



Accessibility to the Geographic Location of Earth's Magnetic Field with Simulation & Data Collection

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Kianfar K.¹ MSc,
Ranjbar Noiey A.^{*1} PhD,
Rezaie B.¹ PhD

How to cite this article

Kianfar K, Ranjbar Noiey A, Rezaie B. Accessibility to the Geographic Location of Earth's Magnetic Field with Simulation & Data Collection. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):2031-2038.

¹Control Department, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Electrical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Shariati Avenue, Babol, Mazandaran, Iran, Postal Code: 4714871167
Phone: +98 (11) 32310985
Fax: +98 (11) 32310985
a.ranjbar@nit.ac.ir

Article History

Received: July 29, 2018
Accepted: January 30, 2019
ePublished: August 12, 2019

ABSTRACT

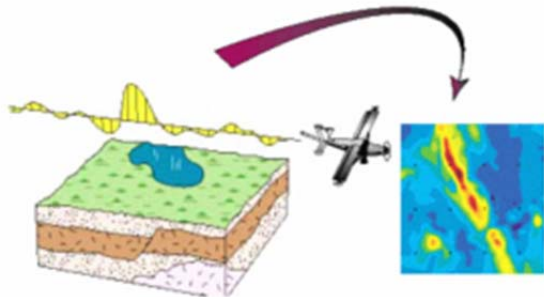
In recent years, scientific advances in navigation systems and technological development of low-power consumption and high-precision in magnetic sensors have made researchers to realize that earth's magnetic field can be applied for locating purposes. Earth's magnetic field is applied in the navigation method where the required data from earth's magnetic field can be read from high accuracy magnetic sensors. It is possible to determine the location by comparing the data with the reference maps through adaption of algorithms and/or filtering. Generally, in this method of locating, the inertia system is used to determine the velocity and condition, and the magnetic navigation system represents navigational assistance. In the first step toward obtaining a magnetic locating system, a reference magnetic map must be created; so, it is required to carefully analyze the earth's magnetic field, the quantity, and quality of the field variations over different time and places. In this paper, the possibility of obtaining the geographical location of an observatory by extracting available data of a magnetic observatory has been investigated and, then, the effect of the displacement of geographical location on the magnitude of the earth's magnetic field has been examined by an experimental test. The results of simulation and data collection confirm the fact that geographic location for a variety of vehicles can be attainable just using earth's magnetic field data and there is no need to use any other navigation sensors.

Keywords Geomagnetic Navigation; Positioning; Geomagnetic Model

CITATION LINKS

- [1] New anti-jamming technique for GPS and GALILEO receivers using adaptive FADP filter [2] The earth's magnetic field and bird orientation [3] Sensing magnetic directions in birds: Radical pair processes involving cryptochrome [4] Key technique and development for geomagnetic navigation [5] A survey of geomagnetic navigation [6] Information fusion strategy and performance for marine Inertial/Geomagnetic navigation system [7] A novel feature extraction method of direction navigability analysis for geomagnetic navigation [8] IMM-UKF based underwater geomagnetic aided inertial navigation algorithm [9] Nonlinear filtering techniques for geomagnetic navigation [10] Research on underwater integrated navigation system based on SINS/DVL/magnetometer/depth-sensor [11] Bio-inspired geomagnetic navigation method for autonomous underwater vehicle [12] Autonomous navigation algorithm based on AUKF filter about fusion of geomagnetic and sunlight directions [13] On integration of a strapdown inertial navigation system with modern magnetic sensors [14] The geomagnetic filtering algorithm based on correlative probability density add-weight. In: Sun J, Yang C, Guo S, editors [15] A new geomagnetic matching navigation method based on multidimensional vector elements of earth's magnetic field [16] From global to regional analysis of the magnetic field on the sphere using wavelet frames [17] A novel weighting method for satellite magnetic data and a new global magnetic field model [18] An improved geomagnetic data selection algorithm for global geomagnetic field modelling [19] The magnetic field of the earth: Paleomagnetism, the core, and the deep mantle [20] The component compensation of geomagnetic field vector measurement system [21] Comparative study of models of earth's magnetic field derived from Oersted, CHAMP and SAC-C magnetic satellite data [22] The US/UK world magnetic model for 2015-2020 [Internet] [23] Foundations of geomagnetism

روش نوین مکان‌یابی با استفاده از میدان مغناطیسی زمین باشند. در این روش با استفاده از حسگرهای مغناطیسی، اطلاعات میدان مغناطیسی زمین قرائت شده و با مقایسه این اطلاعات با نقشه مغناطیسی که از قبل فراهم شده است، امکان تعیین موقعیت فراهم می‌شود (شکل ۱). لازم به ذکر است در روش تعیین موقعیت بر مبنای میدان مغناطیسی زمین، عموماً از سامانه اینرسی برای تعیین سرعت و وضعیت استفاده می‌شود و سامانه مغناطیسی، نقش کمک‌ناوبری را ایفا می‌کند [4-7].



شکل ۱) نمایی کلی از نحوه عملکرد ناوبری مغناطیسی

طی ۲۰ سال اخیر، بسیاری از تکنیک‌های فیلترینگ غیرخطی به مساله ناوبری مغناطیسی اعمال شده است. در این راستا پژوهش‌هایی [8, 9] به استفاده از فیلترهای غیرخطی در مساله ناوبری پرداخته و شبیه‌سازی‌های مطالعه‌ای [8] نشان داده است که فیلتر کالمن نمونه‌بردار، عملکرد رضایت‌بخش‌تری از فیلتر کالمن توسعه‌یافته دارد.

در سال ۲۰۱۷ محققان در پژوهشی [10]، یک سیستم ناوبری یکپارچه زیرسطحی مشتمل بر سیستم ناوبری اینرسی متصل به بدنه، سرعت سنج داپلری، حسگر مغناطیسی و حسگر عمق‌سنج را طراحی نموده‌اند. در این سیستم ناوبری به‌منظور یکپارچه‌سازی سیستم و حذف خطاهای جمع‌شونده، از فیلتر کالمن برای تلفیق داده‌ها و تخمین بهتر حالت‌ها استفاده شده است.

محققان [11] با الهام از طبیعت، روش دیگری از ناوبری مغناطیسی برای وسایل نقلیه بدون سرنشین زیرسطحی را بدون استفاده از اطلاعات پیشین میدان مغناطیس زمین ارائه داده‌اند. در این روش، ابتدا مساله جست‌وجو چندهدفه مطرح شده و سپس مدل ناوبری مغناطیسی با تولید یک تابع هزینه ایجاد می‌شود. برای این منظور با توجه به فرآیند مگنتو- تاکسی (فرآیندی که توسط گروهی از باکتری‌ها اجرا شده و شامل حرکت و هماهنگ‌سازی در پاسخ به میدان مغناطیسی زمین است)، از الگوریتم جست‌وجوی تکاملی چندهدفه برای توصیف فرآیند جست‌وجو و ناوبری استفاده می‌شود.

در پژوهشی [12] از ناوبری مغناطیسی به‌منظور کاربرد در ماهواره استفاده شده است. لیکن از آنجایی که مدل مغناطیس زمین دارای عدم قطعیت، دقت کم و تغییرپذیری درازمدت است و این نقصان‌ها روی دقت ناوبری تأثیر دارند، این مقاله استفاده از الگوریتم تلفیقی اطلاعات مغناطیسی زمین و نور خورشید برای بهبود دقت مدار را پیشنهاد نموده است. در این راستا مطالعه‌ای [13] نیز از ادغام سیستم ناوبری اینرسی متصل به بدنه با حسگر اندازه‌گیری میدان مغناطیسی استفاده نموده است.

پژوهشی [14] برای غلبه بر خطاهای خطی‌سازی از الگوریتم تطبیق فیلتر کالمن نمونه‌بردار، استفاده از تغییرات مغناطیسی مبتنی بر

شبیه‌سازی و داده‌برداری واقعی برای بررسی امکان دستیابی به موقعیت جغرافیایی با استفاده از میدان مغناطیسی زمین

کاوه کیانفر MSc

گروه مهندسی برق- کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

ابوالفضل رنجبرنوعی PhD

گروه مهندسی برق- کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

بهروز رضایی PhD

گروه مهندسی برق- کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

پیشرفت‌های علمی در زمینه مبانی ناوبری و همچنین دستیابی به تکنولوژی ساخت حسگرهای مغناطیسی در ابعاد کوچک با توان مصرفی پایین و دقت بالا، طی سال‌های اخیر، محققان را به فکر استفاده از میدان مغناطیسی زمین برای مکان‌یابی انداخت. در روش ناوبری با استفاده از میدان مغناطیسی زمین از حسگرهای دقیق مغناطیسی، داده‌های میدان مغناطیسی زمین قرائت می‌شود و با مقایسه این اطلاعات با نقشه‌های مرجع از طریق الگوریتم‌های تطبیق یا فیلترینگ، امکان تعیین موقعیت فراهم می‌شود. در این روش تعیین موقعیت، عموماً از سامانه اینرسی برای تعیین سرعت و وضعیت استفاده می‌شود و سامانه ناوبری مغناطیسی، نقش کمک‌ناوبری را ایفا می‌کند. در گام نخست برای دستیابی به سیستم تعیین موقعیت مغناطیسی، نیاز به تولید نقشه مرجع مغناطیسی است، لذا نیاز به تحلیل دقیق از میدان مغناطیسی زمین، کمیت و کیفیت تغییرات میدان در طول زمان‌های مختلف و در نقاط مختلف وجود دارد. در این مقاله از طریق استخراج داده‌های مغناطیسی یک رصدخانه مغناطیسی، امکان دستیابی به موقعیت جغرافیایی رصدخانه با استفاده از این داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت و سپس با انجام آزمایش عملی به بررسی میزان تأثیر جابه‌جایی موقعیت جغرافیایی بر مقدار میدان مغناطیسی زمین پرداخته شد. نتایج استخراج‌شده در بخش‌های شبیه‌سازی و داده‌برداری بر این واقعیت دلالت دارد که دستیابی به موقعیت جغرافیایی برای انواع وسایل نقلیه، تنها با استفاده از اطلاعات میدان مغناطیسی زمین و بدون نیاز به سایر حسگرهای ناوبری امکان‌پذیر است.

کلیدواژه‌ها: ناوبری مغناطیسی، موقعیت‌یابی، مدل مغناطیسی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

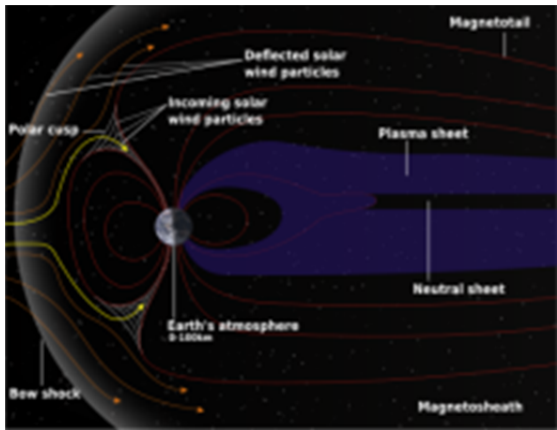
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۰

*نویسنده مسئول: a.ranjbar@nit.ac.ir

۱- مقدمه

در حال حاضر سیستم‌های جهانی موقعیت‌یابی ماهواره‌ای به‌عنوان گسترده‌ترین سیستم‌های ناوبری و تعیین موقعیت در دنیا به کار گرفته می‌شوند. به‌عنوان مثال سیستم GPS با کمک ۲۴ ماهواره که در مدار زمین دارد، در هر لحظه موقعیت کاربر را از لحاظ طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ارائه می‌دهد. طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده در شرایط خاص، امکان اخلاف در کارایی این سیستم وجود دارد و همچنین در محیط‌های مسقف از قبیل غارها، داخل ساختمان، زیر آب و غیره قابل استفاده نیست، لذا نمی‌توان از آن به‌عنوان یک سیستم قابل اعتماد در مأموریت‌های نظامی استفاده کرد [1].

پیشرفت‌های علمی در زمینه رفتار پرندگان مهاجر مشخص نمود که پرندگان از میدان مغناطیسی زمین برای تعیین جهت حرکت و موقعیت استفاده می‌نمایند [2, 3]، همچنین افزایش دقت حسگرهای اندازه‌گیری مغناطیسی باعث شد که محققان به فکر استفاده از



شکل ۲) تأثیرات متقابل مابین لایه مگنتوسفر جو و بادهای خورشیدی

بدین ترتیب میدان مغناطیسی زمین را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [22]:

$$B(r, t) = B_m(r, t) + B_c(r, t) + B_d(r, t) \quad (1)$$

از سویی دیگر، این حقیقت که میدان مغناطیسی زمین با زمان تغییر می‌نماید، بر پایه شواهد مستدل در چندین قرن گذشته به اثبات رسیده است. علت این تغییرات را می‌توان در هر یک از سه بخش میدان جست‌وجو نمود. بخش اصلی، جزء غالب میدان مغناطیسی زمین بوده و دارای کمترین تغییرات دوره‌ای طی یک بازه زمانی معین است. از سویی دیگر، میدان پوسته در سرتاسر زمین متغیر است، لیکن در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت می‌توان آن را ثابت فرض نمود. همچنین میدان خارجی نیز دارای تغییرات زمانی و مکانی منظم به صورت روزانه، ماهانه و سالانه است. جدول ۱، برخی از مهم‌ترین منابع ایجاد نوسان در میدان مغناطیسی زمین را نمایش می‌دهد. لذا با توجه به مطالب ارائه شده، پیش‌بینی نوسانات مغناطیسی امکان‌پذیر خواهد بود.

جدول ۱) برخی از مهم‌ترین نوسانات میدان ژئومغناطیس زمین [19]

نوع	پریود	دامنه (نانوتسلا)	عامل
نوسانات دوره‌ای خورشید	سال ۱۱	۲۰	لکه‌های خورشیدی
نوسانات سالیانه	سال ۱	۵	یونوسفر
نوسانات نیم‌سالانه	ماه ۶	۵	مدار زمین به دور خورشید
نوسانات طوفان‌های مغناطیسی	۲ تا ۲۷ روز	۱۰۰	طوفان‌های مغناطیسی
نوسانات روزانه ناشی از خورشید	روز ۱	۳۰ تا ۶۰	جریان‌های یونوسفر در بخش روز هر دو نیم‌کره
نوسانات روزانه ناشی از ماه	روز ۱	۱ تا ۳	جریان‌های یونوسفر در هر دو نیم‌کره
نوسانات ناشی از طوفان‌های قطبی	۱۰ دقیقه تا ۲ ساعت	۱۰۰۰	طوفان‌های قطبی

۳- مدل میدان مغناطیسی زمین

از آنجایی که میدان مغناطیسی زمین با گذشت زمان تغییر می‌نماید، دستیابی به مدلی که بتواند مقادیر میدان را در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه نماید، ضروری به نظر می‌رسد. برای این منظور طی چند دهه گذشته، تلاش‌های بسیاری برای ایجاد یک مدل جامع مغناطیسی با استفاده از ادغام داده‌های جمع‌آوری شده

چگالی احتمال را پیشنهاد داده است. برای صحت‌گذاری الگوریتم پیشنهادی، دو آزمایش در دریای جنوب چین انجام و نشان داده شده که با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، خطاهای دریفت سامانه ناوبری اینرسی کاهش یافته و دقت موقعیت و قابلیت اطمینان الگوریتم اصلاح شده به طور واضح بهبود یافته است.

یکی از آخرین پژوهش‌های انجام شده در این زمینه به استفاده از الگوریتم تکرار نزدیک‌ترین نقطه کانتور و مشاهده اسکالر میدان مغناطیسی زمین می‌پردازد [15]. در این مقاله، روش جدیدی برای ناوبری مغناطیسی مبتنی بر الگوریتم تطبیق بردار پیشنهاد شده است. عملکرد تطبیق و روش اصلاح با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن دقت بیشتر، قابل اعتمادتر و عملی‌تری را در مقایسه با الگوریتم تکرار نزدیک‌ترین نقطه کانتور سنتی نشان می‌دهد.

بدین ترتیب همان گونه که مشاهده می‌شود، در اکثر قریب به اتفاق پژوهش‌های انجام شده، از الگوریتم‌های فیلترینگ و تلفیق با سایر حسگرهای ناوبری به منظور اصلاح و بهبود عملکرد ناوبری مغناطیسی استفاده شده است. لیکن هدف از ارائه این پژوهش این است که از میدان مغناطیسی زمین به تنهایی و بدون اتکا به سامانه ناوبری اینرسی یا سایر حسگرهای اندازه‌گیری برای ناوبری استفاده شود.

از آنجایی که در روند ناوبری مغناطیسی، نیازمند استفاده از مدل‌های ریاضی برای تولید نقشه‌های میدان مغناطیسی زمین هستیم، در گام نخست به تحلیل دقیق میدان مغناطیسی زمین و همچنین اطلاع از کمیت و کیفیت آن و نحوه تهیه نقشه‌های میدان می‌پردازیم. امروزه مدل‌های ریاضی مختلفی به صورت محلی یا جهانی ارائه شده است [16]. این مدل‌های ریاضی، همواره در حال بهبود است و دانشمندان در تلاش برای نزدیک‌نمودن مدل ریاضی به داده‌های واقعی هستند [17, 18]. لذا در بخش‌های بعدی به معرفی میدان مغناطیسی و مدل ریاضی آن می‌پردازیم.

۲- میدان مغناطیسی زمین

زمین مانند بیشتر سیارات منظومه شمسی دارای میادین سیاره‌ای با منشأ داخلی است. یکی از این میدان‌ها حضور یک دوقطبی مغناطیسی با چگالی شار حدود ۶۰۰۰۰ نانوتسلا در نزدیکی قطبین و ۳۰۰۰۰ نانوتسلا در استوا است [19] که اصطلاحاً میدان مغناطیسی زمین یا میدان ژئومغناطیس نامیده می‌شود.

میدان مغناطیسی زمین، کمیتی برداری است که با تغییر موقعیت در فضا و گذشت زمان تغییر می‌کند [20]. مهم‌ترین منابع تولید این میدان به صورت زیر هستند [21]:

۱- بخش اصلی میدان (B_m): این مؤلفه بزرگ‌ترین مؤلفه میدان مغناطیسی زمین (حدود ۹۵ تا ۹۷٪ کل میدان) بوده و اعتقاد بر آن است که جریان‌های الکتریکی حاصل از سیالات هسته بیرونی زمین منشأ آن است.

۲- میدان ناشی از پوسته (B_c): بخشی از میدان مغناطیسی ده که با خواص مغناطیسی سنگ‌های پوسته زمین مرتبط است و یک تا ۲٪ کل میدان مغناطیسی زمین را شامل می‌شود.

۳- میدان خارجی (B_d): این مؤلفه بخش نسبتاً کوچکی از میدان مغناطیسی زمین را تشکیل می‌دهد که منشأ آن خارج از کره زمین بوده و اعتقاد بر آن است که ریشه در تأثیرات متقابل مابین لایه مگنتوسفر جو و همچنین بادهای خورشیدی شکل ۲ و میادین مغناطیسی ناشی از خورشید، ماه و سایر سیارات منظومه شمسی دارد. این بخش نیز حدود یک تا ۲٪ کل میدان مغناطیسی زمین را

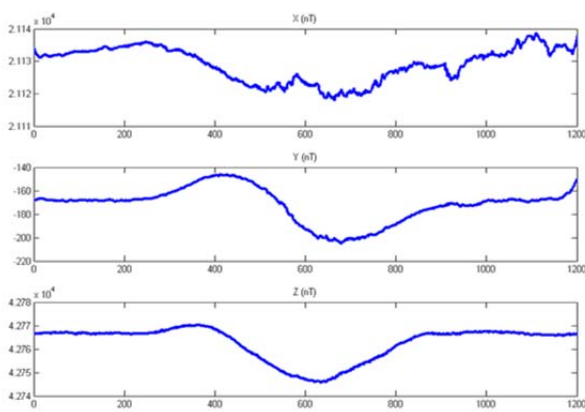
۴- استخراج موقعیت جغرافیایی بر مشاهدات مغناطیسی زمین

امروزه ایستگاه‌های (رصدخانه) بسیاری در سطح جهان در حال اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین هستند و به ثبت لحظه‌به‌لحظه مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین می‌پردازند. لذا در این بخش، ابتدا به بررسی مقادیر واقعی میدان مغناطیسی زمین در یک رصدخانه مغناطیسی پرداخته و سپس با استفاده از تحلیل این نتایج نشان داده خواهد شد که تعیین موقعیت با استفاده از داده‌های میدان مغناطیسی زمین و بدون استفاده از هیچ داده کمکی دیگری امکان‌پذیر است.

برای این منظور، اطلاعات روزانه یکی از این رصدخانه‌های مغناطیسی واقع در پاریس (فرانسه) در طول جغرافیایی ۲۰۳ درجه و عرض جغرافیایی ۴۹ درجه استخراج شد (جدول ۲). نمودار ۱، گراف‌های مربوط به داده‌های میدان مغناطیسی زمین در مؤلفه‌های X ، Y و Z این ایستگاه را در تاریخ ۱۰ اکتبر ۲۰۱۰ نشان می‌دهد.

جدول ۲) مشخصات رصدخانه مغناطیسی پاریس

نام	چامبون له فورث
تاریخ تأسیس	۲۰۱۰-۰۱-۰۱
طول و عرض جغرافیایی	۴۹N, ۲۰۳ E
کشور	فرانسه



نمودار ۱) دامنه سه مؤلفه میدان مغناطیسی زمین در طول یک روز در ایستگاه پاریس

از سویی دیگر می‌توان نقشه مغناطیسی منطقه را با استفاده از مدل‌های موجود محاسبه نمود. در این تحقیق از مدل IGRF استفاده شده که نتایج آن برای سه مؤلفه میدان مغناطیسی زمین در محدوده مختصات طول جغرافیایی صفر تا ۱۰ درجه با دقت ۰.۱ درجه و عرض جغرافیایی صفر تا ۵۰ درجه با دقت یک درجه برای سه مؤلفه X ، Y و Z در نمودارهای ۴-۲ نشان داده شده است.

بدین ترتیب همان‌طور که در نمودار ۱ دیده می‌شود، در هر نقطه از زمین، مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در طول زمان، مقدار ثابتی نیستند. از این رو برای تعیین موقعیت، تنها با استفاده از مشاهدات میدان مغناطیسی زمین، در هر مؤلفه با توجه به تغییرات همان مؤلفه میدان، به‌جای خود مشاهده یک بازه به مرکزیت مشاهده و انحراف معیار تغییرات مشاهده میدان مغناطیسی را در نظر می‌گیریم. بدین ترتیب در ورودی مدل، برای هر یک از سه مؤلفه اصلی میدان مغناطیسی، محدوده‌های جغرافیایی را مشخص می‌کنیم که دامنه تغییرات میدان در آنها در بازه مورد نظر نمودار قرار می‌گیرد و نتایج آن در محدوده تغییرات یک روز ایستگاه پاریس مطابق با نمودارهای ۷-۵ است.

در دوره‌های زمانی مختلف و استفاده از مشاهدات زمینی، دریایی، هوایی و در این اواخر ماهواره‌ای صورت گرفته است [21].

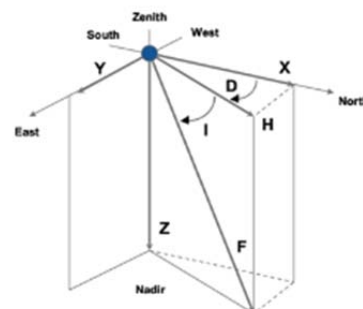
میدان مغناطیسی اصلی زمین (B_m) یک میدان پتانسیلی است که می‌توان آن را در مختصات کروی برحسب مؤلفه‌های طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از آب‌های آزاد و زمان نوشت. در برخی پژوهش‌ها [22, 23] به تفصیل در خصوص روابط ریاضی حاکم بر میدان مغناطیسی زمین پرداخته شده است.

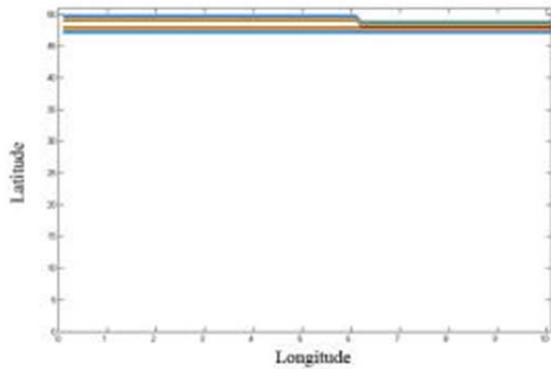
علاوه بر مؤلفه‌های X ، Y و Z میدان مغناطیسی زمین، مؤلفه‌های دیگری نیز تعریف شده‌اند. این مؤلفه‌ها مستقل نیست و می‌توان آنها را با اطلاع از مؤلفه‌های X ، Y و Z محاسبه نمود. یکی از این مؤلفه‌ها، انحراف مغناطیسی نامیده می‌شود. در حقیقت قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین بر هم منطبق نیستند و عقربه مغناطیسی قطب‌نما امتداد شمال- جنوب مغناطیسی را به صورت تقریبی معین می‌کند. لذا در هر نقطه، صفحه‌ای که عقربه مغناطیسی در آن قرار می‌گیرد را اصطلاحاً صفحه نصف‌النهار مغناطیسی آن نقطه و خط مستقیم گذرنده از نقطه که در امتداد آن این صفحه قطع می‌شود را نصف‌النهار مغناطیسی می‌نامند. بدین ترتیب زاویه بین نصف‌النهار مغناطیسی و نصف‌النهار جغرافیایی گذرنده بر آن نقطه (شمال جغرافیایی) را زاویه انحراف مغناطیسی می‌نامند و معمولاً با D نشان می‌دهند.

از سویی دیگر، خطوط میدان مغناطیسی زمین معمولاً به موازات سطح زمین نیستند. این بدان معناست که القای میدان مغناطیسی زمین در صفحه افقی گذرنده از نقطه اندازه‌گیری قرار ندارد، بلکه زاویه معینی با این سطح را نشان می‌دهد. این زاویه را میل (شیب) میدان مغناطیسی می‌نامند و جهت مثبت آن به سمت پایین است. زاویه میل را با I نشان داده می‌شود و در نقاط مختلف سطح زمین متفاوت است.

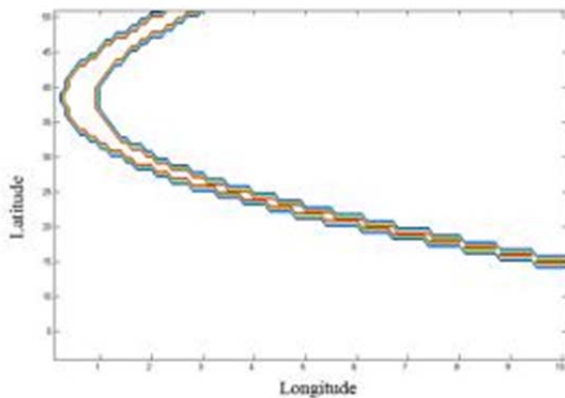
در نهایت، شدت میدان مغناطیسی، متناسب با نیرویی است که میدان در هر نقطه بر یک آهن‌ریا اعمال می‌نماید و با نوتیشن F و واحد آرستد یا تسلا نمایش داده می‌شود. بزرگی شدت میدان ژئومغناطیس در قطب شمال و جنوب به ترتیب برابر ۶۰۰۰ و ۷۰۰۰ نانوتسلا بوده که این مقدار بیشترین مقدار شدت میدان مغناطیسی زمین است. همچنین کمترین مقدار شدت میدان مغناطیس زمین مربوط به نقطه‌ای در اقیانوس آرام (در شمال شیلی) و در حدود ۲۵۰۰۰ نانوتسلا است.

لازم به ذکر است مؤلفه‌های میدان F معمولاً در سه امتداد رایج شمال (X)، شرق (Y) و پایین (Z) اندازه‌گیری شده و مؤلفه افقی این میدان با نوتیشن H نشان داده می‌شود. بدین ترتیب می‌توان بردار میدان مغناطیس زمین را توسط یک مجموعه سه‌عنصری مناسب از میان هفت عنصر ممکن (X , Y , Z , H , F , I , D) توصیف کرد. این مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در شکل ۳ نمایش داده شده است.

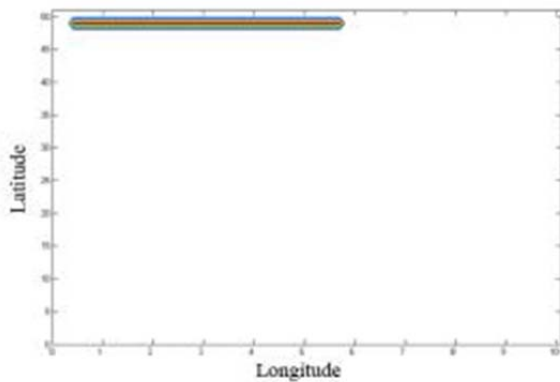
شکل ۳) هفت المان از بردار میدان مغناطیسی B_m مربوط به هر نقطه از فضا



نمودار ۵) موقعیت‌های جغرافیایی که دامنه مدل مغناطیسی در آنها برابر با دامنه تغییرات مؤلفه X میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در پاریس است.



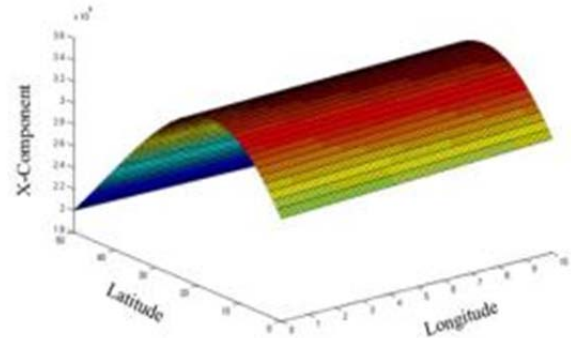
نمودار ۶) موقعیت‌های جغرافیایی که دامنه مدل مغناطیسی در آنها برابر با دامنه تغییرات مؤلفه Y میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در پاریس است.



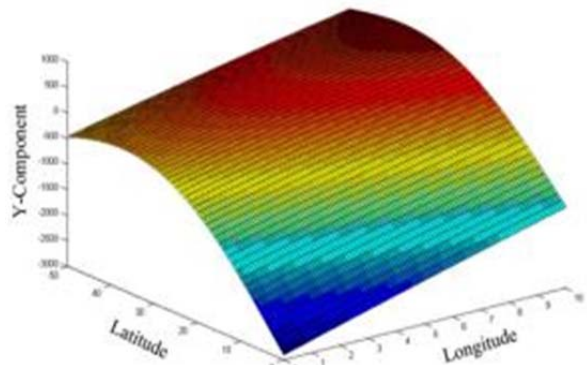
نمودار ۷) موقعیت‌های جغرافیایی که دامنه مدل مغناطیسی در آنها برابر با دامنه تغییرات مؤلفه Z میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در پاریس است.

در شکل ۴ نقاط روشن، نقاطی است که مدل مغناطیسی زمین برابر مقدار میدان اندازه‌گیری شده با در نظر گرفتن محدوده تغییرات میدان در پاریس بوده و محدوده‌ای که از همه روشن‌تر است، مربوط به اشتراک مکان‌هایی است که هر سه مؤلفه X ، Y و Z مدل مغناطیسی به صورت هم‌زمان با مقدار اندازه‌گیری شده همخوانی دارد. شکل ۵، نمای دقیق‌تری از منطقه شکل ۴ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، نقطه با طول جغرافیایی 2.3° درجه و عرض جغرافیایی 49° درجه که همان مکان دقیق ایستگاه اندازه‌گیری پاریس بوده، در محدوده جواب قرار گرفته است. این بدین معناست که با استفاده از مدل مغناطیسی زمین و داده‌های اندازه‌گیری شده، امکان دستیابی به محدوده جغرافیایی

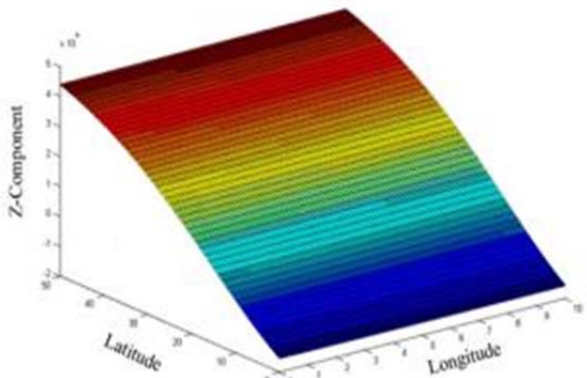
هر یک از نمودارهای ۵-۷ به‌تنهایی کاربردی ندارند و تنها یک محدوده جغرافیایی از مکان احتمالی رصدخانه را مشخص می‌نمایند. لذا شرط لازم برای اینکه بتوان از داده‌های میدان مغناطیسی زمین، موقعیت جغرافیایی مکان رصدخانه مغناطیسی را تعیین کرد، دسترسی به محدوده موقعیت جغرافیایی است که هر سه مقدار مؤلفه X ، Y و Z اندازه‌گیری شده را به صورت هم‌زمان شامل شود. لذا با اشتراک‌گرفتن از نمودارهای ۵-۷، مکان نقاطی مشخص می‌شود که مقدار سه مؤلفه میدان مغناطیسی براساس نقشه‌های تولیدشده در نمودارهای ۲-۴ برابر با مقدار میدان اندازه‌گیری توسط رصدخانه است.



نمودار ۲) دامنه مؤلفه X مدل میدان مغناطیسی زمین در محدوده جغرافیایی مورد نظر



نمودار ۳) دامنه مؤلفه Y مدل میدان مغناطیسی زمین در محدوده جغرافیایی مورد نظر



نمودار ۴) دامنه مؤلفه Z مدل میدان مغناطیسی زمین در محدوده جغرافیایی مورد نظر

نمایشگر ۵ رقمی این حسگر دقت یک نانوتسلا در یک میدان ۱۰۰۰۰ نانوتسلا را مهیا می‌سازد. بنابراین تغییرات کوچک در میدان مغناطیسی را می‌توان در یک میدان بزرگ مانند میدان مغناطیسی زمین اندازه‌گیری نمود.

از سویی دیگر لازم است تا حسگر به نحوی تثبیت شود که اولاً در وضعیت پایداری قرار داشته باشد، ثانیاً بتوان حسگر را در راستای لازم قرار داد و ثالثاً مواد مغناطیسی و فرو مغناطیسی در اطراف حسگر وجود نداشته باشد که بر میدان مغناطیسی قرائت شده تأثیر نگذارد. لذا پایه‌ای، مطابق شکل ۶ ساخته شد که بتواند قابلیت شش‌درجه آزادی برای حسگر مغناطیسی را فراهم کند. همچنین لازم است حسگر در محیطی دور از مواد مغناطیسی و فرومغناطیس باشد. به همین خاطر با استفاده از کابل رابط ۱/۵ متری، حسگر از دستگاه دریافت داده دور می‌شود.

بدین ترتیب با توجه به تمام موارد اشاره شده در فوق، تست‌های متعددی تعریف و اجرا شد، که در ادامه نتایج برخی از این تست‌ها به صورت تست شماره ۱ (شکل ۷؛ جدول ۳)، تست شماره ۲ (شکل ۸؛ جدول ۴) و تست شماره ۴ (شکل ۹؛ جدول ۵) ارائه می‌شود.



شکل ۶) نمایی از حسگر به همراه پایه ساخته شده

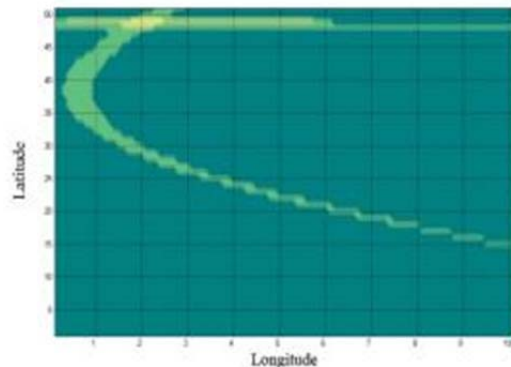


شکل ۷) نمایی از منطقه تست و فاصله بین دو موقعیت جغرافیایی (تست شماره ۱)

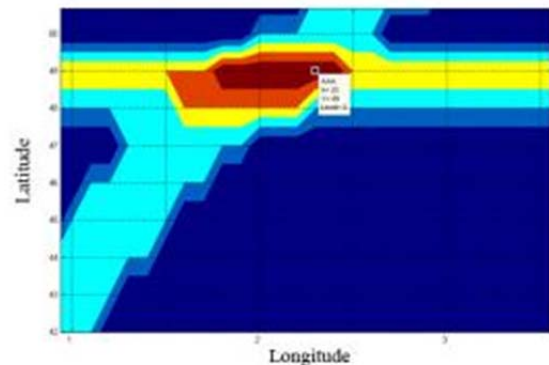
جدول ۳) نتایج تست شماره ۱

مسافت (متر)	شدت میدان (نانوتسلا)	میانگین تغییرات (متر بر نانوتسلا)	طول و عرض جغرافیایی
۲۵۱.۲	۲۰	۱۲.۵۶	نقطه اول
			نقطه دوم
			۳۵:۴۴:۱۰.۸N ۵۱:۱۲:۳۸.۹E
			۳۵:۴۴:۵.۸N ۵۱:۱۲:۴۶.۸E

رصدخانه مغناطیسی از روی میدان مغناطیسی اندازه‌گیری وجود دارد. بدیهی است با بهبود دقت مدل مغناطیسی زمین و حسگر مغناطیسی، نواحی پررنگ‌تر (تخمین مکان اندازه‌گیری) کوچک‌تر می‌شود و در نهایت به یک نقطه موردنظر خواهیم رسید.



شکل ۴) اشتراک نقاطی که دامنه میدان مغناطیسی مدل برابر مقدار اندازه‌گیری شده در پاریس است.



شکل ۵) اشتراک نقاطی که دامنه میدان مغناطیسی مدل برابر مقدار اندازه‌گیری شده در پاریس است.

۵- تست تجربی تأثیر جابه‌جایی موقعیت جغرافیایی بر تغییرات میدان مغناطیسی زمین

با توجه به روابط ریاضی حاکم بر مدل میدان مغناطیسی زمین، مشخص شد که جابه‌جایی موقعیت جغرافیایی، متناظر با تغییر مقدار میدان مغناطیسی زمین است. لذا برای بررسی میزان کارایی ایده پیشنهادی مقاله، آزمایشی طراحی شد، که در یک محیط جغرافیایی که عوامل اغتشاش تأثیر گذار بر میدان مغناطیسی زمین از قبیل سازه‌های آهنی، کابل‌های فشار قوی برق و غیره در آن محدوده وجود ندارد، به ثبت مؤلفه F (مقدار اسکالر) میدان مغناطیسی، طی فاصله زمانی اندک برای دو موقعیت جغرافیایی متفاوت پرداخته شود. برای این منظور، مختصات جغرافیایی دو نقطه با دستگاه GPS، ثبت و سپس مسافت بین دو نقطه، محاسبه و در خاتمه تفاضل مؤلفه F میدان توسط حسگر قرائت شده محاسبه می‌شود. بدین ترتیب به کمک این آزمایش میزان جابه‌جایی مکانی لازم برای مشاهده تغییرات محسوس میدان مغناطیسی زمین مشخص می‌شود.

به منظور ثبت نتایج تجربی از یک حسگر مغناطیسی FVM-400 استفاده شد. این حسگر از تکنولوژی فلاکس‌گیت برای اندازه‌گیری سه مؤلفه X ، Y ، Z میدان مغناطیسی زمین استفاده می‌کند.

عدم قطعیت ناشی از اثر میدان مغناطیسی بدنه وسیله نقلیه نیز اشاره کرد که تا حدودی با استفاده از روش تفاضل، قابل حذف است و می‌توان عدم قطعیت مقدار میدان قرائت شده توسط حسگر مغناطیسی را کاهش داد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، میدان مغناطیسی زمین مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از روابط ریاضی حاکم بر معادلات مغناطیسی زمین، مدل مناسبی برای شبیه‌سازی میدان مغناطیسی زمین انتخاب و پیاده‌سازی شد. با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده، دستیابی به موقعیت جغرافیایی از طریق میدان مغناطیسی زمین مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد به‌تنهایی تعیین موقعیت جغرافیایی از روی میدان مغناطیسی زمین با در نظر گرفتن ملاحظات خاص و خطای نسبتاً بالا (حدود چند کیلومتر) در تعیین موقعیت امکان‌پذیر است. لازم به ذکر بوده که دقت در تعیین موقعیت با استفاده از میدان مغناطیسی زمین، وابسته به شدت تغییرات میدان مغناطیسی در آن منطقه نیز است. در مناطقی که تغییرات میدان مغناطیسی زمین شدیدتر و خطوط میدان مغناطیسی به هم نزدیک‌تر است، دقت در تعیین موقعیت افزایش می‌یابد و بالعکس در مناطقی که شدت تغییرات میدان مغناطیسی زمین کمتر و خطوط میدان مغناطیسی به هم دورتر است، دقت در تعیین موقعیت کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل این که مدل نمودن تمامی پارامترهای تأثیرگذار بر مقدار میدان مغناطیسی زمین بالأخص عوامل خارجی نظیر (مگنوسفر و یونسفر) بسیار مشکل بوده، بررسی دستیابی به ناوبری مغناطیسی از روند تفاضلی شدت میدان مغناطیسی مورد توجه قرار گرفته است و می‌توان جمع‌بندی نمود که امکان دستیابی به موقعیت جغرافیایی از روی شدت میدان مغناطیسی امکان‌پذیر است.

از ویژگی‌های بارز این روش تعیین موقعیت می‌توان به عدم وابستگی تعیین موقعیت با گذشت زمان اشاره کرد. حتی می‌توان ادعا نمود هرچه زمان پرواز وسیله افزایش یابد، دقت تعیین موقعیت نیز افزایش می‌یابد و دلیل این موضوع، افزایش مشاهدات ناشی از تغییرات میدان مغناطیسی زمین است. این خاصیت میدان مغناطیسی می‌تواند باعث تحول در حوزه ناوبری وسایل پروازی شود.

تشکر و قدردانی: مقاله حاضر بخشی از رساله دکترای تخصصی مهندسی برق- کنترل مصوب دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل است که نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از مسئولان پژوهشی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر و هیئت داوران پایان‌نامه که ما را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تا کنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: کاوه کیانفر (نویسنده اول)، پژوهشگر/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ ابوالفضل رنجبرنوعی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس (۳۰٪)؛ بهروز رضایی (نویسنده سوم)،



شکل ۸) نمایی از منطقه تست و فاصله بین دو موقعیت جغرافیایی (تست شماره ۲)

جدول ۴) نتایج تست شماره ۲

مسافت (متر)	شدت میدان (نانوتسلا)	میانگین تغییرات (متر بر نانوتسلا)	طول و عرض جغرافیایی	
			نقطه اول	نقطه دوم
۶۴۵.۷	۱۲	۵۳.۸۰	۳۵:۴۶:۵۸.۳N	۳۵:۴۶:۷.۴N
			۵۱:۳۶:۳۴.۸E	۵۱:۳۶:۳۴.۳E



شکل ۹) نمایی از منطقه تست و فاصله بین دو موقعیت جغرافیایی (تست شماره ۳)

جدول ۵) نتایج تست شماره ۳

مسافت (متر)	شدت میدان (نانوتسلا)	میانگین تغییرات (متر بر نانوتسلا)	طول و عرض جغرافیایی	
			نقطه اول	نقطه دوم
۷۴.۸۱	۳	۲۴.۹۳	۳۵:۴۴:۱۰.۸N	۳۵:۴۴:۸.۴N
			۵۱:۱۲:۴۶.۸E	۵۱:۱۲:۴۶.۴E

بدین ترتیب همان گونه که ذکر شد، هدف از انجام این تست، بررسی اثرات میدان ناشی از هسته و پوسته زمین است. با در نظر گرفتن این نکته که داده‌برداری مغناطیسی از دو موقعیت جغرافیایی با فاصله زمانی اندک صورت می‌پذیرد، لذا عوامل خارجی میدان ناشی از اثرات مگنوسفر و یونسفر که مدل نمودن آن بسیار مشکل بوده، در هر دو موقعیت تقریباً ثابت است و در تفاضل مقدار اسکالر میدان قرائت شده توسط حسگر حذف می‌شود.

به دلیل عدم قطعیت در مقدار قرائت شده توسط حسگر مغناطیسی، عدم قطعیت در مدل‌های مغناطیسی و حذف عوامل اغتشاشی که در دو اندازه‌گیری مشترک هستند و امکان تفکیک این عوامل از مقدار صحیح میدان مغناطیسی وجود ندارد، از مقدار تغییرات میدان مغناطیسی زمین در مابین دو نقطه (روش تفاضل) برای شناسایی مقدار جابه‌جایی مکانی، در این آزمایش استفاده شده است.

اگر حسگر مغناطیسی برای تعیین موقعیت روی وسیله نقلیه نصب شود، علاوه بر عوامل عدم قطعیتی که اشاره شد، می‌توان به

2017;28(6):1203-1209.

12- Hua B, Zhang Z, Wu Y, Chen Z. Autonomous navigation algorithm based on AUKF filter about fusion of geomagnetic and sunlight directions. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*. 2018;11(4):471-485.

13- Tkorenko MY, Pavlov BV, Karshakov EV, Volkovitsky AK. On integration of a strapdown inertial navigation system with modern magnetic sensors. 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 28-30 May 2018, St. Petersburg, Russia. Piscataway: IEEE; 2018.

14- Chong Y, Chai H, Liu W, Kong Y, Pan Z, Chen G. The geomagnetic filtering algorithm based on correlative probability density add-weight. In: Sun J, Yang C, Guo S, editors. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2018 proceedings, CSNC 2018, lecture notes in electrical engineering*. 499th Volume. Singapore: Springer; 2018. pp. 511-523.

15- Chen Z, Zhang Q, Pan M, Chen D, Wan C, Wu F, et al. A new geomagnetic matching navigation method based on multidimensional vector elements of earth's magnetic field. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018;15(8):1289-1293.

16- Holschneider M, Chambodut A, Mandea M. From global to regional analysis of the magnetic field on the sphere using wavelet frames. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2003;135(2-3):107-124.

17- Thomson AWP, Hamilton B, Macmillan S, Reay SJ. A novel weighting method for satellite magnetic data and a new global magnetic field model. *Geophysical Journal International*. 2010;181(1):250-260.

18- Thomson AWP, Lesur V. An improved geomagnetic data selection algorithm for global geomagnetic field modelling. *Geophysical Journal International*. 2007;169(3):951-963.

19- Merrill RT, Mc Elhinny MW, Mc Fadden PL. The magnetic field of the earth: Paleomagnetism, the core, and the deep mantle. Mc Elhinny MW, Mc Fadden PL, editors. San Diego: Academic Press; 1998.

20- Pang H, Zhu XJ, Pan M, Zhang Q, Wan C, Luo S, et al. The component compensation of geomagnetic field vector measurement system. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;381:390-395.

21- Vichare G, Rajaram R. Comparative study of models of earth's magnetic field derived from Oersted, CHAMP and SAC-C magnetic satellite data. *The Journal of Indian Geophysical Union*. 2009;13(1):33-42.

22- Chulliat A, Macmillan S, Alken P, Beggan C, Nair M, Hamilton B, et al. The US/UK world magnetic model for 2015-2020 [Internet]. Washington DC: National Oceanic and Atmospheric Administration; 2015 [cited 2015 August 31]. Available from: http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/510709/1/WMM2015_Report.pdf

23- Backus G, Parker R, Constable C. *Foundations of geomagnetism*. New York: Cambridge University Press; 1996.

Y - پی نوشت

B_m	میدان ناشی از هسته
B_c	میدان ناشی از پوسته
B_d	میدان خارجی
r	موقعیت جغرافیایی
t	زمان
X	مؤلفه برداری میدان در راستای شمال
Y	مؤلفه برداری میدان در راستای شرق
Z	مؤلفه برداری میدان در راستای پایین
nT	نانوتسلا

منابع

- Landry RJ, Boutin P, Constantinescu A. New anti-jamming technique for GPS and GALILEO receivers using adaptive FADP filter. *Digital Signal Processing*. 2006;16(3):255-274.
- Wiltschko W. The earth's magnetic field and bird orientation. *Trends in Neurosciences*. 1980;3(6):140-144.
- Wiltschko R, Wiltschko W. Sensing magnetic directions in birds: Radical pair processes involving cryptochrome. *Biosensors (Basel)*. 2014;4(3):221-242.
- Zhou J, Ge ZL, Shi GG, Liu YX. Key technique and development for geomagnetic navigation. *Journal of Astronautics*. 2008;5.
- Guo CF, Hu ZD, Zhang SF, Cai H. A survey of geomagnetic navigation. *Journal of Astronautics*. 2009;4.
- Mu H, Ren ZX, Hu XP, Ma HX. Information fusion strategy and performance for marine Inertial/Geomagnetic navigation system. *Journal of Chinese Inertial Technology*. 2007;3.
- Xiao J, Duan X, Qi X, Shi J. A novel feature extraction method of direction navigability analysis for geomagnetic navigation. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*. 2018(1):47-59.
- Liu M, Wang H. IMM-UKF based underwater geomagnetic aided inertial navigation algorithm. *Proceedings of the 2012 Second International Conference on Electric Information and Control Engineering*, April 6-8, 2012. Washington DC: IEEE Computer Society; 2012. p. 793-796.
- Guo C, Cai H, Hu Z. Nonlinear filtering techniques for geomagnetic navigation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering*. 2014;228(2):305-320.
- Yuan D, Ma X, Liu Y, Yang L, Wu Y, Zhang X. Research on underwater integrated navigation system based on SINS/DVL/magnetometer/depth-sensor. *OCEANS 2017*, 19-22 June 2017, Aberdeen, UK. Piscataway: IEEE; 2017.
- Li H, Liu M, Liu K. Bio-inspired geomagnetic navigation method for autonomous underwater vehicle. *Journal of Systems Engineering and Electronics*.