


## Comparison and analysis of matching patterns using simulation with subsurface navigation approach based on magnetic maps

Hasankhani, A.<sup>1</sup> 

1. Master of Geophysics, Geomatic Science Technology Development Center, Geographical Organization, Tehran, Iran.

**Corresponding Author E-mail:** [1987haali@gmail.com](mailto:1987haali@gmail.com)

*(Received: 25 Sep 2023, Accepted: 30 Sep 2023, Published online: 30 Sep 2023)*

### Abstract

Today, the widespread use of satellite equipment to determine the location of objects or persons is done in a commercial and common way. Considering that the basis of satellite equipment is non-native and in the possession of foreign countries, in fact as a result, crises such as political tensions or war, due to tracking or sending incorrect information, are unavoidable. Information security is very important, especially in the military field. Also, accurate knowledge of geographic coordinates and positioning of people and equipment are very important. The importance of this issue is evident especially in the case of subsurface navigation where it is not possible to use GPS. In this project, we intend to investigate the possibility of subsurface navigation independent of GPS and using magnetic maps and matching algorithms. Three methods KATO, ICCP and MSD are presented, simulated and compared and RMSE values are calculated. Three matching algorithms were selected by the collaborative research team of this project. You can see the results of these three algorithms in that these results of each algorithm were the best results related to them. The KATO algorithm is a simple algorithm based only on a map and a search area and the difference of magnetism of the matching sensor, and for this reason, as expected, it has a lower accuracy than other algorithms. Both ICCP and MSD algorithms work based on the fact that the points obtained by the motion sensor and the original points can be matched with each other by a rotation and a displacement.

In the results section, we show that ICCP has the best accuracy. The related system design is also discussed.

Magnetic map is the most important component of matching algorithms. All matching algorithms need to have the magnetization value at every point of the map.

The main goal of this research is to implement and operationalize the positioning system in the discussion of navigation. In determining the position using the magnetic field, the problems raised have been solved and it can be discussed as a positioning system. Earth's magnetic field is present and available all over the planet, such as forest, water, desert, etc. which is considered as a very important parameter. While magnetic field signals are available day and night and in any weather conditions. Also, the possibility of jamming in the magnetic field is very difficult, which can even be said to be impossible. In addition, the magnetic field can be measured using passive devices and there is no need for a signal to be sent.

It is very important to use a backup positioning system at times or places where global positioning system is not available. Magnetic navigation methods or positioning using the Earth's magnetic field have recently attracted the attention of researchers and military experts around the world.

**Keywords:** Information security, subsurface navigation, independent of GPS, magnetism, matching algorithm, simulation

## مقایسه و تحلیل الگوهای تطابق با بهره‌گیری از شبیه‌سازی با رویکرد ناوبری زیر سطحی بر اساس نقشه‌های مغناطیسی

علی حسخانی<sup>۱</sup> ✉

۱. کارشناسی ارشد ژئوفیزیک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران، کارشناس ارشد مرکز توسعه فناوری علوم ژئوماتیک سازمان جغرافیایی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [1987haali@gmail.com](mailto:1987haali@gmail.com)

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸)

### چکیده

امروزه استفاده همه‌گیر از تجهیزات ماهواره‌ای به منظور تعیین موقعیت اشیاء یا اشخاص، به صورت تجاری و رایج انجام میشود. با توجه به اینکه اساس تجهیزات ماهواره‌ای، غیربومی و در اختیار کشورهای بیگانه است، در مواقع بحرانی از قبیل تنشهای سیاسی و یا جنگ، به دلیل ردیابی و یا ارسال اطلاعات ناصحیح، غیر قابل اجتناب میباشند. امنیت اطلاعات، به ویژه در حوزه نظامی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. همچنین شناخت دقیق مختصات جغرافیایی و تعیین موقعیت افراد و تجهیزات از موارد بسیار مهم میباشد. اهمیت این موضوع به خصوص در مورد ناوبری زیر سطحی که امکان استفاده از GPS وجود ندارد، مشهود است. در این پروژه قصد داریم امکان ناوبری زیر سطحی مستقل از GPS و با استفاده از نقشه‌ی مغناطیسی و الگوریتمهای تطابق مورد بررسی قرار دهیم. سه روش KATO، ICCP و MSD ارائه، شبیه‌سازی و مقایسه میشوند و مقادیر RMSE محاسبه گشته اند. در بخش نتایج نشان میدهم که ICCP بهترین دقت را دارد. همچنین طراحی سامانه مربوط مورد بحث قرار میگیرد.

**کلمات کلیدی:** امنیت اطلاعات، ناوبری زیر سطحی، مستقل از GPS، مغناطیس، الگوریتم تطابق، شبیه‌سازی.

### ۱. مقدمه

ژئوفیزیک به بیان ساده دانش مطالعه زمین با استفاده از خصوصیات یا ویژگیهای فیزیکی است. میدان مغناطیسی زمین به عنوان یک ویژگی ژئوفیزیکی اطلاعات جهت را در اختیار موجودات زنده روی کره زمین قرار می دهد. سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای با توجه به تکنولوژی مدرن ماهواره، یکی از سامانه‌های تعیین موقعیت میباشد که با خطای اندکی موقعیت نقطه‌ای را نشان میدهد. میزان خطا در این سیستم‌ها حتی تا چندسانتیمتر نیز کاهش یافته است، اما از منظر پدافند غیرعامل، استفاده از آن با ایرادهایی روبرو است:

- اختلال در ارسال و دریافت امواج در برخی مناطق خاص جغرافیایی مثل مناطق کوهستانی، زیر زمین و زیر دریا
- اختلال عمدی به دلیل جَمینگ (ارسال نویز و امواج)
- جاسوسی به وسیله ردیابی یا شنود
- ارسال اطلاعات ناصحیح و هدایت ناخواسته در مواقع بحران و تنشهای سیاسی یا جنگ
- امکان استفاده از سامانه‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای برای دوستان به موازات از کار انداختن آن برای بیگانگان در یک منطقه مشترک.

صورت عملی در روی کشتی انجام خواهد شد. روشهای تطبیق با استفاده از نقشه‌ی مغناطیسی زیادی ارائه شده‌اند که اخیراً با تلفیق هوش مصنوعی دقت‌های خوبی نیز گزارش کرده‌اند (کیم ۲۰۱۹ و کاجو ۲۰۱۹). در این پروژه سه روش KATO، ICCP و MSD مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هر سه الگوریتم در محیط شبیه‌سازی و پیاده‌سازی شده‌اند و دقتها و عملکرد آنها مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا بهترین روش انتخاب شود (ژی و همکاران ۲۰۱۳). در گذشته نیز فعالیتهایی در این حوزه صورت پذیرفته است که به اختصار به برخی از آنها اشاره خواهیم داشت.

کلم در سال ۱۹۹۷ در رابطه تصحیحات مرتبط با داده‌های مغناطیس سنجی دریایی بحث کرده‌اند. تلاشهای زیادی برای ناوبری با استفاده از ژئوفیزیک در کارهای هوابرد و زیردریایی انجام شده است که میتوان به مقاله ویلسون و کلاین شودر در سال ۲۰۰۶ اشاره کرد. در این مقاله یک فیلتر ناوبری طراحی شد که مقادیر اندازه‌گیری شده سه محوری مگنتومتر را با نقشه آنومالی مغناطیسی در دسترس مقایسه می‌کند. در مقاله دیگری هینز و همکاران در سال ۱۹۹۸، سیستم ناوبری مغناطیسی به طور کامل بحث شده است و هم در مورد اندازه‌گیری‌های اسکالر و گرادایومتری صحبت شده است. در مقاله هینز و کولس به برداشت مغناطیس دریایی در خلیج بای اشاره شده است، در بخش‌های مختلف این مقاله به روش‌های اعمال تصحیحات روزانه، اثر کشتی روی داده‌های مغناطیسی و .... پرداخته است (هاینز و همکاران ۱۹۹۸)

تایرن در سال ۱۹۸۷ یکی از اولین سیستم‌های ناوبری مغناطیسی برای استفاده در زیردریایی‌ها را معرفی کرد. برگمن در سال ۱۹۹۷ از دو مگنتومتر با یک فاصله جدایش مشخص استفاده کرد. او اولین کسی بود که به چگونگی جدایش میدانهای مغناطیسی حاصل از کشتی و زمین اشاره کرد.

در کار دیگری جی در سال ۲۰۰۹ به ناوبری زیردریایی با استفاده از فیلتر کالمن پرداخت. او در این مقاله مطلب مهم حذف اثرات روزانه از اندازه‌گیری‌های مغناطیس را بیان داشت. در کار دیگری یانگ در سال ۲۰۱۲ از الگوریتمهای ICP برای

استفاده از یک سیستم تعیین موقعیت پشتیبان در زمانها یا مکانهایی که سیستم تعیین موقعیت جهانی قابل دسترس نیست، بسیار حائز اهمیت است. روشهای ناوبری مغناطیسی یا تعیین موقعیت با استفاده از میدان مغناطیسی زمین به تازگی مورد توجه محققان و کارشناسان نظامی در سراسر دنیا قرار گرفته است. با توجه به مطالب فوق و با توجه به ضرورت و اهمیت تعیین موقعیت از روشهای امن برای دستگاه‌های کشور، در این پژوهش به بررسی امکان تعیین موقعیت جغرافیایی با استفاده از میدان مغناطیسی زمین به جای استفاده از سامانه تعیین موقعیت ماهواره‌ای می‌پردازد. هدف اصلی از این پژوهش پیاده‌سازی و عملیاتی کردن سامانه تعیین موقعیت در بحث ناوبری میباشد. در تعیین موقعیت با استفاده از میدان مغناطیسی مشکلات مطرح شده حل شده و میتوان به عنوان یک سیستم تعیین موقعیت مورد بحث قرار داد. میدان مغناطیسی زمین در سراسر کره زمین از قبیل جنگل، آب، صحرا و .... موجود و در دسترس میباشد. که به عنوان یک پارامتر بسیار مهم در نظر گرفته میشود. در حالی که سیگنالهای میدان مغناطیسی شب و روز و در هر شرایط آب و هوایی در دسترس است. همچنین امکان جیمینگ در میدان مغناطیسی بسیار مشکل میباشد که حتی میتوان گفت غیرممکن است. بعلاوه میدان مغناطیسی را میتوان با استفاده از دستگاههای غیرفعال اندازه‌گیری کرد و نیازی به سیگنالی جهت ارسال نمی باشد (ژائو و همکاران ۲۰۰۹)

در راستای بهره‌گیری از این پدیده در ناوبری زیرسطحی، در مرحله اول اثر میدان مغناطیسی در سطح دریا باید شبیه‌سازی شود. بدین صورت که میدان مغناطیسی زمین را با فرض وجود یکسری آنومالی‌های زیرسطحی و بررسی اثر آن مدل‌سازی خواهد شد. داده‌های مغناطیسی همچون تمامی روشهای ژئوفیزیکی دیگر نیازمند تصحیحاتی میباشند. عوامل زیادی روی این داده‌ها تاثیرگذار هستند که از جمله آنها میتوان به طوفان‌های خورشیدی اشاره کرد. تغییرات روزانه، اثر کشتی و غیره از عوامل دیگری هستند که بایستی به نحوی از داده‌ها حذف گردند. بدین منظور روی داده‌ها نویز اعمال شده و پس از آن روش مطلوب جهت حذف نویز از روی داده‌ها بررسی خواهد شد. مرحله بعد مربوط به داده برداری میباشد که به

درونیایی پیوسته و مشتق‌پذیر لازم است تا در صورت نبود مقدار مغناطیس در یک نقطه از نقشه‌ی مغناطیسی، داده‌ی مورد نیاز را تهیه کند.

## ۲. مواد و روشها

### ۱-۲. الگوریتمهای تطابق

سه الگوریتم KATO، ICCP و MSD بهبودیافته برای پیاده‌سازی انتخاب شده‌اند. هر کدام از این الگوریتم‌ها، در ادامه تشریح خواهند شد. در این فصل خروجی الگوریتمهای معرفی شده را در محیط شبیه‌سازی نمایش می‌دهیم و به بررسی متغیرهای تاثیرگذار بر هر کدام از الگوریتمها می‌پردازیم. همچنین به بررسی دقت هر کدام از روشها می‌پردازیم. در هر کدام از الگوریتمها، در شکل‌های ذیل، نمونه خروجیهای مربوط به حالات مختلف تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی را مشاهده می‌کنید. در هر کدام از شکل‌های ذیل نقشه‌ی مغناطیسی، مسیری که متحرک واقعا طی نموده، مسیری که INS به عنوان سنسور حرکتی تخمین زده است و مسیری که الگوریتم تطابق تخمین زده است را می‌توانید مشاهده کنید. همچنین در نظر داشته باشید که  $V$  به معنای سرعت متحرک و در واقع مقدار مسافت پیموده شده در هر بار خواندن سنسورها، Space به معنای فاصله‌ی برداشت یا درونیایی نقشه‌ی مغناطیسی،  $magsensorerrors$  خطای سنسور مغناطیس در واحد نانو تسلا و  $INSerror$  درصد خطای سنسور حرکت می‌باشند. برای عادلانه بودن نتایج، هر شبیه‌سازی را به تعداد زیاد اجرا می‌کنیم و کلیه اعداد ارائه شده، میانگین تمام اجرا می‌باشد. در ضمن از یک نقشه‌ی مغناطیسی به اندازه  $10000 * 10000$  متر مربع در شبیه‌سازیها استفاده شده است و تمامی واحدها در نقشه، متر می‌باشد. همچنین در تمامی آزمایشات یک مسیر ۸۰۰۰ متری پیموده می‌شود. معیار خطا در این آزمایشات دو مقدار می‌باشد؛ خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) و خطای نقطه‌ی پایانی با پیمودن یک طول مسیر مشخص (Final Point Distance Error (FPDE)). دو مقدار

ناوبری زیردریایی با استفاده از مگنتومترها پرداخت. او نشان داد که الگوریتم مربوطه قادر به محدود کردن جابجایی‌های موجود در سیستم<sup>۱</sup> INS را دارد.

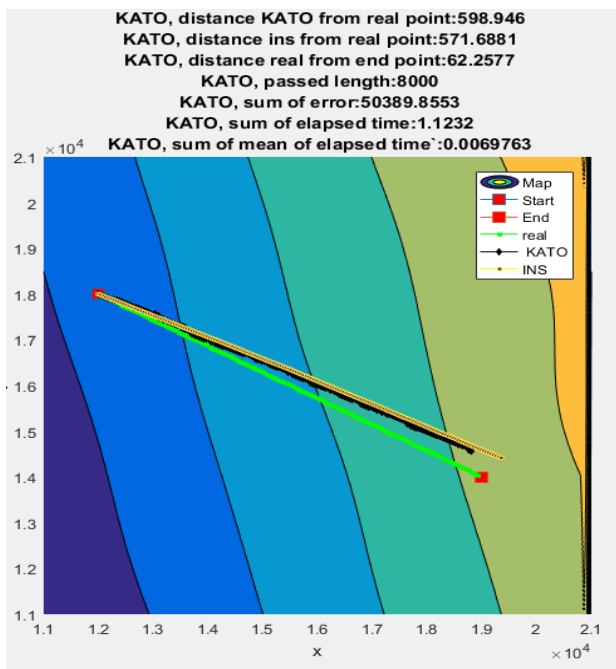
در کوششی دیگر می و میسینگر ۱۹۹۲ نشان دادند که اختلاف بین مگنتیک برداشت شده با آنومالیهای مگنتیک در مسیرهای تکراری بین ۵ تا ۳۰ نانوتسلا می‌باشد. همین تلاش و با در نظر گرفتن نسبت سیگنال به نوفه استفاده از ناوبری مغناطیسی را جذابتر کرد.

برای شروع این پژوهش، ابتدا باید تمامی عملیاتها به صورت شبیه‌سازی پیاده‌سازی و آزمایش شوند.

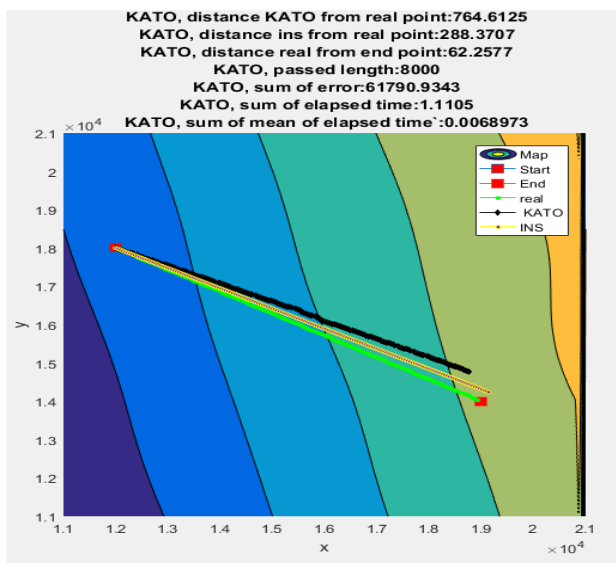
این پژوهش شامل اجزای زیر می‌باشد:

- بررسی دقیق رفتار INS و شبیه‌سازی آن و استخراج روابط تبدیل خروجی آن.
- بررسی شبیه‌سازی INS با دیتای واقعی INS.
- شبیه‌سازی سنسور مغناطیس با دیتای واقعی از این سنسور.
- در اختیار داشتن نقشه‌ی مغناطیسی.
- انتخاب الگوریتمها بر مبنای روشهای علمی و عملی بودن آنها.
- پیاده‌سازی الگوریتمهای تطابق.
- بررسی تمامی هاپر پارامترهای دخیل در هر یک از الگوریتمها و انتخاب بهترین شرایط برای هر الگوریتم (البته با پارامترهای حرکتی و مغناطیسی برابر در تمامی الگوریتمها).
- انتخاب بهترین الگوریتم: براساس معیار خطای INS از نقطه‌ی واقعی و خطای مدل تطابق از نقطه‌ی واقعی، بهترین مدل انتخاب شد. معیارها نیز RMSE کل مسیر و نقطه‌ی انتهایی، بودند.
- همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، نقشه‌ی مغناطیسی مهمترین مولفه‌ی الگوریتمهای تطابق می‌باشد. همه‌ی الگوریتمهای تطابق، نیاز دارند تا در هر نقطه‌ی ای از نقشه، مقدار مغناطیس را داشته باشند. البته برخی الگوریتمها نیز نیازمند مشتق مقدار مغناطیس در هر نقطه‌ی ای، نیز هستند. بدین منظور یک الگوریتم

<sup>۱</sup> - Inertial Navigation System



شکل ۲.  $KATO, INS\_error=0.1$



شکل ۳.  $KATO, INS\_error=0.05$

جدول ۱. نتایج الگوریتم KATO

$V=50, Space=10, mag\_sensor\_errors=2$					
INS_error		۰,۰۵	۰,۱	۰,۱۵	۰,۲۰
KATO	FPDE	۷۶۴	۵۹۸	۵۴۵	۵۴۷
	RMSE	۵۴۱	۴۲۴	۳۸۶	۳۸۷
INS	FPDE	۲۸۸	۵۷۱	۸۴۴	۱۱۲۵
	RMSE	۲۰۴	۴۰۵	۵۹۸	۷۹۷

خطای مغناطیس و مقدار خطای INS، پارمترهایی هستند که بین الگوریتمها مشترک هستند و برخی پارمترها مختص هر الگوریتمی می‌باشد. برای بیان دقیق آزمایشات و عادلانه بودن نتیجه گیری، با حالات مختلف پارمترهای مشترک و خصوصی، الگوریتمها اجرا میشوند و نتایج RMSE و FDPE آنها ارائه خواهد شد.

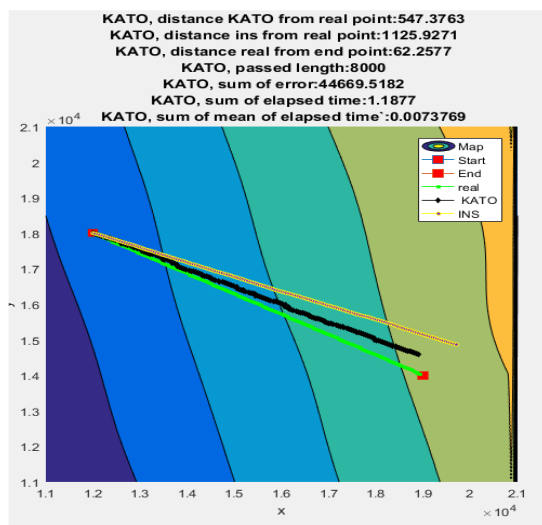
### ۳. بحث و نتایج

#### ۳-۱. الگوریتم KATO

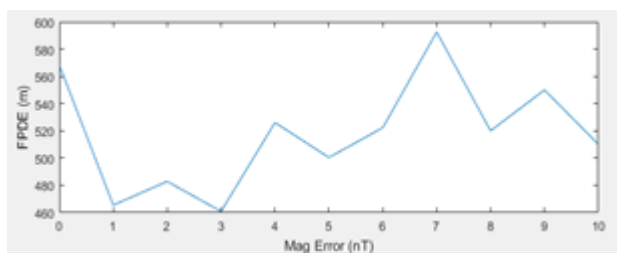
این الگوریتم یکی از پایه‌ای‌ترین و از لحاظ مفهومی به عبارتی ساده‌ترین الگوریتم مکانیابی با استفاده از تطبیق میباشند و در صورت داشتن دقت بسیار خوب در سنسور مغناطیس و دقت نسبتا مناسب در سنسورهای حرکتی، این روش میتواند دقت بسیار خوبی داشته باشد. در این روش با استفاده از سنسور حرکتی مکان جدید شناور بدست می‌آید، سپس یک پنجره به مرکز نقطه‌ی بدست آمده انتخاب میکنیم. با کمک سنسور مغناطیسی، کانتور مغناطیسی با استفاده از نقشه‌ی مغناطیسی، در آن پنجره بدست می‌آید. سپس نزدیکترین نقطه از کانتور به نقطه‌ی حرکتی انتخاب میشود. (کاتو و شیگتومی، ۲۰۱۹)

پارامترها:

$$V=50, Space=10, mag\_sensor\_errors=3$$



شکل ۱.  $KATO, INS\_error = 0.2$



شکل ۵. خطای KATO براساس تغییرات خطای مگنتومتر

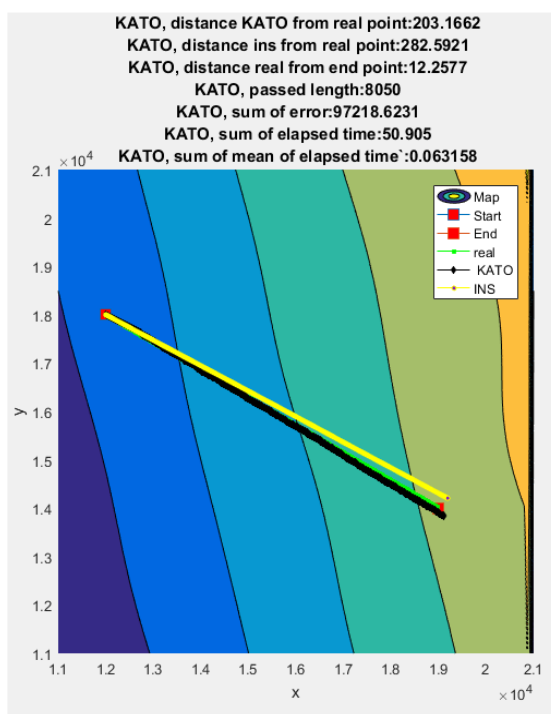
این الگوریتم یک هاپر پارامتر به عنوان ناحیه تطابق دارد. به طبع این پارامتر بسیار تاثیر گذار خواهد بود. زمانیکه این ناحیه کوچک در نظر گرفته شود، تطابق به سمت خطای حرکت یعنی INS متمایل می شود و نمی تواند مقادیر مغناطیس نقطه ای واقعی را در ناحیه خودش ببیند. همینطور زمانیکه ناحیه تطابق بزرگ در نظر گرفته شود، ممکن است نقطه ای مشابه مغناطیسی دیگری که دورتر از نقطه ای واقعی میباشد، پیدا کند. پس اندازه ای مناسب، ناحیه ای است که به اندازه ای کافی کوچک باشد اما به طور قطع نقطه ای واقعی و اطراف آنرا تحت پوشش قرار دهد. در هر دو صورت کوچک یا بزرگ بودن ناحیه، خروجی الگوریتم کاملا به سمت نقطه ای INS متمایل می شود.

### ۲-۳. الگوریتم ICCP

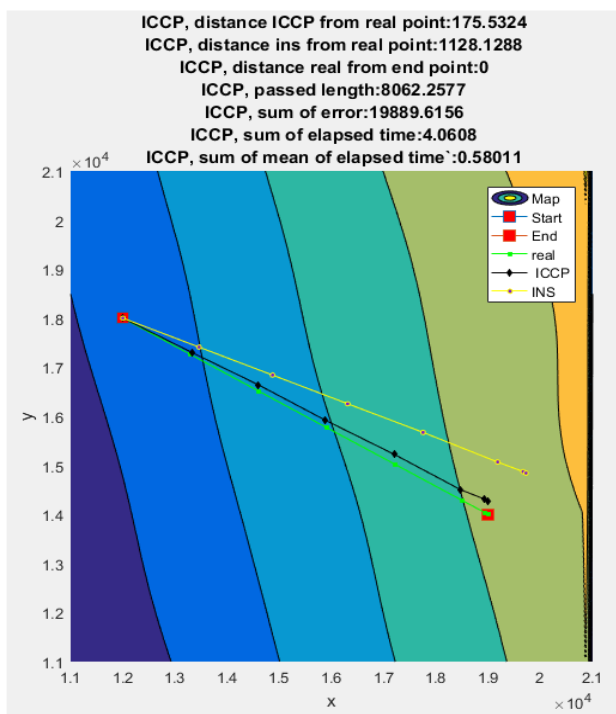
قدمهای ابتدایی این الگوریتم همانند الگوریتم KATO میباشد اما در مرحله ای انتخاب نزدیکترین نقطه روی کانتور به نقطه ای بدست آمده توسط سنسورهای حرکتی، ایده ای دیگری استفاده میشود. در این الگوریتم، از یک تبدیل چرخش و انتقال بر روی نقطه ای که توسط مغناطیس بدست آمده، استفاده میشود. و علاوه بر این از چندین نقطه استفاده میکند تا دقت بهتری بدست آید و تاثیر نقاط بعد که ممکن است به سبب خطاهای سنسوری بدست آید را کمتر کند.

این الگوریتم یکی از بهترین کارهای انجام شده در این زمینه براساس تطبیق میباشد. نتایج شبیه سازی شده برای این کار در پژوهش مربوطه بسیار خوب بوده است.

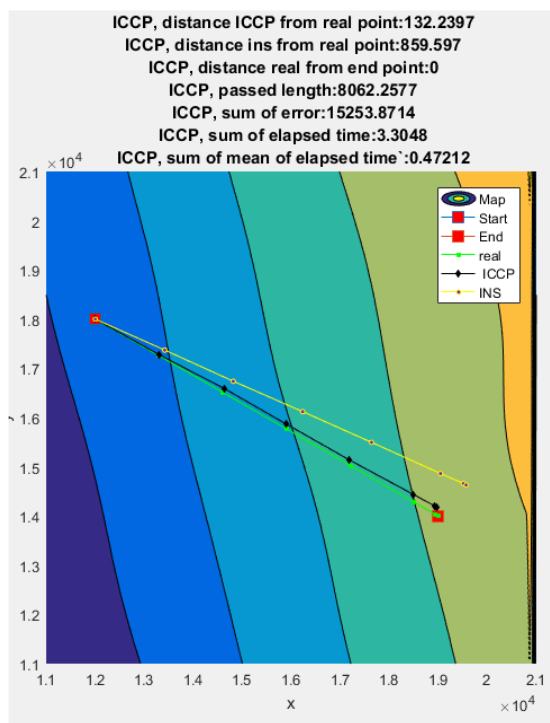
همانطور که در جدول مشخص است، الگوریتم کاتو تنها زمانی نتیجه ای مورد استفاده ای خواهد داشت که خطای سنسور حرکت زیاد باشد. همانطور که از روش الگوریتم هم مشخص بود این روش دقت بالایی نخواهد داشت اما سرعت این روش بسیار بسیار بالا میباشد. در صورتی که پارامترهای تنظیمی مانند سرعت و فاصله ای برداشت نقشه ای مغناطیسی و دقت آن تغییر کند و این روش دقت بالاتری خواهد داشت. برای مثال اگر  $V=10$  و  $Space=5$  باشد، خطای KATO، از 764 به 203 میرسد شکل (۴). اما همچنان دقت بسیار نامناسب میباشد. برخلاف تاثیر دقت نقشه های تهیه شده، خطای سنسور مغناطیس بر روی این الگوریتم تاثیر چندانی ندارد و نتایج با تغییر خطای مغناطیس از 0 تا 10، الگوی خاصی را پیروی نمیکنند. برای مثال وقتی خطای مغناطیس قرار داده میشود، خطای بیشتری نسبت به زمانی که خطای مغناطیس 10 میباشد رخ میدهد، اما با خطای ۳ دقت بهتری بدست می آید.



شکل ۴. KATO, INS\_error=0.05



شکل ۸. ICCP,INS\_error=0.2



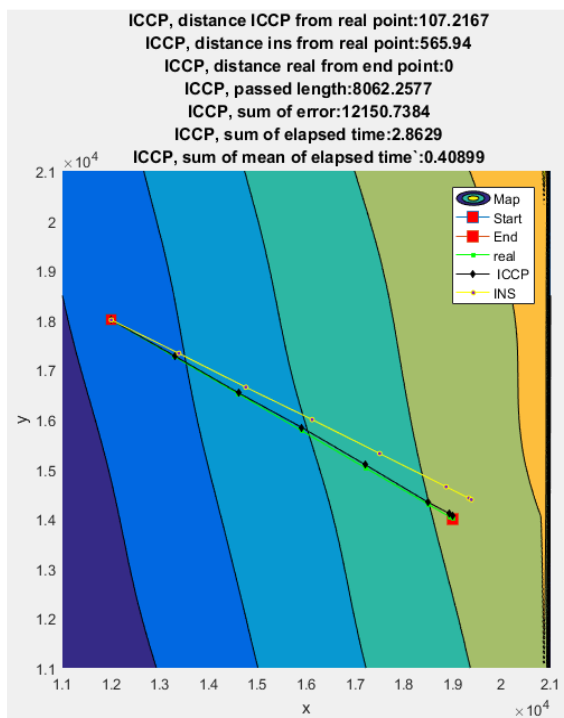
شکل ۶. ICCP,INS\_error=0.15

در این الگوریتم پارامتر دیگری به نام `step_correction` وجود دارد. این پارامتر تعیین کننده‌ی این است که بعد از برداشت چند نقطه، روی این نقاط تطابق انجام شود.

### ۳-۳. بررسی تاثیر پارامتر `step_correction` بر روی

#### ICCP

در این بخش ابتدا برای `step_correction=30` با پارامترهای `V=50,Space=10,mag_sensor_errors=3` خروجیها به ازای خطاهای مختلف `INS`، نمایش داده میشوند. در جدول ۲ میتوانید نتایج مربوط به تاثیر `step_correction` را مشاهده کنید.

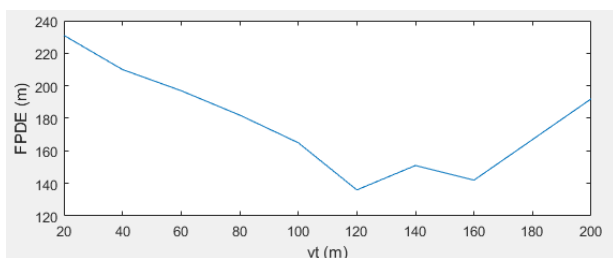


شکل ۷. ICCP,INS\_error=0.1

جدول ۲. نتایج الگوریتم ICCP، بررسی تاثیر پارامترهای خطای INS و

step_correction						
V=0, Space=1, mag_sensor_errors=r						
INS_error	step_correction	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	
0.05	ICCP	FPDE	۸۵	۶۱	۶۲	۵۶
		RMSE	۶۰	۴۲	۴۴	۳۹
	INS	FPDE	۲۸۷	۲۸۲	۲۸۷	۲۸۲
		RMSE	۲۰۲	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۰
0.10	ICCP	FPDE	۱۲۸	۱۰۷	۹۶	۱۰۰
		RMSE	۹۰	۷۵	۶۸	۷۱
	INS	FPDE	۵۶۷	۵۶۵	۵۶۷	۵۶۲
		RMSE	۴۰۲	۴۰۰	۳۹۸	۴۰۰
0.15	ICCP	FPDE	۱۲۲	۱۲۲	۱۰۵	۱۰۷
		RMSE	۹۵	۹۳	۷۴	۷۶
	INS	FPDE	۸۵۸	۸۵۹	۸۶۵	۸۵۳
		RMSE	۶۰۸	۶۰۹	۵۹۹	۶۰۱
0.20	ICCP	FPDE	۲۰۴	۱۷۵	۱۱۱	۱۵۳
		RMSE	۱۴۴	۱۲۴	۷۹	۱۰۸
	INS	FPDE	۱۱۱۶	۱۱۲۵	۱۱۲۲	۱۱۲۴
		RMSE	۷۹۲	۷۹۰	۷۹۶	۸۰۴

پارامترهای دخیل دیگر، رزولوشن نقشه برداری و فرکانس خواندن سنسور و اجرای الگوریتم میباشد. همانند الگوریتم KATO، هرچه رزولوشن نقشه برداری بیشتر باشد دقت الگوریتم بهتر خواهد بود. اما در مورد فرکان خواندن سنسورها، این مساله وجود دارد که، علی رغم اینکه ممکن است این فکر وجود داشته باشد که هر چه سنسورها با فرکانس بالاتری خوانده شود و الگوریتم نیز با همان فرکانس اجرا شود، دقت بهتری بدست خواهد آمد، اما این طور نیست. دلیل این امر، قدرت مدل ICCP میباشد که تنها براساس یک چرخش و جابجایی برای تمام نقاط، میباشد. این امر باعث میشود هر چه شناور یک مسیر مستقیم را طی کند و فرکانس سنسورخوانی کمتر باشد این تخمین بهتر بدست آید. در آزمایشات، تا یکجایی دقت بهتر میشود و سپس کاهش مییابد:

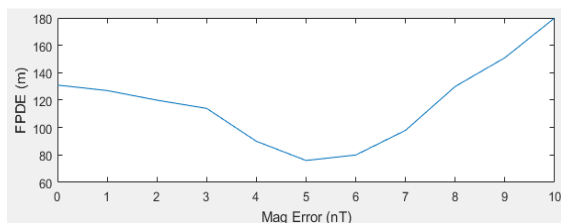


شکل ۱۰. نمودار دقت نهایی براساس فرکانس سنسورخوانی الگوریتم ICCP

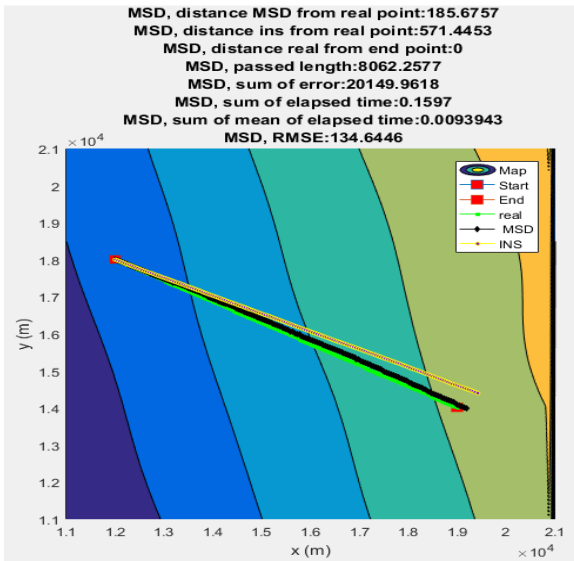
### ۳-۴. الگوریتم MSD بهبود یافته

این الگوریتم همانند الگوریتم ICCP، یک تبدیل چرخش و انتقال برای نقاط در نظر گرفته شده است اما با تعریف یک تابع هزینه سعی در کمینه کردن این مقدار دارد. تمرکز این روش بر روی پایدار کردن روش MSD نسبت به Outliers میباشد. با وارد کردن تابع وزن طراحی شده و با استفاده از ترکیب کردن تساوی رابطه‌ی بین منحنی مسیر منبع و منحنی مسیر تطبیق با استفاده از بسط تیلور، این مساله تبدیل به حل یک مساله روابط غیرخطی برای بدست آوردن خطاهای عرض، طول جغرافیایی و زاویه، میشود. این الگوریتم نیز مانند الگوریتم ICCP دارای پارامتر step\_correction میباشد و همچنین یک هاپر پارامتر  $\sigma$  نیز دارد. در آزمایشات زیر به تاثیر این متغیرها بر روی این الگوریتم پرداخته میشود تا بهترین

با بالا بردن پارامتر step\_correction تا مقدار 40، دقت بالاتر میرود، اما هر چه این مقدار بیشتر باشد، سرعت الگوریتم کمتر میشود و دقت بهبود بیشتر نخواهد داشت. بررسی تاثیر پارامترهای خطای مگنتومتر، رزولوشن نقشه برداری و فرکانس سنسورخوانی بر روی ICCP نکته ای قابل توجه در مورد این الگوریتم این است که تا یک حدی، هر چه خطای مگنتومتر بیشتر میشود دقت این الگوریتم بالاتر میرود، اما یک مشکل بسیار بزرگ پیش میآورد. وقتی خطای مگنتومتر بالا باشد ممکن است کانتورهای نامناسب و بسیار دورتری را پیدا کند و الگوریتم در یک بهینه‌ی محلی بسیار بد قرارگیرد و این خطای بسیار زیاد بر روی ادامه‌ی مسیر تاثیر بسزایی دارد. برای مقایسه‌ی بهتر، اجراهایی که این اتفاق میافتد، در نتایج در نظر گرفته نشده است:



شکل ۹. تاثیر خطای مگنتومتر بر روی ICCP



شکل ۱۳. MSD,INS\_error=0.13

جدول ۳. نتایج الگوریتم MSD، بررسی تاثیر پارامترهای خطای INS و step\_correction

		V=50, Space=10, mag_sensor_error=3, sigma=1.....				
INS_error	step_correction		5	10	15	20
0.05	MSD	FPDE	280	94	112	138
		RMSE	198	66	85	96
	INS	FPDE	282	281	285	281
		RMSE	144	145	147	144
0.10	MSD	FPDE	549	185	220	279
		RMSE	399	135	165	191
	INS	FPDE	540	571	557	542
		RMSE	325	345	325	328
0.15	MSD	FPDE	860	286	320	322
		RMSE	621	203	245	288
	INS	FPDE	872	860	828	854
		RMSE	556	548	485	496
0.20	MSD	FPDE	1205	370	451	554
		RMSE	812	262	322	382
	INS	FPDE	1124	1120	1123	1129
		RMSE	704	688	695	719

۳-۶. بررسی تاثیر پارامترهای خطای مگنتومتر،

رزولوشن نقشه برداری، فرکانس سنسورخوانی و  $\sigma$

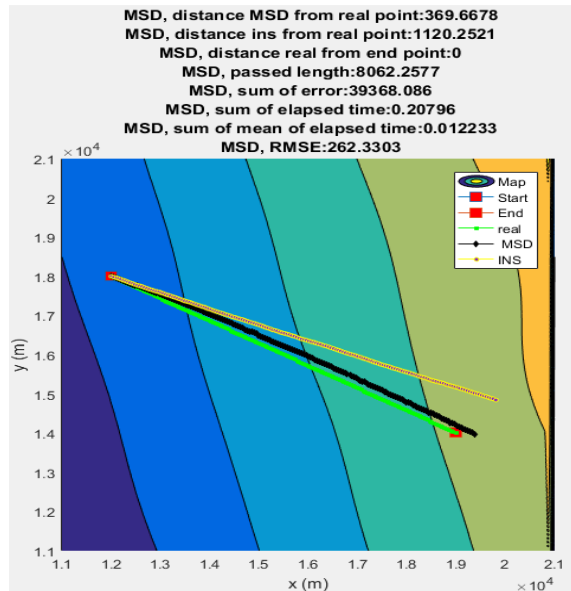
بر روی MSD

نکته ای قابل توجه در مورد این الگوریتم این است که تا یک حدی، هر چه خطای مگنتومتر بیشتر میشود دقت این الگوریتم تغییری چندانی نمیکند همانند دو الگوریتم فوق الذکر، MSD نیز نسبت با رزولوشن نقشه برداری رابطه ی مستقیم دارد.

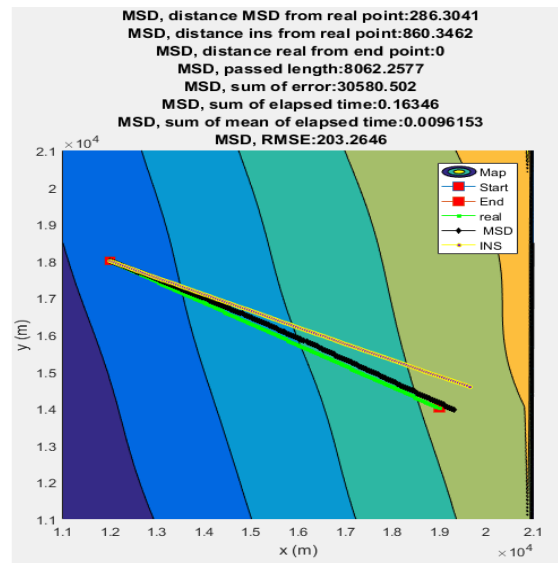
تنظیم پارامترها برای این الگوریتم بدست آید (ژیومکاران ۲۰۱۳).

۳-۵. بررسی پارامتر step\_correction

ابتدا برای step\_correction=10 با پارامترهای خروج  $V=50, Space=10, mag\_sensor\_errors=3$  یها به ازای خطاهای مختلف INS، نمایش داده میشوند. در شکل‌های زیر می‌توانید نتایج مربوط به تاثیر step\_correction را مشاهده کنید.

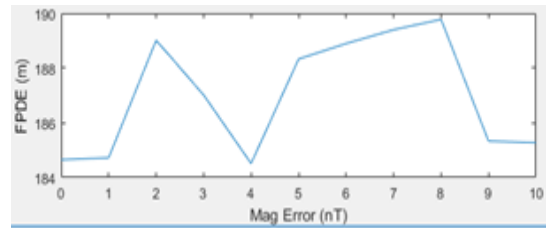


شکل ۱۱. MSD,INS\_error=0.20



شکل ۱۲. MSD,INS\_error=0.15

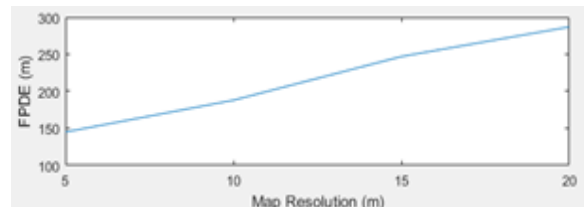
که اگر به طور مناسب انتخاب نشود، الگوریتم به هیچ وجه درست کار نخواهد کرد. در شکل می‌توانید این مساله را مشاهده کنید. تاثیر این پارامتر بر روی دقت MSD نمی‌باشد، بلکه بر روی درست عمل کردن الگوریتم است.



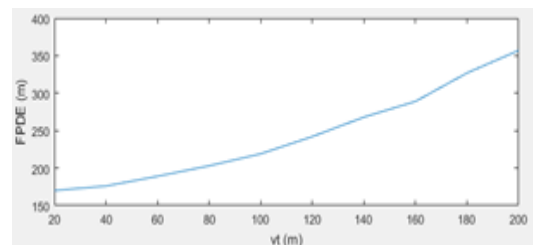
شکل ۱۴. تاثیر خطای مگنتومتر بر روی MSD

#### ۴. نتیجه گیری و جمع بندی

سه الگوریتم تطابق توسط تیم تحقیقاتی همکار این پروژه، انتخاب شده بودند. نتایج این سه الگوریتم را در می‌توانید مشاهده کنید که این نتایج از هر الگوریتم، بهترین نتایج مربوط به آنها بوده است. الگوریتم KATO یک الگوریتم ساده و فقط بر اساس نقشه و یک ناحیه جستجو و اختلاف مغناطیس سنسور تطابق را انجام می‌دهد و به همین دلیل مطابق انتظار دقت پایین تری نسبت به الگوریتمهای دیگر دارد. الگوریتمهای ICCP و MSD هر دو بر اساس اینکه، نقاطی که توسط سنسور حرکت بدست آمده و نقاط اصلی، نسبت بهم با یک چرخش و یک جابجایی می‌توانند بر هم منطبق شوند، عمل می‌کنند. همانطور که در نتایج مشاهده می‌کنید دقت ICCP از MSD بیشتر است.



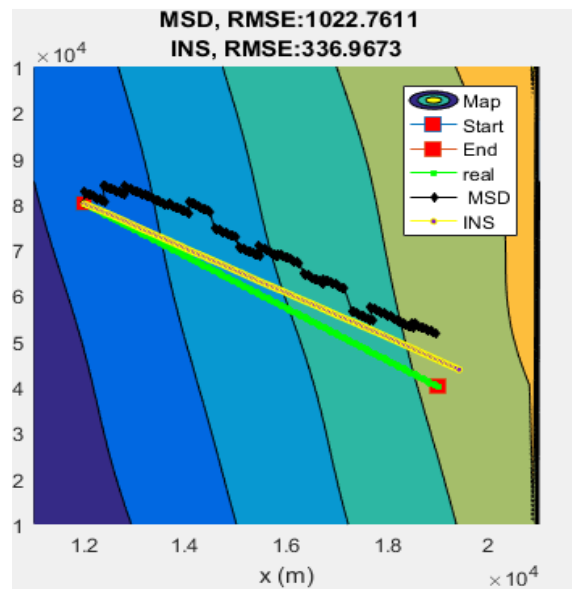
شکل ۱۵. تاثیر رزولوشن نقشه برداری بر روی MSD



شکل ۱۶. تاثیر فرکانس سنسور خوانی بر روی دقت MSD

#### ۵. منابع

1. Bergman N., (1997). On the cramer-rao bound for terrain-aided navigation. Automatic control group, Linkoping.
2. Clem, T. R. (1997, April). Progress in magnetic sensor technology for sea mine detection. In SPIE Proceedings for Detection and Remediation Technologies for Mines and Mine-like Targets (Vol. 3079, pp. 354-371).
3. Feng Jie. (2009), Kalman filter underwater passive geomagnetic navigation technology research considering the impact of diurnal variation. In Image and Signal Processing CISP '09. 2nd International Congress on, pages 1-4. IEEE, October 2009.
4. Hinze, W.J., R. Von Frese, and Afif H. Saad (1998). Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications. Cambridge, U.K.: Cambridge UP.
5. Kaji, C. V (2019). Underwater Navigation using Geomagnetic Field Variations. IEEE



شکل ۱۷. تاثیر انتخاب نادرست - شکل  $\sigma$  بر روی MSD

الگوریتم MSD، هایپر پارامتر  $\sigma$  را دارد که به شدت بر روی این الگوریتم تاثیر می‌گذارد. تاثیر این الگوریتم به گونه ای است

11. underwater vehicles. In Selected and Revised Results of the 2011 International Conference on Mechanical Engineering and Technology, pages 59–65. IEEE, November.
12. Wilson J.M. and Robert J. Kline-Schoder (2006). Passive navigation using local magnetic field variations. ION NTM,
13. Xie, W., Qu, Z & Li, Q (2013). A fast algorithm of the geomagnetic correlation matching based on MSD. navigation.03-03
14. Xie, W., Huang, L., Qu, Z & Wang, Z (2017). Geomagnetic matching navigation algorithm based on robust estimation. Journal of Physics: Conference Series.109101 ,
15. Zhang Y., (2012). Geomagnetism-aided navigation based on matching algorithm for
16. Zhao, J., Wang, S., & Wang, A. (2009). Study on underwater navigation system based on geomagnetic match technique. Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI'09. 9th International Conference on (pp. 3-255). IEEE.
17. A textbook on the Fundamentals of Spatial Information Systems (Apic Series) 1st Edition by Robert Laurini (Author), Derek Thompson (Author), 1992.
- International Conference on Electro Information Technology (EIT).6--0 ,
6. Kato, N & Shigetomi, T. (2019). Underwater navigation for long-range autonomous underwater vehicles using geomagnetic and bathymetric information. Advanced Robotics.813-787 ,93 ,
7. Kim, D. a (2019). Approach to geomagnetic matching for navigation based on a convolutional neural network and normalised cross-correlation. IET Radar, Sonar & Navigation.0339--0393 ,
8. May M., and Paul Meisinger(1992). Testing of the Geomagnetic Navigation Concept. Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center RDTE Div., DetWarminster.
9. Menq, C.-H., Yau, H.-T & Lai, G.-Y. (2009). Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection. IEEE Transactions on Robotics and Automation.978-968 ,8 ,
10. Tyren, C. (1987, June). Magnetic terrain navigation. In Unmanned Untethered Submersible Technology, Proceedings of the 1987 5th International Symposium on (Vol. 5, pp. 245-256). IEEE.