



## بهبود محلی مدل میدان ژئومغناطیس به روش حداقل مربعات

کاوه کیانفر<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل رنجبرنوعی<sup>۲</sup> و بهروز رضایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۰

\* نویسنده مسئول مکاتبات: kaveh.kianfar@yahoo.com

### چکیده

مدل‌های ژئومغناطیس توصیفی جهان‌شمول از میدان مغناطیسی زمین را برای مقاصد علمی و کاربردی عرضه می‌نمایند. لیکن از آنجایی که میدان ژئومغناطیس با گذشت زمان تغییر می‌نماید، دستیابی به مدلی که بتواند مقادیر میدان را در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه نماید امری ضروری و بسیار پیچیده است. بدین منظور طی چند دهه گذشته تلاش‌های بسیاری برای ایجاد یک مدل جامع ژئومغناطیس با استفاده از ادغام داده‌های جمع‌آوری شده در دوره‌های زمانی مختلف صورت گرفته است. بررسی‌های زمانی و مکانی این داده‌ها نشان‌گر آن است که همه مؤلفه‌های میدان واقعی در بازه‌های زمانی معین همواره دارای یک مقدار متوسط می‌باشند؛ که مقادیر لحظه‌ای حول آن نوسان می‌نمایند. این نوسانات ناشی از برخی عوامل خارجی مؤثر بر میدان ژئومغناطیس می‌باشند؛ که معمولاً در مدل‌های مرجع میدان مغناطیسی زمین به دلیل دیدگاه جهانی چندان مورد توجه قرار نمی‌گیرد. لذا هدف از این مقاله بررسی نوسانات فرکانس بالای میدان مغناطیسی زمین و تخمین مؤلفه‌های مؤثر بر آن است. برای این منظور یک مدل ریاضی نوسانات میدان مغناطیسی ناشی از عوامل خارجی نظیر (فعالیت خورشیدی (SA)، دوره ماه (LA)، زمان محلی (LT) و روز سال (DOY) مشتمل بر ۲۷۰ پارامتر پیشنهاد شده و سپس با استفاده از مشاهدات طولانی‌مدت رصدخانه‌های میدان مغناطیسی و روش حداقل مربعات خطا به تخمین نوسانات فرکانس بالای میدان ژئومغناطیس پرداخته شده است. مقایسه مشاهدات واقعی رصدخانه‌ها با نتایج ناشی از تلفیق مدل مرجع و مدل محلی پیشنهادی این مقاله بیانگر افزایش ۹۰ درصدی دقت محلی در مدل‌سازی میدان مغناطیسی زمین است. از سویی دیگر محاسبه مدل محلی در رصدخانه‌های مختلف و اعمال ضرایب تخمینی هر رصدخانه به رصدخانه دیگر نشان داد که مدل تغییرات محلی میدان مغناطیسی زمین برای عرض‌های جغرافیایی مختلف (در یک طول جغرافیایی) و همچنین در طول‌های جغرافیایی مختلف (در یک عرض جغرافیایی) متفاوت است. لذا تعیین ضرایب این مدل تنها به صورت محلی امکان‌پذیر بوده و با تغییر مختصات جغرافیایی نسبت به مختصات محل رصدخانه از تأثیر آن کاسته می‌شود.

### واژگان کلیدی

میدان مغناطیسی زمین  
حداقل مربعات  
مدل‌سازی  
نوسانات روزانه میدان مغناطیسی

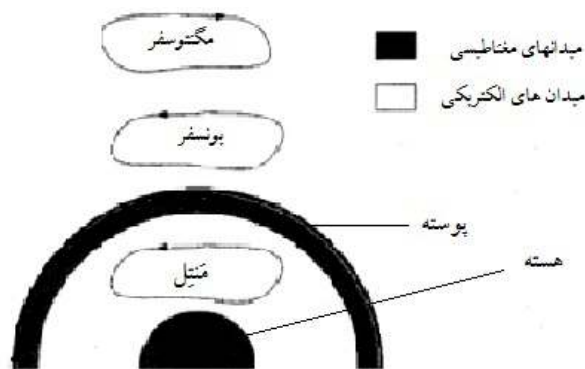
۱- مقدمه

زمین مانند بیشتر سیارات منظومه شمسی، دارای میدان‌های سیاره‌ای با منشأ داخلی است. یکی از این میدان‌ها ناشی از وجود یک دوقطبی مغناطیسی با چگالی شار حدود ۶۰۰۰۰ نانو تسلا در نزدیکی قطبین و ۳۰۰۰۰ نانو تسلا در استوا است (Schmucker, 1985).

میدان حاصل از دوقطبی مغناطیسی زمین (میدان ژئومغناطیس) کمیتی برداری است که با تغییر موقعیت در فضا و تغییرات زمانی تغییر می‌نماید (بلندی و همکاران، ۱۳۸۷). این تغییرات به صورت رابطه (۱) نشان داده می‌شود (Vichare et al., 2009).

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

که در آن میدان اصلی و یا میدان ناشی از هسته (Bm)، میدان ناشی از پوسته یا لیتوسفر (Bc) و میدان خارجی (Bd) ناشی از یونسفر و مگنتوسفر هستند (Maus et al., 2015). شکل ۱ نیز بخش‌های مختلف تأثیرگذار بر روی میدان مغناطیسی زمین را نشان می‌دهد.



شکل ۱: بخش‌های مختلف تأثیرگذار در میدان مغناطیسی زمین

همان‌طور که در شکل فوق نیز مشاهده می‌شود عوامل گوناگونی بر روی میدان مغناطیسی زمین اثرگذار هستند؛ که هر کدام از این عوامل به همراه میزان تأثیر آن بر روی میدان مغناطیسی زمین در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱: مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین در منطقه استوا

مؤلفه	منشأ	میزان تأثیر به درصد	میزان تأثیر بر حسب نانو تسلا
میدان اصلی	جریان‌های الکتریکی حاصل از سیالات هسته بیرونی زمین	۹۵-۹۷	۲۹۱۰۰
	خواص مغناطیسی سنگ‌های پوسته	۱-۲	۲۰۰-۳۰۰
میدان مغناطیسی پوسته	زمین، میدان القایی به‌جامانده از پوسته و لایه بیرونی		

میدان مغناطیسی خارجی	تأثیرات متقابل مابین لایه‌های مگنتوسفر، یونسفر و همچنین طوفان‌های خورشیدی
۲۰۰-۳۰۰	۱-۲

همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌گردد میزان تأثیر عوامل خارجی بر روی میدان مغناطیسی زمین در مرتبه تأثیرات ناشی از پوسته است؛ لیکن این میدان خارجی در مدل‌های مرجع میدان مغناطیسی زمین به دلیل دیدگاه جهانی این مدل‌ها چندان مورد توجه قرار نمی‌گیرد.

علاوه بر میدان مغناطیسی خارجی برخی عوامل دیگری نیز وجود دارند که سبب بروز تغییراتی در میدان مغناطیسی زمین می‌شوند. این عوامل در دوره‌های زمانی منظم و بعضاً نامنظم رخ داده و سبب بروز خطا در مقادیر پیش‌بینی شده می‌گردد. بدیهی است شناخت عوامل مذکور و اعمال آن‌ها در مدل، در صورت تخمین درست تغییرات، می‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش دقت مدل محلی داشته باشند. جدول ۲ به برخی از این عوامل اشاره شده است.

جدول ۲: برخی از مهم‌ترین نوسانات میدان ژئومغناطیس زمین (Schmucker, 1985)

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

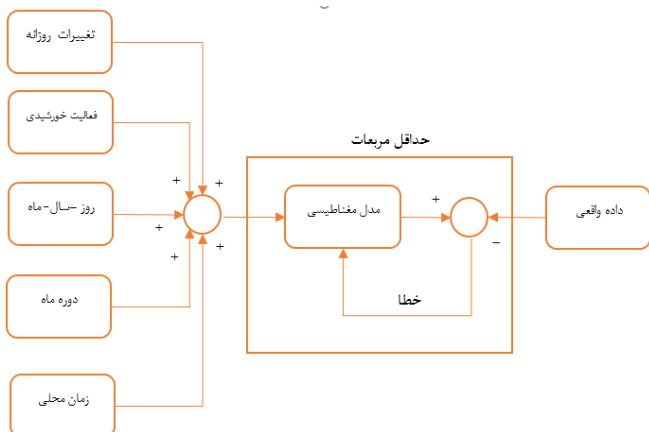
همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نوسانات میدان مغناطیسی زمین متأثر از عوامل گوناگون دستخوش تغییرات می‌گردد. این تغییرات میدان بر پایه شواهد مستدل در چندین قرن گذشته به اثبات رسیده و در واقع این موضوع از دلایل اصلی مشاهدات ثابت و پایدار میدان مغناطیسی زمین است. از سویی دیگر تغییرات میدان مغناطیسی زمین (شامل تغییرات در شدت، میل و انحراف مغناطیسی) در یک نقطه ثابت نبوده و برحسب زمان نیز تغییر می‌نمایند. علت این تغییرات در میدان ژئومغناطیس را می‌توان در هر یک از سه بخش میدان جستجو نمود. بخش اصلی جزء غالب میدان ژئومغناطیس بوده و دارای کمترین

لکه‌های خورشیدی، فصل‌ها توسط یک شبکه عصبی مدل نمود (Sutcliffe et al., 1999). در سال ۲۰۰۱ گلسنر و همکاران با استفاده از شبکه‌های عصبی شعاعی نشان دادند که می‌توان اغتشاشات میدان مغناطیسی زمین را با طوفان‌های خورشیدی پیش‌بینی نمود (Gleisner et al., 2001). عادیو و همکاران در سال ۲۰۱۵ برای پیش‌بینی طوفان‌های خورشیدی نیز از شبکه عصبی استفاده نمودند. مدل ارائه شده یک ورودی و سه خروجی بوده که ورودی آن زمان و خروجی آن سه مؤلفه میدان مغناطیسی است (Oudfeul et al., 2015). همچنین جیپال و همکاران در سال ۲۰۱۶ از روش تبدیل فوریه برای پیش‌بینی داده‌های مؤلفه افقی میدان مغناطیسی استفاده نمودند (Jayapal et al., 2016).

بدین ترتیب در این مقاله تلاش می‌گردد با استفاده مدل ریاضی نوسانات فرکانس بالای میدان خارجی، مشاهدات طولانی مدت میدان و روش حداقل مربعات ضرایب مدل محلی تخمین زده شده و از تلفیق این مدل محلی با مدل مرجع یک مدل بهینه کارآمدتر برای پیش‌بینی و تخمین دقیق‌تر تغییرات میدان زمین ارائه گردد. لذا در ادامه تلاش می‌شود تا ابتدا روش پیشنهادی شرح داده شده و سپس صحت و دقت عملکرد آن با استفاده از مشاهدات واقعی اعتبارسنجی گردد.

## ۲- روش کار

هدف از این مقاله بررسی تغییرات زمانی میدان مغناطیسی زمین به صورت محلی و تخمین مؤلفه‌های مؤثر بر آن مطابق مدل پیشنهادی شکل ۲ است.



شکل ۲: فلوچارت روش پیشنهادی

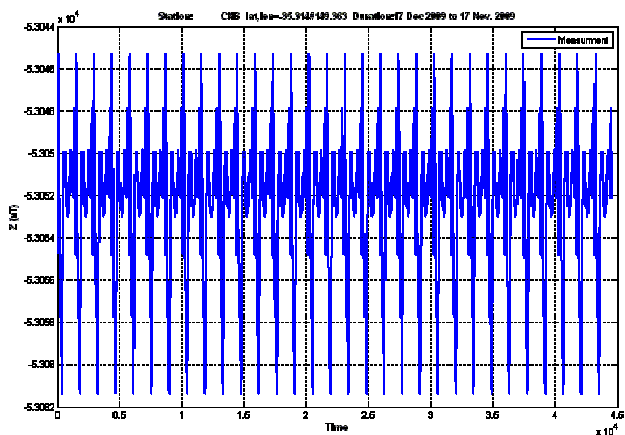
همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود و پیش‌تر نیز به آن اشاره شده در این مدل عواملی همچون تغییرات روزانه میدان مغناطیسی زمین، فعالیت‌های خورشیدی و زمان مؤثر بود و در روش پیشنهادی ضرایب مربوط به آن با استفاده از مشاهدات واقعی، مدل مرجع و روش حداقل مربعات تخمین زده می‌شود. لازم به ذکر است همان‌گونه که در مراجع اشاره شده است، روش

تغییرات دوره‌ای طی یک بازه زمانی معین است. از سویی دیگر میدان پوسته در سرتاسر زمین متغیر است. لیکن میزان تغییرات در مقیاس زمانی کوتاه مدت ناچیز بوده و می‌توان آن را ثابت فرض نمود. همچنین میدان خارجی نیز دارای تغییرات زمانی و مکانی منظم به صورت روزانه، ماهانه و سالانه بوده و به طور معمول در سطح دریا کمتر است. بدین ترتیب با توجه به جدول (۲) می‌توان نوسانات میدان مغناطیسی خارجی زمین را به چهار دسته کلی تقسیم‌بندی نمود که عبارتند از:

- ا- نوسانات با زمان تناوب طولانی: زمان این نوسانات قابل‌مقایسه با دوره‌های زمین‌شناسی (چند ده میلیون سال) است. از جمله این نوسانات می‌توان تغییر مکان قطب‌های مغناطیسی و حتی معکوس شدن آن‌ها را نام برد.
- ب- نوسانات قرنی: این نوسانات که دوره تناوب آن‌ها در حدود قرن است، علاوه بر تغییر شدت میدان مغناطیسی در یک محل زوایای انحراف و میل آن نیز عوض می‌شود.
- ت- نوسانات روزانه: میدان مغناطیسی زمین در یک نقطه حتی در طول یک روز ثابت نیست و به میزان قابل‌توجهی تغییر می‌کند. اندازه نوسانات روزانه تا حدود زیادی به عرض جغرافیایی محل بستگی داشته و از آنجا که دوره تناوب آن با گردش زمین مطابقت می‌کند، تصور می‌شود که عامل اصلی این دسته نوسانات خورشید است.

ث- نوسانات ناگهانی: این نوسانات همانند طوفان‌های مغناطیسی به طور ناگهانی و اتفاقی انجام می‌گیرند. هرچند برای این دسته از نوسانات تناوب مشخصی نمی‌توان در نظر گرفت، ولی تقریباً هر ۲۷ روز یک‌بار نوسانات مشابهی اتفاق می‌افتد.

بدین ترتیب اگرچه میدان مغناطیسی زمین در حقیقت یک دو قطبی مغناطیسی است؛ لیکن با توجه به روند تغییرات زمانی میدان ژئومغناطیسی ارائه‌ی، یک مدل مغناطیسی که بتواند تغییرات آن را در آینده پیش‌بینی نماید ضروری به نظر می‌رسد (Navabi et al., 2017). (Celani et al., 2015) و (Brito et al., 2017). از جمله کاربردهای این پیش‌بینی را می‌توان به محاسبه موقعیت ماهواره در فضا و یا محاسبه موقعیت ماهواره در ایستگاه کنترل در سطح زمین در صورت از کار افتادن حسگر و یا عملگر ماهواره، مقایسه داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های حاصل از محاسبه‌ی میدان مغناطیسی توسط مدل‌های مغناطیسی برای بررسی طوفان‌های مغناطیسی اشاره نمود. لذا در سال‌های اخیر مقایسه انواع نمونه‌های موجود مدل میدان مغناطیسی زمین و بهینه‌سازی آنها مورد توجه متخصصان این حوزه قرار گرفته است (Brito et al., 2017) و (Cilden et al., 2015). در این میان نوسانات روزانه میدان مغناطیسی زمین از جمله عواملی است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Courtilot et al., 1988). تلاش‌های بسیاری برای مدل‌سازی این تغییرات روزانه انجام شده است. در سال ۱۹۹۹ ساکلین در تحقیقی که بر روی میدان‌های مغناطیسی جنوب آفریقا انجام داده، تغییرات روزانه میدان مغناطیسی را به صورت تابعی از طول جغرافیایی و زمان محلی و



شکل ۵: تغییرات یک‌ماهه مؤلفه Z میدان مغناطیسی ایستگاه کانبرا

با بررسی‌های دقیق‌تر مشاهده می‌شود که اوج این تغییرات دو بار در هر شبانه‌روز (یک‌بار در هنگام طلوع و بار دیگر در هنگام غروب خورشید) رخ می‌دهد. نسبت این تغییرات برای کل ایستگاه‌ها ثابت است ولی اختلاف از مقدار متوسط، مقداری قابل پیش‌بینی است. بدین ترتیب تخمین اختلاف بین ۴۰ تا ۵۰ نانو تسلا برای میدان مغناطیسی زمین در هنگام صبح و شب می‌تواند تا حدود ۰/۵ درصد خطای مدل را بهبود بخشد؛ لذا برای افزودن این تغییرات به مدل مرجع باید علاوه بر سال و روز، ساعت دقیق اندازه‌گیری نیز معلوم باشد. علاوه بر آن باید مدل مناسبی برای اثرات روز و شب در هر عرض جغرافیایی تعیین‌شده و نتایج این مدل‌سازی به مدل مرجع میدان مغناطیسی زمین افزوده شود.

برای این منظور در این مقاله مدل انتخابی بر اساس مرجع (Kakinami et al., 2009) و مشتمل بر ۲۷۰ ضریب مجزا می‌باشد. این مدل به صورت حاصل‌ضرب توابعی از فعالیت خورشیدی (SA)، دوره ماه (LA)، زمان محلی (LT) و روز سال (DOY) در رابطه (۲) بیان شده است که در ادامه توابع تشکیل دهنده مدل اصلی به تفکیک مشخص می‌گردند.

$$FIT(SA, DOY, LA, LT) = f(SA).g(DOY).h(LA).i(LT) \quad (2)$$

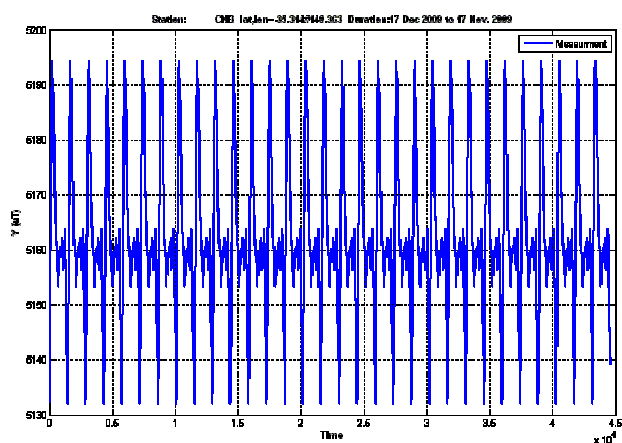
### ۱-۲- وابستگی مدل به فعالیت خورشیدی

در مراجع مختلف اثبات‌شده که دامنه و فاز تغییرات روزانه میدان مغناطیسی به فعالیت خورشیدی بستگی دارد. لذا هر افزایش در فعالیت سطحی خورشید منجر به افزایش رسانایی یونوسفر شده که نتیجه آن افزایش جریان الکتریکی یونوسفر و در نتیجه افزایش میدان مغناطیسی حاصل از آن است. نرخ تولید یون‌ها و الکترون‌ها در یونوسفر به خاطر تابش ماوراءبنفش خورشیدی است که می‌توان مقدار آن را با آزمایشی با عنوان تابش رادیویی خورشیدی تخمین زد (Caifa et al., 2011)؛ که پارامترهای S و A نرخ تولید یون‌ها در یونوسفر هستند.

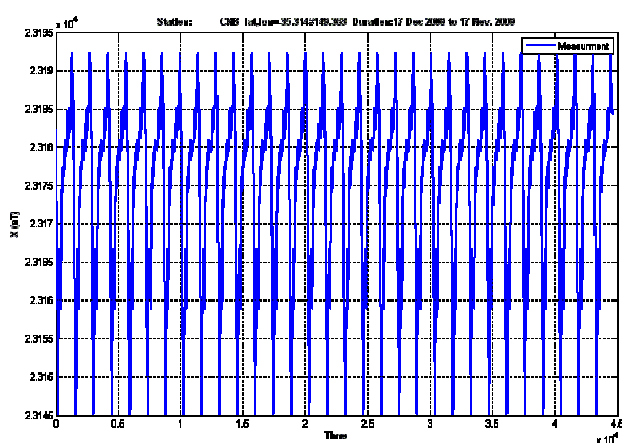
$$f(SA) = a_1 + a_2 SA \quad (3)$$

حداقل مربعات یکی از روش‌های ساده برای تخمین ضرایب بوده که اغلب با مشکلات فراوانی از جمله تکنیکی مواجه می‌گردد. لیکن یکی از مهم‌ترین دلایلی که در این مقاله چنین روش ساده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است، تأکید بر اثربخشی استفاده از مدل پیشنهادی و بهبود نتایج است. بدیهی است استفاده از روش‌های هوشمند نظیر روش‌های فازی و عصبی سبب بهبود بیش از پیش نتایج خواهد شد.

در عمل برای پیاده‌سازی مدل پیشنهادی ابتدا به بررسی مشاهدات واقعی و مقایسه آن با نتایج مدل مرجع میدان مغناطیسی زمین می‌پردازیم. برای این منظور همان‌گونه در شکل‌های (۳، ۴ و ۵) مشاهده می‌شود اندازه‌گیری پلاایش شده سه مؤلفه X، Y و Z میدان مغناطیسی زمین در طول یک ماه (۱۷ نوامبر تا ۱۷ دسامبر ۲۰۰۹) در رصدخانه کانبرا - استرالیا نشان می‌دهد که میدان واقعی در هر سه مؤلفه دارای یک مقدار متوسط است؛ که مقادیر لحظه‌ای حول این مقدار متوسط نوسان می‌کنند.



شکل ۳: تغییرات یک‌ماهه مؤلفه Y میدان مغناطیسی ایستگاه کانبرا



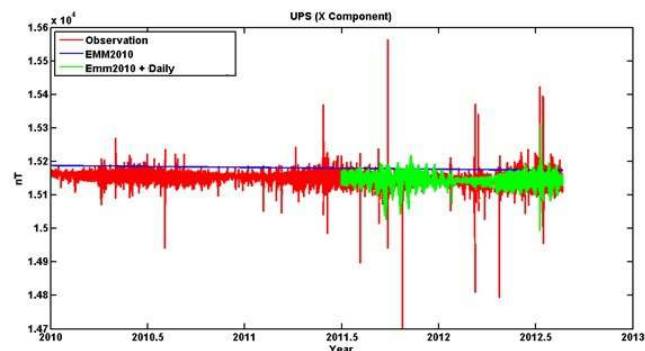
شکل ۴: تغییرات یک‌ماهه مؤلفه X میدان مغناطیسی ایستگاه کانبرا

یک سال و نیم) یک رصدخانه میدان مغناطیسی با استفاده از مدل پیشنهادی و روش حداقل مربعات خطا می‌توان این ضرایب مجهول را استخراج و به کمک آنها مقدار نوسانات روزانه را در زمان‌های آتی پیش‌بینی نمود.

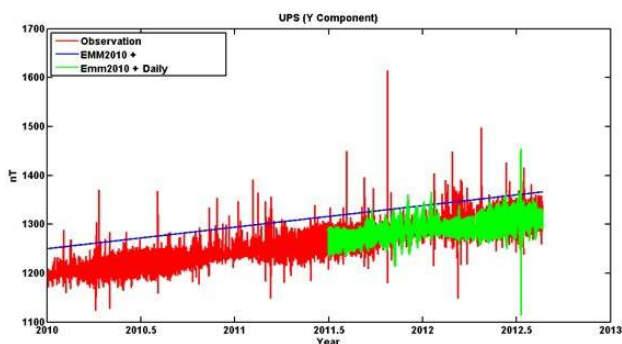
برای بررسی عملی این موضوع مطابق شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نخست با استفاده از یک سال و نیم (از ابتدای ۲۰۱۰ تا میانه سال ۲۰۱۱) مشاهدات صورت گرفته در رصدخانه مغناطیسی UPS (واقع در کشور سوئد) پارامترهای مدل ریاضی نوسانات میدان مغناطیسی زمین تخمین زده شده و سپس برای مدت زمان یک سال آتی (از میانه سال ۲۰۱۱ تا میانه سال ۲۰۱۲) مشاهدات با مجموع نتایج حاصل از مدل EMM2010 و تخمین نوسانات با استفاده از مدل پیشنهادی (نمودار سبز رنگ) مقایسه شده است.

جدول ۳: موقعیت رصدخانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

IAIG Code	Country	Latitude	Longitude	Altitude
AQU	Italy	42.383°N	13.317°E	682.0m
BDV	Czech Republic	49.08°N	14.015°E	496.0m
IZN	Turkey	40.5°N	29.73°E	256.0m
UPS	Sweden	59.903°N	17.353°E	50.0m



شکل ۶: تأثیر نوسانات محلی بر روی مؤلفه X مدل EMM2010



شکل ۷: تأثیر نوسانات محلی بر روی مؤلفه Y مدل EMM2010

## ۲-۲- وابستگی مدل به روزهای سال

مشاهدات نشان می‌دهد میدان مغناطیسی زمین در یک نقطه و در یک‌زمان مشخص برحسب روزهای مختلف سال متفاوت است و این امر در عرض‌های جغرافیایی مختلف نیز تفاوت دارد. به عنوان مثال می‌توان به تغییرات فصلی در طول سال اشاره نمود؛ که در هر فصلی از سال، تغییرات روزانه میدان مغناطیسی زمین متفاوت است. در رابطه (۴)  $DOY$  نشان دهنده روز سال است.

$$g(DOY) = b_1 +$$

$$\sum_{k=1}^2 [b_{2k} \cos(2k\pi \cdot DOY / 365) + b_{2k+1} \sin(2k\pi \cdot DOY / 365)] \quad (4)$$

## ۲-۳- وابستگی مدل به دوره ماه

دامنه و فاز تغییرات روزانه به دوره ماه نیز بستگی دارد. تغییرات روزانه میدان مغناطیسی در اثر ماه با رابطه (۵) بیان می‌شود. به طوری که  $\tau$  زمان قمری است.  $C_n$  و  $\alpha_n$  به ترتیب دامنه و فاز  $n$  امین هارمونیک از تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از ماه است ( Yamazaki et al., 2011).

$$h(LA) =$$

$$\sum_{n=1}^4 C_n \sin\{2\pi n\tau / 24 + 2\pi(n-2)LA / 24 + \alpha_n\} \quad (5)$$

## ۲-۴- وابستگی مدل به زمان محلی

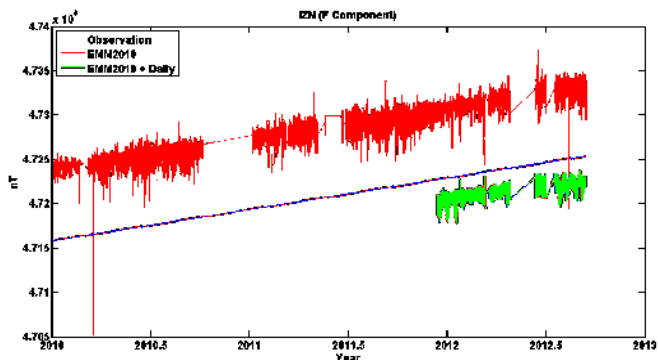
تغییرات روزانه میدان مغناطیسی را می‌توان با مجموع تعدادی از موج‌های سینوسی آنالیز فوریه، مدل نمود. انحراف از میانگین با رابطه (۶) برای  $n$  امین هارمونیک زمان محلی بیان می‌شود؛ که در رابطه (۶)،  $LT$  نشان دهنده زمان محلی است. بر اساس تحقیقات انجام شده، لحاظ نمودن چهار هارمونیک برای مدل کردن تغییرات روزانه کافی است ( George Erick et al., 2017).

$$i(LT) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(2\pi n \cdot LT / 24 + \beta_n) \quad (6)$$

## ۳- نتایج عملی

با توجه به مدل ارائه شده در بخش قبل ابتدا نیاز است تا ۲۷۰ پارامتر مجهول مدل نوسانات میدان مغناطیسی ناشی از فعالیت خورشیدی، دوره ماه، زمان محلی و روز سال تخمین زده شوند. برای این منظور با استفاده از مشاهدات طولانی مدت رصدخانه این پارامترها به گونه‌ای تخمین زده می‌شوند که مجموع مربعات اختلاف بین مشاهدات و نتایج محاسبه‌شده از مدل ریاضی پیشنهادی کمینه شود (Xue et al., 2010).

بدین ترتیب در صورت دسترسی به اطلاعات طولانی مدت (حداقل



شکل ۱۲: تأثیر نوسانات AQU در مؤلفه F رصدخانه IZN

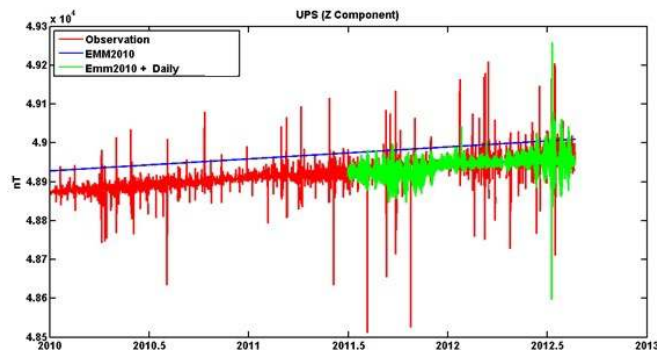
بدین ترتیب مشاهده می‌گردد که تخمین و اعمال نوسانات محلی منجر به بهبود چشمگیر نتایج شده، به گونه‌ای که میانگین طولانی مدت خطاها به سمت صفر میل نموده است. لازم به ذکر است هرچه طول مشاهدات اولیه بیشتر باشد، دقت برآورد ضرایب مربوط به نوسانات روزانه بیشتر شده و انحراف معیار خروجی حاصل از مدل ژئومغناطیس همراه با اعمال نوسانات محلی با مشاهدات واقعی کاهش می‌یابد.

در ادامه این پژوهش امکان استفاده از ضرایب تولید شده در یک ایستگاه در نقطه‌ای دیگر در خارج از آن ایستگاه (تعمیم استفاده از ضرایب مدل نوسانات پیشنهادی در ایستگاه AQU محاسبه شد و سپس این ضرایب در همان ایستگاه و دو ایستگاه BDV و IZN استفاده گردید. همان‌گونه که از شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، ضرایب برآورد شده در رصدخانه AQU علاوه بر خود رصدخانه IZN اعمال رصدخانه BDV نیز تا حدی کاربرد دارد. لیکن در رصدخانه اعمال این ضرایب منجر به حصول نتیجه مناسب نشده است؛ که این موضوع می‌تواند ناشی از نوع سنسور بکار رفته در رصدخانه‌های سه‌گانه و استفاده از سنسور یکسان از نظر فناوری و مدل و همچنین اعمال کالیبراسیون متفاوت این سنسورها باشد. لیکن به نظر می‌رسد در صورت استفاده از سنسور یکسان برای سنسور واقع در رصدخانه و سنسور واقع در ایستگاه مجاور بتوان تا چند ده کیلومتر از ضرایب برآورد شده در یک رصدخانه برای تخمین مؤلفه روزانه نوسانات میدان مغناطیسی زمین در نقاط مجاور استفاده نمود.

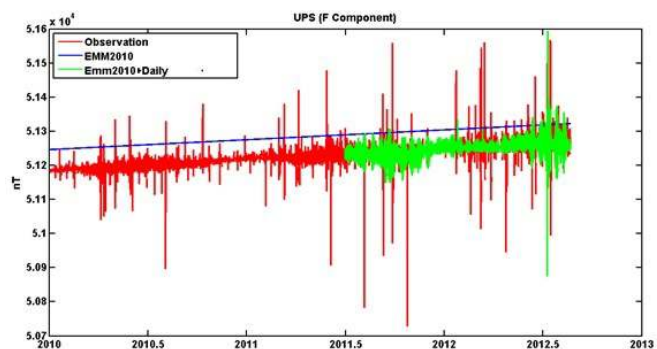
جدول ۴: مشخصات سنسورهای مورد استفاده در این پژوهش

IAGA Code	Opened	Instrument	Type
AQU	1960-01-01	-	-
BDV	1967-01-01	Narod ring-core	Vector (XYZ)
IZN	2007-01-01	DMI FGE 89D (Danish Meteorological Institute)	Vector (HDZ)
UPS	2000-01-01	DMI FGE 89D (Danish Meteorological Institute)	Vector (XYZ)

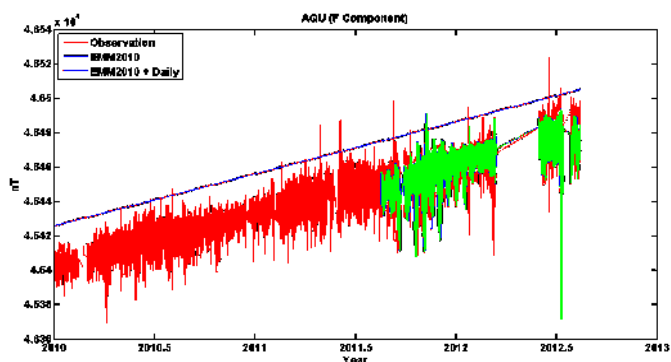
در ادامه برای اطمینان از صحت این جمع‌بندی تست فوق برای رصدخانه‌های UPS، BDV و IZN مجدداً تکرار گردید. لازم به ذکر است مطابق اطلاعات جدول ۴ سنسور بکار رفته در ایستگاه‌های IZN و UPS یکسان است.



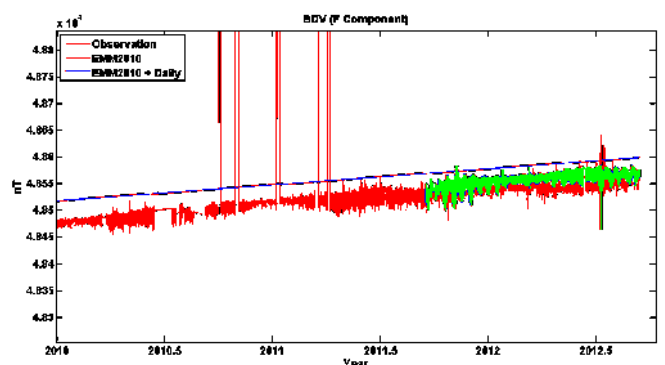
شکل ۸: تأثیر نوسانات محلی بر روی مؤلفه Z مدل EMM2010



شکل ۹: تأثیر نوسانات روزانه بر روی مؤلفه F مدل EMM2010



شکل ۱۰: تأثیر نوسانات AQU در مؤلفه F رصدخانه AQU



شکل ۱۱: تأثیر نوسانات AQU در مؤلفه F رصدخانه BDV

۱ مؤلفه F همان نرم سه مؤلفه X، Y و Z است.



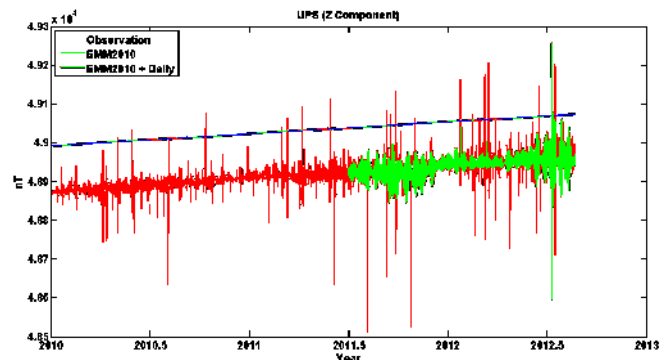
#### نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۱، ۱۳۹۸.

با استفاده از مشاهدات طولانی مدت میدان مغناطیسی زمین در یک رصدخانه مغناطیسی و روش حداقل مربعات تعیین گردید. در ادامه مقایسه اندازه‌گیری‌های انجام شده در همان ایستگاه با داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل مرجع و مدل محلی پیشنهادی این مقاله دقت و صحت نتایج را مورد تأیید قرارداد. از سوی دیگر محاسبه مدل محلی در رصدخانه‌های مختلف و اعمال ضرایب تخمینی هر رصدخانه به رصدخانه دیگر نشان داد که مدل تغییرات محلی میدان مغناطیسی زمین برای عرض‌های جغرافیایی مختلف (در یک طول جغرافیایی) و همچنین در طول‌های جغرافیایی مختلف (در یک عرض جغرافیایی) متفاوت است. لذا تعیین ضرایب این مدل تنها به صورت محلی امکان‌پذیر بوده و با تغییر مختصات جغرافیایی نسبت به مختصات محل رصدخانه از تأثیر آن کاسته می‌شود. بدین ترتیب نتایج بیانگر موفقیت بالای ۹۰٪ مدل پیشنهادی در پیش‌بینی تغییرات محلی میدان مغناطیسی زمین است. لازم به ذکر است که به دلیل فرآیندهای تصادفی، همواره اختلاف کوچکی بین مقدار تخمینی ناشی از مدل و مقدار واقعی مشاهده شده در رصدخانه وجود دارد؛ که این خطا به دلیل ذات تصادفی آن قابل پیش‌بینی نیست و هیچ مدلی قادر به برآورد آن نیست.

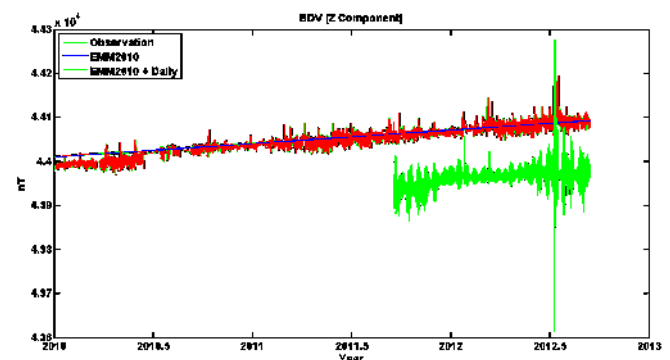
#### ۵- منابع

- بلندی ح.، قاسمزاده بادامچی م.، فانی صابری ف.، ۱۳۸۷ "مقایسه انواع روش‌های مدل‌سازی میدان مغناطیسی زمین در مدارات پایین (LEO)"، هشتمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) انجمن هوافضای ایران، دانشگاه مالک اشتر، شاهین‌شهر، اصفهان.
- Brito, Thiago V., and Steven K. Morley. 2017, Improving empirical magnetic field models by fitting to in situ data using an optimized parameter approach. Space Weather.
- Caifa G., Anliang L., Hong C., and Huabo Y., 2011, Algorithm for Geomagnetic Navigation and Its Validity Evaluation, IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), Shanghai, China.
- Celani, Fabio. 2015, Robust three-axis attitude stabilization for inertial pointing spacecraft using magnetorquers. Acta Astronautica, 107: 87-96.
- Cilden, Demet, Zerefsan Kaymaz, and Chingiz Hajiyev. 2015, Comparison of geomagnetic field from models and satellite observations for attitude determination purposes. Recent Advances in Space Technologies (RAST), 7th International Conference on IEEE.
- Courillot, Vincent, and Jean Louis Le Mouel. 1988, Time variations of the Earth's magnetic field: from daily to secular. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 16.1: 389-476.
- George Erick O., Paul B., and Boniface N., 2016, Quiet Time Geomagnetic Field Variations in the Equatorial East African Region During the Inclining Phase of Solar Cycle 24, International Journal of Astrophysics and Space Science. Vol. 4, No. 2, pp. 21-25.

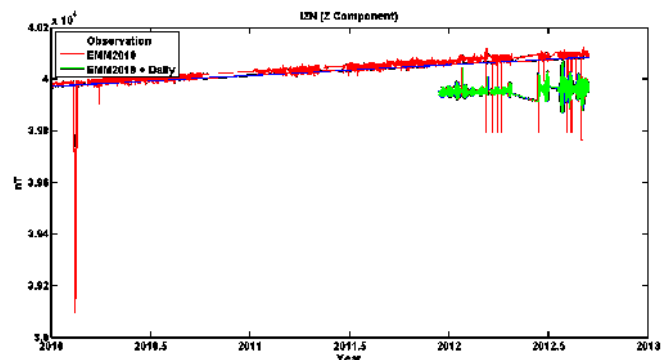
هر چند بر اساس نتایج مرحله قبل به نظر می‌رسید ضرایب تولید شده در رصدخانه UPS باید در ایستگاه IZN نتایج مطلوبی به همراه داشته باشد (به دلیل استفاده از سنسور یکسان)؛ لیکن در این مرحله، به دلیل تفاوت عرض جغرافیایی و همچنین تفاوت کالیبراسیون سنسورهای بکار رفته در این دو ایستگاه عملاً ضرایب تولید شده در رصدخانه UPS در رصدخانه IZN کاربرد ندارد.



شکل ۱۳: تاثیر نوسانات UPS در مؤلفه Z رصدخانه UPS



شکل ۱۴: تاثیر نوسانات UPS در مؤلفه Z رصدخانه BDV



شکل ۱۵: تاثیر نوسانات UPS در مؤلفه Z رصدخانه IZN

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی مشتمل بر ۲۷۰ پارامتر به منظور تخمین نوسانات میدان مغناطیسی زمین ناشی از مؤلفه‌های فرکانس بالای میدان ارائه شده و نتایج با استفاده از مشاهدات واقعی و مدل مرجع EMM2010 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای این منظور ضرایب مدل پیشنهادی

- Schmucker U., 1985, External part of the earth's magnetic field, In: Fuchs K., Soffel H. (eds) Sub volume B. Landolt-Börnstein - Group V Geophysics (Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology), Vol. 2b, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sutcliffe, P. R. 1999, The development of a regional geomagnetic daily variation model using neural networks. *Annales Geophysicae*. Vol. 18. No. 1. Springer-Verlag.
- Vichare G., and Rajaram R., 2009, Comparative study of models of Earth's magnetic field derived from Oersted, CHAMP and SAC-C Magnetic Satellite Data, *J. Ind. Geophys. Union*, Vol. 13, No.1, pp.33-42.
- Xue H., Miao H., and Wu H., 2010, Sieve Estimation of constant and time-varying coefficients in nonlinear ordinary differential equation models by considering both numerical error and measurement error, *Annals of Statistics*, Vol. 38, no. 4, pp. 2351-2387.
- Yamazaki Y., Yumoto K., Cardinal M. G., Fraser B. J., Hattori P., Kakinami Y., Liu J. Y., Lynn K. J. W., Marshall R., McNamara D., Nagatsuma T., Nikiforov V. M., Otadoy R. E., Ruhimat M., Shevtsov B. M., Shiokawa K., Abe S., Uozumi T., and Yoshikawa A. 2011, An empirical model of the quiet daily geomagnetic field variation, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, A10312.
- Gleisner, Hans, and Henrik Lundstedt. 2001, A neural network based local model for prediction of geomagnetic disturbances. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106.A5: 8425-8433.
- Jayapal, R., et al. 2016, A regional geomagnetic model using fourier analysis. *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*, Vol. 3, Issue 1.
- Kakinami Y., Chen C.H., Liu J.Y., Oyama K.I., Yang W.H., and Abe S., 2009, Empirical models of total electron content based on functional fitting over Taiwan during geomagnetic quiet condition, *Ann. Geophys.*, Vol. 27, pp. 3321-3333.
- Maus S., and McLean S., 2015, The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015, NOAA, National Geophysical Data Center.
- Navabi, M., and Barati M. 2017, Mathematical modeling and simulation of the earth's magnetic field: A comparative study of the models on the spacecraft attitude control application. *Applied Mathematical Modelling*, 46: 365-381.
- Ouadfeul, Sid-Ali, Victor Tourtchine, and Leila Aliouane. 2015, Daily geomagnetic field prediction of INTERMAGNET observatories data using the multilayer perceptron neural network, *Arabian Journal of Geosciences*, 8.3: 1223-1227.





## Local Improvement in Geomagnetic Field Model by Method of Least Squares

Kaveh kianfar<sup>1\*</sup>, Abolfazl Ranjbar Noiey<sup>2</sup> and Behrooz Rezaie<sup>3</sup>

1. Ph.D. Candidate, Department of Control and Instrumentation, Babol University of Technology, Babol, Iran.

2. Professor, Department of Control and Instrumentation, Babol University of Technology, Babol, Iran.

3. Associate Professor, Department of Control and Instrumentation, Babol University of Technology, Babol, Iran.

Received: 20 February 2018; Accepted: 1 August 2018

Corresponding author: kaveh.kianfar@yahoo.com

### Keywords

Earth magnetic field  
Least squares  
Modeling  
Daily variation of magnetic field

### Extended Abstract

#### Summary

Global and regional geomagnetic field models give the components of the geomagnetic field as functions of place and time. Most of these models utilize polynomials or Fourier series to map the input variables to the geomagnetic field values. The only temporal variation in these models is the long term secular variation. However, there is an increasing need amongst certain users for the models that can provide shorter term temporal variations, such as the geomagnetic daily variation. In this research, we have constructed an empirical model of the quiet daily geomagnetic field variation based on functional fitting.

### Introduction

The geomagnetic models provide a universal description of the magnetic field of the earth for scientific and applied applications. However, considering the course of changes in time concerning the geomagnetic field, it seems necessary to provide a magnetic model that can predict the changes in it in the future. Various factors affect the geomagnetic field. These factors appear in regular and sometimes irregular periods and create errors in the prediction of geomagnetic models. It is axiomatic that knowing the above factors and applying them in the models for correct estimation of the changes can have a substantial effect on the increase of the accuracy of the models.

### Methodology and Approaches

Many attempts have been made over some past decades to make a comprehensive geomagnetic model using the combination of the geomagnetic data collected in different periods. The investigations into time and location have shown that all real geomagnetic field components have always had average values over certain periods around which the momentary values fluctuate. These fluctuations result from some external factors affecting the geomagnetic field that are usually ignored in the reference models of magnetic fields due to the universal perspective. Thus, the objective of this paper is to investigate into the high frequency fluctuations of the earth magnetic field and to estimate the components affecting them. For this purpose, a mathematical model of the magnetic field fluctuations resulting from the external factors such as solar activities, lunar age, local time and day of year was proposed, and the results were analyzed using the real observations and the reference model EMM2010. In this regard, the coefficients of the proposed model were determined using the long observations of the magnetic field of the earth in a magnetic observatory and the method of least squares through which the high frequency fluctuations of the geomagnetic field were estimated. Furthermore, in this paper, a comparison between measurements taken in the same station and the predicted data by the reference model has been made. The local model proposed in this paper confirms the precision and accuracy of the results.

### Results and Conclusions

A comparison between the real observations of the observatories and the results resulting from the combination of the reference model and the local model proposed in this paper indicates 90% increase of local precision in modelling of the magnetic field of the earth. On the other hand, calculation of the local model in different observatories and applying the estimated coefficients of each observatory to the next one have shown that the model of local changes of the earth magnetic field differs in different latitudes having a certain longitude, and also, in different longitudes having a certain latitude. Therefore, determination of the coefficients of this model is possible only locally, and its effect is lessened

through the change in its geographical coordinates in relation to the location of the observatory.

---