

Research Paper

Experimental Study of the Effect of Stress on the Magnetic Signatures of a Steel Sample¹

Reza Eslamifar², Mohsen Safikhani³ and Morteza Mozaffari^{*4}

Received: 2024.04.20

Revised: 2024.07.02

Accepted: 2024.09.07

Abstract

Before sailing, submarines with ferromagnetic hulls are demagnetized to avoid damage and detection by sea mines and airborne systems. The increase in the residual magnetization of the submarine body after demagnetization due to the rising and falling can reduce the effect of demagnetization. This study aimed to investigate how internal hydrostatic pressure affects the magnetic signatures of a demagnetized submarine model. Magnetic sensors were placed at specific points under the body, and the changes in magnetic signatures were recorded when pressure was applied from 0 to 60 bar. The results show that by increasing the pressure up to 60 bar before demagnetization, the magnetic field components originating from the sample's internal stresses showed a linear increase. After depressurization, there was an exponential decrease followed by a subsequent increase in permanent magnetization of about 6%. However, after demagnetization, as the pressure increased up to 60 bar, the magnetic field generated by internal stresses in the sample increased by about 27%, but upon decreasing pressure, this magnetic field did not decrease but remained unchanged. This phenomenon negatively impacted the performance of the deperming process. Also, for further investigation, the increasing trend of magnetic signatures was evaluated at pressures of 30, 45, and 60 bar.

Keywords: *Demagnetization, Stress, Magnetic Characteristic, Magnetic Silencing.*

¹<https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46948.1403>

² PhD Student, Faculty of Physics, Isfahan University, Isfahan, Iran. Email: r.eslamifar@sci.ui.ac.ir

³ M. Sc. Graduated, Faculty of Physics, Isfahan University, Isfahan, Iran. Email: mohsensafikhani65@gmail.com

⁴ Associate Professor, Faculty of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. (Corresponding Author) Email: mozafari@sci.ui.ac.ir

<https://jap.alzahra.ac.ir>



بررسی تجربی اثر تنش بر مشخصه‌های مغناطیسی یک نمونه فولادی^۱

رضا اسلامی فر^۲، محسن صفی‌خانی^۳ و مرتضی مظفری^{۴*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۹، زمستان ۱۴۰۳

صص ۱۷۵ - ۱۵۸

چکیده:

زیردریایی‌ها با بدنه فرومغناطیس پیش از دریانوردی برای جلوگیری از آسیب و شناسایی با مین‌های دریایی و سامانه‌های هوابرد، مغناطش‌زدایی می‌شوند. افزایش مغناطش پسماند بدنه‌ی زیردریایی‌ها پس از فرآیند مغناطش‌زدایی، به دلیل بالا و پایین رفتن شناور، می‌تواند اثر مغناطش‌زدایی را کاهش دهد. در این پژوهش برای بررسی اثر تنش وارد شده بر مغناطش بدنه شناور، اثر فشار هیدروستاتیکی درونی بر مشخصه‌های مغناطیسی نمونه‌ی مدل زیردریایی پیش و پس از فرآیند وامغناطش بررسی شد. با کاربرد فشار از ۰ تا ۶۰ بار، تغییرات مشخصه‌های مغناطیسی به کمک حسگرهای مغناطیسی چیده شده در نقاط مشخص زیر بدنه آن ثبت شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش فشار تا ۶۰ بار، پیش از مغناطش‌زدایی، مؤلفه‌های میدان مغناطیسی برآمده از تنش درونی نمونه به صورت خطی افزایش و با برداشتن فشار به صورت نمایی کاهش یافته و در نهایت در حدود ۶ درصد به مغناطش همیشگی افزوده شده است. اگرچه پس از مغناطش‌زدایی، مؤلفه‌های میدان مغناطیسی برآمده از تنش درونی نمونه، به صورت خطی افزایش یافته است. سپس با کاهش فشار تا ۰ بار، مؤلفه‌های میدان مغناطیسی نمونه کاهش نیافته و میدان مغناطیسی ناشی از تنش پسماند به میزان ۲۷ درصد افزایش یافته است. از این‌رو، اثر تنش در آن باقی ماند که سبب کاهش عملکرد فرآیند مغناطش‌زدایی دی‌پرمنینگ شد. همچنین برای بررسی بیشتر روند افزایش مشخصه‌های مغناطیسی در فشارهای ۳۰ و ۴۵ و ۶۰ بار پس از مغناطش‌زدایی ارزیابی شد.

واژگان کلیدی: مغناطش‌زدایی، تنش، مشخصه مغناطیسی، سکوت مغناطیسی.

^۱ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46948.1403>

^۲ دانشجوی دکتر، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. Email: r.eslamifar@sci.ui.ac.ir

^۳ دانش‌آموخته کاشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. Email: mohsensafikhani65@gmail.com

^۴ دانشیار، دانشکده فیزیک دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. (نویسنده مسئول). Email: mozafari@sci.ui.ac.ir



۱. مقدمه

سازه اصلی شناورهای دریایی معمولاً از فولادهای فرومغناطیس است. دو گونه مغناطش در بدنه این شناورها ایجاد می‌شود. یکی مغناطش القایی که به دلیل واکنش بدنه فرومغناطیس شناور به میدان مغناطیسی زمین است و دیگری مغناطش همیشگی‌ای است که به دلیل تنش‌های باقی‌مانده‌ی مکانیکی^۱ به هنگام ساخت و/یا دوره فعالیت شناور در آن ایجاد می‌شود [۱]. مغناطش کل به ناهنجاری مغناطیسی پیرامون شناور می‌انجامد که به آن مشخصه یا امضای مغناطیسی^۲ شناور گفته می‌شود. مشخصه مغناطیسی بزرگ می‌تواند به آشکار شدن شناور با حسگرهای مغناطیسی و/یا فعال شدن مین‌های مغناطیسی منجر شود. با گسترش سریع فناوری شناسایی شناورها، مین‌های مغناطیسی و سامانه‌های شناسایی مغناطیسی هواورد^۳ میدان‌های مغناطیسی پیرامون شناورهای دریایی را شناسایی می‌کنند که ایمنی شناورها را تهدید می‌کند. تغییر در تنش بدنه فولادی در هنگام شناور شدن زیردریایی و همچنین تنش کششی و فشاری در فرآیند ساخت‌وساز، سبب تغییر مشخصه‌های مغناطیسی آن می‌شود. از همین رو بررسی تغییرات مشخصه‌های مغناطیسی در اثر تنش برای مشخص کردن چگونگی انجام فرآیندهای وامغناطش مهم است [۷-۲].

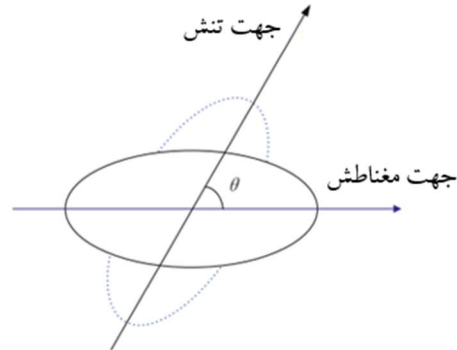
بر پایه نظریه فرومغناطیس، با تغییر تنش درونی مواد فرومغناطیس، مغناطش آن‌ها نیز تغییر می‌کند. و وارون آن، هنگامی که مواد فرومغناطیس در میدان‌های مغناطیسی قرار گیرند، تنیده می‌شوند. از دید انرژی، هنگامی که مواد فرومغناطیس تنیده می‌شوند، یک سهم انرژی به نام انرژی مغناطوکشسانی در آن‌ها پدیدار می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، با کار بست تنش در یک جهت ویژه از ماده فرومغناطیس محور اصلی بیضی از جهت مغناطش اصلی به جهت تنش تغییر می‌کند. سهم انرژی مغناطوکشسانی مواد فرومغناطیس را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۸].

$$W_{\sigma} = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \theta \quad (1)$$

¹ Mechanical Stress

² Magnetic Signature

³ Magnetic Anomaly Detection (MAD)



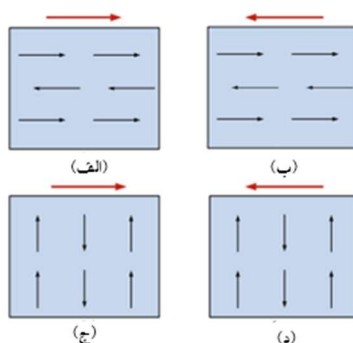
شکل ۱ کاربرد تنش بر یک ماده فرومغناطیس بیضوی.

که در آن، λ_s ضریب مغناطو کشسانی، θ زاویه میان جهت تنش و جهت مغناطش، σ تنشی است که برای تنش فشاری منفی و برای تنش کششی مثبت است. هنگامی که زیردریایی در زیر آب حرکت می‌کند، تنش معمولاً منفی است. هنگامی که λ_s و σ مشخص می‌شود، کار مغناطو کشسان فقط به θ مربوط می‌شود. با توجه به اصل کمینه انرژی، مغناطش ذاتی جهتی را با کمترین انرژی مغناطو کشسانی خواهد گرفت. همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، اثر تنش بر مغناطش ذاتی در چهار مورد زیر وجود دارد.

بر پایه اصل کمینه انرژی، هنگامی که $\sigma > 0$ و $\lambda_s > 0$ باشد، $\theta = 0$ یا $\theta = 180^\circ$ است که نشان می‌دهد کشش، مغناطش ذاتی را به همان جهت یا جهت وارونش می‌چرخاند (شکل ۲-الف)). هنگامی که $\sigma < 0$ و $\lambda_s < 0$ باشد، $\theta = 0$ یا $\theta = 180^\circ$ است که کشش مغناطش ذاتی را به همان جهت یا جهت مخالف منحرف می‌کند (شکل ۲-ب)).

هنگامی که $\sigma > 0$ و $\lambda_s < 0$ باشد، فشار مغناطش ذاتی را به جهت عمود بر آن منحرف می‌کند (شکل ۲-ج)). هنگامی که $\sigma < 0$ و $\lambda_s > 0$ باشد، فشار مغناطش ذاتی را به جهت عمود بر آن می‌چرخاند (شکل ۲-د)). [۹].





شکل ۲ اثر تنش بر مغناطش ذاتی برای (الف) $\sigma > 0$ و $\lambda_s > 0$ ، (ب) $\sigma < 0$ و $\lambda_s < 0$ ، (ج) $\sigma > 0$ و $\lambda_s < 0$ و همچنین (د) $\sigma < 0$ و $\lambda_s > 0$

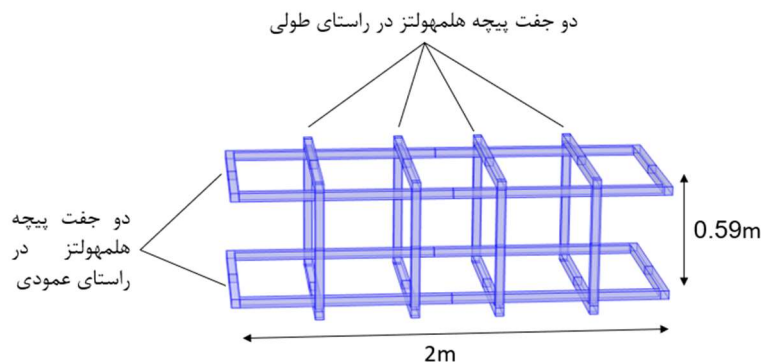
در فرآیند مغناطو کشسانی تغییر مغناطش یک فرومغناطیس نه تنها به ویژگی‌های مواد و تنش وابسته است بلکه به شکل ماده فرومغناطیس و میدان مغناطیسی بیرونی وابسته است. پژوهش‌هایی درباره اثر تنش فشاری بر ویژگی‌های مغناطیسی آن‌ها در حین ساخت و ساز بدنه زیردریایی‌ها در ابعاد کوچک (کمتر از ۲۰ سانتی متر) انجام شده است که همگی برای انتخاب بهترین فولاد برای ساخت بدنه بوده است [۴]. به این صورت که فولادی که در اثر تنش و کشش بر ویژگی‌های مغناطیسی فولاد کمترین اثر را می‌گذارد، فولادی مناسب از دید مغناطیسی برای ساخت و ساز بدنه است. در حالی که تغییر در مشخصه مغناطیسی زیردریایی در اعماق دریا در اثر شیرجه زدن و بالا آمدن، از دید مخفی شدن در برابر تهدیدهای دریایی همچون مین و سامانه‌های گشت دریایی مهم است. از همین رو در این پژوهش برای بررسی اثر تنش بر فولاد، تاثیر فشار هیدروستاتیک درونی بر مشخصه‌های مغناطیسی یک مخزن استوانه‌ای فولادی پیش و پس از فرآیند مغناطش زدایی دی‌پرمینگ، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. فرآیند دی‌پرمینگ و فشارگذاری در مخزن فولادی

زیردریایی‌ها پس از فرآیند دی‌پرمینگ عملیاتی شده و به اعماق دریا می‌روند. در اثر شیرجه زدن و بالا و پایین آمدن زیردریایی، فشار آب در عمق‌های گوناگون به بدنه وارد شده که به تغییر در مغناطش همیشگی آن منجر می‌شود. در این پژوهش از یک مخزن فولادی ST37 با طول ۱۲۶ و قطر ۲۴ سانتی متر که اغلب برای ساخت بدنه شناورها به کار می‌رود، برای بررسی فرآیند دی‌پرمینگ و تاثیر فشار هیدروستاتیک بر ویژگی‌های مغناطیسی بهره گرفته شد. پیش از فشارگذاری درون

مخزن، نخست درون آن خالی و سپس در یک شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین در سیم لوله‌ای به بلندی ۱۵۰ سانتی‌متر، مغناطش‌زدایی شد.

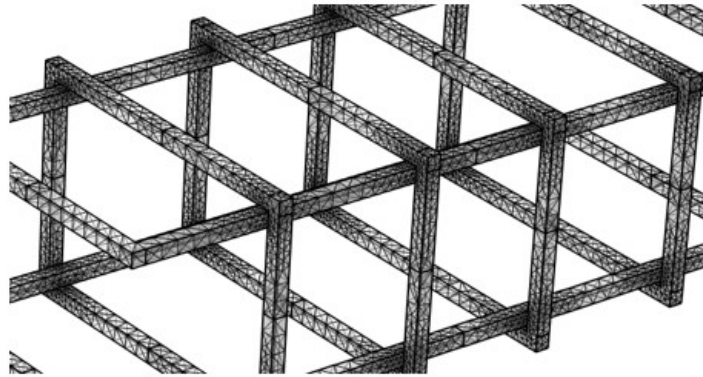
هدف از داشتن شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین زدودن مغناطش القایی ناشی از میدان مغناطیسی زمین و اندازه‌گیری و دنبال کردن تغییرات مغناطش همیشگی فولاد مورد نظر است. به کمک نرم‌افزار COMSOL Multiphysics شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین دو بعدی به ابعاد $2 \times 1.8 \times 0.59$ متر در ماژول magnetic fields شبیه‌سازی شد. به دلیل قرار گرفتن جسمی کشیده همانند الگوی زیردریایی در آن از دو جفت پیچه هلمهولتز در راستای محور طولی (دو پیچه درونی با یکدیگر و دو پیچه بیرونی با یکدیگر کوپل شده‌اند) برای زدودن میدان مغناطیسی B_x زمین و یک جفت پیچه هلمهولتز در راستای عمودی برای زدودن میدان مغناطیسی B_z بهره گرفته شد. با قرار گرفتن شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین در راستای شمالی-جنوبی میدان مغناطیسی عرضی زمین B_y نیز زدوده خواهد شد. همچنین از یک کره به شعاع ۲۰ متر برای محیط بی‌نهایت پیرامون هندسه مورد نظر در نرم‌افزار بهره گرفته شد. شکل (۳)، نمایی از هندسه به کار برده شده برای طراحی شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین دو بعدی را نشان می‌دهد.



شکل ۳ هندسه طراحی شده برای شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین در نرم‌افزار COMSOL.

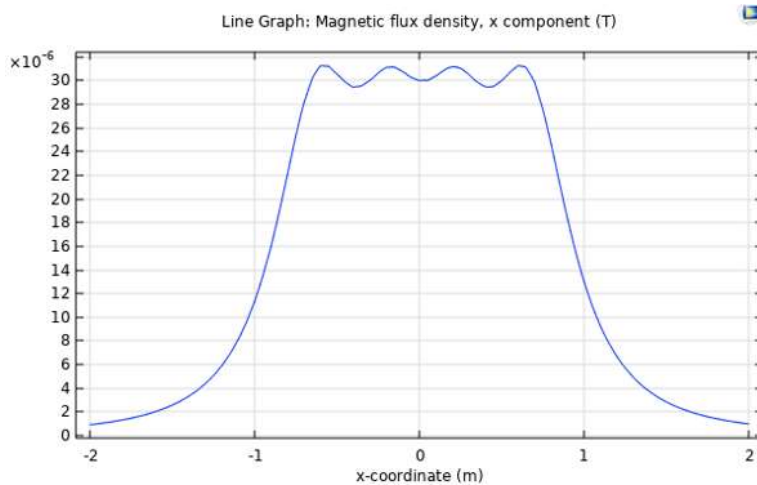
تعداد دورهای جفت پیچه‌های درونی و بیرونی در راستای محور طولی به ترتیب ۲۰ و ۳۰ و همچنین تعداد دورهای پیچه‌های محور عمودی ۱۰ دور انتخاب شدند. مش‌بندی هندسه پیچه‌های هلمهولتز برای رسیدن به همگرا شدن جواب پایانی در نرم‌افزار COMSOL به صورت ترکیبی از مثلثی و چهاروجهی انتخاب شدند و اندازه مش‌بندی بسیار ریز انتخاب شد. شکل (۴)، نمایی از مش‌بندی هندسه شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین را نشان می‌دهد.



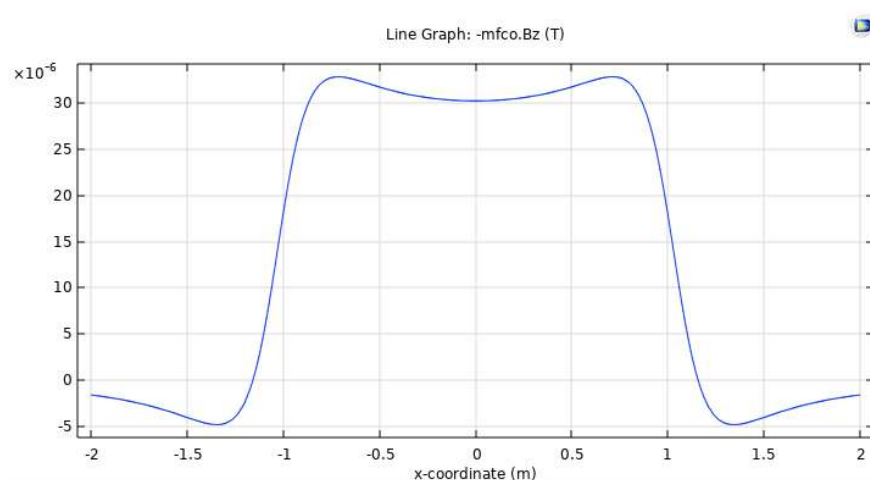


شکل ۴ مش‌بندی به کار گرفته شده در نرم افزار COMSOL.

پس از انجام کامل فرآیند شبیه‌سازی با انتخاب یک خط به عنوان خط قرارگیری سنسورها در مرکز هندسه مورد نظر به طول ۴ متر نمودار چگالی شار میدان مغناطیسی در راستای طولی و عمودی بر حسب فاصله ترسیم شد. شکل‌های (۵) و (۶)، نمودارهای مورد نظر را نشان می‌دهد. میزان نایکنواختی میدان مغناطیسی زمین در حدود ۱/۳ متری از شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین در راستای طولی در حدود ۵ درصد است. که با توجه به داشتن مخزنی به طول ۱/۲۶ متر یکنواختی ۹۵ درصدی در این طول قابل قبول است.



شکل ۵ نایکنواختی چگالی شار مغناطیسی B_x در راستای طولی در مرکز شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین.



شکل ۶ نایکناختی چگالی شار مغناطیسی B_z در راستای طولی در مرکز شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین.

شبیه‌ساز میدان مغناطیسی مورد نظر برای زدودن میدان مغناطیسی زمین با کمک آلیاژ آلومینیوم تماماً نگیر و همچنین جوشکاری ویژه آلومینیوم ساخته شد. شکل (۷)، نمایی از سازه ساخته شده و مخزن مورد آزمایش درون آن را نشان می‌دهد.



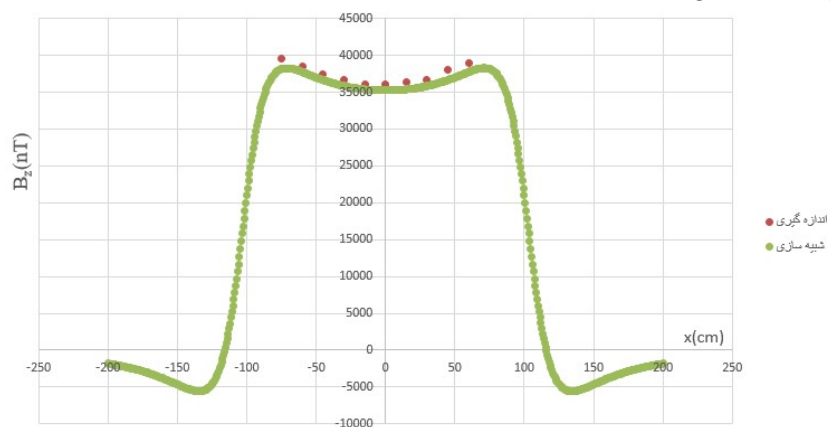
شکل ۷ نمایی از شبیه‌ساز میدان مغناطیسی ساخته شده به همراه مخزن فولادی درون آن.

با قرار دادن سنسور مغناطیسی برداری فلاکس گیت^۱ از شرکت Bartington با توانایی اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تا ۵۲۴ میکروتسلا و رزولوشن $۶۲/۵ \text{ pT/bit}$ در مرکز سازه و جابه‌جایی آن در طول سازه به اندازه ۱۵ سانتی‌متر، یکنواختی میدان مغناطیسی با داده‌های شبیه‌سازی

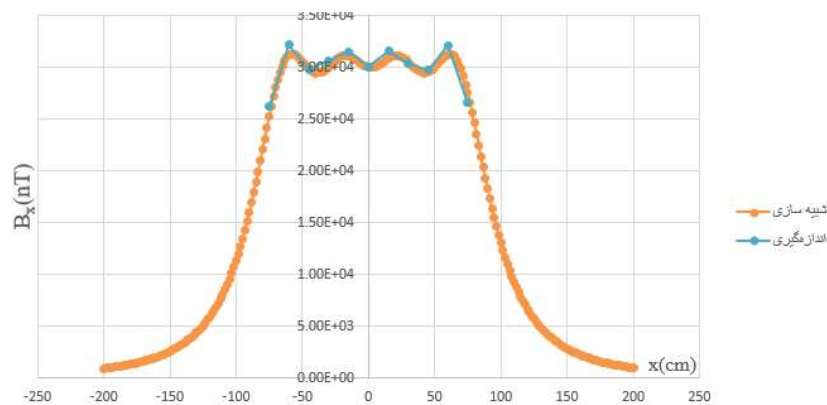
^۱ Fluxgate



شده مقایسه و میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط سازه اعتبارسنجی شد که با یکدیگر همخوانی کامل داشتند (شکل (۸) و (۹)).

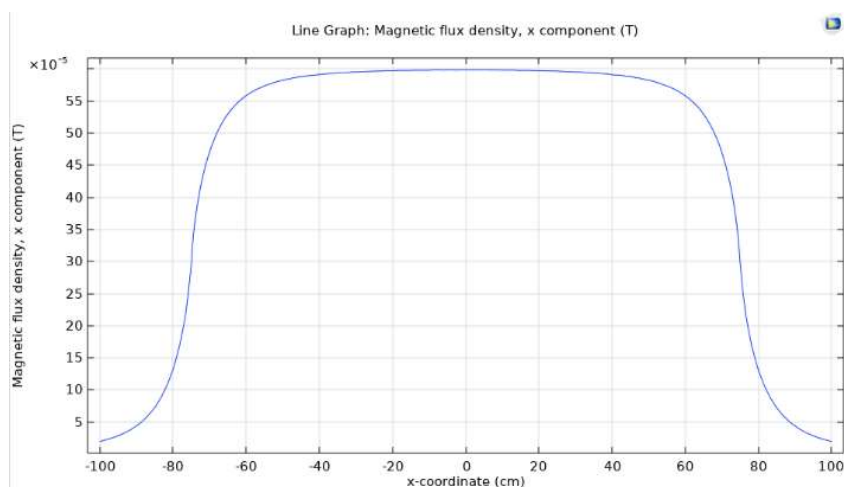


شکل ۸ مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده با سنسور مغناطیسی برای میدان مغناطیسی عمودی تولید شده در راستای طولی (B_z).



شکل ۹ مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده با سنسور مغناطیسی برای میدان مغناطیسی تولید شده عمودی در راستای طولی (B_x).

برای اجرای فرآیند پرمیننگ سیملوله‌ای به طول ۱/۵ و قطر ۰/۲۶ متر با ۷۲۰ دور سیم‌پیچ طراحی و ساخته شد. طراحی سیم‌پیچ مورد نظر در نرم افزار COMSOL Multiphysics انجام شد. شکل (۱۰)، یکنواختی میدان مغناطیسی درون سیم‌لوله در مرکز آن به ازای جریان یک آمپر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ نمودار یکنواختی میدان مغناطیسی سیم‌لوله شبیه‌سازی شده در مرکز سیم‌لوله.

همان‌گونه که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، در حدود ۱۱۰ سانتی‌متر از سیم‌لوله میدان مغناطیسی ایجاد شده یکنواخت است. شکل (۱۱)، نمایی از جایگاه دی‌پرمینگ کامل شده همراه با سیم‌لوله برای مخزن فولادی را نشان می‌دهد که برای جلوگیری از نوفه مغناطیسی محیطی، در فضایی باز و به دور از سازه‌های مغناطیسی قرار گرفته است.



شکل ۱۱ نمایی از جایگاه دی‌پرمینگ مخزن.

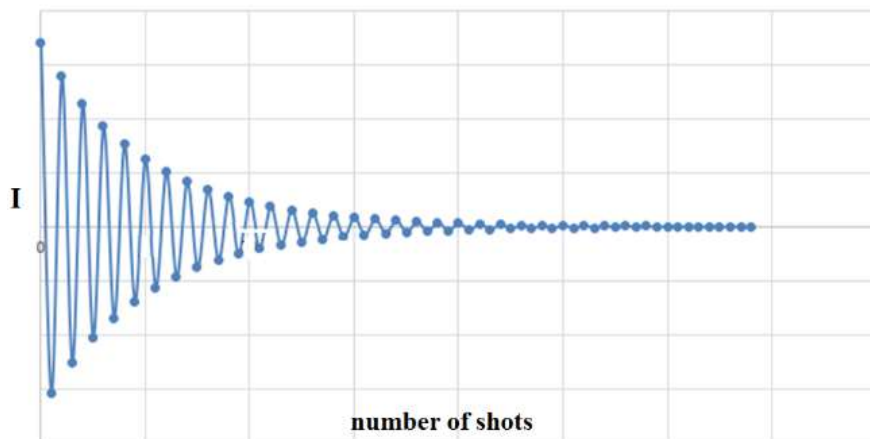
فرآیند دی‌پرمینگ شناورهای دریایی به سه روش Flash-، Anhyseretic، Deperm-ME و D انجام می‌شود [۱۲]. با توجه به پژوهش‌های IM S-H [۳،۲] روش Deperm-ME با دامنه‌های کاهشی جریان‌های کاربردی، بازدهی بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. از این‌رو، در این پژوهش از این روش بهره گرفته شد. برای اجرای فرآیند دی‌پرمینگ بیشینه جریان عبور داده شده



از سیملوله ۱۷ آمپر و تعداد ۶۰ جریان بر پایه شکل (۱۲) انتخاب شد. رابطه‌ی (۱) چگونگی کاهش جریان‌های کاربرستی را نشان می‌دهد.

$$I=I_0e^{-(\alpha n)}, n=0,1,2,\dots \quad (2)$$

در این رابطه، I_0 جریان بیشینه برابر ۱۷ آمپر و α که نمایانگر شیب کاهش جریان‌های کاربرستی است برابر ۰/۱ انتخاب شد.



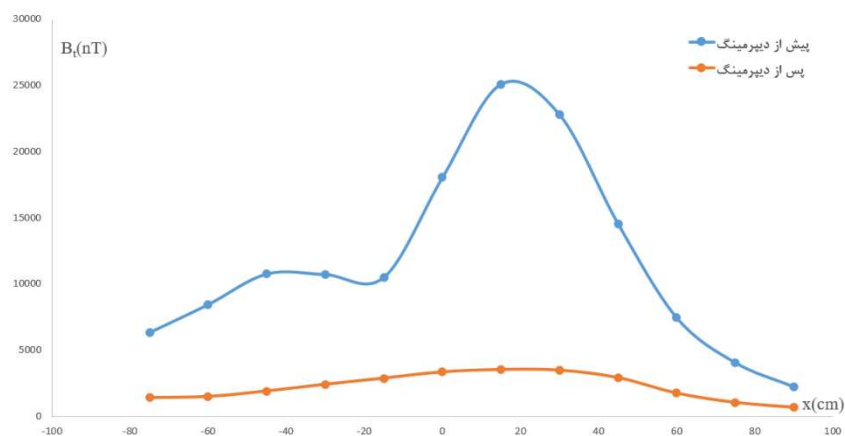
شکل ۱۲ جریان‌های کاربرستی در اجرای فرآیند دی‌پرمینگ.

پیش و پس از فرآیند دی‌پرمینگ برای دنبال کردن میدان مغناطیسی ناشی از تغییرات مغناطش همیشگی مخزن فولادی از ۱۲ سنسور فلاکس گیت که در یک خط به فاصله‌ی ۱۵ سانتی‌متر از یکدیگر و ۲۴ سانتی‌متر از کف مخزن فولادی قرار گرفته‌اند، بهره گرفته شد. شکل (۱۳)، نمایی از قرارگیری سنسورها در جایگاه دی‌پرمینگ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ قرارگیری خط سنسورهای مغناطیسی به فاصله ۲۴ سانتی‌متر از کف مخزن.

پس از مغناطش‌زدایی، در حدود ۹۰ درصد از مغناطش همیشگی اولیه در مخزن کاهش یافت. شکل (۱۴) میدان مغناطیسی ناشی از مغناطش همیشگی پیش و پس از انجام فرآیند دی‌پرمنینگ را نشان می‌دهد. در این شکل هر نقطه بر محور X نشانگر داده هر سنسور مغناطیسی است که به فاصله ۱۵ سانتی‌متر از سنسور کناری قرار گرفته است. همان‌گونه که دیده می‌شود، مغناطش همیشگی مخزن از ۲۵ میکروتسلا به کمتر از ۴ میکروتسلا رسیده است که کاهش حدود ۹۰ درصدی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ مغناطش همیشگی مخزن فولادی پیش و پس از فرآیند دی‌پرمنینگ.



در این پژوهش نمونه آزمایشگاهی مدل زیردریایی را که مخزنی فولادی است، از آب پر شد تا یک فشار هیدروستاتیکی درونی به آن وارد شود. سپس، تغییرات مشخصه‌های مغناطیسی آن را پیش و پس از فشارگذاری در شبیه‌ساز میدان مغناطیسی زمین و آرایه‌ای از سنسورهایی که به اندازه یک قطر مخزن از کف آن فاصله دارد، بررسی شد. فشار هیدروستاتیکی از صفر تا ۶۰ بار با پله‌های ۵ باری افزایش یافت. دقت فشارگذاری با توجه به مانومتر به کار برده شده در فرآیند آزمایش پیرامون ۱ بار بود. سپس فشار از ۶۰ بار با همان پله‌های ۵ باری کاهش داده شد تا به فشار صفر برسد. شکل (۱۵)، نمایی از فرایند فشارگذاری درون مخزن را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵ فشارگذاری درون مخزن.

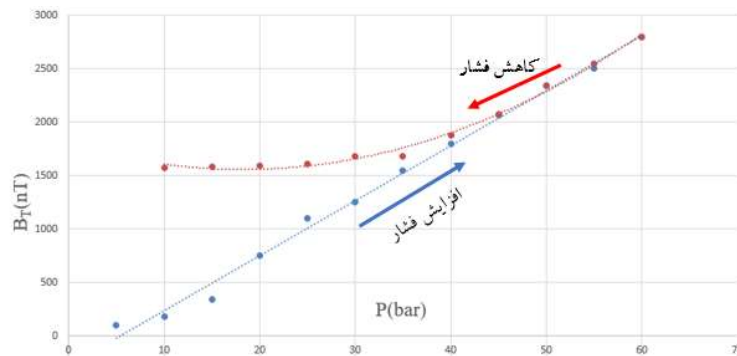
۳. یافته‌ها و بحث

نتایج آزمایش نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی مدل ساده‌ی زیردریایی به روشنی با فشار تغییر می‌کند. با در نظر گرفتن ۶۰ بار (معادل ۶۰۰ متر زیر دریا) برای نقطه مرجع، شکل (۱۶) و (۱۷) نمودار تغییرات میدان مغناطیسی مخزن از فشار ۵ تا ۶۰ بار و ۶۰ تا صفر بار برای سنسور شماره ۶ که دقیقاً در ۲۴ سانتی‌متری از کف و مرکز مخزن قرار دارد، پیش و پس از فرآیند دی‌پرمینگ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، با بالا رفتن فشار میدان مغناطیسی ناشی از تنش به صورت خطی برای هر دو افزایش می‌یابد اما پس از کاهش فشار پیش از فرآیند دی‌پرمینگ میدان مغناطیسی ناشی از تنش به صورت نمایی کاهش می‌یابد. اما پس از فرآیند دی‌پرمینگ میدان مغناطیسی ناشی از تنش کاهش نیافته است و تا فشار صفر بار در آن روند کمابیش ثابتی دارد. در نهایت مغناطش

دائمی باقی مانده پیش از دی‌پریمینگ در مخزن در حدود ۱۶۰۰ نانوتسلا افزایش یافته و پس از فرآیند دی‌پریمینگ مغناطش دائمی باقی مانده در حدود ۱۱۰۰ نانوتسلا افزایش یافته است. مقدار مغناطش همیشگی اولیه پیش از دی‌پریمینگ در حدود ۲۵ میکروتسلا بوده است (شکل (۱۴)) که با کاربست فشار هیدروستاتیک ۶۰ باری و برداشتن آن، ۱/۶ میکروتسلا در حدود ۶ درصد به آن افزوده شده است که مقدار قابل توجهی نیست. حال آن‌که پس از فرآیند دی‌پریمینگ که مغناطش همیشگی به حدود ۴ میکروتسلا رسیده بود (شکل (۱۴))، با فشارگذاری و کاربست تنش در حدود ۱/۱ میکروتسلا به مغناطش همیشگی آن افزوده شد و باقی ماند که حدود ۲۷ درصد به آن افزوده شده است (جدول (۱)) که نشان دهنده این موضوع است که کاربست تنش بر یک ماده فرومغناطیس و امغناطیده شده سبب ایجاد مغناطش همیشگی در آن می‌شود که با برداشتن تنش این مغناطش از میان نمی‌رود [۱۱-۱۰]. در اصل تنش وارد شده به مخزن منجر به اثرگذاری در مغناطش همیشگی موجود در آن می‌شود. این افزایش در مغناطش همیشگی سبب تاثیر گذاشتن در فرآیند دی‌پریمینگ و کاهش کارایی آن می‌شود. به همین دلیل است که شناورها و زیردریایی‌ها پس از انجام مانورهای دریایی طولانی مدت دوباره و امغناطیده شده تا احتمال شناسایی آن‌ها کاهش یابد [۱۳-۱۲].

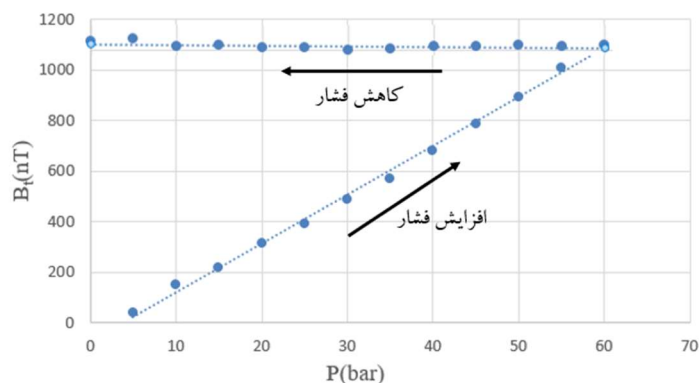
جدول (۱) مقایسه میدان مغناطیسی ناشی از مغناطش همیشگی پیش و پس از فرآیند دی‌پریمینگ.

| فرآیند | میدان مغناطیسی پیش از فشارگذاری (μT) | میدان مغناطیسی پس از فشارگذاری (μT) | درصد افزایش میدان مغناطیسی |
|-------------------|---|--|----------------------------|
| پیش از دی‌پریمینگ | ۲۵ | ۲۶/۶ | ۶ |
| پس از دی‌پریمینگ | ۴ | ۵/۱ | ۲۷ |



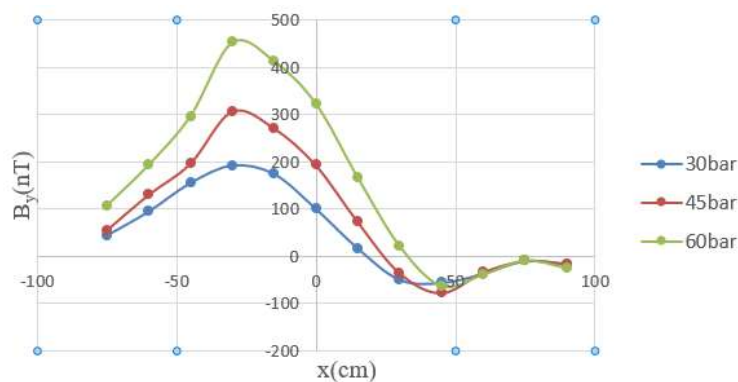
شکل ۱۶ نمودار تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از تنش از فشار ۵ تا ۶۰ بار و ۶۰ تا صفر بار پیش از فرآیند دی‌پریمینگ.



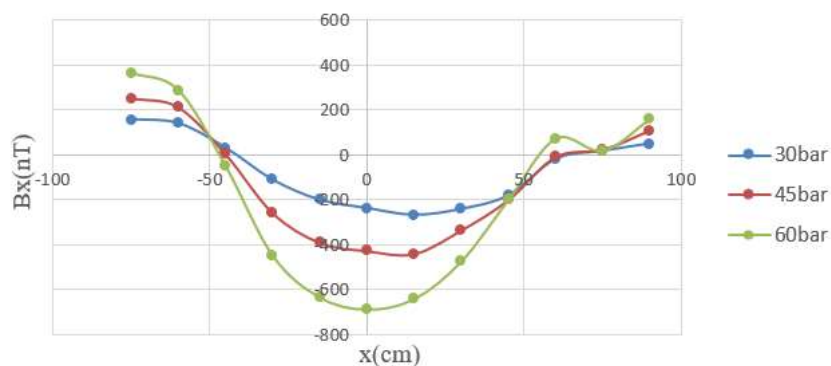


شکل ۱۷ نمودار تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از تنش از فشار ۵ تا ۶۰ بار و ۶۰ تا صفر بار پس از فرآیند دی‌پریمینگ.

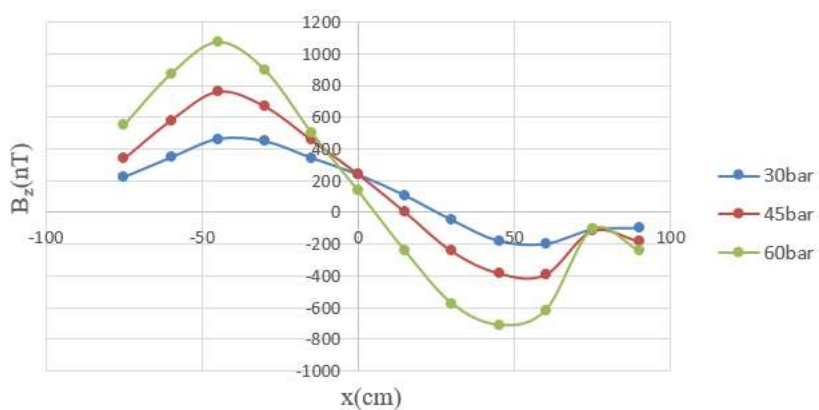
از آن‌جا که تغییرات مشخصه‌های مغناطیسی پس از اجرای دی‌پریمینگ اهمیت بیشتری دارد، پس بررسی و مشاهده روند تغییرات مشخصه‌های مغناطیسی، بازه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ بار نیز با یکدیگر مقایسه شدند. شکل‌های (۶) تا (۸) نمودارهای تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از تنش هیدروستاتیکی برای هر سه مشخصه میدان را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش فشار دامنه مولفه‌های مغناطیسی افزایش یافته است که نشان دهنده تأثیر تنش بر مغناطش دائم مخزن و افزایش آن است.



شکل ۱۸ تغییرات مولفه‌ی میدان مغناطیسی ناشی از تنش در فشارهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ بار.



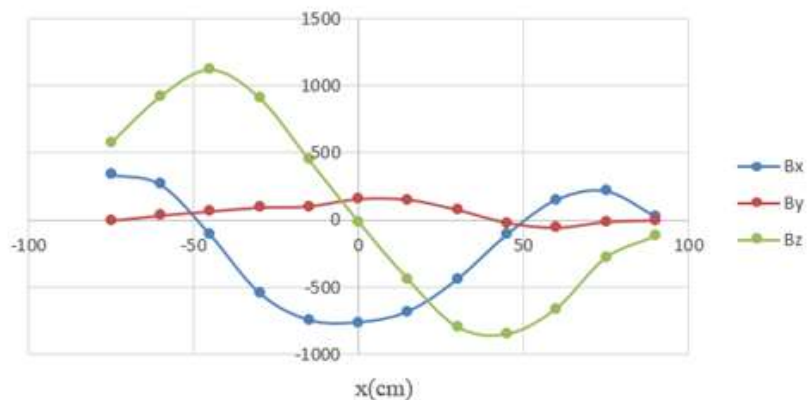
شکل ۱۹ تغییرات مولفه‌ی میدان مغناطیسی ناشی از تنش در فشارهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ بار.



شکل ۲۰ تغییرات مولفه‌ی میدان مغناطیسی ناشی از تنش در فشارهای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ بار.

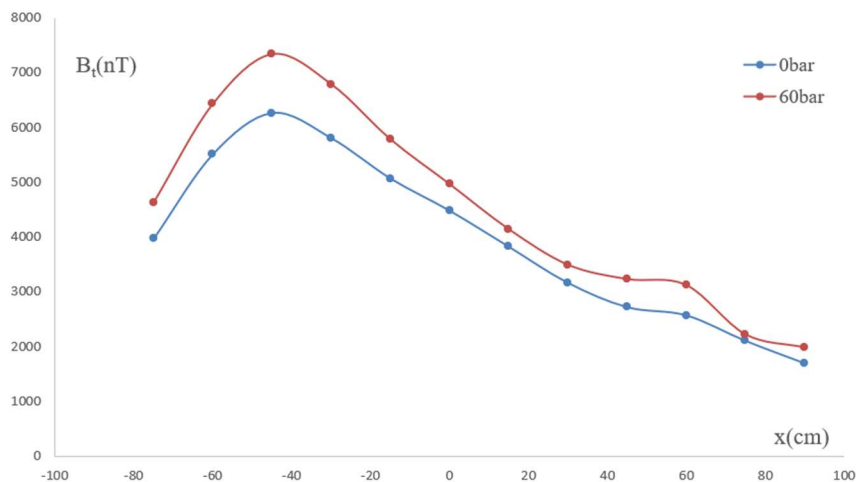
همان گونه که در شکل‌های (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) دیده می‌شود با افزایش فشار از ۳۰ به ۶۰ بار مولفه‌های x ، y و z میدان مغناطیسی به ترتیب پیرامون ۴۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ نانوتسلا افزایش یافته است. شکل (۲۱)، اختلاف مولفه‌های میدان مغناطیسی را پیش و پس از افزایش فشار نشان می‌دهد.





شکل ۲۱ اختلاف مولفه‌های میدان مغناطیسی پیش و پس از فشار گذاری پس از اجرای دی‌پرمینگ.

همان گونه که دیده می‌شود، پس از برداشتن فشار ۶۰ بار، حدود ۸۰۰ نانوتسلا در B_x و حدود ۱۰۰۰ نانوتسلا در B_z باقی مانده که برآمده از تنش پسماند در بدنه است. همچنین با مقایسه مشخصه مغناطیسی کلی در حالت پیش و پس از فشارگذاری دیده می‌شود که بیشینه مقدار مشخصه مغناطیسی پس از فشار گذاری به اندازه ۲۷ درصد افزایش داشته است (شکل ۲۲)) که این مقدار با افزایش دوره عملیاتی شناور و تکرار بالا پایین رفتن در آب افزایش می‌یابد که فرآیند دی‌پرمینگ را تحت تاثیر خود قرار داده و کارایی آن را پایین می‌آورد.



شکل ۲۲ مقایسه مشخصه مغناطیسی کل پیش و پس از فشارگذاری پس از اجرای دی‌پرمینگ.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی نقش تنش بر بدنه مغناطیسی زیردریایی، اثر فشار هیدروستاتیکی درونی بر مشخصه‌های مغناطیسی یک نمونه مدل زیردریایی پیش و پس از فرآیند وامغناطش بررسی شد. با کار بست فشار از صفر تا ۶۰ بار به کمک حسگرهای مغناطیسی جایگذاری شده در فاصله‌ای مشخص زیر بدنه، تغییرات مشخصه‌های مغناطیسی آن ثبت شد. با افزایش فشار تا ۶۰ بار پیش از مغناطش زدایی، مغناطش همیشگی ناشی از تنش افزایش یافت و با برداشتن تنش به صورت نمایی کاهش یافت و در نهایت در حدود ۶ درصد به مغناطش همیشگی آن افزوده شد. اما پس از مغناطش زدایی مولفه‌های میدان مغناطیسی برآمده از تنش درونی نمونه، به صورت خطی افزایش یافت و سپس با کاهش فشار تا صفر بار مولفه‌های میدان مغناطیسی نمونه کاهش نیافت و میدان مغناطیسی ناشی از تنش پسماند به میزان ۲۷ درصد افزایش یافت و در آن ماند که سبب کاهش عملکرد فرآیند مغناطش زدایی دی‌پرمنینگ شد.

۵. تقدیر و تشکر

بدین وسیله از تمامی همکاران نقشه‌کشی، ساخت و تولید که ما را در این پژوهش یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

منابع

- [1] Chung, H.J., Bae, K.W., Yang, C.S. and Jung, W.J., "Magnetic Treatment Techniques for Magnetic Field Reduction of a Naval Ship without Degaussing Coil", *Dpibia* 28(2), 41-2, 2018. <https://doi.org/10.13910/en16548874>.
- [2] Im, S. H., Lee, H. Y. and Park, G. S., "Novel Deperming Protocols to Reduce Demagnetizing Time and Improve the Performance for the Magnetic Silence of Warships", *Energies* 14(19), 6295, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14196295>.
- [3] Zivieri, R., Palomba, G., Consolo, G. and Proverbio, E., "Static magnetic signature of a ghost-ship propulsor system as a composite ferromagnetic medium", *AIP Advances* 13(9), 9-13, 2023. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0163553>.
- [4] Yadav, R. D., Gautam, V., "Effect of Magnetic Field on Deformation Behavior of a Steel Sheet in Uniaxial Tension", *Journal of Testing and Evaluation*, 51-53, 2024. <https://doi.org/10.3390/en15249363>
- [5] Im, S. H., Park, G. S., "Research on the demagnetizing factors for magnetic hollow cylinders", *21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, IEEE Xplore, 60-65, 2018. <https://doi.org/10.23919/ICEMS.2018.8548969>.
- [6] Kildishev, A. V., Nyenhuis, J. A., Dobrodeyev, P. N., Volokhov, S. A., "Deperming technology in large ferromagnetic pipes", *IEEE transactions on magnetics* 35(5), 3907-9, 1999. <https://doi.org/10.1109/20.800704>.



- [7] Ozima, M., Joshima M, Kinoshita, H., "Magnetic properties of submarine basalts and the implications on the structure of the oceanic crust", *Journal of geomagnetism and geoelectricity* 26(3), 335-54, 1974. <https://doi.org/10.5636/jgg.26.335>.
- [8] Wołoszyn, M., Jankowski, P., "Ship's de-perming process using coils lying on seabed", *Metrology and Measurement Systems* 26(3), 569-79, 2019. <http://dx.doi.org/10.24425/mms.2019.129582>.
- [9] Zhao, Y., Zhang, J., Li, J., Liu, S., Miao, P., Shi, Y. and Zhao, E., "A brief review of magnetic anomaly detection", *Measurement Science and Technology* 32(4), 042002, 2021. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6501/abd055>.
- [10] Holmes, J. J., "Reduction of a ship's magnetic field signatures. Synthesis lectures on computational electromagnetics", *Morgan & Claypool, New York* 3(1), 1-68, 2008.
- [11] Holmes, J.J., "Exploitation of a ship's magnetic field signatures. Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics", *Morgan & Claypool, New York*, 1(1), 1-78, 2006.
- [12] Kim, J.W., Kim, S.H., Kim, J.H., Lee, H.B. and Chung, H.J., "Study on efficient deperming protocol search technique of Vessel", *Proceedings of the KIEE Conference, The Korean Institute of Electrical Engineers*, 2017. <http://dx.doi.org/10.4283/JMAG.2017.22.1.085>.
- [13] Holmes, J. J., "Modeling a ship's ferromagnetic signatures", *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Morgan & Claypool, New York* 2(1), 1-75, 2022.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).