

## تعیین جریان سیم‌پیچ‌های سیستم جبران‌ساز اختلالات مغناطیسی کشتی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

سینا محمودنژاد ماکویی<sup>۱\*</sup>، ایاز قربانی<sup>۲</sup>

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

(دریافت: ۹۳/۰۹/۰۹، پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۳)

### چکیده

اختلالات مغناطیسی شناورها یکی از اصلی‌ترین معضلات آن‌ها در مقابله با مین‌های دریایی و یکی از عوامل مهم شناسایی هر چه سریع‌تر شناورهای زیرسطحی است. هدف اصلی این مقاله طراحی یک سیستم جبران‌ساز (سیستم دگوسینگ) به‌منظور کمینه کردن اختلالات مغناطیسی کشتی‌ها است. برای انجام این مهم، ابتدا میدان اختلالی مغناطیسی کشتی شبیه‌سازی شده و سپس با استفاده از سه دسته سیم‌پیچ که در داخل بدنه کشتی تعبیه شده‌اند، سعی می‌شود میدانی هم‌اندازه اختلال اولیه کشتی و در جهت عکس آن تولید شود تا برآیند این اختلالات به کم‌ترین میزان ممکن برسد. در این مقاله با استناد به خطی بودن کل سیستم و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، جریان هر کدام از سیم‌پیچ‌ها مشخص می‌شود. پیچیدگی کم‌تر و سرعت بیشتر این روش در مقایسه با بهینه‌سازی‌های مستقیم شبیه‌سازها، از مهم‌ترین مزیت‌های روش پیشنهادی می‌باشد.

### واژگان کلیدی

اختلالات مغناطیسی، مواد فرومغناطیس، امضای مغناطیسی کشتی، سیستم دگوسینگ، الگوریتم ازدحام ذرات.

### ۱. مقدمه

مانند خوردگی بدنه، جریان‌های گردابی القا شده در بدنه و تجهیزات الکتریکی و مغناطیسی شناورها، در تولید اختلالات مغناطیسی، الکتریکی و حتی الکترومغناطیسی موثر هستند. طی تحقیقات و آزمایشات فراوان، مشخص شده است که مغناطیسه شدن بدنه شناور موثرترین عامل ایجاد اثرات اختلالی بوده و بایستی تلاش برای کاهش آن در اولویت اول قرار بگیرد [۱]. تمامی منابع از جمله [۲-۵] ضمن بررسی عوامل موثر در ایجاد امضای مغناطیسی شناورها، بر این واقعیت تاکید دارند که اولین و مهم‌ترین عامل، همان مغناطیسه‌شدگی بدنه فرومغناطیسی شناور خواهد بود. دامنه بزرگ‌تر این مولفه از امضای مغناطیسی در کنار این واقعیت که این مولفه تحت هر شرایطی در اطراف شناور وجود دارد، از مهم‌ترین دلایل اهمیت آن در مقایسه با سایر عوامل موثر در تولید اثرات اختلالی است. به عنوان مثال، خوردگی شناور همیشه وجود نداشته و در صورت وجود نیز راه‌کارهای مناسبی برای مقابله با آن ارایه شده است [۳ و ۵] و یا جریان‌های گردابی فقط در شرایطی که شناور نوسانات شدیدی داشته باشد، القا خواهد شد. برای اولین بار در

در حال حاضر به دلیل برتری‌های مکانیکی و هزینه ساخت کم‌تر فولاد در مقایسه با موادی نظیر فایبرگلاس، بیشتر شناورهای سطحی و زیرسطحی از این ماده ساخته می‌شوند. به لحاظ مغناطیسی، فولاد ماده‌ای فرومغناطیس بوده و این ویژگی فولاد یکی از اصلی‌ترین معایب آن برای ساخت شناورها به‌شمار می‌رود. همان‌طور که می‌دانیم مواد فرومغناطیس در اثر میدان‌های مغناطیسی خارجی مغناطیسه‌شده و یک میدان مغناطیسی اختلالی به محیط اعمال می‌کنند. با ساخت شناورها از جنس فولاد و با توجه به حضور میدان مغناطیسی زمین در محیط این شناورها، شناور همواره یک اختلال مغناطیسی در پیرامون خود ایجاد خواهد کرد. این اختلال مغناطیسی که امضای مغناطیسی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، یکی از عواملی است که می‌تواند امنیت شناور را تهدید کند. البته بایستی به این نکته اشاره کرد که میدان مغناطیسی زمین و مغناطیسه شدن فولاد تحت تاثیر آن، تنها عامل ایجاد امضای شناور نبوده و عوامل بسیاری

\* رایانامه نویسنده پاسخگو: sina.mm@aut.ac.ir

<sup>۱</sup> Magnetic signature

کنند، یک مساله وارون سه بعدی<sup>۲</sup> است که انجام محاسبات بهینه‌سازی آن با استفاده از شبیه‌سازهای عددی بسیار زمان‌بر بوده و در عین حال نیازمند رایانه‌های پیشرفته‌ای برای انجام محاسبات خواهد بود. در مقاله پیش‌رو ابتدا سعی خواهد شد با استفاده از نرم‌افزارهای در دسترس مانند MAXWELL 16.0 [۱۳] امضای مغناطیسی یک شناور بیست متری شبیه‌سازی شده و سپس با اعمال الگوریتم ازدحام ذرات بر روی خروجی‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌ساز، جواب بهینه برای جریان سیم‌پیچ‌ها محاسبه شود. بهینه‌سازی مربوطه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2013a انجام گرفته و برای حصول اطمینان از صحت نتایج، پاسخ مساله در شبیه‌ساز عددی اعمال شده است. مقایسه امضای مغناطیسی برآیند به‌دست‌آمده از شبیه‌ساز عددی و امضای برآیند محاسبه‌شده در نرم‌افزار MATLAB، صحت روش اعمال‌شده را تایید خواهد کرد.

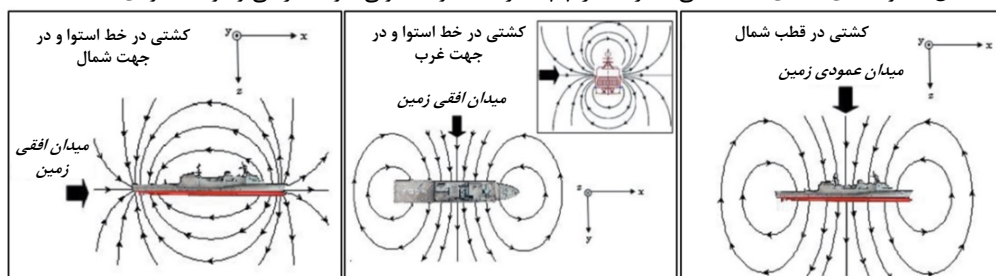
## ۲. شبیه‌سازی امضای مغناطیسی کشتی

با توجه به جهت میدان مغناطیسی زمین و راستای کشتی، امضای مغناطیسی کشتی به سه مولفه طولی (ILM<sup>۳</sup>)، عرضی (IAM<sup>۴</sup>) و عمودی (IVM<sup>۵</sup>) تقسیم می‌شود. در شکل ۱ هر سه حالت امضای مغناطیسی یک کشتی نشان داده شده است. در کلی‌ترین حالت، هنگامی که میدان مغناطیسی زمین در یک جهت اختیاری قرار دارد می‌توان میدان مغناطیسی زمین را به سه جهت طولی، عرضی و عمودی تجزیه کرد و سایر محاسبات را بر اساس همین تقسیم‌بندی انجام داد.

برای شبیه‌سازی امضای مغناطیسی کشتی در هر یک از سه حالت فوق ابتدا بایستی میدانی یکنواخت و استاتیکی در محیط مساله تعریف کرد. بیشتر نرم‌افزارهای در دسترس در زمینه مخابرات میدان مانند HFSS، FEKO و CST [۱۴-۱۶] برای شبیه‌سازی ساختارهای کوچک و در فرکانس‌های مگاهرتز به بالا مناسب هستند. در اکثر این نرم‌افزارها امکان تعریف میدان یکنواخت در فرکانس صفر وجود ندارد. برای حل مشکل تعریف میدان یکنواخت نیز از یک آرایه

جنگ جهانی دوم دانشمندان به وجود چنین اثری در شناورها پی بردند و از همان زمان، تلاش‌ها برای آرایه راه‌حلی مناسب و البته مقرون به صرفه شروع شد. سیستم دگوسینگ فعال<sup>۱</sup> کامل‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین راه‌حلی است که تا به امروز برای جبران اختلالات مغناطیسی شناورها آرایه شده است [۵]. این سیستم، مجموعه‌ای شامل سه دسته از سیم‌پیچ‌هایی است که در سه راستای عمود بر هم در بدنه شناور تعبیه شده و با کنترل جریان هر یک از سیم‌پیچ‌ها سعی می‌شود اختلال برآیند به حداقل میزان ممکن برسد. بخش مهم دیگر در این سیستم قسمت پردازشی است که بایستی در هر لحظه اختلال شناور را اندازه‌گیری و یا محاسبه کرده و جریان سیم‌پیچ‌ها را در بهینه‌ترین حالت ممکن تنظیم کند. بخش پردازشی سیستم دگوسینگ شامل محاسبات زمان‌بری است که بایستی سعی شود در کوتاه‌ترین زمان ممکن انجام گیرد. بخش اول محاسبات، مربوط به تحلیل امضای مغناطیسی شناور و بخش دوم آن مربوط به محاسبه جریان سیم‌پیچ‌ها برای حداقل کردن اختلال برآیند است. در تحلیل امضای مغناطیسی شناور به دو صورت امکان‌پذیر است. در حالت اول از ابزارهای اندازه‌گیری مانند سنسورهای تعبیه‌شده در داخل بدنه و یا ربات‌های زیرسطحی برای اندازه‌گیری مستقیم امضای مغناطیسی استفاده می‌شود [۹-۶] و در حالت دوم با استفاده از شبیه‌سازها این محاسبات صورت می‌گیرد. طبیعی است که استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری هزینه‌بر بوده و قطعاً اعمال آن برای تمامی ناوگان یک کشور مستلزم پرداخت هزینه گزافی خواهد بود. استفاده از شبیه‌ساز بسیار کم هزینه‌تر از حالت اول خواهد بود ولی در عین حال شبیه‌سازی چنین ساختارهای بزرگی حتی در حالت مگنتواستاتیک نیز ساده نبوده و بسیار زمان‌بر می‌باشد. علاوه بر این، متاسفانه به‌دلیل برخی از مشکلات، نرم‌افزارهای استاندارد مانند EMC-studio، MagNet و Opera [۱۰-۱۲] که برای استفاده در چنین مسایلی مناسب هستند، در ایران در دسترس نبوده و مشکلات پژوهشی در این زمینه را دوچندان می‌کند. مساله بعدی در طراحی چنین سیستمی این است که بهینه‌سازی جریان سیم‌پیچ‌ها به‌نحوی که بتوانند میدانی معادل با امضای شناور و در جهت عکس ایجاد

شکل ۱. مولفه‌های امضای مغناطیسی به ترتیب از چپ به راست: مولفه طولی، مولفه عرضی و مولفه عمودی [۱].



<sup>2</sup> 3D-Inverse Problem

<sup>3</sup> ILM; Induced Longitudinal Magnetization

<sup>4</sup> IAM; Induced Athwartship Magnetization

<sup>5</sup> IVM; Induced Vertical Magnetization

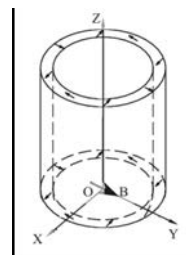
<sup>1</sup> Active Degaussing System

عمق ده متری و به طول ۴۰۰ m در نظر گرفته شده که به منظور مشاهده واضح‌تر نتایج، امضای شناور در ۲۰۰ m میانی این خط نشان داده شده است. کشتی نیز به صورتی تقریبی در محدوده ۱۹۰-۲۱۰ متری این خط واقع شده است. به دلیل تقارن موجود در مساله در هر کدام از حالت‌های ILM، IAM و IVM تعدادی از مولفه‌های امضای شناور نسبت به این خط اندازه‌گیری متقارن بوده و در نتیجه اختلالی روی آن دیده نمی‌شود. در شکل‌های (۴-۶) مولفه‌های هر یک از حالت‌های سه‌گانه امضای شناور نشان داده شده در شکل ۳ و با فرض میدان مغناطیسی ۵۵۰۰۰ نانو تسلا نشان داده شده است.

در حالت ILM، مؤلفه  $y$  امضای شناور نسبت به خط اندازه‌گیری متقارن بوده و در نتیجه در روی این خط، اندازه  $B_y$  برابر صفر خواهد بود. به همین دلیل در شکل ۴ اختلالی در این جهت نشان داده نشده است. البته بایستی توجه شود مؤلفه  $y$  در تمامی نقاط عمق ۱۰ متری برابر صفر نیست و در صورتی که محل خط اندازه‌گیری در راستای عرض کشتی شیفت پیدا کند، اختلال این مولفه نیز کاملاً قابل مشاهده خواهد بود. شکل (۷-الف) هر سه مولفه میدان اختلالی را بر روی یک صفحه در عمق ۱۰ متری نشان می‌دهد. با دقت در این شکل می‌توان تقارن مولفه  $y$  نسبت به خط اندازه‌گیری را مشاهده کرد. همین تقارن برای مولفه‌های  $x$  و  $z$  امضای IAM و مولفه  $y$  امضای IVM نیز وجود دارد که در شکل‌های (۷-ب) و (۷-ج) به وضوح قابل تشخیص است و به همین دلیل در شکل ۵، مولفه‌های  $x$  و  $z$  و در شکل ۶، مولفه  $y$  وجود ندارد.

نکته حائز اهمیت دیگری که در رابطه با شکل‌های (۴-۶) وجود دارد این است که در میدان‌های اختلالی به‌دست‌آمده، با وجود تقارن مدل، ریبلی‌هایی مشاهده می‌شود. این ریبل‌ها به دلیل محدودیت‌های محاسباتی مانند حداکثر تعداد مش اعمالی به مدل ایجاد می‌شود و بدیهی است در صورت در اختیار داشتن امکانات سخت افزاری مناسب و اعمال مش‌بندی‌های فشرده‌تر، به‌شکل مناسبی قابل حذف خواهند بود.

آهن‌ربایی خاص، به نام آرایه هالباخ استفاده شده است. این آرایه مجموعه‌ای از هشت آهن‌ربا است که با جهت‌گیری‌های خاصی در کنار هم قرار گرفته‌اند و می‌توان میدانی یکنواخت در وسط آن ایجاد کرد. آرایه هالباخ<sup>۱</sup> در [۱۷] به‌منظور استفاده‌های صنعتی برای تولید میدان‌های یکنواخت ارایه شده است. در شکل ۲ این آرایه با جهت‌های وادارندگی<sup>۲</sup> هر قطعه از هشت آهن‌ربا و میدان برآیند ساختار نشان داده شده است.

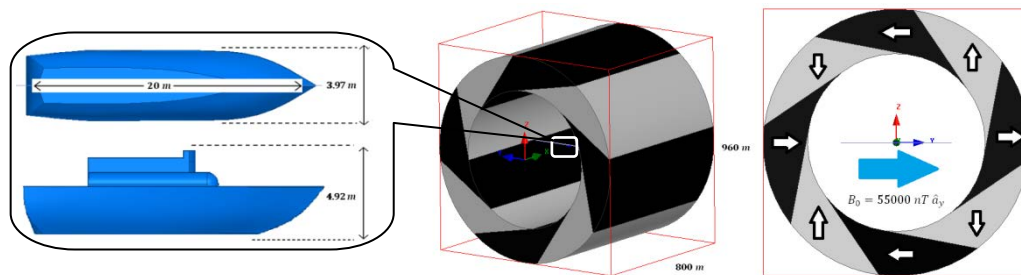


شکل ۲. آرایه هالباخ استوانه‌ای [۱۷].

در شکل ۳ نیز این آرایه در کنار مدل ساده کشتی که در محیط نرم‌افزار MAXWELL رسم شده، نشان داده شده است. ابعاد آرایه هالباخ  $800 \times 960 \times 20$  m و دامنه میدان مغناطیسی ۵۵۰۰۰ نانو تسلا در نظر گرفته شده است. چنین ابعاد بزرگی به‌منظور افزایش میزان یکنواختی میدان در وسط آرایه و در نتیجه افزایش دقت مساله انتخاب شده است. دامنه میدان مغناطیسی نیز در محدوده میدان مغناطیسی زمین (۶۰۰۰۰-۲۰۰۰۰۰ نانو تسلا) و نزدیک به مقادیر آن در نواحی خلیج فارس و دریای خزر تعیین شده است. این دامنه با تغییر وادارندگی آهن‌رباها به‌راحتی قابل کنترل است. مدل کشتی نیز در ابعاد تقریبی  $20 \times 4 \times 5$  m با ضخامت متوسط ۲ سانتی‌متر و با ضریب گذردهی مغناطیسی  $\mu_r = 80$  در نظر گرفته شده است. جزئیات دقیق نحوه محاسبه امضای مغناطیسی کشتی در [۱۸] شرح داده شده است.

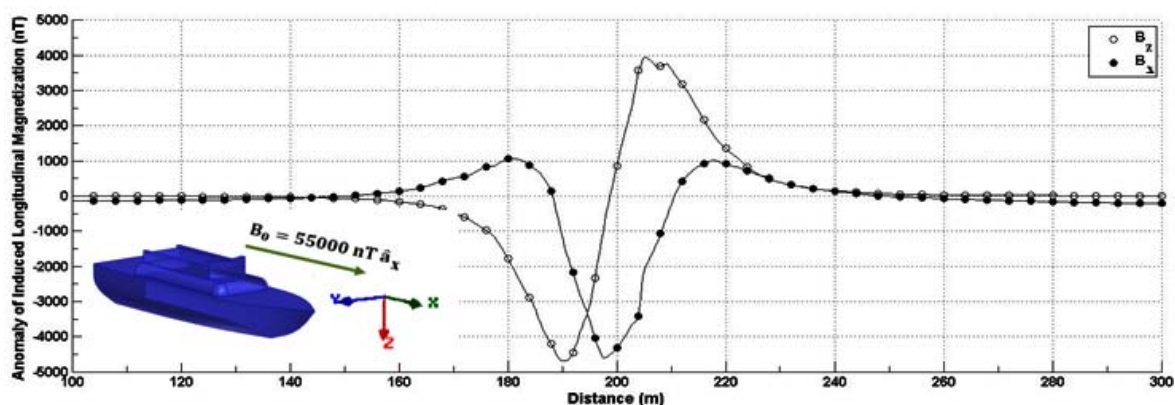
به طور معمول اندازه میدان اختلالی کشتی، بر روی خطی که در راستای طولی کشتی و در زیر تیرک اصلی آن قرار دارد و در یک عمق استاندارد، گزارش می‌شود. خط اندازه‌گیری در این مقاله در

شکل ۳. آرایه هالباخ استوانه‌ای و مدل استفاده شده برای کشتی در نرم‌افزار MAXWELL

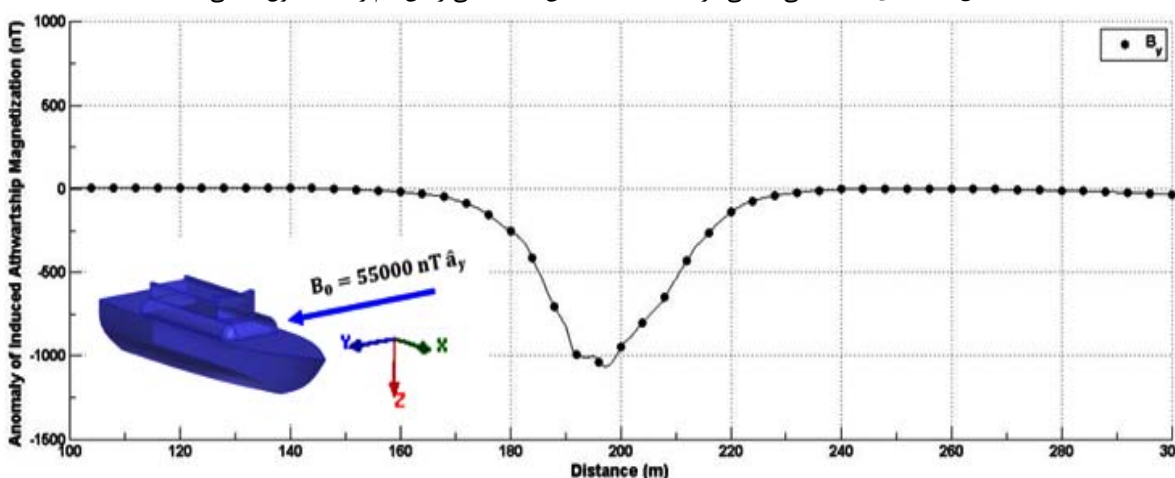


<sup>1</sup> Halbach array

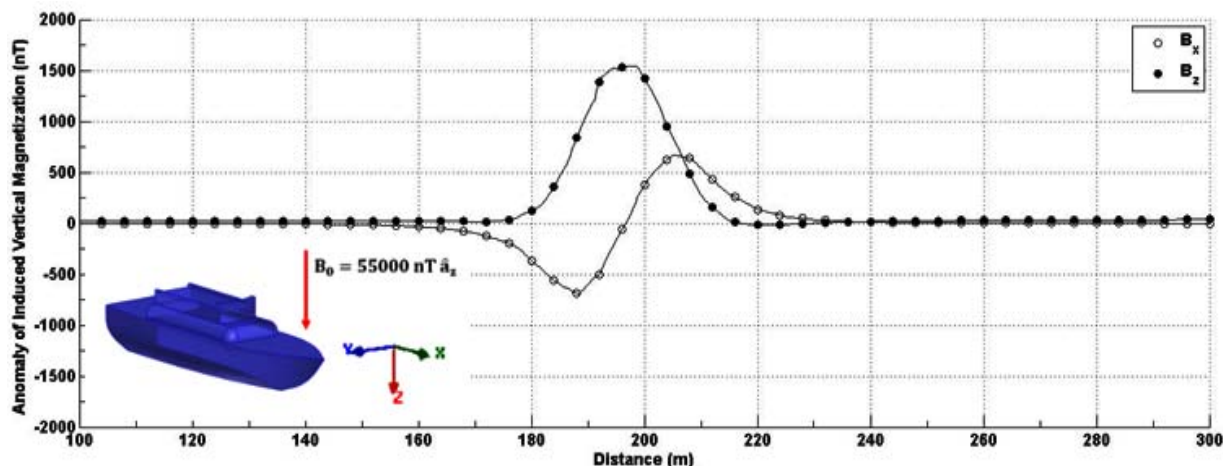
<sup>2</sup> coercivity



شکل ۴. امضای مغناطیسی کشتی در حالت ILM (میدان مغناطیسی زمین هم راستا با طول کشتی است).



شکل ۵. امضای مغناطیسی کشتی در حالت IAM (میدان مغناطیسی زمین هم راستا با عرض کشتی است).



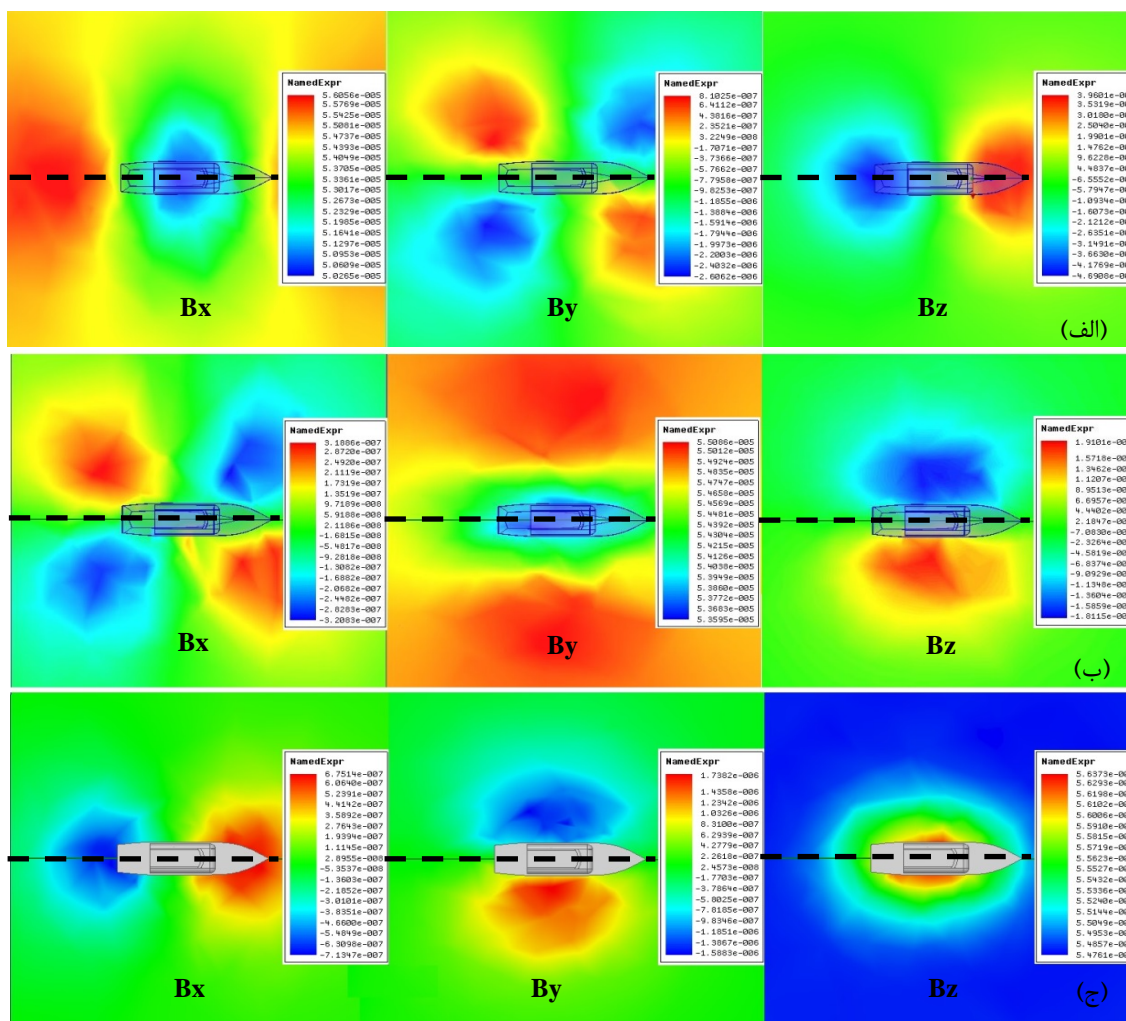
شکل ۶. امضای مغناطیسی کشتی در حالت IVM (میدان مغناطیسی زمین عمود بر کشتی است).

مغناطیسی شناورها فعال می‌شود و از این روی، برای اولین بار نیروی دریایی بریتانیا در جنگ جهانی دوم برای مقابله با مین‌های مغناطیسی آلمانی سیستم‌های دگوسینگ را توسعه داد [۵]. در طول سالیان متمادی سیستم‌های دگوسینگ شاهد تحولات بسیاری بوده است ولی به نظر می‌رسد طرح اولیه این سیستم توسط سرچارلز فردریک گودیو<sup>۱</sup> پیشنهاد شده است [۱۹]. شکل ۸ نمای کلی یک

### ۳. سیستم جبران‌ساز مغناطیسی یا دگوسینگ

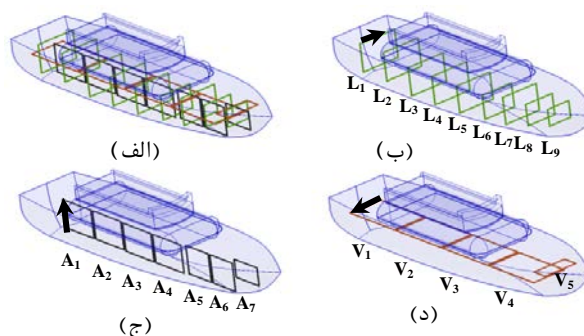
بین سپتامبر ۱۹۳۹ و ژانویه ۱۹۴۰ در حدود ۴۴ کشتی انگلیسی در کانال مانش در اثر مین‌های مغناطیسی غرق شد. بعد از این حادثه نیروی دریایی بریتانیا به بررسی یکی از مین‌های زیر سطحی پرداخت و متوجه شد که سیستم آتش این مین‌ها بر اساس اختلالات

<sup>1</sup> Sir Charles Frederick Goodeve



شکل ۷. الگوی امضای مغناطیسی کشتی بر روی یک صفحه فرضی در عمق ۱۰ متری. الف: حالت ILM؛ ب: حالت IAM؛ ج: حالت IVM

چنین سیستمی از این حقیقت ناشی می‌شود که میدان تولیدی یک سیم‌پیچ رفتاری بسیار مشابه با اختلالات شناورها دارد. در واقع این مساله را می‌توان به‌گونه‌ای دیگر نیز شرح داد. با مغناطیسه شدن فولاد در اثر میدان مغناطیسی زمین، جریان‌های مقیدی بر روی بدنه کشتی القا می‌شود. این جریان‌های مقید در دو شکل جریان‌های سطحی و جریان‌های حجمی ظاهر شده و از طریق روابط  $\vec{J}_m = \vec{\nabla} \times \vec{M}$  و  $\vec{J}_{ms} = \vec{M} \times \hat{n}$  به بردار مغناطیس‌شدگی وابسته می‌شوند. پس علت اختلالات مغناطیسی شناورها توزیع جریان مقیدی است که بر روی بدنه آن القا می‌شود ولی به‌دلیل هندسه خاص هر کشتی، این جریان‌ها توزیع‌های پیچیده‌ای دارند. حال اگر بتوان بر روی بدنه کشتی توزیع جریانی مشابه همین توزیع جریان ولی در جهت عکس آن ایجاد کرد، اختلالات مغناطیسی خنثی خواهد شد. پس در حالت حدی بایستی به دنبال یک توزیع جریان صفحه‌ای باشیم ولی از آنجایی که تولید چنین جریانی در عمل ممکن نیست می‌توانیم چنین فرض کنیم که صفحه از سه مجموعه بی‌نهایت سیم‌پیچ تشکیل شده است. مسلماً هر چه تعداد سیم‌پیچ‌ها



شکل ۸. سیستم دگوسینگ. الف: نمای کلی ب: سیم‌پیچ‌های L

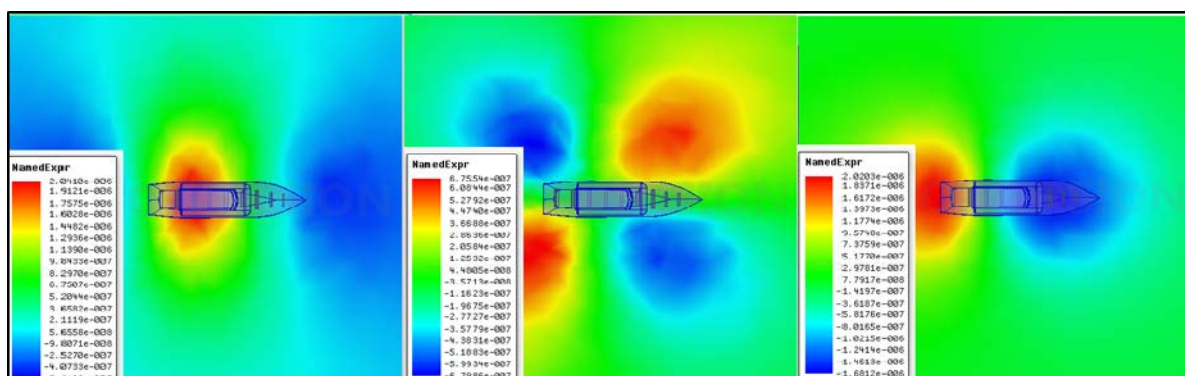
ج: سیم‌پیچ‌های A؛ د: سیم‌پیچ‌های V. فلش‌ها جهت فرضی جریان‌ها را نشان می‌دهند.

سیستم دگوسینگ را نشان می‌دهد. این سیستم از سه دسته سیم‌پیچ طولی<sup>۱</sup>، عرضی<sup>۲</sup> و عمودی<sup>۳</sup> تشکیل شده است. هدف اصلی در این سیستم ایجاد میدانی مشابه با اختلال کشتی و در جهت عکس آن است تا برآیند این دو میدان حداقل شود. ایده اصلی

<sup>1</sup> L Coils

<sup>2</sup> A Coils

<sup>3</sup> V Coils



شکل ۹. الگوی میدان یکی از سیم‌پیچ‌های طولی که در داخل کشتی با جریان فرضی یک کیلو آمپر تحریک شده است (\*در این الگوها بر خلاف شکل (۷) میدان مغناطیسی زمین مدل نشده - آرایه آهنربایی حذف شده- و فقط یکی از سیم‌پیچ‌های طولی تحریک شده است).

به دلیل طراحی سیستم به صورت حلقه بسته، سیستم می‌تواند جواب‌های خود را تصحیح کند. بهینه‌سازی چنین سیستمی در واقع یک مساله وارون سه بعدی است که انجام آن توسط شبیه‌ساز بسیار زمان‌بر خواهد بود. برای غلبه بر این مشکل سعی می‌شود بهینه‌سازی در خارج از شبیه‌ساز صورت گرفته و جواب نهایی به شبیه‌ساز اعمال شود. این کار دو مزیت انکارناپذیر در مقایسه با بهینه‌سازی شبیه‌ساز خواهد داشت. اولین مزیت این است که به جای حل مساله وارون سه بعدی، یک مساله وارون صرفاً ریاضی و مستقل از هندسه ساختار خواهیم داشت که حجم محاسبات را کاهش می‌دهد [۲۰] و مزیت دوم نیز امکان استفاده از الگوریتم مناسب برای این نوع خاص از مساله است. طبق بررسی‌های انجام گرفته یکی از مناسب‌ترین الگوریتم‌ها برای چنین مسایلی الگوریتم ازدحام ذرات<sup>۱</sup> است [۲۱] که این الگوریتم در نرم‌افزار MAXWELL 16.0 وجود ندارد. الگوریتم ازدحام ذرات به دلیل سادگی کدنویسی و بازدهی خوب آن در رسیدن به پاسخ بهینه یکی از الگوریتم‌های محبوب برای حل مسایل بهینه‌سازی است که این موضوع در مراجعی مانند [۲۱-۲۲] با جزئیات کامل شرح داده شده است. با وجود این که این الگوریتم هیچ تضمینی در یافتن پاسخ مطلق مساله ارائه نمی‌کند، در مسایلی که یافتن سریع یکی از پاسخ‌های به اندازه کافی مناسب، مهم‌تر از رسیدن به پاسخ بهینه است، الگوریتم ازدحام ذرات بازدهی بسیار خوبی خواهد داشت. به دلیل حجم محاسبات سیستم‌های دگوسینگ، زمان اجرای الگوریتم‌ها، یکی از اولویت‌های اصلی طراحان آن بوده و رسیدن به پاسخ بهینه (مطلق) در اولویت دوم قرار دارد و از این رو استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات در سیستم دگوسینگ بسیار مناسب به نظر می‌رسد.

### ۳-۱. مدل‌سازی مساله وارون

قبل از استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، بایستی تابع هزینه<sup>۲</sup> مساله و ورودی‌های لازم برای آن تعریف شود. برای بهینه‌سازی مساله دگوسینگ به جای در نظر گرفتن تمام محیط مساله، می‌توان خط اندازه‌گیری در عمق ده متری را به عنوان ناحیه حل مساله در نظر

افزایش یابد، دقت حل مساله نیز بیشتر خواهد شد ولی بایستی محدودیت‌های عملی را نیز در چنین مسایلی در نظر بگیریم. محدودیت‌هایی از قبیل هزینه سیستم، وزنی که مجموعه این سیستم به شناور اضافه می‌کند و فضای که می‌توان در آن سیم‌پیچ‌ها را تعبیه کرد از جمله ملاحظات است که در طراحی سیستم دگوسینگ حائز اهمیت خواهد بود.

هر یک از سیم‌پیچ‌های طولی، عرضی و عمودی به ترتیب رفتاری مشابه با حالت‌های ILM، IAM و IVM نشان می‌دهند. به عنوان مثال الگوی میدان تولیدی یکی از سیم‌پیچ‌های طولی در شکل ۹ نشان داده شده است. با مقایسه این شکل با شکل (۷-الف) مشخص می‌شود که با جهت جریان فرض شده در شکل ۸، میدان‌ها دقیقاً رفتاری مشابه و البته در جهت عکس اختلالات ILM نشان می‌دهند و می‌توان از سیم‌پیچ‌های طولی برای جبران اختلالات مغناطیسی در حالت ILM استفاده کرد. سیم‌پیچ‌های عرضی و عمودی نیز رفتار مشابهی را از خود نشان می‌دهند که برای جلوگیری از تکرار مطالب الگوهای میدان تولیدی آن‌ها آرایه نشده است. در این مقاله به صورت فرضی به دلیل دامنه بزرگ‌تر مولفه ILM، ده سیم‌پیچ طولی و برای مولفه IAM هفت سیم‌پیچ عرضی در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن تاثیر تعداد سیم‌پیچ‌ها در دقت مساله، به صورت تعمدی تعداد سیم‌پیچ‌های کم‌تری برای مولفه IVM انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل (۸-د) نشان داده شده است، پنج سیم‌پیچ عمودی برای جبران مولفه IVM در نظر گرفته شده است. تاثیر کاهش تعداد سیم‌پیچ‌ها در نتایج حاصل از بهینه‌سازی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

مرحله بعدی طراحی سیستم دگوسینگ، بهینه‌سازی جریان سیم‌پیچ‌هاست. در سیستم‌های دگوسینگ اولیه که به صورت غیرفعال طراحی شده بودند، جریان سیم‌پیچ‌ها به صورت تجربی و با در نظر گرفتن مختصات جغرافیایی و کلاس شناور انتخاب می‌شدند [۵]. با پیشرفت مین‌های دریایی و افزایش دقت آن‌ها در تشخیص اختلالات مغناطیسی، سیستم‌های دگوسینگ فعال آرایه شد. در این سیستم سعی می‌شود پاسخ بهینه برای حداقل‌سازی اختلالات انتخاب شود و

<sup>۱</sup> Particle Swarm Optimization Algorithm

<sup>۲</sup> Cost function

در شکل‌های (۱۱-۱۳) میدان‌های تولیدی هر یک از سیم‌پیچ‌ها نشان داده شده است. در شبیه‌سازی اثر این سیم‌پیچ‌ها، بدنه کشتی نیز در نظر گرفته شده تا تأثیرات وجود بدنه - بدنه کشتی باعث کاهش چند درصدی دامنه میدان‌های تولیدی سیم‌پیچ‌ها خواهد شد که این مساله در مرجع [۲۰] نیز مد نظر قرار گرفته است - محاسبه شود. مشابه مولفه‌های مختلف امضای کشتی، برخی از مولفه‌های میدان تولیدی سیم‌پیچ‌ها نیز نسبت به خط اندازه‌گیری متقارن هستند. برای سیم‌پیچ‌های طولی مولفه  $y$ ، برای سیم‌پیچ‌های عرضی مولفه‌های  $x$  و  $z$  و برای سیم‌پیچ‌های عمودی مولفه  $y$  متقارن بوده و در نتایج ارایه نشده است. با وجود این که طول خط اندازه‌گیری در این شبیه‌سازی‌ها  $400\text{ m}$  انتخاب شده است، نتایج در فاصله  $160-240$  متری وسط این خط ارایه شده تا اختلاف اثر هر کدام از سیم‌پیچ‌ها بهتر مشخص شود. در خارج از این بازه اثر سیم‌پیچ‌ها نزدیک به صفر است.

با در دست داشتن این ورودی‌ها می‌توان تابع هزینه مساله بهینه‌سازی را به صورت رابطه (۳) نوشت.

$$F = \min \left( \max \left( \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p |B_j^{x,ship} - c_i B_j^{x,Li}|, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p |B_j^{y,ship} - c_i B_j^{y,Li}|, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p |B_j^{z,ship} - c_i B_j^{z,Li}| \end{array} \right) \right) \quad (3)$$

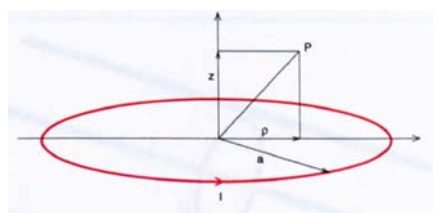
در رابطه (۳)  $i=1,2,\dots,n$  تعداد سیم‌پیچ‌ها،  $j=1,2,\dots,p$  تعداد نقاط اندازه‌گیری بر روی خط اندازه‌گیری،  $B_j^{x,ship}$  مولفه  $x$  امضای کشتی در نقطه  $z$  و  $B_j^{x,Li}$  مولفه  $x$  میدان سیم‌پیچ طولی  $i$  در نقطه  $z$  است. بایستی به این نکته توجه کرد که پارامتر  $c$  در رابطه (۳) نشان‌دهنده ضرایب جریان الکتریکی بوده و هدف بهینه‌سازی، به دست آوردن همین ضرایب است تا با استفاده از آن‌ها جریان الکتریکی هر سیم‌پیچ با ضرب این ضرایب در یک کیلوآمپر-جریان مرجع- محاسبه شود.

### ۳-۲. الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات برای اولین بار توسط جیمز کندی<sup>۱</sup> و راسل ابرهات<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۵ ارایه شد [۲۱]. جزئیات ریاضی این الگوریتم در مراجعی مانند [۲۴، ۲۵] به طور مفصل شرح داده شده است، ولی برای آشنایی با روند حل مساله، در این بخش کلیات استراتژی این الگوریتم مرور خواهد شد. یکی از ویژگی‌های الگوریتم ازدحام ذرات این است که از گرادیان مساله استفاده نمی‌کند. این امر بدین معنی است که در الگوریتم ازدحام ذرات نیازی نیست

گرفت و چنین فرض کرد که اگر مساله بر روی خط اندازه‌گیری بهینه شود، در تمام محیط مساله بهینه خواهد بود. با وجود این که ممکن است جواب حاصل از این راه‌حل پاسخ بهینه نباشد ولی بایستی در نظر گرفت که اگر تمام محیط مساله در تابع هزینه لحاظ شود حجم داده‌ها به شدت افزایش پیدا کرده و برای مساله‌ای در چنین ابعادی، حل آن تقریباً ناممکن خواهد بود. ضمن این که چون خط اندازه‌گیری در بدترین محل روی صفحه (زیر تیرک کشتی) در نظر گرفته شده، طبیعتاً بهینه‌سازی نیز برای بیشترین اختلالات انجام می‌گیرد. صحت این روش در بیشتر مراجع از جمله [۵، ۲۰، ۲۱] ذکر شده و در مراجعی مانند [۲۳] با انجام آزمایشات عملی تایید شده است.

در تابع هزینه مساله دو دسته ورودی لازم است. ورودی اول همان مولفه‌های امضای کشتی بر روی خط اندازه‌گیری است که در شکل-های (۴-۶) نشان داده شد. دسته دوم ورودی‌ها، میدان‌های تولیدی تک تک سیم‌پیچ‌ها بر روی خط اندازه‌گیری است. برای به دست آوردن این اطلاعات از نرم افزار MAXWELL 16.0 استفاده شده است. در شبیه‌سازی اثر سیم‌پیچ‌ها میدان مغناطیسی زمین حذف شده - آرایه آهن‌ربایی در این حالت وجود ندارد- و در هر مرتبه تنها یک سیم‌پیچ با یک جریان معیار تحریک شده است. در مرجع [۲] میدان تولیدی یک سیم‌پیچ دایروی در هر نقطه دلخواه در فضا که در شکل ۱۰ نشان داده شده، محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در معادله (۱) نشان داده شده که در این معادله توابع  $K$  و  $E$  توابع بیضوی کامل نوع اول و دوم هستند. همان‌طور که در این معادله دیده می‌شود، میدان مغناطیسی حاصل از سیم‌پیچ با جریان آن رابطه مستقیم دارد و در نتیجه با در دست داشتن میدان سیم‌پیچ برای یک جریان معیار (که در این مقاله یک کیلوآمپر در نظر گرفته شده است)، میدان سیم‌پیچ برای سایر جریان‌ها از طریق رابطه ساده (۲) به دست می‌آید. در رابطه (۲) زیرنویس  $\Gamma$  جریان معیار و میدان ناشی از آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. سیم‌پیچ دایروی به شعاع  $a$  و جریان  $I$  [۲]

$$B_\rho = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2z}{\rho \sqrt{(a+\rho)^2 + z^2}} \left[ -K(k) + \frac{a^2 + \rho^2 + z^2}{(a-\rho)^2 + z^2} E(k) \right] \quad (الف-۱)$$

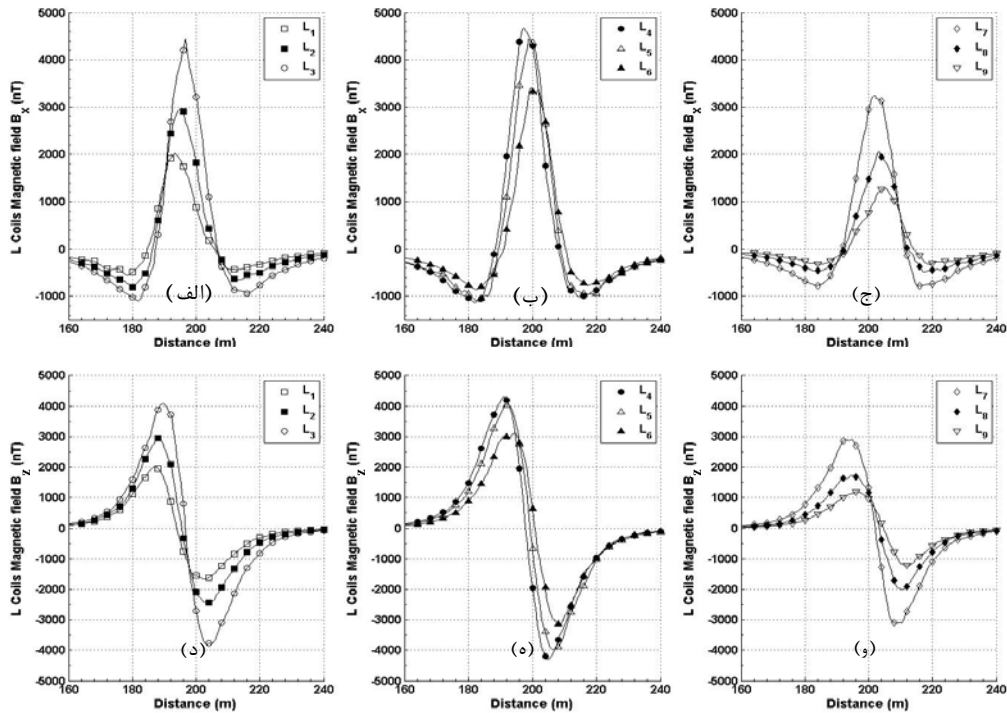
$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2}{\rho \sqrt{(a+\rho)^2 + z^2}} \left[ K(k) + \frac{a^2 - \rho^2 - z^2}{(a-\rho)^2 + z^2} E(k) \right] \quad (ب-۱)$$

$$k = 2 \sqrt{\frac{a\rho}{(a+\rho)^2 + z^2}} \quad (ج-۱)$$

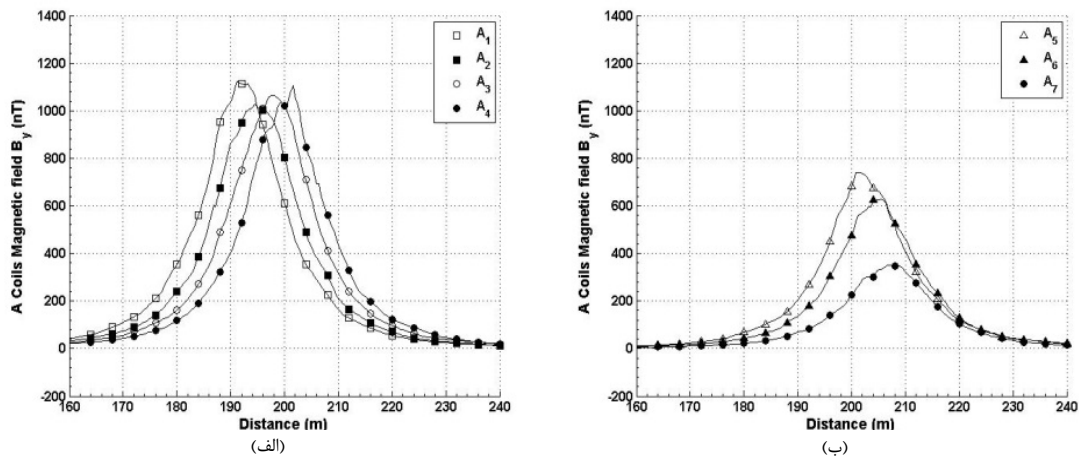
$$B = B_r \frac{I}{I_r} \quad (۲)$$

<sup>1</sup> J. Kennedy

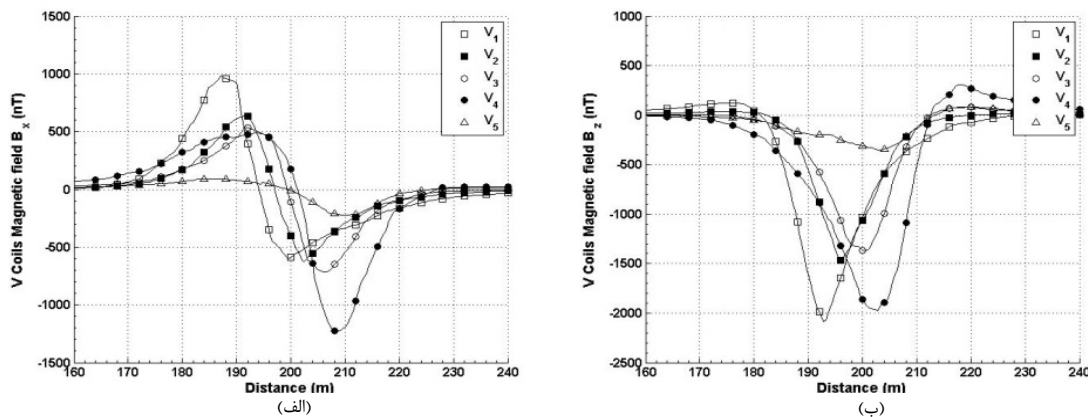
<sup>2</sup> R.Eberhart



شکل ۱۱. میدان‌های تولیدی سیم‌پیچ‌های طولی. الف) مولفه  $B_x$  سیم‌پیچ‌های  $L_1-L_3$ . ب) مولفه  $B_x$  سیم‌پیچ‌های  $L_4-L_6$ . ج) مولفه  $B_x$  سیم‌پیچ‌های  $L_7-L_9$ . د) مولفه  $B_z$  سیم‌پیچ‌های  $L_1-L_3$ . ه) مولفه  $B_z$  سیم‌پیچ‌های  $L_4-L_6$ . و) مولفه  $B_z$  سیم‌پیچ‌های  $L_7-L_9$



شکل ۱۲. میدان‌های تولیدی سیم‌پیچ‌های عرضی. الف) مولفه  $B_y$  سیم‌پیچ‌های  $A_1-A_4$ . ب) مولفه  $B_y$  سیم‌پیچ‌های  $A_5-A_7$



شکل ۱۳. میدان‌های تولیدی سیم‌پیچ‌های عمودی. الف) مولفه  $B_x$  سیم‌پیچ‌های  $V_1-V_5$ . ب) مولفه  $B_z$  سیم‌پیچ‌های  $V_1-V_5$



دقیق بهینه‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار MAXWELL نیز در جدول ۳ نشان شده است.

در جدول ۴ مقادیر جریان به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی ارایه شده است. در شکل‌های (۱۷-۱۵) نیز میدان‌های برآیند سیم‌پیچ‌ها (Optimization results) در مقایسه با امضای کشتی (با علامت منفی تحت عنوان Ship signature)، برای هر کدام از حالت‌های ILM، IAM و IVM به‌صورت نرمالیزه نشان داده شده است. هر یک از نمودارها به مقدار بیشینه امضای شناور در آن حالت نرمالیزه شده‌اند.

جدول ۱. پارامترهای به کار رفته در روابط (۴-۶) [۲۱]

نام پارامتر	توضیح	نام پارامتر	توضیح
$c_1, c_2$	ضرایب یادگیری	$M$	تعداد ذرات در هر جمعیت
$w^k$	تابع وزن در تکرار $k$	$v_{id}^k$	مولفه $i$ ام سرعت ذره $i$ در تکرار $k$
$w_{ini}$	تابع وزن اولیه	$x_{id}^k$	مولفه $i$ ام مکان ذره $i$ در تکرار $k$
$w_{end}$	تابع وزن نهایی (هنگامی که آخرین جمعیت تولید می‌شود)	$p_{id}$	مولفه $i$ ام بهترین موقعیت ذره $i$ ام
$T_{max}$	بیشترین تعداد جمعیت	$p_{gd}$	مولفه $i$ ام بهترین موقعیت جمعیت

مساله مشتق‌پذیر باشد که این شرط در بسیاری از روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی مانند شبه‌نیوتن و گرادیان کاهشی جزو شروط لازم برای حل مساله است. از دیگر مزایای این الگوریتم این است که هیچ فرضی در حل مساله صورت نمی‌گیرد و الگوریتم می‌تواند ناحیه بسیار وسیع از جواب‌های احتمالی را جستجو کند. البته از معایب اصلی این روش نیز می‌توان به این نکته اشاره کرد که الگوریتم از دحام ذرات هیچ ضمانتی برای رسیدن به پاسخ بهینه ندارد. این نکته برای بهینه‌سازی سیستم دگوسینگ مشکلی پیش نمی‌آورد چرا که در حل چنین مساله‌ای، رسیدن به پاسخ بهینه در مقایسه با یافتن سریع یکی از جواب‌های احتمالی (و به اندازه کافی مناسب) اهمیت کم‌تری دارد و به دلیل حجم محاسبات زیاد، اولویت حل مساله با زمان انجام بهینه‌سازی است.

این الگوریتم هر جواب احتمالی را به‌صورت نقطه‌ای در ناحیه  $n$  بعدی مساله فرض می‌کند که موقعیت این نقاط با بردار  $X_i=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  و سرعت حرکت هر ذره در این ناحیه با بردار  $V_i=(v_1, v_2, \dots, v_n)$  نشان داده می‌شود. هر ذره که بخشی از یک جمعیت اولیه است در ناحیه حل مساله حرکت می‌کند و جهت حرکت آن و مسافتی که طی می‌کند بر اساس ضریبی از بهترین تجربه انفرادی و بهترین جواب جمعیتی انتخاب می‌شود. در شکل ۱۴ فلوچارت الگوریتم ازدحام ذرات نشان داده شده است و روابط این الگوریتم را می‌توان به صورت ساده زیر نوشت [۲۱]. در جدول ۱ هر یک از پارمترهای به‌کار رفته در روابط زیر توضیح داده شده است.

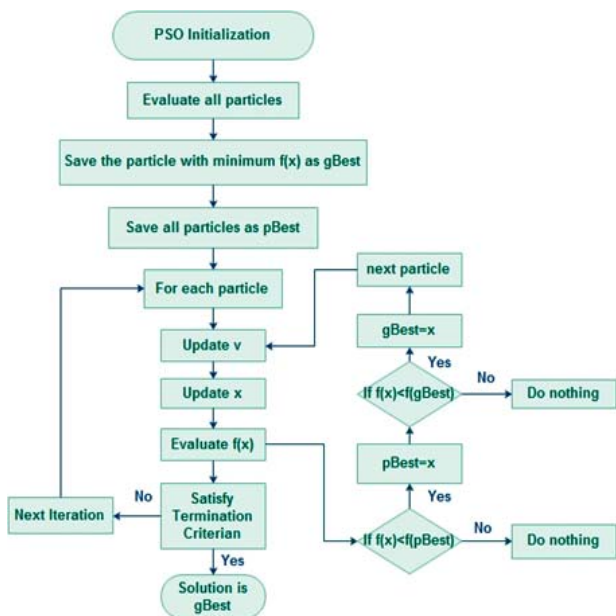
$$v_{id}^{k+1} = w^k \times v_{id}^k + c_1 \times rand(\cdot) \times (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 \times rand(\cdot) \times (p_{gd} - x_{id}^k) \quad (4)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (5)$$

$$w^k = \frac{(w_{ini} - w_{end})(T_{max} - k)}{T_{max}} + w_{end} \quad (6)$$

#### ۴. نتایج بهینه‌سازی

با در دست داشتن امضای مغناطیسی شناور، اثر سیم‌پیچ‌ها و تابع هزینه مساله می‌توان بهینه‌سازی را برای هر یک از حالت‌های ILM، IAM و IVM انجام داد. در هر سه حالت، جمعیت ۵۰۰ ذره و حداکثر تعداد تکرار ۲۰۰۰ مرتبه تعیین شده است. چنین اعداد بزرگی برای افزایش هر چه بیشتر دقت بهینه‌سازی‌ها انتخاب شده و اگر در یک سیستم عملی محدودیت‌های زمانی مهم‌تر باشد، می‌توان با جمعیت‌ها و تعداد تکرارهای کم‌تری نیز جواب‌های قابل قبولی به دست آورد. محدوده اولیه (۱۰۰۰، -۱۰۰۰) آمپر برای الگوریتم در نظر گرفته شده که البته الگوریتم می‌تواند خارج از این بازه را نیز جستجو کند و این بازه در انتخاب ذرات اولیه تاثیرگذار خواهد بود. برای انجام این محاسبات از یک رایانه‌ی معمولی با مشخصات ارایه شده در جدول ۲ استفاده شده است. مدت زمان



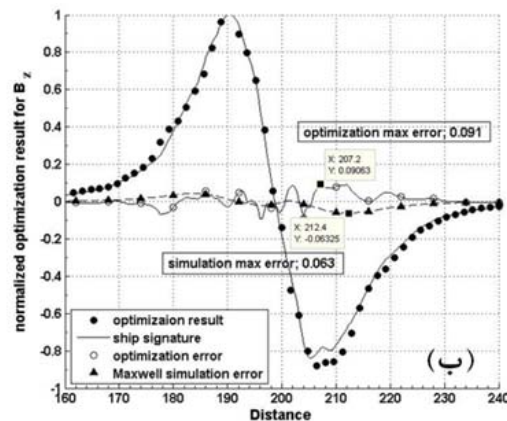
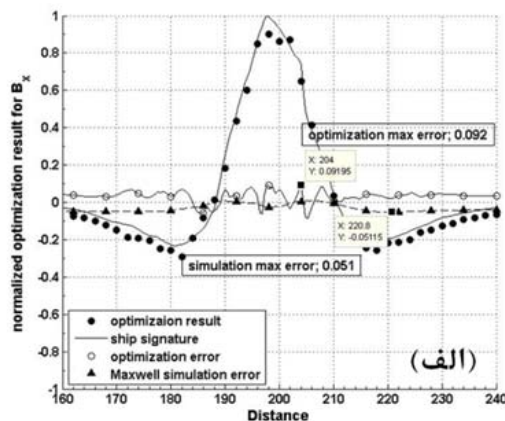
شکل ۱۴. فلوچارت الگوریتم ازدحام ذرات

جدول ۲. مشخصات سیستم مورد استفاده برای انجام شبیه‌سازی‌ها و محاسبات مربوط به بهینه‌سازی

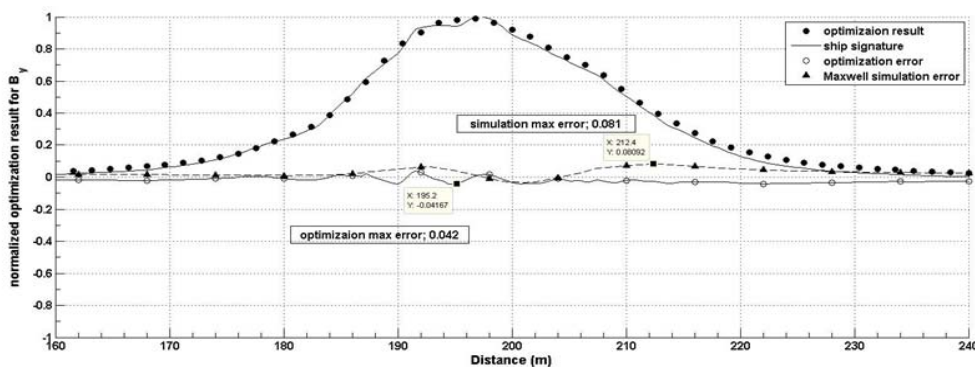
CPU	RAM
Intel (R) Core™ i7-2640M @ 2.8 GHz	8.00 GB

نسبت به دو حالت ILM و IVM که دو مولفه از میدان به صورت هم‌زمان بهینه می‌شوند، وجود دارد. خطای بیشتر حالت IVM نسبت به حالت ILM نیز کاملاً قابل انتظار بود چرا که برای حالت IVM تعداد سیم‌پیچ کم‌تری در نظر گرفته شده و در واقع درجه آزادی سیستم از ۹ به ۵ کاهش یافته است. برای بررسی صحت داده‌های به دست آمده، با استفاده از مقادیر جریان حاصل از بهینه‌سازی‌ها، امضای شناور در حالتی که کشتی مجهز به سیم‌پیچ‌های دگوسینگ است، در نرم‌افزار MAXWELL شبیه‌سازی شده است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها نیز در شکل‌های (۱۷-۱۵) با عنوان

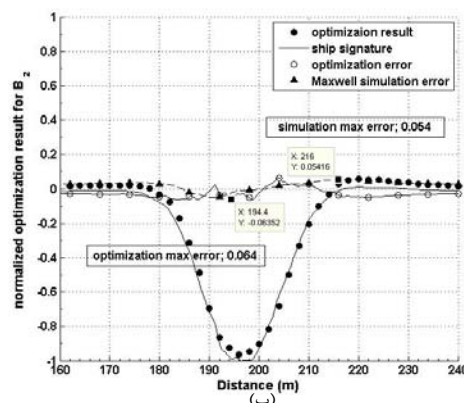
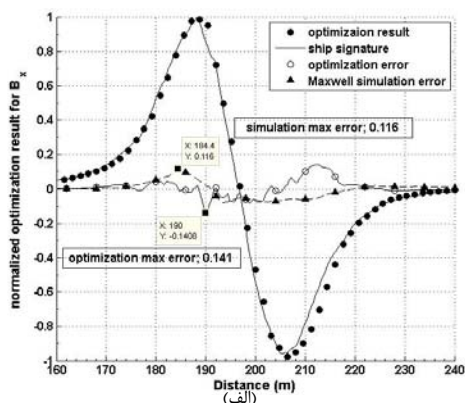
در این شکل‌ها اختلاف میدان‌های برآیند سیم‌پیچ‌ها و امضای اولیه که نشان‌دهنده اختلال باقی‌مانده بعد از انجام فرایند دگوسینگ است نیز در منحنی Optimization error ارایه شده است. در حالت ILM بیشترین خطای بهینه‌سازی (محلی که بعد از انجام فرایند دگوسینگ بیشترین اختلال را خواهد داشت) برای مولفه  $B_x$ ، ۹/۲ درصد و برای مولفه  $B_z$ ، ۹/۱ درصد است. خطا برای حالت IAM، ۴/۲ درصد و برای حالت IVM در مولفه  $B_x$ ، ۱۴/۱ درصد و در مولفه  $B_z$ ، ۶/۴ درصد است. همان‌طور که انتظار داشتیم در حالت IAM که فقط یک مولفه از میدان مغناطیسی بهینه می‌شود، خطای کم‌تری



شکل ۱۵. مقایسه امضای شناور، میدان‌های برآیند سیم‌پیچ‌ها و اختلال باقی‌مانده بعد از انجام بهینه‌سازی در حالت ILM الف) مولفه  $B_x$ ، ب) مولفه  $B_z$  در این تصویر Optimization result نشان‌دهنده میدان برآیند تولیدی سیم‌پیچ‌ها، Ship signature نشان‌دهنده قرینه امضای شناور (محاسبه شده در نرم‌افزار Maxwell)، Optimization error تفاضل این دو منحنی و Maxwell simulation error نشان‌دهنده اختلال باقی‌مانده بعد از فعال کردن سیستم دگوسینگ در محیط نرم‌افزار Maxwell است.



شکل ۱۶. مقایسه امضای شناور، میدان‌های برآیند سیم‌پیچ‌ها و اختلال باقی‌مانده بعد از انجام بهینه‌سازی در حالت IAM



شکل ۱۷. مقایسه امضای شناور، میدان‌های برآیند سیم‌پیچ‌ها و اختلال باقی‌مانده بعد از انجام بهینه‌سازی در حالت IVM الف) مولفه  $B_x$ ، ب) مولفه  $B_z$

علت این امر، قابل مقایسه بودن دامنه امضای شناور با خطای شبیه سازی (ناشی از محاسبات عددی، مش‌بندی و ...) در حالتی است که دامنه امضای شناور کاهش یافته است. این خطا در نتایج حاصله از بهینه‌سازی که در نرم افزار Matlab محاسبه شده وجود نداشته و طبیعتاً اعداد گزارش شده بر اساس منحنی Optimization error دقیق تر خواهند بود. تنها نکته مهم در مقایسه این دو منحنی این است که، دامنه‌ها در محدوده تقریبی یکسانی قرار داشته باشد و چون این حالت در شکل‌های (۱۷-۱۵) وجود دارد، می‌توان از عملکرد مطلوب سیستم دگوسینگ اطمینان حاصل کرد.

در شکل ۱۸ نیز الگوی میدان مغناطیسی باقی‌مانده بعد از فرایند دگوسینگ در مقایسه با امضای اولیه شناور، برای حالت ILM نشان داده شده است. در این شکل به وضوح تاثیر سیم‌پیچ‌های دگوسینگ در از بین بردن اختلالات شناورها دیده می‌شود. بدیهی است که برای حالت‌های IAM و IVM نیز چنین الگوهایی را داشته باشیم که به منظور جلوگیری از تکرار مطالب ارایه نشده است.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله امضای مغناطیسی یک شناور نمونه با استفاده از آرایه هالبخ شبیه‌سازی شد. با توجه به زمان‌بر بودن بهینه‌سازی سیستم دگوسینگ در نرم‌افزارهای حل عددی، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی امضای کشتی و اثر هر یک از سیم‌پیچ‌های سیستم دگوسینگ را به‌عنوان ورودی یک مساله بهینه‌سازی در نظر گرفته و با اعمال الگوریتم ازدحام ذرات، مساله بهینه‌سازی با توضیحات ارایه‌شده، در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. خطاهای نرم‌الیزه به‌دست‌آمده (با در نظر داشتن محدودیت‌های عملی) در مقایسه با سایر سیستم‌های طراحی شده در محدوده مناسبی قرار دارد. برای اطمینان از صحت داده‌های به‌دست‌آمده جریان‌های محاسبه‌شده توسط بهینه‌سازی به یک کشتی مجهز به سیستم دگوسینگ اعمال شد که نتایج این شبیه‌سازی در مقایسه با خطاهای پیش‌بینی شده

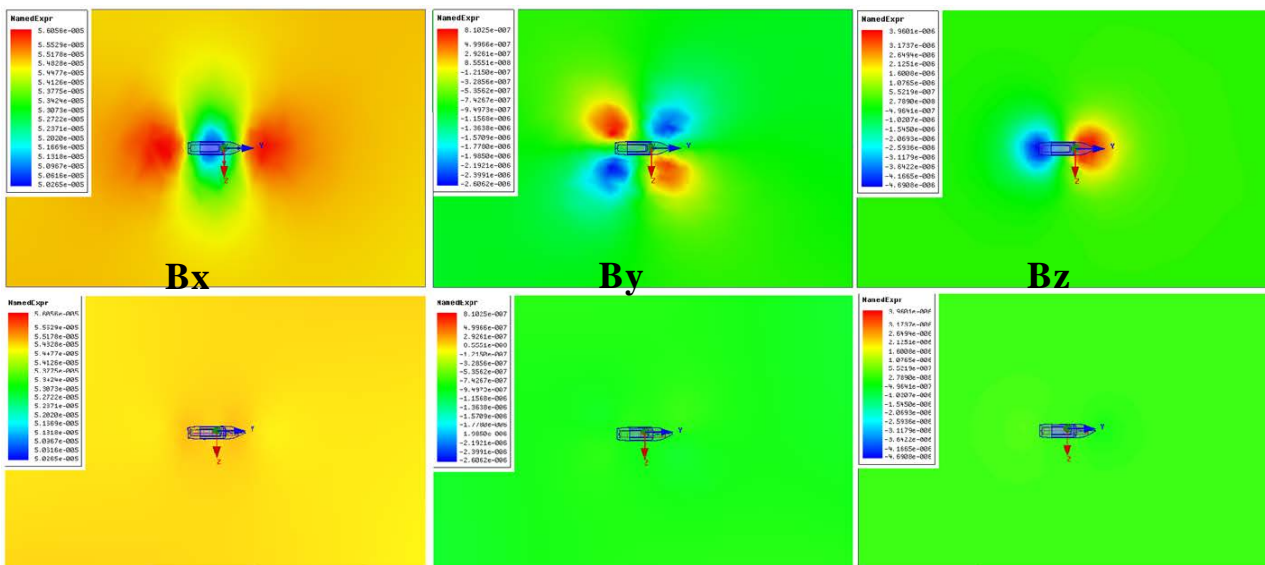
جدول ۳. مدت زمان اجرای شبیه‌سازی‌ها و محاسبات مربوط به بهینه‌سازی (ثانیه:دقیقه)

شماره سیم‌پیچ	ILM	IAM	IVM
شبیه‌سازی امضای کشتی در نرم افزار MAXWELL	۵:۲۴	۴:۴۴	۴:۱۴
شبیه‌سازی اثر هر یک سیم‌پیچ‌ها(میانگین)	۱۵:۱۹	۱۳:۴۹	۱۰:۵۸
شبیه‌سازی اثر کل سیم‌پیچ‌ها	۱۳۷:۵۰	۹۶:۴۱	۵۴:۴۹
بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB	۴۶:۴۴	۲۹:۱۱	۲۲:۵۷
شبیه‌سازی نهایی در نرم‌افزار MAXWELL با جواب مساله بهینه‌سازی	۱۴:۳۰	۱۷:۵۷	۴:۰۸

جدول ۴. جریان سیم‌پیچ‌های سیستم دگوسینگ بعد از بهینه‌سازی (بر حسب آمپر)

شماره سیم‌پیچ	سیم‌پیچ‌های طولی	سیم‌پیچ‌های عرضی	سیم‌پیچ‌های عمودی
۱	۱۱۱۱/۵	۲۲۲/۲	۴۲۳/۷
۲	-۱۳۳۳/۳	۶۱۸/۷	۴۲/۵
۳	۱۲۴۷	-۲۱/۱	۴۵۱/۴
۴	۹۲/۸	۳۹/۵	-۲۱/۱
۵	-۸۴۳/۸	۱۴۰	۱۰۷۰
۶	۱۴۳۵/۵	۶۸/۴	-
۷	-۱۰/۹	۹۰۵/۷	-
۸	-۵۷۴/۸	-	-
۹	۱۰۸۴/۳	-	-

Maxwell simulation error نشان داده شده است. تطبیق خوب دامنه این نمودار با نمودار خطای بهینه‌سازی (Optimization error)، نشان‌دهنده صحت داده‌ها بوده و تایید می‌کند که سیستم دگوسینگ طراحی شده به‌خوبی کار می‌کند. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که بیشینه این منحنی در مقایسه با خطاهای بهینه‌سازی که از روی منحنی Optimization error گزارش شده است، متفاوت بوده و



شکل ۱۸. مقایسه الگوی امضای اولیه شناور و اختلال باقی‌مانده بعد از انجام بهینه‌سازی در حالت ILM

- [17] C. Jizhong, Z. Yiming and X. Chunyan, "A more homogeneous, less massive Halbach magnet array for portable NMR", In Electronic Measurement and Instruments ICE-MI'07. 8th Int. Conf. on, pp. 1-330-1-336, IEEE, 2007.
- [18] S. Mahmoudnezhad and A. ghorbani, "Ship's Magnetic Signatures Simulation Using Halbach Magnet Array as Uniform Static Magnetic Field Source", in The third Iranian Conference on Engineering Electromagnetic (ICEEM 2014). 2014: Tehran, Iran.
- [19] Wikipedia contributors, "Charles F. Goodeve"; [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Charles\\_F.\\_Goodeve&oldid=678572449](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Charles_F._Goodeve&oldid=678572449), 2015.
- [20] N. S. Choi et al, "Optimization of degaussing coil currents for magnetic silencing of a ship taking the ferromagnetic hull effect into account", Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, Vol.22, No.3, pp.4904504-4904504, 2012.
- [21] H. Liu and Z. Ma, "Optimization of vessel degaussing system based on poly-population particle swarm algorithm", In Mechatronics and Automation ICMA 2007 Int. Conf. on, pp.3133-3137, IEEE, 2007.
- [22] E. Elbeltagi, T. Hegazy, and D. Grierson, "Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms", Advanced engineering informatics, Vol.19, No.1, pp.43-53, 2005.
- [23] L. Demilier et al, "Validation of Closed Loop Degaussing System for Double Hull Submarines", marine system and technology Conf. on, pp.10-14, 2010.
- [24] M. Clerc, "Particle Swarm Optimization"; John Wiley & sons, Vol.93, 2010.
- [25] A. Lazineca, "Particle Swarm Optimization"; In Tech, 2009.

بهینه‌سازی تطابق خوبی نشان داد. ضمن این‌که در روش پیشنهادی اثر بدنه شناور در میدان‌های تولیدی سیم‌پیچ‌ها نیز در نظر گرفته شده است. بدیهی است با در اختیار داشتن سیستم‌های رایانه‌ای سریع‌تر و نرم‌افزارهای استاندارد حل چنین مسائلی، می‌توان زمان و دقت محاسبات را بهبود بخشید.

## ۶. مراجع

- [1] J. J. Holmes, "Exploitation of a ship's magnetic field signatures", Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Vol. 1, No.1, pp. 1-78, 2006.
- [2] G. J. Aird, "Modelling the induced magnetic signature of naval vessels", PhD thesis, University of Glasgow, 2000.
- [3] P. J. Allan, "Investigations of the Magnetic Fields from Ships Due to Corrosion and Its Countermeasures", University of Glasgow, 2004.
- [4] J. J. Holmes, "Modeling a ship's ferromagnetic signatures", Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Vol.2, No.1, pp. 1-75, 2007.
- [5] J. J. Holmes, "Reduction of a ship's magnetic field signatures", Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Vol. 3, No.1, pp. 1-68, 2008.
- [6] C. Walker et al, "Survey of the magnetic signature of a moving surface vessel by multiple AUVs", in Oceans Int. Conf. on, PP.1-7, IEEE, 2012.
- [7] B. Armstrong et al, "Field measurement of surface ship magnetic signature using multiple AUVs", In Oceans Int. Conf. on, pp. 1-9, IEEE, 2009.
- [8] I. Gloza, S. Malinowski, and B. Marchalewski, "Ranges and equipment for the measurement of the ship's underwater signatures", Vol.15, pp. 39-48, 2012.
- [9] Z. Wei, X. Jie, and C. Jinfang, "Analysis of ship magnetic field surveying based on two Tri-axial Magnetic Sensors", In Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), Int. Conf. on, Vol. 5, pp. 5-8, IEEE, 2010.
- [10] <http://www.emcos.com/?application-examples=magnetic-signature-of-naval-ship-in-the-earths-magnetic-field>.
- [11] "Flux"; <http://magsoft-flux.com/products/flux>.
- [12] "Static Electromagnetics Module"; <http://operafea.com/product/analysis-modules/static-electromagnetics/>.
- [13] "ANSYS Maxwell"; <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electronics/Electromechanical/ANSYS+Maxwell>.
- [14] "ANSYS HFSS"; <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electronics/Signal+Integrity/ANSYS+HFSS>.
- [15] "Marine"; <https://www.feko.info/applications/marine>.
- [16] "Statics and Low Frequency"; <https://www.cst.com/Applications/StaticsLowFreq>.