**Research Paper** 

## Designing and Fabricating of a Laboratory Site to Evaluate a Degerming Process <sup>1</sup>

Reza Eslamifar<sup>2</sup>, Morteza Mozaffari<sup>\*3</sup> and Mohsen Safikhani<sup>4</sup>

Received: 2025.04.05 Revised: 2025.05.18 Accepted: 2025.06.02

#### 1. Introduction

Reducing a vessel's magnetic signature is critical for evading naval mines and detecting them by maritime systems. This signature primarily stems from the ferromagnetic hull, eddy currents, and electrical systems, with the ferromagnetic hull being the dominant factor, contributing both induced and permanent magnetization. Induced magnetization varies with vessel orientation, while permanent magnetization arises from residual magnetism after mechanical stress and changes slowly. Deperming is removing this permanent magnetization, typically using methods like Closed Wrap, Drivein, or Overrun. This study focuses on the Drive-in method, employing Helmholtz coils, a solenoid, and magnetic sensors. The Deperm-ME current profile is preferred for its effectiveness with non-linear magnetic properties. Previous challenges include accurately separating permanent and induced signatures and a lack of focus on demagnetizing steel sheets. This research aims to design and build a laboratory setup for evaluating the deperming process, specifically focusing on precise magnetic signature measurement and effective Deperm-ME application on both a hollow steel cylinder and a sheet of ST37 steel.

### 2. Methodology

A laboratory setup, inspired by the Drive-in method, was designed and constructed to assess deperming and accurately measure magnetic signatures. It integrates Helmholtz coils, a solenoid, and a linear array of magnetic sensors. Aligned north-south to simplify the system and reduce costs, this orientation allows for the cancellation of transverse magnetic fields, necessitating only vertical (z-axis) and longitudinal (x-axis) Helmholtz coils. This design enhances the accuracy of permanent magnetic signature

https://jap.alzahra.ac.ir





<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> https://doi.org/10.22051/ijap.2025.50737.1454

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> PhD Student, Faculty of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: r.eslamifar@sci.ui.ac.ir

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. (Corresponding Author). Email: mozafari@sci.ui.ac.ir

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> M. Sc. Graduated, Faculty of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: mohsensafikhani65@gmail.com

#### LI / Extended Abstracts

measurements by eliminating induced magnetization from Earth's magnetic field.

The Earth's magnetic field simulator was modeled in 3D using COMSOL Multiphysics, measuring 2 x 0.88 x 0.59 cubic meters. It utilized two pairs of longitudinal Helmholtz coils (inner and outer) and one pair of vertical coils to cancel Earth's  $B_x$  and  $B_z$  components, respectively, while the north-south alignment naturally handled  $B_y$ . Simulations demonstrated approximately 5% non-uniformity for  $B_x$  and  $B_z$  within 1.3 meters of the simulator's center. The simulator frame, constructed from non-magnetic 6000-series aluminum alloy, showed good agreement with simulation results when validated with a Bartington fluxgate 4 vector magnetic sensor.

For deperming, a 1.5-meter long, 25-cm diameter, 720-turn solenoid was designed and fabricated. COMSOL simulations of this solenoid confirmed its uniform magnetic field along approximately 1 meter of its axis, reaching about 0.59 milliTesla at 1 Ampere. The solenoid was built using a non-magnetic aluminum cylindrical shell with insulated copper wire windings.

ST37 steel samples, a hollow cylinder (1m x 24cm OD x 4mm thickness) and a sheet (1m x 20cm x 4mm thickness), were prepared. ST37 is a widely used low-carbon, high-strength steel in marine and construction applications, including submarine hulls. A toroid sample of ST37 steel was also characterized using a B-H tracer, yielding initial and maximum relative magnetic permeabilities of 328 and 976, respectively.

Magnetic signatures were measured using 10 fixed Bartington Mag 630 fluxgate magnetic sensors, spaced 15 cm apart on an aluminum rail. Samples were placed in the north-south direction, 25 cm above the sensor array. Total magnetic signatures were recorded first with the simulator coils off. Then, with the x and z coils activated to cancel Earth's magnetic field, only the permanent signature was measured. Induced magnetization was then derived by subtracting the second measurement from the first.

### 3. Results and Discussion

Analysis of  $B_x$ ,  $B_y$ , and  $B_z$  magnetic signatures for both steel plate and hollow cylinder samples showed that the  $B_y$  component was negligible due to the north-south alignment. For the steel plate, permanent magnetization contributed more significantly to the total signature than induced magnetization, likely influenced by the plate's cutting direction. In contrast, the hollow cylinder exhibited a greater induced magnetization, attributed to stress neutralization during its rolling process. The larger volume of steel in the cylinder also resulted in a higher induced magnetic signature ratio of 3 for the plate, with a peak induced to permanent magnetic signature ratio of 3 for the cylinder versus 0.17 for the steel plate.

Magnetic signatures for both samples were simulated using COMSOL Multiphysics 6.2's magnetic fields, no currents submodule. The simulations, which calculated the magnetic field using Maxwell's equations and scalar magnetic potential (reduced field approach), showed good agreement with





experimental measurements for the cylindrical sample. Minor discrepancies were attributed to measurement errors and limited experimental data.

The Deperm-ME method, applying exponentially decreasing magnetic fields, was used for deperming. This process effectively achieved a 95% reduction in the steel plate's permanent magnetization and a 92% reduction for the hollow cylinder. These significant reductions demonstrate the high efficacy of the Deperm-ME method within this experimental setup, surpassing reported reductions of 85% for Deperm-ME and 60% for Anhysteretic methods in previous studies.

### 4. Conclusion

This research successfully developed a laboratory setup, inspired by the Drive-in method, for evaluating the deperming of ferromagnetic materials. The setup effectively cancels Earth's magnetic field, enabling precise permanent magnetic signature measurements. The Deperm-ME method proved highly effective, achieving 95% and 92% reductions in permanent magnetization for ST37 steel sheet and hollow cylinder samples, respectively. These findings underscore the efficiency of the Deperm-ME method within the established Drive-in deperming framework, offering a more precise and effective approach. The integration of a fixed sensor array and accurate simulation techniques minimizes measurement errors, providing a robust platform for future research in magnetic signature reduction.

**Keywords**: Magnetic Signature, Induced Magnetization, Permanent Magnetization, Deperming.

### References

- [1] Holmes, J.J., "Modeling a ship's ferromagnetic signatures", *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Morgan & Claypool*, New York:1-75, 2007.
- [2] Holmes, J.J., "Exploitation of a ship's magnetic field signatures", *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Morgan & Claypool*, New York:1-78, 2006.
- [3] Holmes, J.J., "Reduction of a ship's magnetic field signatures", *Synthesis lectures on computational electromagnetics, Morgan & Claypool*, New York:1-68, 2008.
- [4] 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", *DBpia*, 28(2), 41-42, 2018. https://doi.org/10.13910/en16548874
- [5] Kildishev, A.V., Nyenhuis, J.A., Dobrodeyev, P.N. and 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

https://jap.alzahra.ac.ir





LIII / Extended Abstracts

- [6] Wołoszyn, M. and 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
- [7] Culity, B. and Graham, C., "Introduction to magnetic materials", *John Wiley&Sons*, 1-126, 2009.
- [8] Kim, J.W., Kim, S.H., Jung, H.J., Lee, H.B., "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
- [9] Ozima, M., Joshima, M., Kinosmta, 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
- [10] 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
- [11] Eslamifar, R., Safikhani, M. and Mozaffari, M., "Research Paper: Experimental Study of the Effect of Stress on the Magnetic Signatures of a Steel Sample," *Iranian Journal of Applied Physics*, 14, 158-17, 2024. http://dx.doi.org/10.22051/ijap.2024.46948.1403 (in Persian)
- [12] 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
- [13] Im, S.H. and 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
- [14] Im, S.H., Lee, H.Y., Chung, H.J. and Park, G.S., "Demagnetization scheme for avoiding magnetic mines under the exposure of Earth magnetic field," *IEEE Transactions on Magnetics*, 54, 1-4, 2017. https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2764531
- [15] Im, S.H., Lee, H.Y., Chung, H.J. and Park, G.S., "Influence of magnetic interactions on the demagnetization scheme of multiple ferromagnetic materials by using Preisach model," *IEEE Transactions on Magnetics*, 55, 1-4, 2019. https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2929105



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) (<u>http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/</u>).





### مقالة پژوهشى

# طراحی و ساخت جایگاه آزمایشگاهی برای ارزیابی فرآیند دیپرمینگ<sup>۱</sup> رضا اسلامی فر<sup>۲</sup>، مرتضی مظفری<sup>\*۳</sup>و محسن صفی خانی<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

فصلنامهٔ علمی فیزیک کاربردی ایران دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه الزهرا سال پانزدهم، پیاپی۴۱، تابستان ۱۴۰۴ صص ۱۱۲ – ۱۳۶

### چکیده:

یکی از راههای شناسایی شناورهای دریایی، آشفتگی مغناطیسی ایجاد شده با استفاده از آنها در میدان مغناطیسی زمین است. در این پژوهش، یک جایگاه آزمایشگاهی الهام گرفته از روش Drive-in طراحی و ساخته شد که از پیچه های هلمهولتز، سیملوله و آرایه خطی حسگرهای مغناطیسی برای ثبت امضای مغناطیسی تشکیل شده است. برای ارزیابی فرآیند دیپرمینگ، از دو نمونه صفحه و استوانه توخالی از جنس فولاد کرفته در دمته از فولاد کم کربن با استحکام بالا که در صنایع دریایی و ساختمانی کاربرد گستردهای دارد) بهره گرفته شد. این دسته از فولادها معمولا در بدنه نرم زیر دریایی و ساختمانی کاربرد گسترده ای دارد) بهره گرفته ناشی از مغناطش همیشگی نمونه ها نخست امضای مغناطیسی القایی آن ها با جایگاه آزمایشگاهی و شبیه سازی با نرم افزار کامسول بدست آمد که همخوانی خوبی با یکدیگر داشتند. فرآیند دیپرمینگ به کمک روش ناتی از مغناطش همیشگی نمونه ها نخست امضای مغناطیسی القایی آن ها با جایگاه آزمایشگاهی و شبیه سازی با نرم افزار کامسول بدست آمد که همخوانی خوبی با یکدیگر داشتند. فرآیند دیپرمینگ به کمک روش نتایج نشان داد که دیپرمینگ به ترتیب منجر به کاهش ها و ۲۹ درصدی مغناطی مولادی و استوانه توخالی شود که نشان دهنده موثر بودن روش Deperm-ME در فرآیند دیپرمینگ به کمک روش سیایی خوانه ایگاهی میشگی میونه ها ایش میا تو در ایت د. میناطیس می ای ایت رو سایدی مها مولادی

واژ گان کلیدی: امضای مغناطیسی، مغناطش القایی، مغناطش همیشگی، دیپرمینگ.

<sup>1</sup> https://doi.org/10.22051/ijap. 2025.50737.1454

۲ دانشجوی دکتری، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. Email: r.eslamifar@sci.ui.ac.ir ۳ دانشیار، دانشکده فیزیک دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. (نویسندهٔ مسئول).Email: mozafari@sci.ui.ac.ir ۴ دانش آموختهٔ کارشناسی(رشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. Email: mohsensafikhani65@gmail.com





### ۱. مقدمه

کاهش امضای میدان مغناطیسی یک شناور نه تنها به کاهش حساسیت آن نسبت به مینهای دریایی میانجامد، بلکه در مورد زیردریایی، احتمال افشای آن با سامانه های دریایی و هواپیماهای گشتی نیز کاهش مییابد. چهار سرچشمه اصلی میدان مغناطیسی مرتبط با شناور در نوار بسامدی بسیار کم<sup>۱</sup> [کمابیش صفر تا ۳ هرتز] عبارتند از [۳–۱]:

- ۱- بدنه فرومغناطیس شناورها
- ۲- جریانهای گردابی ناشی از هر ماده رسانای الکتریکی روی شناور (مغناطیسی و همچنین غیرمغناطیسی) هنگام چرخش در میدان مغناطیسی زمین.
- ۳- جریانهای الکتریکی وارد شده به بدنه رسانای شناور و آبهای اطراف آن توسط فرآیندهای خوردگی. الکتروشیمیایی طبیعی یا سامانههای حفاظت کاتدی که برای جلوگیری از خوردگی (زنگ زدن) شناور طراحی شدهاند.
- ۴- جریان هایی که در موتورهای الکتریکی، ژنراتورها، کابل های توزیع، دنده سوئیچ،
   ۴- بریکرها و سایر مدارهای فعال موجود در داخل شناور جریان دارند.

مهمترین سرچشمه میدان مغناطیسی شناور، فولاد فرومغناطیس است که در ساخت بدنه، ساختار داخلی، ماشین آلات و نمونه تجهیزات مورد استفاده قرار می گیرد [۴]. سرچشمه فرومغناطیس را می توان به دو بخش به نام مغناطش القایی و همیشگی تقسیم کرد. امضای مغناطیسی ناشی از شناور نتیجه آشفتگی میدان مغناطیسی طبیعی یکنواخت زمین با استفاده از فولاد به کار برده شده در ساخت اجزای آن است. این ناهنجاری در میدان مغناطیسی زمین به عنوان یک سیگنال ULF به کمک یک مین، حسگر میدان مغناطیسی ثابت یا به کمک یک حسگر MAD<sup>۲</sup> هوابرد هنگام پرواز تشخیص داده می شود. مغناطش القایی شناور و امضای مغناطیسی خارج از آن با زاویه چرخش شناور نسبت به زمین، سمت، عرض جغرافیایی و طول جغرافیایی تغییر می کند. همان گونه که شناور از نظر مکانیکی تحت فشار قرار می گیرد، بخشی از مغناطیس القایی به عنوان مغناطش همیشگی یا باقی مانده حفظ می شود که به صورت کلی در طول زمان به آرامی تغییر می کند. اجزای فرومغناطیس شناور معمولاً بر امضای مغناطیسی یک شناور تسلط دارند و باید ابتدا در طراحی یک سامانه

- <sup>1</sup> Ultra Low Frequency (ULF)
- <sup>2</sup> Magnetic Anomaly Detection





<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Magnetic Silencing

دیپرمینگ<sup>۱</sup> می گویند. سه روش رایج برای دیپرمینگ شناورها به کار برده می شود که عبارت از Drive-in ،Closed wrap و Driverun [۳]. شکل (۱) سه روش فر آیند دیپرمینگ را نشان می دهد. در روش Closed wrap سیم پیچهایی موقتی به دور شناور پیچیده می شوند و با کاربست میدان مغناطیسی با دامنه کاهشی شروع به مغناطیس زدایی بدنه می کنند (شکل (۱– الف)). در روش Drive-in مناور وارد یه محفظه قفس مانند شده که این محفظه تشکیل شده از پیچههای هلمهولتز سه محوره، سیملوله و آرایهای از حسگرهای مغناطیسی در بستر دریا است. وظیفه اصلی پیچههای هلمهولتز زدون میدان مغناطیسی زمین و در نتیجه مغناطی القایی شناوراست. این کار به اندازه گیری امضای مغناطیسی ناشی از مغناطش همیشگی موجود در شناور می شود و سپس با اجرای فر آیند دیپرمینگ دوباره (کاربست میدان مغناطیسی با دامنه کاهشی به سیملوله) سطح مغناطش فر آیند دیپرمینگ موجود در آن اندازه گیری می شود (شکل (۱– ب)). در روش Overrun همیشگی موجود در آن اندازه گیری می شود (شکل (۱– ب)). در روش Overrun همیشگی موجود در آن اندازه گیری می شود (شکل (۱– ب)). در روش Overrun مینی می همهولتز و سیملوله برای اجرای فر آیند دیپرمینگ همگی در بستر دریا قرار گرفته اند [۶]. در این موش شناور از منطقه از پیش مشخص شده با سرعت ویژه عبور کرده و برخلاف دو روش پیشین بخش بخش مغناطیس زدایی می شود (شکل (۱– ج)).



**Fig. 1** Deperming process executed using three methods: (a) Closed Wrap, (b) Drive-in, and (c) Overrun [2]. (closed Wrap و (ج) Drive-in و (ج) Drive-in (ب) الجراى فر آيند ديبر مينگ به سه روش (الف)

فرومغناطیس ها از حوزه های مغناطیسی تشکیل شده اند که مغناطش هر یک از این حوزه ها اندازه و جهت ویژه ای دارند. گشتاور حوزه ها در یک فرومغناطیس میدان ندیده سو گیری های کاتوره ای داشته و مغناطش بر آیندشان نز دیک به صفر است. با کاربست یک میدان مغناطیسی بیرونی، نخست دیواره ی حوزه ها یا دیواره های بلوخ جابه جا شده، سپس گشتاور های مغناطیسی حوزه ها چرخیده و با میدان هم سو می شوند. بدین ترتیب یک مغناطش ناصفر بدست می آید. پس از صفر کردن میدان مغناطیسی، جهت برخی از حوزه ها به دلیل ملاحظات کمینگی انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی و

<sup>1</sup> Deperming





وجود موانع ساختاری، همانند ناخالصیها، کرنشهای باقیمانده و عیوب بلورین، به جهت پیشین بازنگشته که به یک مغناطش مانده، به نام "مغناطش همیشگی" میانجامد. با دیبرمینگ می توان مغناطش همیشگی را کاهش داد که این کاهش بر آمده از فر آیند باز آرایی تازهی گشتاورهای حوزههای مغناطیسی است [۷]. افزون بر روش های گوناگون فر آیند دیپرمینگ، چگونگی کاربست جریانهای الکتریکی برای تولید میدان مغناطیسی با دامنه کاهشی هم از اهمیت ویژهای برخوردار است. سه روش برای نمایه جریان کاربستی برای فر آیند دیپرمینگ عبارتند از بدون پسماند،

- روش بی پسماند<sup>۱</sup>: این روش ساده ترین و رایج ترین روش است. در این روش مجموعه ای از میدان های مغناطیسی متناوب با شدت کاهشی خطی به کار گرفته می شود. کنترل و اجرای این روش کمابیش آسان است.
- روش (Deperm-ME): این روش از میدان مغناطیسی با شدت کاهشی غیرخطی بهره می گیرد که در مغناطش زدایی مواد می تواند نسبت به روش بدون پسماند مؤثر تر باشد. با این حال، کنترل این گونه میدان در زمان حقیقی دشوار تر است.
- روش فلش دی<sup>۲</sup>: این روش یک فرآیند سه مرحله ای کاهش ویژگی مغناطیسی است که به صورت ویژه برای شناورها طراحی شده است. این روش ترکیبی از میدان های مغناطیسی به تدریج کاهشی و متناوب و به دنبال آن مرحله نهایی با یک میدان به سرعت متناوب را شامل می شود. تصور بر این است که فلش دی بسیار مؤثر است، اما پژوهش های در مورد آن همچنان ادامه دارد.

برای دیپرمینگ در پژوهش های آزمایشگاهی معمولا از روش های بی پسماند و Deperm-ME و در مقیاس حقیقی برای شناورهای دریایی و زیردریایی ها از روش Flash-D بهره می گیرند [۸]. داده های بسیار ناچیزی درباره روش Flash-D در دسترس و البته طبقهبندی شده است. در پژوهش های انجام شده در مقیاس آزمایشگاهی، روش ME-ME به دلیل به کارگیری جریان های متناوب کاهشی با دامنه یناخطی با ویژگی های مغناطیسی فولادها که آن ها نیز نسبت به میدان مغناطیسی ناخطی اند، ساز گارتر بوده و در نتیجه فرآیند مغناطش زدایی نتیجه بهتری نسبت به روش بی پسماند در بر دارد [۱۱]. در پژوهش های انجام شده شی [10–۱۲] فرآیند دیپرمینگ در مقیاس آزمایشگاهی برای استوانه های فولادی توخالی از جنس های SPCC و SS400 به

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Anhysteretic Deperm







روش های بی پسماند و Deperm-ME انجام شدهاند. پس از انجام کامل فر آیند دیپرمینگ، مغناطش همیشگی هر دو فولاد با روش Deperm-ME کاهشی حدود ۸۵ درصد داشته در حالی که با روش بی یسماند این کاهش در حدود ۶۰ درصد بوده است. همچنین در این پژوهش ها برای بدست آوردن امضاي مغناطیسي استوانهها، پیچههاي هلمهولتز به کار گرفته نشدهاند و براي استخراج امضاهاي مغناطيسي هميشگي و القايي يک بار سر جسم به سمت شمال قرار گرفته و مغناطش کل آن در فاصلهای به اندازه یک قطر در زیر آن اندازه گیری شده است. سپس جسم سر جسم به سمت جنوب قرار داده شده و دوباره مغناطش آن اندازه گیری شده است. با کم کردن مقادیر بدست آمده در این دو حالت مغناطش همیشگی را استخراج کرده که خطای بسیاری داشته است. همچنین در مقیاس واقعی برای شناورهای دریایی انجام آن بسیار پرهزینه و زمانبر است. پژوهشهای آزمایشگاهی بیشتر روی هندسههای استوانهای به عنوان الگوهای شناورها یا زیردریاییها انجام مي شود. اين در حالي است كه پيش از ساخت شناورها و به ويژه زير دريايي ها، صفحات فولادي در کارخانههای فولاد، در یک جایگاه مغناطیس زدایی قرار گرفته تا مغناطش همیشگی آنها کمینه شود [۲]. پس از ساخت بدنه ی زیردریایی، بار دیگر بدنه در جایگاه مغناطیس زدایی قرار گرفته و مغناطش همیشگی ایجاد شده به هنگام رول کردن و جوشکاری زدوده می شود. پس پژوهش پیرامون مغناطیس زدایی صفحات فولادی نیز اهمیت دارد. همچنین، در این پژوهش ها میدان مورد نیاز برای اشباع فولادها از منحنی یسماند نمونهی چنبره شکل آنها بدست می آید. اگر چه هندسههای گوناگون به دلیل داشتن سازه وامغناطش میدان مغناطیسی اشباع گوناگونی دارند. این پژوهش ها با یک یا دو حسگر مغناطیسی برای ثبت امضای مغناطیسی انجام می شود. بدین گونه که با ثابت بودن جسم و حرکت دادن سنسورها یا ثابت بودن سنسورها و حرکت دادن جسم امضای مغناطیسی آن ثبت می شود. این جابه جایی ها خود خطای زیادی در اندازه گیری ایجاد می کنند. در این پژوهش یک جایگاه آزمایشگاهی برای ثبت امضای مغناطیسی و ارزیابی فر آیند دیپرمینگ طراحی و ساخته شد. این جایگاه برای داشتن دقت در ثبت امضای مغناطش همیشگی پیش و پس از فرآیند دیپرمینگ همانند روش Drive-in از پیچههای هلمهولتز، سیملوله و آرایهای خطی از سنسورهای مغناطیسی تشکیل شده است. برای کاهش هزینهی ساخت، جایگاه آزمایشگاهی در راستای شمالی جنوبی قرار گرفت. پس میدان مغناطیسی در راستای عرضی زدوده شده و تنها ییچههای هلمهولتز در راستای عمودی (Z) و طولی (X) گذاشته شدند. این طراحی مغناطش القایی

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Demagnetization Factor





را زدوده و امضای مغناطیسی همیشگی با دقت بیشتر ثبت می شود. هم چنین برای ارزیابی فر آیند دیپرمینگ دو نمونه استوانه تو خالی و صفحه با ابعاد ویژه از جنس فولاد ST37 فراهم شد. فولاد ST37، فولادی کم کربن با ساختار BCC و استحکام بالا است که در صنایع دریایی و ساختمانی کاربرد بسیاری دارد. همچنین بدنه نرم زیر دریایی ها معمولا از این دسته فولادها ساخته می شود. برای انجام دیپرمینگ فولاد مورد نظر از روش Deperm-ME که روشی موثر تر است بهره گرفته شد. برای رسیدن به کمینهی مغناطش همیشگی، میدان مغناطیسی مورد نیاز برای به اشباع رساندن صفحه و استوانه فولادی به صورت تجربی مشخص شد. همچنین آرایه ای از سنسورهای مغناطیسی در زیر دو جسم قرار داده شد تا خطای اندازه گیری کمینه شود.

۲. الگوسازی و ساخت شبیهساز میدان مغناطیسی زمین

هدف از داشتن شبیه ساز میدان مغناطیسی زمین زدودن مغناطش القایی ناشی از میدان مغناطیسی زمین و اندازه گیری و دنبال کردن تغییرات مغناطش همیشگی فولاد قرار گرفته در آن است. به کمک نرمافزار کامسول (COMSOL Multiphysics) شبیه ساز میدان مغناطیسی زمین سه بعدی به ابعاد ۲×۸۸۰×۸۹۹۰، متر مکعب در ماژول magnetic fields شبیه سازی شد. به دلیل قرار گرفتن جسمی کشیده همانند الگوی زیر دریایی در آن از دو جفت پیچه هلمهولتز که محور آنها در راستای محور طولی است (یک جریان از پیچه های درونی و جریانی دیگر از دو پیچه بیرونی می گذرد) برای زدودن میدان مغناطیسی xB زمین و یک جفت پیچه هلمهولتز در راستای عمودی برای زدودن میدان مغناطیسی zd زمین و یک جفت پیچه هلمهولتز در راستای عمودی راستای شمالی – جنوبی میدان مغناطیسی عرضی زمین yB نیز زدوده خواهد شد. همچنین از یک کره به شعاع ۵ متر برای محیط بی نهایت پیرامون هندسه مورد نظر در نرمافزار بهره گرفته شد. شکل (۲) هندسه بکار برده شده را بر ای شبیه ساز میدان مغناطیسی زمین نشان می دهد.







**Fig. 2** The designed geometry for the Earth's magnetic field simulator in COMSOL. **شکل ۲** هندسه طراحی شده برای شبیه ساز میدان مغناطیسی زمین در نرم افزار کامسول.

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. شکل (۳) نمایی از چشمهبندی هندسه شبیهساز میدان مغناطیسی زمین و محیط پیرامون آن را نشان میدهد.



Fig. 3 The meshing (or mesh) used in COMSOL software. شکل ۳ چشمهبندی بکار گرفته شده در نرم افزار کامسول.

پس از انجام کامل فر آیند شبیهسازی با انتخاب یک خط به عنوان خط قرار گیری حسگرها در محور X به طول ۳ متر نمودار چگالی شار میدان مغناطیسی در راستای طولی و عمودی بر حسب فاصله ترسیم شد. شکلهای (۴) و (۵) نمودارهای مورد نظر را نشان میدهد. میزان نایکنواختی میدان







مغناطیسی زمین Bx و Bz در حدود ۱/۳ متری از شبیهساز میدان مغناطیسی زمین در راستای طولی در

Fig. 4 The non-uniformity of the magnetic flux density B<sub>x</sub> along the longitudinal direction at the center of the Earth's magnetic field simulator. شکل ۴ نایکنواختی چگالی شار مغناطیسی B<sub>x</sub> در راستای طولی در مرکز شبیه ساز میدان مغناطیسی زمین.



**Fig. 5** The non-uniformity of the magnetic flux density B<sub>z</sub> along the longitudinal direction at the center of the Earth's magnetic field simulator. شکل ۵ نایکنواختی چگالی شار مغناطیسی Bz در راستای طولی در مرکز شبیه ساز میدان مغناطیسی زمین.

در ادامه شبیهساز میدان مغناطیسی مورد نظر برای زدودن میدان مغناطیسی زمین با کمک آلیاژ آلومینیوم تماما نگیر کلاس ۶۰۰۰ و همچنین جوشکاری ویژه آلومینیوم ساخته شد. شکل (۶) نمایی از سازه ساخته شده را نشان میدهد.

انتظار الزمر



۱۲۰ / طراحی و ساخت جایگاه آزمایشگاهی برای ارزیابی فرآیند دیپرمینگ؛ رضا اسلامیفر، مرتضی مظفری و محسن صفیخانی



Fig. 6 A view of the fabricated magnetic field simulator. شکل 9 نمایی از شبیه ساز میدان مغناطیسی ساخته شده.

با قرار دادن سنسور مغناطیسی برداری فلاکس گیت<sup>۴</sup> از شرکت Bartington با توانایی اندازه گیری میدان مغناطیسی تا ۵۲۴ میکروتسلا و توان جداسازی ۶۲/۵ pT/bit در مرکز سازه و جابهجایی آن در طول سازه به اندازه ۱۵ سانتی متر، یکنواختی میدان مغناطیسی با داده های شبیه سازی شده مقایسه و میدان مغناطیسی ایجاد شده با استفاده از سازه اعتبار سنجی شد که با یکدیگر همخوانی خوبی داشتند (شکل (۷) و (۸))



Fig. 7 Comparison of simulated and measured data with the magnetic sensor for the vertical magnetic field generated in the longitudinal direction (Bz). شکل ۷ مقایسه دادههای شبیه سازی شده و اندازه گیری شده با سنسور مغناطیسی برای

میدان مغناطیسی عمودی تولید شده در راستای طولی (Bz).







Fig. 8 compares the simulated and measured data with a magnetic sensor for the vertical magnetic field (B<sub>z</sub>) generated along the longitudinal direction. شکل ۸ مقایسه داده های شبیه سازی شده و اندازه گیری شده با سنسور مغناطیسی برای میدان مغناطیسی تولید شده عمودی در راستای طولی(B<sub>x</sub>).

برای اجرای فرآیند دیپرمینگ در جایگاه آزمایشگاهی مورد نظر، یک سیملوله به طول ۱/۵ متر و قطر ۲۵ سانتیمتر با ۷۲۰ دور سیم پیچی طراحی و ساخته شد. به کمک نرم افزار کامسول سیملوله مورد نظر طراحی و در شبیهساز میدان مغناطیسی زمین قرار گرفت. شکل (۹) سیملوله مورد نظر در را شبیهساز میدان مغناطیسی زمین در نظر گرفته شده نشان میدهد.



Fig. 9 The solenoid designed within the Earth's magnetic field simulator in COMSOL. شکل ۹ سیملوله طراحی شده در شبیهساز میدان مغناطیسی زمین در نرمافزار کامسول.





برای جریاندهی به سیملوله در فیزیک Coil imagnetic fields انتخاب شد و در بخش تنظیمات آن homogenized multiturn روی conductor model قرار گرفت. همچنین بخش coil type روی coil type و تعداد دور ۲۲۰ و میزان جریان عبور کرده از سیملوله یک آمپر برگزیده شد. برای سریع تر شدن حل نهایی از چشمهبندی user controlled mesh بهره گرفته شد و به کمک دستور Swept سیملوله با مشهای منشوری مشربندی شدند. شکل (۱۰) مشربندی سیملوله و محیط پیرامون آن را نشان میدهد.



Fig. 10 The meshing of the solenoid and its surrounding environment in COMSOL software. شکل ۱۰ چشمهبندی سیملوله و محیط اطراف آن در نرمافزار کامسول.

همچنین با قرار دادن یک خط به طول ۳ متر روی محور سیملوله، یکنواختی میدان مغناطیسی آن در طول سیملوله رسم شد. شکل (۱۱) نمودار میدان مغناطیسی در راستای محور طولی سیملوله را نشان میدهد که در حدود ۱ متر یکنواختی دارد. همانگونه که دیده می شود بیشینه میدان تولید شده سیملوله با جریان ۱ آمپر در حدود ۰/۵۹ میلی تسلا است.







Fig. 11 The magnetic field generated by the solenoid along its axis. شکل ۱۱ نمودار میدان مغناطیسی تولید شده سیملوله روی محور آن.

همچنین برای یافتن میزان یکنواختی میدان مغناطیسی در جای جای سیملوله یک صفحه XY عمود بر محور سیملوله گذرانده شد. شکل (۱۲) توزیع میدان مغناطسی داخل سیملوله را نشان میدهد. همان گونه که دیده می شود، به جز دو سر سیملوله همه جا میدان یکنواخت است، شار مغناطیسی از یک سر وارد می شود و از سر دیگر بیرون می رود و در دو سر با کاهش شار مغناطیسی و در نتیجه کاهش میدان مغناطیسی روبه رو است.



Fig. 12 The uniformity of the magnetic field generated by the solenoid on a plane passing through its center. شکل ۱۲ یکنواختی میدان مغناطیسی تولید شده با سیملوله در صفحهای گذشته از وسط آن.





با یک پوسته استوانهای از جنس آلومینیوم نگیر بدنه سیملوله شبیهسازی شده ساخته شد. سپس به کمک سیم مسی روکش دار به تعداد ۷۲۰ دور سیم به گونه منظم به دور آن پیچیده شد. شکل (۱۳) جایگاه آزمایشگاهی به همراه سیملوله داخل آن را نشان می دهد.



Fig. 13 The experimental setup with the solenoid inside. شکل ۱۳جایگاه آزمایشگاهی به همراه سیملوله درون آن.

**۳. اندازه گیری ویژ گی های مغناطیسی فولاد ST37** برای اجرای فرآیند مغناطیس زدایی دیپرمینگ داخل جایگاه آزمایشگاهی ساخته شده، فولاد کم کربن ST37 انتخاب شد. فولاد ST37، فولادی با توانایی رولشدگی بالا است که در صنایع گوناگونی چون ساختمانسازی و کشتی سازی کاربرد دارد. در این پژوهش استوانه و صفحه ST37 برای فرآیند دیپرمینگ تهیه شدند که مشخصات آنها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ ابعاد نمونههای بکار برده شده برای فرآیند دی پرمینگ. Table 1 The dimensions of the samples employed in the deperming process.

Steel ST37	Dimensions
Cylinder	1 m in length, 24 cm outer diameter, 4 mm thickness.
Sheet	1 m in length, 20 cm width, 4 mm thickness.

برای ارزیابی ویژگیهای مغناطیسی فولاد مورد نظر نخست چنبره به قطر بیرونی ۱۰ و قطر درونی ۹ سانتی متر به کمک وایر کات از ورق برش داده شد که کمترین گرمای ممکن به هنگام برش کاری به نمونه وارد شود. همچنین تعداد ۸۰ دور سیمپیچ اولیه و ثانویه به دور رینگ پیچیده شد. سپس به



کمک یک سامانه B-H tracer & FORCs measurements برخی ویژگی های مغناطیسی نمونه اندازه گیری شد. شکل (۱۴) چنبره مورد نظر هنگام اندازه گیری در دستگاه را نشان میدهد.



**Fig. 14** The placement of the ST37 toroid in the B-H tracer. B-H tracer شکل ۱۴ قرارگیری چنبره ST37 در دستگاه

```
شکل (۱۵) منحنی پسماند فولاد ST37 مورد نظر را نشان میدهد. ویژگیهای مغناطیسی استخراج
شده از فولاد ST37 در جدول (۲) آمده است.
```



**Fig. 15** The hysteresis curve of the ST37 sample. شکل ۱۵منحنی پسماند نمونه ST37.





$B_{max}\pm 0.005(T)$	1.365
$B_r \pm 0.1(T)$	0.8
H <sub>c</sub>	363±1 (A/m)

**جدول ۲** کمیتهای بدست آمده از منحنی پسماند.

Table 2 Parameters obtained from the hysteresis curve.

همچنین نمودار مغناطش نمونه برای اندازه گیری تراوایی مغناطیسی اولیه و بیشینه با دستگاه بالا ترسیم شد. شکل (۱۶) منحنی مغناطش فولاد ST37 را نشان میدهد. تروایی مغناطیسی نسبی اولیه µi و µmax فولاد ST37 از منحنی مغناطش به ترتیب ۳۲۸ و ۹۷۶ بدست آمد.



**Fig. 16** The magnetization curve of ST37 steel. شکل ۱۶ منحنی مغناطش فولاد ST37.

۴. شبیهسازی و اندازه گیری امضاهای مغناطیسی نمونههای فولادی

دو نمونه فولادی به شکل استوانه توخالی به طول ۱ متر، قطر بیرونی ۲۴ سانتیمتر و ضخامت ۴ میلیمتر و یک صفحه به طول یک متر و عرض ۲۰ سانتیمتر و ضخامت ۴ میلیمتر از فولاد ST37 استخراج شد. هر دو جسم فولادی از یک ورق ST37 به طول ۱۵ و عرض ۳ متر استخراج شد. استوانه فولادی با دستگاه رول خم و پس از مراحل برش پسرول و سپس جوشکاری شد و به شکل استوانه در آمد. همچنین صفحه فولادی با دستگاه سنگ برش داده شد. برای اندازه گیری امضاهای مغناطیسی دو جسم فولادی در نظر گرفته شده تعداد ۱۰ حسگر مغناطیسی فلاکس گیت از شرکت





Bartington مدل Mag 630 به کار گرفته شد. بر خلاف پژوهش های انجام شده توسط شی [۱۵–۱۲] که یک حسگر مغناطیسی را در محلی مشخص زیر جسم قرار داده و سپس جسم را در طولی مشخص حرکت میدهند و امضای مغناطیسی آن را اندازه می گیرند، که به خطا در داده برداری میانجامد، در این پژوهش هم جسم و هم حسگرهای مغناطیسی ثابت هستند. برای جلو گیری از ایجاد نوفه مغناطیسی در حسگرها، هر حسگر به فاصله ۱۵ سانتیمتر از یکدیگر روی یک ریل آلویمینیومی ثابت شدند و داده های هر ده حسگر به گونه همزمان ضبط می شود. شکل (۱۷) آرایه حسگرهای چیده شده در ریل آلومینیومی را نشان میدهد.



Fig. 17 The fluxgate magnetic sensor array. شکل ۱۷ آرایه حسگرهای مغناطیسی فلاکس گیت.

برای اندازه گیری امضاهای مغناطیسی، هر دو جسم فولادی یکی یکی داخل جایگاه آزمایشگاهی در راستای شمالی- جنوبی قرار گرفتند و آرایه حسگرهای مغناطیسی به فاصله ۲۵ سانتی متر از کف آن ها قرار گرفت. نخست در حضور میدان مغناطیسی زمین هنگامی که تمامی سیم پیچهای شبیه ساز میدان مغناطیسی زمین خاموش است، امضاهای مغناطیسی (Bx,By,Bz) آن ها گرفته شد که برابر امضاهای مغناطیسی همیشگی و القایی است. پس از آن با روشن کردن سیم پیچهای X و Z شبیه ساز میدان مغناطیسی زمین، میدان مغناطیسی کاربستی از سوی زمین به نمونه فولادی زدوده شد و در این حالت امضاهای مغناطیسی ناشی از مغناطش همیشگی نمونه ها ضبط شد. حال با کم کردن امضاهای مغناطیسی بدست آمده از حالت اول و حالت دوم امضاهای مغناطیسی القایی آن ها بدست می آید.







شکل (۱۸) نمودارهای امضای مغناطیسی ناشی از مغناطش کل، القایی و همیشگی را برای دو نمونه صفحه (سمت چپ) و استوانه (سمت راست) نشان میدهد.

**Fig. 18** The magnetic signature plots due to total, permanent, and induced magnetization for two types of samples: sheet (left-hand side plots) and cylinder (right-hand side plots).

**شکل ۱**۸ نمودارهای امضای مغناطسی ناشی از مغناطش کل، همیشگی و القایی را برای دو نمونه صفحه (نمودارهای سمت چپ) و استوانه (نمونههای سمت راست) نشان میدهد.

همان گونه که از شکلهای بالا دیده می شود امضای مغناطیسی در راستای y برای هر دو نمونه به دلیل قرار گرفتن در راستای شمالی – جنوبی تقریبا صفر است. در نمونه صفحه فولادی به دلیل آنکه جسم در جهت نورد برش خورده است بیشتر سهم امضای مغناطیسی ناشی از مغناطش همیشگی موجود در آن است و سهم مغناطش القایی ناشی از میدان مغناطیسی زمین کمتر است. حال آنکه در نمونه استوانه فولادی به دلیل رول شدن صفحه بخشی از تنشهای کاربستی به آن یکدیگر را خنثی



می کنند. به همین دلیل امضای مغناطیسی القایی استوانه تو خالی از سهم مغناطش همیشگی آن بزر گتر است. همچنین به دلیل بیشتر بودن حجم فولاد بکار برده شده در نمونه استوانهای، سهم امضای مغناطیسی القایی آن نسبت به امضای مغناطیسی القایی صفحه فولادی بیشتر است. نسبت قلّه بیشنه امضای مغناطیسی ناشی از مغناطش القایی و همیشگی در استوانه ۳ برابر است. در حالی که این نسبت در صفحه فولادی ۰/۱۷ برابر است. شکل (۱۹) امضای مغناطیسی کل القایی و همیشگی هر دو نمونه استوانه (شکل سمت چپ) و صفحه (شکل سمت راست) با یکدیگر مقایسه شدهاند.



**Fig. 19** Total induction and permanent magnetic signature of two sheet (right) and cylinder (left) samples. شکل ۱۹ امضای مغناطیسی کل القایی و همیشگی دو نمونه صفحه (راست) و استوانه (چب).

برای شبیه سازی امضاهای مغناطیسی دو نمونه فولادی استوانه و صفحه از نرمافزار کامسول Multiphysics 6.2 بهره گرفته شد. از ماژول AC/DC، زیرماژول Multiphysics 6.2 currents انتخاب شد. شکل (۲۰) هندسه به کار گرفته شده و استوانه سه بعدی رسم شده را نشان می دهد.



Fig. 20 The geometry employed in COMSOL for simulating the magnetic signature. شکل ۲۰ هندسه به کار گرفته شده در نرم افزار کامسول برای شبیه سازی امضای مغناطیسی.



بر يايه معادلات ماكسول در جايي كه جريان الكتريكي وجود ندارد داريم:  $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{0}$ (1) یس می توان یتانسیل مغناطیسی نردهای  $V_m$ را تعریف کرد. پس  $\vec{H} = -\vec{\nabla}V_m$ (٢) این تعریف هم ارز تعریف پتانسیل الکتریکی برای میدان الکتریکی ساکن است. با کمک رابطه بنيادين ميان چگالي شار و شدت ميدان مغناطيسي داريم:  $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$ (٣)  $\stackrel{
ightarrow}{
abla}=0$  که در آن،  $\mu_r$  تراوایی مغناطیسی نسبی نمونه است. به کمک رابطه (۳) و رابطه  $\mu_r$ مى توانيم رابطه  $V_m$  را داشته باشيم.  $-\vec{\nabla}.\left(\mu_{0}\mu_{r}\vec{\nabla}V_{m}\right)=0$ (۴) در این الگو از رابطه میدان کم شده بهره می گیریم، به این معنی که تنها برای پتانسیل W<sub>m</sub> متناظر با ميدان مختل شده حل مي شود. بنابر اين، داريم:  $-\vec{\nabla}.\left(\mu_0\mu_r\vec{\nabla}V_m+\vec{B}_{ext}\right)=0$ (۵) که در آن، B<sub>ext</sub> میدان پس زمینه است و در محیط آزمایشگاهی برابر با میدان مغناطیسی زمین در حدود ۳۷ میکروتسلا است. مرزهای بیرونی جعبه برای میدان مغناطیسی کم شده ناتروا است:  $-\hat{n} \cdot B = 0$ (9) همچنین از شرط مرزی magnetic shielding برای استفاده از منحنی تراوایی مغناطیسی نمونه ST37 و ضخامت صفحه استوانهای که ۴ میلی متر است، بهره گرفته شد. شکل (۲۱)، نمایه امضای مغناطیسی بدست آمده از شبیهسازی فولاد استوانهای در فاصله ۲۰ سانتی متری از کف آن را برای مولفه های X، Z و کل نشان می دهد. همچنین، در شکل (۲۲) نمودار یک بعدی سه مولفه امضای مغناطیسی استوانه در خطی به فاصله ۲۰ سانتی متر از کف آن رسم شده



است.



فصلنامهٔ علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا، سال پانزدهم، پیاپی ۴۱، تابستان ۱۳۱/۱۴۰۴



Fig. 21 The magnetic signature profile for the (a) x, (b) z, and (c) total components of the cylinder at a distance of 20 cm from its base.

**شکل ۲۱** پروفایل امضای مغناطیسی برای مولفههای (الف) X، (ب) z و (ج) کل استوانه در فاصله ۲۰ سانتیمتری از





Fig. 22 The one-dimensional magnetic signatures of the cylinder along a line 20 cm from its base. شکل ۲۲ نمودار یک بعدی امضاهای مغناطیسی استوانه در خطی به فاصله ۲۰ سانتی متری از کف آن.

با مقایسه نمودارهای بدست آمده از شبیهسازی و اندازه گیری (شکل (۲۳)) دیده میشود که خروجیهای شبیهسازی با اندازه گیری هماهنگی خوبی دارد. در حالی که، اختلاف ناچیز میان آنها

به دلیل خطاهای حین اندازه گیری و کم بودن دادههای اندازه گیری نسبت به شبیهسازی است.







Fig. 23 Comparison of magnetic signatures due to simulated and measured induced magnetization of (a)  $B_x$ , (b)  $B_z$ , and (c)  $B_t$ .

**شکل ۲۳** مقایسه امضای مغناطیسی ناشی از مغناطش القایی شبیهسازی و اندازه گیری (الف) B<sub>x</sub>، (ب) B<sub>z</sub> و (ج) B<sub>t.</sub>

۵. اجرای فر آیند دیپرمینگ برای اجرای فر آیند دیپرمینگ از روش Deperm-ME بهره گرفته شد. در این روش دامنه میدانهای مغناطیسی کاربستی به صورت نمایی کاهش مییابند تا زمانی که میدان مغناطیسی به میدانی برابر یا کوچکتر از میدان مغناطیسی زمین برسد. در این پژوهش جریانهای کاربستی با دامنه کاهشی نمایی با معادله زیر به جسم فولادی مورد نظر داده شد.

 $I=(-1)^{n}I_{0}\exp(-\alpha n), n=0,1,2,...$ 

که در آن، Io بیشینه جریان کاربستی، Π تعداد جریانهای کاربستی است و α شیب دامنه جریانهای کاربستی است. برای کاهش شیب دامنه جریانهای کاربستی مقدار α برابر ۰/۱ انتخاب شد و همچنین بیشینه جریان کاربستی برابر ۱۴ آمپر در نظر گرفته شد که معادل میدان مغناطیسی ۶۶۸۰ آمپر برمتر سیملوله است. شکل (۲۳) نمایه جریانهای کاربستی سیملوله برای اجرای فرآیند دیپرمینگ را نشان میدهد.









**(V)** 

شمار جریانهای کاربستی در فر آیند دیپرمینگ ۶۰ عدد مشخص شد. به گونهای که آخرین جریان برابر ۱۶ آمپر بر متر است که از میدان مغناطیسی زمین کوچک تر است. از آنجا که فر آیند دیپرمینگ ایده آل فر آیندی است که جسم در ابتدا به اشباع رود تا تمام حوزههای مغناطیسی همسو شوند. از این رو، دانستن میدان مغناطیسی مورد نیاز برای اشباع نمونههای فولادی مهم است. در پژوهش های انجام شده کمینه میدان مغناطیسی برای اشباع استوانه برابر با کمینه میدان مغناطیسی برای اشباع چنبره آن در نظر گرفته شده است. سازه وامغناطش برای هندسه مورد نظر به شمار نیامده است [10–17]. کرفته و به صورت دلخواه با یک پروفایل ویژه مغناطیسی اشباعی نخست جسم فولادی در سیملوله قرار فلاکس گیت در میانه جسم فولادی و به فاصله ۲۰ سانتی متر از کف آن قرار گرفت. پس از آن با کاربست جریان یک آمپری و سپس قطع آن پسماند مغناطیسی آن ثبت شد. همین کار تا جریان ۱۴ تمپر با افزایش پلههای یک آمپری تکرار شد. در شکل (۲۴) منحنیهای بدست آمده مغناطش پسماند بر حسب میدان مغناطیسی کاربستی برای دو جسم فولادی است آمده مغناطش



**Fig. 24** The obtained remanent magnetization curves derived from the applied magnetic field for the two samples: sheet and cylinder. **شکل ۲۴** منحنی های بدست آمده مغناطش پسماند بر حسب میدان مغناطیسی کاربستی دو نمونه صفحه و استوانه.

منحنیهای بالانشان میدهد که صفحه فولادی در حدود میدان ۳/۵ کیلو آمپر بر متر به اشباع رسیده است. اما استوانه فولادی در محدوده میدان مغناطیسی ۵/۵ کیلو آمپر بر متر اشباع شده که نشاندهنده بزرگتر بودن سازه وامغناطش استوانه توخالی از صفحه است. همچنین، با مقایسه منحنی پسماند بدست آمده از دو جسم فولادی با منحنی پسماند و منحنی اولیه مغناطش بدست آمده از رینگ

بالتكارون



می توان نتیجه گرفت که میدان مغناطیسی مورد نیاز برای اشباع رینگ در محدوده ۳/۵ کیلو آمپر بر متر است. در نتیجه سازه وامغناطش صفحه فولادی با ابعاد استفاده شده ناچیز بوده و اثر کمی دارد. از اینرو، کمینه میدان مورد نیاز برای صفحه حدود ۲/۵ و برای استوانه فولادی ۵/۵ کیلو آمپر بر متر انتخاب شد. همچنین، زمان مرده میان جریان های کاربستی بسیار ناچیز در نظر گرفته شد. به گونهای که پس از پایان یافتن یک جریان جریان بعدی بی درنگ بکار گرفته شد. همچین مدت زمان کاربست هر جریان یک ثانیه بوده است. پس مدت زمان انجام کامل فر آیند دیبرمینگ ۶۰۰ ثانیه بر آورد شد. پس از انجام فر آیند دیپرمینگ برای اندازه گیری امضای مغناطیسی همیشگی نمونه ها معناطیسی به فاصله ۲۵ سانتی متر از کف نمونه های فولادی زیر آن ها قر ار گرفته. شدک (۲) نمودار مغناطیسی به فاصله ۲۵ سانتی متر از کف نمونه های فولادی زیر آن ها قر ار گرفت. شکل (۲۵) نمودار مغناطیسی معناطیسی همیشگی کل پیش و پس از فر آیند دیپرمینگ برای هر دو نمونه فولادی را نان



Fig. 25 Permanent magnetic signature before and after the de-priming process for both sheet and cylinder samples.

**شکل ۲**۵ امضای مغناطیسی همیشگی پیش و پس از فرآیند دیپرمینگ برای هر دو نمونه صفحه و استوانه.

همان گونه که دیده می شود پس از فر آیند دیپرمینگ بیشینه امضای مغناطیسی همیشگی صفحه فولادی از ۱۷میکرو تسلا به حدود یک میکرو تسلا رسیده است که کاهش ۹۵ درصدی داشته است. همچنین، برای استوانه فولادی از ۲/۵ میکرو تسلا به ۲۰۰ نانو تسلا رسیده است که کاهش ۹۲ درصدی داشته است. همان گونه که در مقدمه آورده شد نسبت به پژوهش های گزارش شده بازدهی بیشتر دارد [۵۵–۱۳]. در شناورهای دریایی بهینه بودن فر آیند دیپرمینگ زمانی است که امضای مغناطیسی ناشی از مغناطش همیشگی از امضای مغناطیسی مغناطش القایی ناشی از میدان مغناطیسی زمین کمتر باشد. چرا که فر آیند دگاوسینگ وظیفه کاهش امضای مغناطیسی مغناطش القایی را دارد. پس با کاهش اثر مغناطش همیشگی به زیر سطح اثر مغناطش القایی، فر آیند دگاوسینگ امکان زدودن همزمان اثر مغناطش القایی و پسماند به جا مانده از فر آیند دیپرمینگ را دارد. همچنین کاهش





سطح اثر مغناطش همیشگی در دو نمونه فولادی نشان میدهد که یکی از مهمترین ویژگیها برای فرایند دیپرمینگ رسیدن به اشباع مغناطیسی نمونه برای هم جهت کردن گشتاورهای مغناطیسی حوزهها است.

### <sup>6</sup>. نتیجه گیری

در این پژوهش، طراحی و ساخت یک جایگاه آزمایشگاهی برای ثبت امضای مغناطیسی و بررسی فرآیند دیپرمینگ ارائه شده است. این جایگاه که با الهام از روش Drive-in طراحی و ساخته شده است، شامل پیچههای هلمهولتز (با جهت گیری عمودی و طولی)، یک سیملوله و یک آرایه خطی از حسگرهای مغناطیسی است که برای زدودن میدان مغناطسی عرضی، در راستای شمال-جنوب قرار گرفتهاند. فرآیند دیپرمینگ روی دو نمونه استوانه توخالی و صفحه که از فولاد ST37 ساخته شدهاند، مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بدست آمدن امضا مغناطیسی همیشگی اولیه نمونهها مغناطش القایی آنها نخست هم به کمک شبیهسازی و هم آزمایشگاهی اندازه گیری و با کم کردن از مغناطش کل، مغناطش همیشگی بدست آمد. فرآیند دیپرمینگ به کمک روش Deperm-ME با توجه به سازه وامغناش نمونهها اجرا شد. نتایج نشان داد که استوانه توخالی و صفحه به ترتیب TP و ۵۹ درصد مغناطش زدایی شدند که نشان دهنده کارایی خوب این روش در جایگاه -Drive- معناطش این روش در جایگاه میشان دهنده کارایی خوب این روش در جایگاه -Drive- این روش در جایگاه - منازی این دو مان داد که استوانه توخالی و مفره ای روش ID-The منازه ای مناخ

۷. تقدیر و تشکر بدینوسیله از تمامی همکاران نقشه کشی، ساخت و تولید که ما را در این پژوهش یاری کردند، صمیمانه تشکر می کنیم.

### منابع

- [1] Holmes, J.J., "Modeling a ship's ferromagnetic signatures", *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Morgan & Claypool*, New York:1-75, 2007.
- [2] Holmes, J.J., "Exploitation of a ship's magnetic field signatures", *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics, Morgan & Claypool*, New York:1-78, 2006.
- [3] Holmes, J.J., "Reduction of a ship's magnetic field signatures", *Synthesis lectures on computational electromagnetics, Morgan & Claypool*, New York:1-68, 2008.
- [4] 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", *DBpia*, 28(2), 41-42, 2018. https://doi.org/10.13910/en16548874





- [5] Kildishev, A.V., Nyenhuis, J.A., Dobrodeyev, P.N. and 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
- [6] Wołoszyn, M. and 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
- [7] Culity, B. and Graham, C., "Introduction to magnetic materials", John Wiley&Sons, 1-126, 2009.
- [8] Kim, J.W., Kim, S.H., Jung, H.J., Lee, H.B., "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
- [9] Ozima, M., Joshima, M., Kinosmta, 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
- [10] 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
- [11] Eslamifar, R., Safikhani, M. and Mozaffari, M., "Research Paper: Experimental Study of the Effect of Stress on the Magnetic Signatures of a Steel Sample," *Iranian Journal of Applied Physics*, 14, 158-17, 2024. http://dx.doi.org/10.22051/ijap.2024.46948.1403 (in Persian)
- [12] 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
- [13] Im, S.H. and 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
- [14] Im, S.H., Lee, H.Y., Chung, H.J. and Park, G.S., "Demagnetization scheme for avoiding magnetic mines under the exposure of Earth magnetic field," *IEEE Transactions on Magnetics*, 54, 1-4, 2017. https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2764531
- [15] Im, S.H., Lee, H.Y., Chung, H.J. and Park, G.S., "Influence of magnetic interactions on the demagnetization scheme of multiple ferromagnetic materials by using Preisach model," *IEEE Transactions on Magnetics*, 55, 1-4, 2019. https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2929105



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/).



