حاصل کرده و میزان خطای آن مشخص شود. شکل (۵) مدل‌های اولیه معرفی شده در بخش دوم را که در محیط نرم‌افزار ترسیم شده‌اند، نشان می‌دهد. برای مدل پوسته کروی، قطر ساختار ۲۰ m و برای مدل پوسته کروی کشیده، نصف قطر اصلی ۲۰ m و نصف قطر فرعی ۱۰ m در نظر گرفته شده است. ضخامت مدل پوسته کروی ۲ cm و ضخامت مدل پوسته کروی کشیده ۲-۴ cm است. در هر دو مدل، امضای مغناطیسی در عمق ۲۰ m اندازه‌گیری شده است.



شکل (۵): مدل‌های اولیه ترسیم شده در محیط نرم‌افزار. (الف) پوسته کروی (ب) پوسته کروی کشیده.

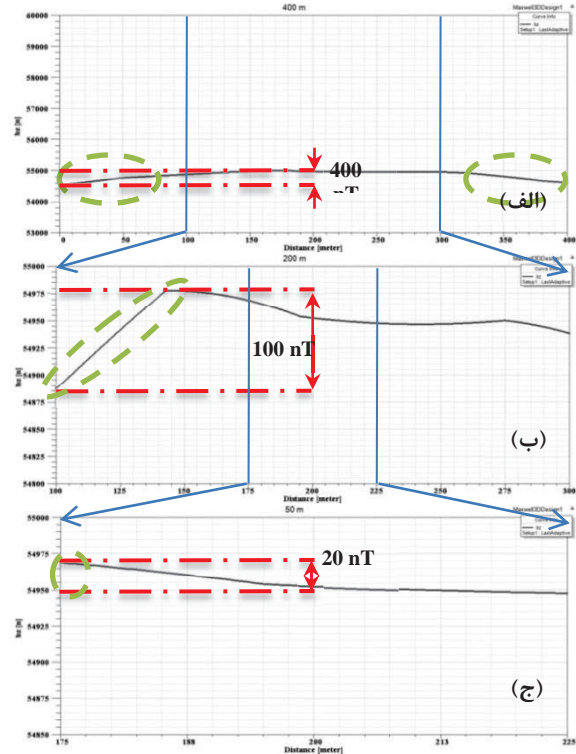
در شکل (۶) نتایج شبیه‌سازی مدل‌های پوسته کروی و پوسته کروی کشیده در مقایسه با نتایج تحلیلی مرجع [۱۰]، ارائه شده است. در این شکل منحنی‌های توپوگراف با استفاده از معادله‌های (۸-۱) ترسیم شده است. با دقت در این معادلات مشاهده می‌شود که اگر نقطه مشاهده در $y=0$ قرار داشته باشد، مولفه y امضای مغناطیسی در هر دو مدل صفر خواهد شد (به معادله‌های ۲ و ۶ رجوع شود). به همین دلیل برای هر کدام از مدل‌های پوسته کروی و پوسته کروی کشیده، فقط دو مولفه x و z نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی‌ها میدان مغناطیسی زمین در جهت محور z فرض شده است و در این حالت با توجه به تقارن موجود در مساله دو مولفه از مولفه‌های سه‌گانه میدان مغناطیسی در روی خط اندازه‌گیری غیرصفر خواهد بود. در شکل‌های (۶-الف) و (۶-ج) مولفه عمودی امضای مغناطیسی و در شکل‌های (۶-ب) و (۶-د) مولفه‌های افقی امضای مغناطیسی نشان داده شده است. نکته دیگری که در رابطه با شکل‌های (۶-ب) و (۶-د) وجود دارد

افزایش یابد. جنس ماده‌ای آهنرباها Ndfe35 با وادارندگی A/m ۸۹۰۰۰ در نظر شده است.



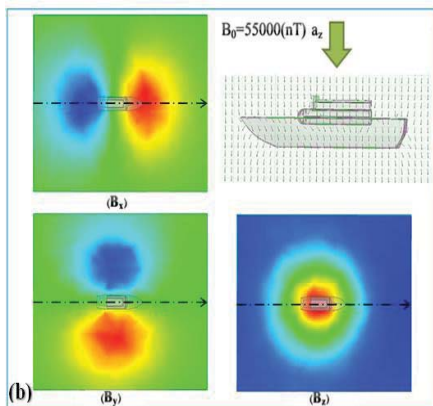
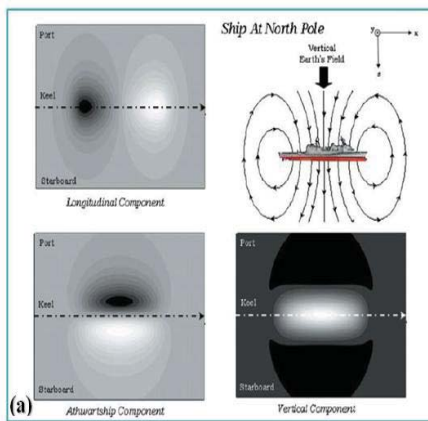
شکل (۳): آرایه آهنربایی هالبخ در محیط نرم‌افزار Maxwell. پیکان‌های سفید رنگ، نشان دهنده راستای وادارندگی هر قطعه و پیکان مرکزی نشان دهنده میدان برآیند آرایه است.

در شکل (۴) میدان مغناطیسی تولیدی آرایه هالبخ در ناحیه مرکزی آرایه نشان داده شده است. در شکل (۴-الف) میدان در راستای یک خط ۴۰۰ m نشان داده شده و همان‌طور که مشخص است میزان غیریکنواختی میدان به ۴۰۰ nT نیز می‌رسد. در شکل (۴-ب) همین میدان در ۲۰۰ m مرکزی خط نشان داده شده و حداکثر میزان غیریکنواختی در این ناحیه در حدود ۱۰۰ nT است و شکل (۴-ج) میدان را در ناحیه ۵۰ m مرکزی می‌دهد که در این ناحیه، حداکثر میزان غیریکنواختی به ۲۰ nT



شکل (۴): میدان مغناطیسی تولیدی آرایه هالبخ. (الف) ناحیه ۴۰۰ m مرکزی (ب) ناحیه ۲۰۰ m مرکزی (ج) ناحیه ۵۰ m مرکزی

عرضی^۳ می‌شوند. در هر یک از این حالت‌ها، میدان اختلالی یا همان امضای مغناطیسی سه‌مولفه دارد و به همین دلیل تعداد مولفه‌های امضای مغناطیسی یک شناور در حالت کلی ۹ مولفه خواهد بود. به منظور جلوگیری از تکرار مطالب، برای مقایسه الگوی میدان اختلالی در محیط اطراف شناور، نتایج مربوط به شناور ۲۰ m در حالت IVM و برای نشان دادن امضای مغناطیسی در روی خط اندازه‌گیری (محل فرضی قرارگیری سنسورها) نتایج مربوط به هر دو مدل ۲۰ m و ۱۳۰ m و در حالت ILM آرایه خواهد شد. در شکل (۷) الگوی میدان مغناطیسی اختلالی شناور ۲۰ m در حالت IVM نشان داده شده است.

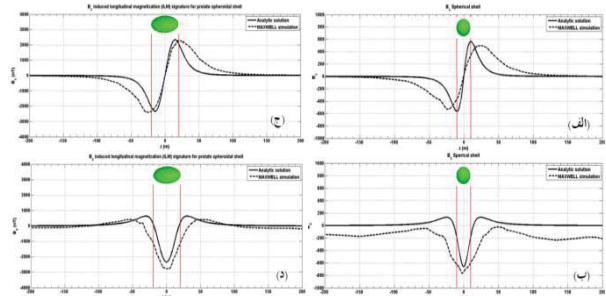


شکل (۷): الگوی میدان مغناطیسی شناور ۲۰ m در حالت IVM. (الف) نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای شناور ۲۰ m (ب) الگوی ارائه شده برای یک شناور نمونه در حالت IVM در مرجع [۶].

در این حالت میدان مغناطیسی زمین عمود بر شناور بوده و به دلیل تقارن موجود در مساله، مولفه B_z میدان مغناطیسی در روی خط اندازه‌گیری برابر صفر خواهد بود. در این شکل نتایج حاصل از شبیه‌سازی شناور ۲۰ m با الگوی پیش‌بینی شده در حالت

این است که در این شکل‌ها، میدان مغناطیسی زمین از میدان کل کسر شده و فقط اختلال ناشی از ساختار فرومغناطیسی نشان داده شده است.

با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و امضای مغناطیسی تحلیلی، سازگاری کلی نتایج، البته با وجود اختلاف‌هایی قابل مشاهده است. علت اصلی اختلاف‌های ایجادشده در نتایج، غیریکنواختی میدان اولیه و محدودیت‌های تحلیل‌های عددی است. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شد، بیش‌ترین میزان غیریکنواختی در نواحی انتهایی خط اندازه‌گیری است و همین امر به وضوح در نواحی انتهایی شکل‌های (۶-ب) و (۶-د) نیز قابل مشاهده است. البته بخش‌های انتهایی شکل‌های (۶-الف) و (۶-ج) فاقد چنین تغییراتی است و دلیل آن این است که آرایه هالباخ در راستای محور X به صورت تقریباً ایده‌آل، میدانی تولید نمی‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها دارای ریب‌هایی است که این مساله را می‌توان به محدودیت‌های نرم‌افزار و مش‌بندی آن نسبت داد. همان‌طور که می‌دانیم، نمی‌توان چنین مساله‌ای در این ابعاد را با هر گامی مش‌بندی کرده و حتماً بایستی محدودیت‌های سخت‌افزاری را در تعیین گام و تعداد نهایی مش‌ها در نظر گرفت. با وجود تمامی این اختلاف‌ها، نتایج حاصله تقریباً قابل قبولی از دامنه و محل بیشینه‌های امضای مغناطیسی مدل‌ها را در اختیار قرار داده و صحت روش پیشنهادی را تایید می‌کند.



شکل (۶): امضای مغناطیسی مدل‌های اولیه. الف: مولفه عمودی B_x پوسته کروی ب: مولفه افقی B_z پوسته کروی ج: مولفه عمودی B_x پوسته کروی کشیده (ب) مولفه افقی B_z پوسته کروی کشیده. منحنی‌های توپر مربوط به نتایج تحلیلی و منحنی‌های خط چین مربوط به نتایج حاصل از شبیه‌سازی است.

۵- شبیه‌سازی مدل‌های کشتی

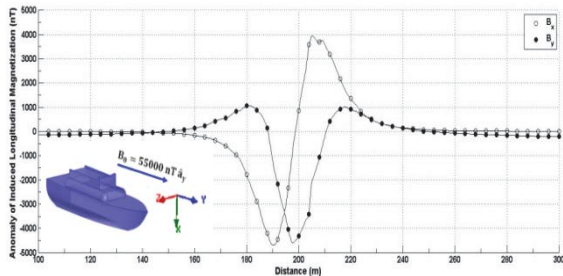
بر اساس جهت‌گیری شناور نسبت به میدان مغناطیسی زمین، سه نوع امضای مغناطیسی برای هر شناور قابل تعریف است. این امضاها مغناطیسی شامل امضای مغناطیسی القایی عمودی^۱، امضای مغناطیسی القایی طولی^۲ و امضای مغناطیسی القایی

3. IAM: Induced Athwartship Magnetization

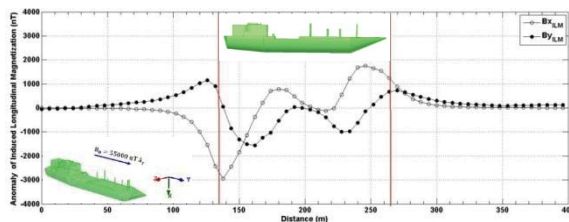
1. IVM: Induced Vertical Magnetization
2. ILM: Induced Longitudinal Magnetization

مختلف چنین بیان شده است که این طول به صورت تقریبی در مرتبه محیط شناورها قرار دارد.

در جدول (۱) زمان اجرای هر کدام از شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است. با توجه به این‌که این مسایل در حوزه مغناطیس ساکن تحلیل می‌شوند (برخلاف ابعاد بزرگ ناحیه حل مساله)، مدت زمان لازم برای اجرای تحلیل‌ها زیاد نخواهد بود. نکته‌ای که در رابطه با جدول (۱) حائز اهمیت است، این است که تحلیل پوسته کروی کشیده سخت‌تر از سایر مسایل بوده و دلیل اصلی این امر انحنای کروی این ساختار است که مش‌بندی آن را در نرم‌افزار مورد استفاده سخت‌تر کرده و کل ساختار با تعداد مش‌های بیش‌تری نسبت به سایر ساختارها تحلیل شده است.



شکل (۸): امضای مغناطیسی کشتی ۲۰ m در حالت ILM (میدان مغناطیسی زمین هم راستا با طول کشتی است).



شکل (۹): امضای مغناطیسی کشتی ۱۳۰ m در حالت ILM (میدان مغناطیسی زمین هم راستا با طول کشتی است).

جدول (۱): زمان اجرای شبیه‌سازی‌ها

زمان شبیه‌سازی (دقیقه: ثانیه)	مساله مورد نظر در شبیه‌سازی
۵':۱۳"	شبیه‌سازی امضای مغناطیسی
۱۰':۵۰"	شبیه‌سازی امضای مغناطیسی پوسته کروی کشیده
۴':۲۵"	شبیه‌سازی امضای مغناطیسی شناور
۶':۱۸"	شبیه‌سازی امضای مغناطیسی شناور
CPU: Intel Core i7-2640 M @ 2.8 GHz RAM: 8 GB	مشخصات سیستم مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها

IVM برای یک شناور نمونه که در مرجع [۶] ارائه شده، مقایسه شده است. در نتایج شبیه‌سازی بخش‌های قرمز و در نتایج مرجع [۶] بخش‌های سفید نشان دهنده پلاریته مثبت و به همین ترتیب بخش‌های آبی و تیره نشان دهنده پلاریته منفی هستند.

در شکل‌های (۸) و (۹) امضای مغناطیسی مغناطیسی شناورهای ۲۰ m و ۱۳۰ m در حالت ILM، بر روی خط اندازه‌گیری در عمق ۱۰ m درست در زیر تیرک اصلی شناور ارائه شده است. مشابه حالت IVM، در حالت ILM نیز به دلیل تقارن موجود در مساله، مولفه عرضی امضای مغناطیسی (که با توجه به تغییر دستگاه مختصات نسبت به حالت‌های قبل، مولفه عرضی در این شبیه‌سازی‌ها مولفه Z خواهد بود) در روی خط اندازه‌گیری صفر خواهد بود. همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود، دامنه امضای مغناطیسی در نواحی که تمرکز ماده فرومغناطیس بیشتر است، بزرگ‌تر بوده و این مساله می‌تواند در طراحی اولیه شناورها در نظر گرفته شود. طراحان شناورها بر اساس همین داده‌های ساده می‌توانند بخش‌های مهم شناورها را در نقاطی طراحی کنند که آسیب‌پذیری کمتری داشته باشند. با انجام چنین اصلاحاتی می‌توان آسیب‌پذیری شناور را در مقابله با مین‌های دریایی کاهش داده و علاوه بر آن بایستی در نظر گرفت که این داده‌ها، ورودی‌های اصلی سیستم‌های حفاظتی مانند دگوسینگ بوده و از ملزومات اصلی طراحی آن‌ها می‌باشند. نکته دیگری که حائز اهمیت است، تفاوت سطح دامنه امضای مغناطیسی شناورهای ۲۰ m و ۱۳۰ m است. دامنه امضای مغناطیسی شناور ۲۰ m نقاط بیشینه بزرگ‌تر از دامنه امضای مغناطیسی شناور ۱۳۰ m است و این مساله کمی عجیب به نظر می‌رسد. دلیل این امر بسیار واضح بوده و به بدنه طراحی شده این دو شناور مربوط می‌شود. در شناور ۲۰ m بخش‌هایی از روسازه ضخامتی معادل ۲۰ cm دارد که چنین بخشی در مدل شناور ۱۳۰ m در نظر گرفته نشده است. در شناور ۱۳۰ m ضخامت در کل بدنه از محدوده ۳-۴ cm خارج نبوده و همین اختلاف در ضخامت دو مدل، باعث متفاوت شدن سطح دامنه دو امضای مغناطیسی شده است. بزرگی یک شناور به لحاظ طولی به معنای آن است که امضای مغناطیسی آن در فضای بیش‌تری وجود دارد (به صورت تقریبی امضای مغناطیسی شناور در طولی به اندازه محیط شناور غیر صفر می‌شود) ولی این بزرگی طول لزوماً به معنی بزرگی دامنه امضای مغناطیسی نخواهد بود. با دقت در شکل‌های (۸) و (۹) مشخص است که امضای مغناطیسی شناور ۲۰ m در طولی به اندازه ۵۰ m میانی خط اندازه‌گیری و امضای مغناطیسی شناور ۱۳۰ m در طولی به اندازه ۲۵۰ m غیر صفر است. در مراجع

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای شبیه‌سازی امضای مغناطیسی شناور با استفاده از آرایه آهنربایی هالباخ ارائه شد. با در نظر گرفتن مسایل شبیه‌سازی ساختارهای بزرگ و محدودیت‌های سخت‌افزاری، سادگی این آرایه و مدل‌های استفاده‌شده برای شناورها، این امکان را فراهم ساخت تا شبیه‌سازی‌ها تا حد ممکن ساده و سریع انجام شوند. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل‌های اولیه و نتایج تحلیلی ارائه‌شده برای آن‌ها، صحت روش پیشنهادی و میزان خطای آن مشخص گردید. دامنه‌های به‌دست‌آمده برای دو شناور ۲۰ m و ۱۳۰ m به اندازه‌ای هستند که می‌توانند به راحتی هر مین حساس به اختلالات مغناطیسی را فعال کنند و همین امر اهمیت سیستم‌های حفاظتی در مقابله با امضاهای مغناطیسی مانند دگوسینگ را بیش از پیش نشان می‌دهد.

۷- مراجع

- [1] X. Brunotte and G. Meunier, "Line element for efficient computation of the magnetic field created by thin iron plates," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 2196-2198, 1990.
- [2] X. Brunotte, G. Meunier, and J.-F. Imhoff, "Finite element modeling of unbounded problems using transformations: a rigorous, powerful and easy solution," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, pp. 1663-1666, 1992.
- [3] O. Chadebec, J.-L. Coulomb, V. Leconte, J.-P. Bongiraud, and G. Cauffet, "Modeling of static magnetic anomaly created by iron plates," *IEEE Transaction on magnetics*, vol. 36, pp. 667-671, 2000.
- [4] <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electronics/Electromechanical/ANSYS+Maxwell>.
- [5] C. Jizhong, Z. Yiming, and X. Chunyan, "A more homogeneous, less massive Halbach magnet array for portable NMR," in *Electronic Measurement and Instruments, 2007. ICEMI'07. 8th International Conference on*, pp. 1-330-1-336, 2007.
- [6] J. J. Holmes, "Exploitation of a ship's magnetic field signatures," *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, vol. 1, pp. 1-78, 2006.
- [7] B. Armstrong, J. Pentzer, D. Odell, T. Bean, J. Canning, and D. Pugsley, "Field measurement of surface ship magnetic signature using multiple AUVs," *IEEE*, 2009.
- [8] C. Walker, J. Stringfield, E. Wolbrecht, M. Anderson, J. Canning, and T. Bean, "Survey of the magnetic signature of a moving surface vessel by multiple AUVs," in *Oceans*, pp. 1-7, 2012.
- [9] <https://www.cst.com>.
- [10] J. J. Holmes, "Modeling a ship's ferromagnetic signatures," *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, vol. 2, pp. 1-75, 2007.

Simulation of the Ship's Magnetic Signatures Using Halbach Magnet Array as Uniform Static Magnetic Field Source

S. Mahmoudnezhad Makouie*, A. Ghorbani

Department of Electrical Engineering, Amirkabir University

(Received: 09/02/2015, Accepted: 08/12/2015)

Abstract

In this paper a method for simulation of the magnetic signature of vessels is presented. This method includes using a special magnet array - called Halbach magnet array - for producing a uniform magnetic field as a source that models Earth's magnetic field. Simplicity of this array beside its proper uniformity makes it possible to perform simulation with acceptable precision. For validating the proposed method and determination of its error, two simple models of spherical shell and prolate spheroidal shell that can be analytically handled are used and a comparison has been done between simulation results of these models and their analytic signatures. Good adaptability between these results confirms the accuracy of the proposed method and determines its precision level. After being ensured that this method works well, two real ship models with the dimensions of 20 m and 130 m are used to perform realistic simulation and their magnetic signatures are presented in 10 m depth.

Keywords: Earth's magnetic fields, ferromagnetic material, magnetic signature, Halbach array

* Corresponding author E-mail: sina.mm@aut.ac.ir