



Research Paper;

Processing and interpretation of buried magnetic anomaly and depth estimation with Euler's method to determine the location of mines and unexploded bombs buried in the ground

Hassan Nanakar¹, Hosein Parnian Khoie², Mohamad Mansuri³

1. Department of Basic Science, University of khatam al-anbia (pbuh), Tehran, Iran. **E-mail:** h_nanakar2006@yahoo.com

2. Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. **E-mail:** hoseinparnian@ut.ac.ir

3. Department of Basic Science, University of khatam al-anbia (pbuh), Tehran, Iran. **E-mail:** m.mansouri@khadu.ac.ir

Article Information

Abstract

Accepted:
2024/05/12

Received:
2024/10/03

Keywords:

*University of Tehran,
Euler method, Institute of
Geophysics, magnetic.*

One of the most important concerns after the imposed war is to clear the land of mines and unexploded bombs buried in it, which unfortunately kills or injures some of our dear compatriots every year. The most important method for processing and interpreting buried magnetic anomalies is Euler's method, which estimates the depth. In this research, at first magnetic fiber data from 16 spherical models and two cylindrical models are simultaneously processed and interpreted. After that, we study ground magnetic data related to the site of the Institute of Geophysics, University of Tehran buried in the area for a study of a number of steel sheets, a hollow iron pipe and a barrage. In order to estimate the depth and boundary of the buried anomalies, the Euler method is used to construct data. The main advantage of using this technique is that it enables us to estimate the horizontal position and depth of the subsurface mass without knowing the parameters of the Earth's magnetometer.

Corresponding Author:
Hassan Nanakar


Email:
h_nanakar2006@yahoo.com



فصلنامه علمی دفاع هو فضایی

دوره ۳، شماره ۲
تابستان
صص ۴۲-۶۳

مجله مقالات

مقاله پژوهشی؛ 

پردازش و تفسیر آنومالی مغناطیسی مدفون و تخمین عمق با روش اویلر جهت تعیین

موقعیت مین ها و بمب های عمل نکرده مدفون در زمین

حسن نعناکار^۱، حسین پرنیان خوی^۲، محمد منصوری^۳

۱. استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران. رایانامه: h_nanakar2006@yahoo.com

۲. کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hoseinparnian@ut.ac.ir

۳. استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران. رایانامه: m.mansouri@khadu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از دغدغه های مهم پس از جنگ تحمیلی پاکسازی زمین از مین ها و بمب های عمل نکرده مدفون در آن می باشد که متأسفانه هر ساله عده ای از هم وطنان عزیزمان کشته و یا زخمی می شوند. مهم ترین روش برای پردازش و تفسیر ناهنجاری های مغناطیسی مدفون، روش اویلر است که عمق را تخمین می زند. در این تحقیق، در ابتدا داده های مغناطیسی ساختگی حاصل از ۱۶ مدل کروی کشیده و ۲ مدل استوانه ای به طور همزمان پردازش و تفسیر شده است. سپس داده های مغناطیس زمینی مربوط به محوطه موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران پردازش و تفسیر می شوند که در منطقه مذکور برای انجام یک مطالعه تحقیقاتی تعدادی ورقه ی فولادی و یک لوله آهنی توخالی و یک تیر آهن میله ای دفن شده است. در ادامه برای تخمین عمق و مرز آنومالی های مدفون، روش اویلر مکانی بروی داده های ساختگی و واقعی اعمال گردید. مزیت اصلی استفاده از این روش این است که این امکان را فراهم می کند تا برآوردی از موقعیت افقی و عمق توده زیرسطحی بدون نیاز به دانستن پارامترهای بردار مغناطیس زمین صورت گیرد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۱۲

کلیدواژه ها:

دانشگاه تهران،
روش اویلر،
موسسه ژئوفیزیک،
مغناطیس.

نویسنده مسئول:

حسن نعناکار

ایمیل:

h_nanakar2006@yahoo.com

استناد: نعناکار، حسن؛ پرنیان خوی، حسین و منصوری، محمد. (۱۴۰۳). پردازش و تفسیر آنومالی مغناطیسی مدفون و تخمین عمق با روش اویلر جهت تعیین موقعیت مین ها و بمب های عمل نکرده مدفون در زمین. *دفاع هو فضایی*، دوره (شماره)، ۶۳-۴۲.

۱- مقدمه

در سالهای اخیر جهت شناسایی ساختارهای زیرسطحی مدفون تلاش های زیادی صورت گرفته است [۱-۲]. مغناطیسی سنجی از جمله روش هایی ژئوفیزیکی است که با اندازه گیری خصوصیات مغناطیسی ساختارهای زیرسطحی به اکتشاف آن ها در زمین می پردازد. در روش مغناطیسی سنجی با مطالعه و بررسی میدان مغناطیسی حاصل از بی هنجاری زیر سطحی، به اکتشاف ساختارهای زیرسطحی مدفون می پردازند [۳]. مدل گرانشی نیز روشی برای تخمین جهت مغناطیسی کل اعوجاج است [۴]. این مدل به عنوان یک روش ارزشمند برای محدود کردن هندسه و چگالی اجسام پوسته ای نشان داده شده است [۵-۶]. تامپسون^۱ [۷] روشی برای تخمین عمق سریع بر اساس رابطه همگنی اوپلر در مقادیر زیادی از داده های مغناطیسی ارائه داده است. با استفاده از رابطه همگنی اوپلر دکانولوشن، می توانیم داده های بررسی مغناطیسی را به شکل شبکه برای موقعیت ها و عمق منبع تفسیر کنیم [۸، ۹]. یک روش ترکیبی برای تحلیل سیگنال و اوپلر ابداع شده است [۱۰]. در سال ۲۰۰۷ توصیفی از یک روش ساده تخمین عمق با استفاده از مشتقات مغناطیسی مرتبه اول ارائه شده است [۱۱]. ارکان^۲ و همکاران [۱۲] نمونه هایی از تشخیص قابلیت اطمینان از گرادایومتری گرانشی، مغناطیس سنجی و رادار نفوذی زمین (GPR) معرفی نموده اند. یک روش وارونگی نیمه خودکار جدید برای تفسیر داده های ناهنجاری مغناطیسی توسط ژو و همکارانش پیشنهاد شده است که عمق را با استفاده از ترکیبی از سیگنال های تحلیلی غیرعادی در ارتفاعات مختلف تعیین می کند [۱۳]. هگی^۳ [۱۴] سه روش ژئوفیزیکی مختلف مغناطیس سنجی، رادار نفوذی زمین (GPR) و توموگرافی مقاومتی الکتریکی (ERT) را با هم ترکیب کرد و از SfM^۴ (حرکت از ساختار) برای دستیابی به یک مدل دقیق ارتفاع رقومی استفاده کرد. یک مطالعه مقایسه ای برای تخمین عمق منبع سیگنال های الکترومغناطیسی با فرکانس بسیار پایین (VLF-EM) توسط ابراهیمی و همکاران [۱۵] انجام شده است. نتایج به دست آمده مبتنی بر تکنیک هایی مانند دکانولوشن اوپلر^۵ (ED)، تحلیل طیفی هارتلی و

¹ Thompson

² Erkan

³ Hegyi

⁴ structure-from-motion

⁵ Euler deconvolution

رویکرد سیگنال تحلیلی مولفه‌های درون فازی حذف‌شده توسط تجزیه حالت گروه تجربی (EEMD^۱) است که در تفسیر داده‌های VLF-EM بسیار رایج نیستند. مدل‌های مغناطیس و چگالی با تفکیک عمق با حل یک مسئله معکوس بر اساس مجموعه‌ای سه بعدی از داده‌های میدان پتانسیل از اطلاعات مربوط به تغییرات عمودی و افقی میدان مغناطیسی یا گرانش به دست می‌آیند [۱۶]. فدی^۲ و همکاران [۱۷] یک ابزار جدید، نمودار تفکیک عمق (DRP^۳)، که با استفاده از تجزیه ارزش منفرد (SVD^۴) محاسبه می‌شود، ارائه داده‌اند. فدی و همکاران [۱۸] تئوری میدان گرانش، میدان مغناطیسی و مشتقات آنها از هر مرتبه و روشی برای عمق از نقاط افراطی (DEXP^۵) برای تفسیر هر میدان بالقوه ارائه داده‌اند. روش DEXP امکان تخمین عمق منبع، چگالی و شاخص ساختاری را از نقاط انتهایی یک میدان سه‌بعدی با توجه به قوانین قدرت خاص ارتفاع می‌دهد. روش واهامیخت اویلر در سال ۱۹۸۲ توسط تامپسون ارائه شده که تلفیقی از روش سیگنال تحلیلی و معادله همگن اویلر است [۱۹]. رید و همکاران در سال ۱۹۹۰ و راوات در سال ۱۹۹۶ این روش را تعمیم دادند [۲۰ و ۲۱].

در این تحقیق برای انجام یک مطالعه تحقیقاتی در محوطه موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران تعدادی ورقه فولادی، یک لوله آهنی توخالی و یک تیر آهن میله‌ای دفن شده است. داده‌های مغناطیس زمینی مربوط به آن پردازش و تفسیر می‌شوند. همچنین برای مطالعه اثرات مغناطیسی ساختارهای فلزی مدفون سطحی داده‌های مغناطیسی ساختگی حاصل از ۱۶ مدل کروی کشیده و ۲ مدل استوانه‌ای به طور همزمان پردازش و تفسیر شده است. در ادامه برای بررسی عمق و مرز ساختارهای مدفون از روش اویلر مکانی استفاده می‌شود. در روش اویلر مکانی برای تخمین عمق و مرز بی‌هنجاری زیرسطحی نیازی به دانستن پارامترهای بردار مغناطیس زمین نیست. روش اویلر مکانی روشی سریع برای تفسیر داده‌های میدان پتانسیل می‌باشد. در این روش در صورتی که مقدار صحیحی از شاخص ساختاری مربوط به هندسه توده سبب شونده، انتخاب شده و در معادله اویلر استفاده شود، این روش می‌تواند تخمینی از عمق آنومالی مورد نظر ارائه دهد و با توجه به اینکه اهداف مورد بررسی ما ساختارهای فلزی مدفونی می‌باشند که دارای هندسه مشخصی هستند پس با توجه به

¹ Empirical Ensemble Mode Decomposition

² Fedi

³ depth resolution plot

⁴ singular-value decomposition

⁵ Depth from Extreme Points

دانستن هندسه ساختار می‌توان شاخص ساختاری مورد نظر را انتخاب کرد. شاخص ساختاری مربوط به اشکال مختلف در جدول ۱ بیان گردیده است.

جدول ۱: شاخص ساختاری اشکال مختلف

شاخص ساختاری	نوع مدل
۰	کتناکت، گسل با نسبت عمق به پاشنه کم
۱	دایک نازک، گسل با نسبت عمق به پاشنه زیاد
۲	استوانه افقی یا قائم
۳	کره

۲- تئوری

۲-۱ تئوری مغناطیسی سنجی

کره زمین را می‌توان به شکل یک دو قطبی بزرگ در نظر گرفت که دارای میدان مغناطیسی است. شدت این میدان روی سطح کره زمین متغیر است و بین ۲۵۰۰۰ نانوتسلا تا ۶۶۰۰۰ نانو تسلا در دو قطب تغییر می‌کند. به همین دلیل بسیاری از سنگ‌ها متأثر از این میدان، دارای خاصیت مغناطیسی هستند که به آن مغناطیدگی القایی می‌گویند. میدان ناشی از هر ساختار زیرسطحی به طور مستقیم با شدت میدان حاضر و همچنین نوع ماده متناسب است که این باعث تقویت میدان محلی می‌شود. به درجه مغناطیدگی جسم، خودپذیری مغناطیسی می‌گویند که پارامتری مهم و اساسی در اکتشافات مغناطیسی به شمار می‌رود

$$J = kH \quad (1)$$

که k خودپذیری مغناطیسی و بدون واحد، H شدت میدان مغناطیسی زمین با واحد تسلا و J مغناطیدگی القایی در واحد حجم بر آمپر متر است.

برای داده برداری مغناطیسی از یک منطقه می‌توان از دستگاه‌های مغناطیس سنج پروتون، فلاکس گیت و بخار سزیم-رویدیم استفاده کرد. رایج‌ترین دستگاه، مغناطیس‌سنج پروتون است که در برداشت‌های زمینی کاربرد دارد. میدان تعیین شده با مغناطیس‌سنج در واقع

میدان کل (\mathbf{T}) است که برآیند دومیدان منطقه‌ای (\mathbf{F}) و میدان حاصل از بی‌هنجاری مغناطیسی ($\Delta\mathbf{T}$) است

$$\mathbf{T} = \mathbf{F} + \Delta\mathbf{T} \quad (۲)$$

۲-۲ تئوری روش اویلر مکانی

یکی از پرکاربردترین روش‌های تخمین عمق، روش اویلر مکانی دیکانولوشن است که یکی از روش‌های نیمه اتوماتیک برای تخمین عمق بی‌هنجاری پتانسیل است. برای تعریف روش اویلر مکانی در ابتدا تابع $\mathbf{F}(\mathbf{v})$ را تعریف می‌کنیم که $\mathbf{F}(\mathbf{v})$ تابعی از متغیرهای $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)$ و همگن از درجه n است هرگاه داشته باشیم:

$$f(t\mathbf{v}) = t^n f(\mathbf{v}) \quad (۳)$$

که در آن t یک عدد حقیقی است.

اگر تابع $\mathbf{f}(\mathbf{v})$ نسبت به متغیر \mathbf{v} مشتق‌پذیر باشد، رابطه زیر را معادله اویلر می‌نامند:

$$\mathbf{v} \Delta_{\mathbf{v}} \mathbf{f}(\mathbf{v}) = n \mathbf{f}(\mathbf{v}) \quad (۴)$$

حال اگر تابع \mathbf{f} را تابعی از $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ در نظر بگیریم روابط ۳ و ۴ برحسب متغیرهای $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ به شکل زیر بازنویسی می‌شوند

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z) \quad (۵)$$

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = n f \quad (۶)$$

از طرفی اثر مغناطیسی اشکال هندسی مختلف را می‌توان به صورت کلی زیر نوشت:

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{a}}{r^N} \quad (۷)$$

که در آن \mathbf{a} مقدار ثابت، r فاصله توده تا نقطه اندازه‌گیری، \mathbf{f} میدان پتانسیل مغناطیسی و N شاخص ساختاری است.

بر طبق رابطه ۷، میدان‌های پتانسیل (گرانی یا مغناطیسی)، تابعی همگن از درجه N هستند که در مورد ساختارهای با هندسه مختلف، می‌توان متغیر N را تغییر داد. تامپسون [۷] نشان داد که در مورد داده‌های میدان پتانسیل معادله اوپلر را می‌توان به شکل زیر نوشت

$$x_0 \frac{\partial f}{\partial x} + y_0 \frac{\partial f}{\partial y} + z_0 \frac{\partial f}{\partial z} + NB = x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} + nf \quad (۸)$$

که در آن (x_0, y_0, z_0) موقعیت توده مسبب بی‌هنجاری و (x, y, z) موقعیت نقطه اندازه‌گیری، B مقدار میدان ناحیه‌ای منطقه که به جمله متعادل کننده معروف بوده و N شاخص ساختاری است که به هندسه توده بستگی دارد. در این روش با انتخاب یک پنجره با پهنای مناسب و حرکت این پنجره بر روی شبکه داده‌ها، جواب‌های معادله اوپلر برای هر پنجره بدست می‌آید.

۳- بررسی مدل ساختگی مغناطیسی و نتایج روش اوپلر مکانی بر آن

در این بخش داده‌های مغناطیسی ساختگی حاصل از ۱۶ ساختار کروی کشیده با زوایای قرارگیری متفاوت و دو استوانه قائم مدفون نشان داده خواهد شد. خصوصیات ساختارهای گفته شده در جدول ۲ بیان گردیده است. مدلسازی مذکور با استفاده از نرم افزار مدل ویژن صورت پذیرفته است. مدل ویژن یک نرم‌افزار ژئوفیزیکی برای نمایش آنالیز و شبیه‌سازی داده‌های گرانی و مغناطیسی است.

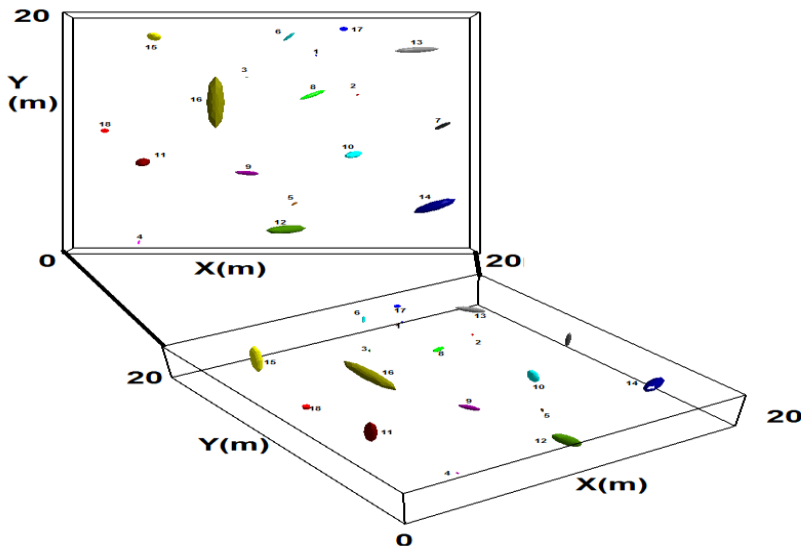
جدول ۲ خصوصیات ساختارهای شبیه‌سازی شده

	Length	Diameter	Volume	Sus	X	Y	Depth	Azimuth	plunge
	(m)	(m)	(m ³)	(SI)	(m)	(m)	(m)		
1	0.0775	0.0425	0.000073	260	12.4	17.041	0.060	150	0
2	0.1110	0.0630	0.000231	260	14.45	13.359	0.200	30	125
3	0.1640	0.0600	0.000309	260	9	15.06	0.8	90	90
4	0.2160	0.0600	0.000407	260	3.647	-5.22	0.8	15	35
5	0.4260	0.0780	0.001357	260	11.35	3.149	0.6	50	65
6	0.4800	0.1050	0.002771	260	11	18.8	0.35	35	175
7	0.7000	0.1550	0.008806	260	18.69	10.46	0.9	45	135
8	0.8700	0.1750	0.013951	260	12.26	13.40	1.1	55	25
9	0.8600	0.2030	0.018556	260	9	6	1.3	100	45
10	1.2100	0.3040	0.058551	260	14.30	7.741	1.5	65	70
11	1.4800	0.3560	0.098211	260	3.732	6.983	2.3	20	85
12	1.6900	0.4060	0.145860	260	10.95	0.551	2.2	90	55

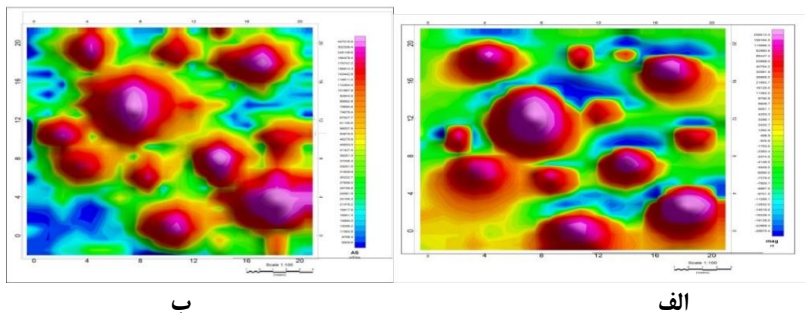
13	1.5900	0.2660	0.058906	260	17.45	17.67	1.3	80	40
14	1.2500	0.4060	0.107885	260	18.31	2.901	1	60	10
15	1.8400	0.3390	0.110717	260	4.28	19.05	2.5	70	90
16	2.500	0.4570	0.273383	260	7.14	12.70	1.5	0	0
17	0.08	0.25	0.015000	260	13.76	19.54	0.3	—	—
18	0.18	0.43	0.099846	260	2	10	.03	—	—

بعد از محاسبه بی‌هنجاری مغناطیسی و سیگنال تحلیلی ساختارهای بیان شده، الگوریتم بلکلی برای شناسایی محل ساختارها بکار برده می‌شود. در ادامه با روش اویلر مکانی پارامتر عمق و محل ساختار تخمین زده می‌شود. با استفاده از سیگنال تحلیلی می‌توان دید اولیه‌ای از محل بی‌هنجاری و مرز آن بدست آورد و الگوریتم بلکی در صورتی که دامنه سیگنال تحلیلی در مرکز شبکه نسبت به ۸ عدد اطراف آن در تمامی جهات بیشتر باشد، این نقطه را به عنوان محل احتمالی ساختارها شناسایی می‌کند.

فرض شده ساختارهای مدلسازی شده از جنس فولاد هستند و خودپذیری مغناطیسی (Sus) با مقدار ثابت ۲۶۰ برای تمامی ساختارها در نظر گرفته شده است. میدان القایی زمین دارای بزرگای ۴۶۰۰۰ نانو تسلا با زاویه‌ای میل و انحراف ۵۰ و ۳ درجه فرض شده است. فرض شده که زمین‌شناسی منطقه دارای خودپذیری مغناطیسی ۰.۰۰۰۱ در واحد SI است. داده‌های مشاهده‌ای مغناطیسی با نوفه‌ی گوسی به اندازه ۰.۵٪ دامنه سیگنال تلفیق شده است تا شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک باشد. فاصله برداشت‌ها ۰.۵ متر می‌باشد. محل و توزیع ساختارهای در نظر گرفته شده به صورت دو و سه بعدی در شکل (۱) نمایش داده شده است و خروجی بی‌هنجاری‌های حاصل و سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری کاهش به قطب آن در شکل (۲) (الف و ب) نشان داده شده است



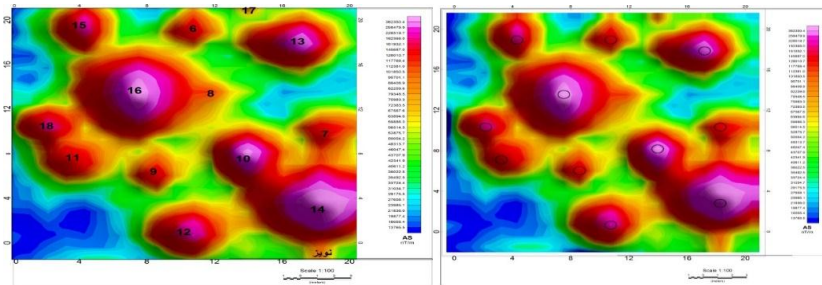
شکل ۱: توزیع ساختارهای شبیه‌سازی شده



شکل ۲: داده‌های پتانسیل ساختگی. الف: بی‌هنجاری مغناطیس ب: سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری کاهش به قطب مغناطیسی

لازم بذکر است قبل از پیاده‌سازی روش سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های مغناطیسی، روش کاهش به قطب بر روی داده‌های مغناطیسی اعمال شده است تا محل ساختارهای مورد نظر منطبق بر واقعیت شود. مشاهده شد که غالب ساختارهای شبیه‌سازی شده در نقشه سیگنال تحلیلی قابل شناسایی هستند ولی نکته‌ای که باید به آن توجه کرد، برجسته شدن اثرات نوفه در نقشه سیگنال تحلیلی می‌باشد که باعث ایجاد آژیرهای غلط و شناسایی نقاط غیر واقعی در الگوریتم بلکی می‌شود. برای کاهش اثر نوفه، داده‌های مغناطیس ۰.۳ متر به سمت بالا

گسترش داده می‌شوند که نتایج حاصل در شکل (۳ الف) نشان داده شده است. با توجه به نقاط مشخص شده بر روی شکل (۳ الف) می‌توان گفت بر روی نقشه سیگنال تحلیلی ۱۴ ساختار قابل تفکیک هستند که البته یکی از آنها نویز بوده است. پس می‌توان گفت با استفاده از نقشه سیگنال تحلیلی می‌توان اطلاعات مناسبی از محل ساختارها بدست آورد. سپس الگوریتم اتوماتیک بلکلی بر روی داده‌ها اعمال شد که نتایج آن در شکل (۳ ب) نشان داده شده است. سیمبل‌های دایره‌های محل‌های شناسایی شده توسط الگوریتم بلکلی را نشان می‌دهد. ۱۱ عدد از ساختارهای شبیه‌سازی شده در این روش شناسایی شده است. ساختار شماره (۸) چون در مجاورت ساختار بزرگ ۱۶ و ساختار ۵ در مجاورت ساختار بزرگ ۱۲ قرار گرفته است توسط روش اتوماتیک شناسایی نشده است. همچنین ساختارهای ۱۷، ۴، ۳، ۲، ۱ بدلیل کوچک بودن دارای اثر مغناطیسی ضعیفی بوده که با ۰.۳ متر گسترش رو به بالا اثرشان تضعیف شده و قابل مشاهده نمی‌باشند. به عبارت دیگر با گسترش فراسوی ۰/۵ متری الگوریتم بلکلی تقریباً ۶۱٪ درصد ساختارها را بدرستی شناسایی کرد و هیچ آژیر غلطی مشاهده نگردید ولی در حالتی که از فیلتر گسترش فراسو استفاده نمی‌شد تعداد ساختارهای صحیح شناسایی شده افزایش می‌یافت، اما تقریباً به همان میزان تعداد آژیرهای غلط نیز افزایش می‌یافت. بنابراین با اعمال فیلتر فراسو تعداد ساختارهای شناسایی شده کاهش یافته ولی از میزان خطا نیز به میزان زیادی کاسته می‌شود.



(ب)

(الف)

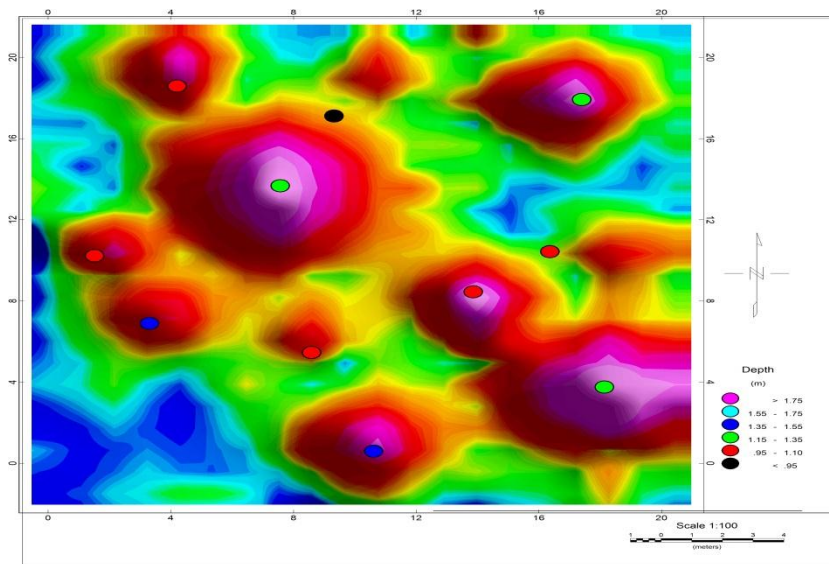
شکل ۳- الف) سیگنال تحلیلی داده‌های پتانسیل ۰/۳ متر گسترش یافته به سمت بالا (ب) نتایج الگوریتم بلکلی بر روی نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های پتانسیل ۰.۳ متر گسترش یافته به سمت بالا

در ادامه روش اویلر مکانی با شاخص ساختاری ۲/۵ بر روی داده‌ها اعمال شده است تا پارامترهای محل و عمق ساختارهای موجود را تخمین بزند. شاخص ساختاری ۲/۵ به این دلیل انتخاب شد که غالب ساختارهای ساختگی ما اشکال کروی کشیده می‌باشند که دارای

شاخص ساختاری بین اعداد ۲ و ۳ می‌باشند. جدول ۳ نتایج اویلر را برای ساختارهای مدل‌سازی شده مغناطیسی نشان می‌دهد و شکل ۴ نتایج این روش را بر روی نقشه سیگنال تحلیلی با گسترش فراسوی ۰/۳ متری نشان می‌دهد. این روش موفق شد محل و عمق را برای همه ساختارهای شناسایی شده توسط روش بلکلی تخمین بزند. به طور کلی با توجه به نتایج جدول ۳ و شکل ۴ و مقایسه با جدول ۲ می‌توان گفت که این روش با خطای قابل قبولی محل و عمق ساختارها را تخمین زده است به جزء برای آیت‌های خیلی کوچک که با مشکل مواجه شده است. از آن جایی که ساختارهای خیلی کوچک دارای دامنه پایین می‌باشند، عمق‌های تخمین زده شده واقعی نمی‌باشد. با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌گردد که روش اویلر مکانی در ۶ مورد عمق ساختارها را بدرستی تعیین کرده و در ۵ مورد دارای خطای نسبی $\pm 0/5$ است که این موضوع می‌تواند ناشی از طول پنجره انتخابی برای روش اویلر مکانی و یا نویز سطحی باشد و همچنین با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌گردد که روش اویلر مکانی، مکان ۹ ساختار را بدرستی تعیین کرده و در ۲ مورد مکان ساختار بدرستی تعیین نشده و دارای خطا می‌باشد.

جدول ۳: نتایج روش اویلر مکانی

	X cor (m)	Y cor (m)	X (m) Euler	Y (m) Euler	Depth of center	Estimated Depth
1(Body 12)	11	.6	10.61	0.60	2.2	1.41
2(Body 14)	18.3	2.9	18.13	3.76	1	1.18
3(Body9)	9	6	8.59	5.46	1.3	1.32
4(Body 11)	3.7	7	3.30	6.89	2.3	1.81
5(Body 10)	14.3	7.7	13.86	8.45	1.5	1.42
6(Body 18)	2	10	1.51	10.23	0.3	1.13
7(Body 7)	18.27	10.32	16.36	10.43	0.9	1.05
8(Body 16)	7.4	12.7	7.57	13.68	1.5	1.33
9(Body 13)	17.5	17.7	17.39	17.93	1.3	1.24
10(Bod15)	4.3	19.1	4.20	18.59	2.5	1.14
11(Body6)	11.1	18.8	9.32	17.12	0.5	0.93



شکل ۴: نتایج روش اویلر مکانی بر روی نقشه سیگنال تحلیلی با گسترش فراسوی ۰/۳ متری

با توجه به نتایج روش اویلر می توان گفت این روش موفق به شناسایی ۶۱٪ ساختارهای مدفون شد که عمق ۳۳٪ ساختارهای شناسایی شده کاملاً صحیح بوده و عمق ۲۸٪ باقی دارای خطای ناچیز ۰/۵ متری بوده که قابل قبول است. مکان ۹ ساختار به درستی تعیین گشته یعنی به عبارتی مکان ۵۰٪ ساختارها به درستی شناسایی شده و ۱۱٪ ساختارها با وجود شناسایی در مورد مکان دارای خطا می باشند. در مجموع می توان گفت روش اویلر یک روش مناسب برای شناسایی مکان و عمق ساختارهای مدفون می باشد که دارای خطای قابل قبولی است.

۴- تعریف پارامتر جدید برای بررسی احتمال اکتشاف

برای بررسی داده ها چند پارامتر جدید تعریف شد که با تجزیه و تحلیل این پارامترها می توان احتمال اکتشاف ساختارها را بصورت کمی بررسی کرد. این پارامترها عبارتند از X و Y که به صورت زیر تعریف می شوند

$$X = \frac{\text{حجم}(cm^3)}{\text{زاویه} * \text{عمق}(cm)} \quad (9)$$

$$Y = \frac{\text{حجم}(cm^3)}{\text{عمق}(cm)} \quad (10)$$

جدول ۴: احتمال اکتشاف با الگوریتم بلکلی و روش سیگنال تحلیلی-اویلر با تجزیه و تحلیل پارامتر

X و Y

	عمق	حجم	زاویه (درجه)	رادیان	X	Y	کشف
۱	۶	۷۳	۵۰	۰.۸۷۲	۱۳.۹۵	۱۲.۱۶	خیر
۲	۲۰	۲۳۱	۷۵	۱.۳۰۸۳	۸.۸۲	۱۱.۵۵	خیر
۳	۸۰	۳۰۹	۴۰	۰.۶۹۷	۵.۵۴	۳.۸۶	خیر
۴	۸۰	۴۰۷	۱۵	۰.۲۶۱	۱۹.۴۹	۵.۰۸	خیر
۵	۶۰	۱۳۵۷	۱۵	۰.۲۶۱	۸۶.۶۵	۲۲.۶۱	خیر
۶	۳۵	۲۷۷۱	۵۵	۰.۹۵۹	۸۲.۵۵۶	۷۹.۱۷	بله
۷	۹۰	۸۸۰۶	۸۵	۱.۴۸	۶۶.۱۱۱	۹۷.۸۴	بله
۸	۱۱۰	۱۳۹۵۱	۲۵	۰.۴۳۶	۲۹۰.۸۸۸	۱۲۶.۸۲	خیر
۹	۱۳۰	۱۸۵۵۶	۵	۰.۰۸۷۲	۱۶۳۶.۹	۱۴۲.۷۳	بله
۱۰	۱۵۰	۵۸۵۵۱	۲۰	۰.۳۴۸	۱۱۲۱.۶	۳۹۰.۳۴	بله
۱۱	۲۳۰	۹۸۲۱۱	۳۵	۰.۶۱۰	۷۰۰	۴۲۷	بله
۱۲	۲۲۰	۱۴۵۸۶۰	۵	۰.۰۸۷۲	۷۶۰۳	۶۶۳	بله
۱۳	۱۳۰	۵۸۹۰۶	۱۰	۰.۱۷۴	۲۶۰۴	۴۵۳.۱۲	بله
۱۴	۱۰۰	۱۰۷۸۸۵	۴۰	۰.۶۹۷	۱۵۴۷.۸۴	۱۰۷۸.۸۵	بله
۱۵	۲۵۰	۱۱۰۷۱۷	۴۰	۰.۶۹۷	۶۳۵	۴۴۲	بله
۱۶	۱۵۰	۲۷۳۳۸۳	۵۰	۰.۸۷۲	۲۰۹۰	۱۸۲۲	بله
۱۷	۳۰	۱۵۰۰۰	۵۰	۰.۸۷۲	۵۷۳	۵۰۰	خیر
۱۸	۳	۹۹۸۴۶	۵۰	۰.۸۷۲	۳۸۱۶۷	۳۳۲۸۲	بله

با توجه به جدول ۴ برای اکتشاف ساختارها به وسیله الگوریتم بلکلی و روش اویلر، برای پارامتر Y می توان حد آستانه ۷۹ را تعریف کرد به عبارتی ساختارها با Y بیشتر از ۷۹ را می توان با الگوریتم بلکلی و روش اویلر اکتشاف کرد. ولی در مورد ساختارهای ۸ و ۱۷ با وجود Y بیشتر از ۷۹ این ساختارها اکتشاف نشدند که این موضوع را می توان برای ساختار شماره ۸ به نزدیکی این ساختار به ساختار بزرگتر شماره ۱۶ نسبت داد که بی هنجاری مغناطیسی

ساختار شماره ۸ را تحت تاثیر قرار داده است و در مورد ساختار شماره ۱۷ نیز نزدیکی به ساختار بزرگتر شماره ۱۳ باعث تضعیف اثر ساختار شماره ۱۷ شده است. در پارامتر X، زاویه بیان شده در واقع زاویه بین ساختار UXO و جهت میدان مغناطیسی است که با توجه به زاویه میل ۵۰ درجه ای مرتبط با داده ها محاسبه گردیده است. با توجه به جدول ۴ برای اکتشاف ساختارها به وسیله الگوریتم بلکلی و روش اویلر مکانی، برای پارامتر X نیز می توان حد آستانه ۶۶ را تعریف کرد به عبارتی ساختارها با X بیشتر از ۶۶ را می توان با الگوریتم بلکلی و روش اویلر اکتشاف کرد. ولی در مورد ساختارهای ۸، ۵ و ۱۷ با وجود X بیشتر از ۶۶ این ساختارها اکتشاف نشدند که این موضوع را می توان برای ساختار شماره ۸ به نزدیکی این ساختار به ساختار بزرگتر شماره ۱۶ و در مورد ساختار شماره ۱۷ نیز نزدیکی به ساختار بزرگتر شماره ۱۳ نسبت داد و در مورد ساختار ۵ می توان به نزدیکی به ساختار ۱۲ و ۱۴ نسبت داد.

۵- بررسی داده های مغناطیسی واقعی و نتایج روش اویلر مکانی بر آن

طی یک مطالعه تحقیقاتی ورقه های فولادی و یک لوله آهنی توخالی و یک تیر آهن در محوطه ژئومغناطیس موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران در عمق های ۰/۵ تا ۱ متر دفن شد. مشخصات ساختارهای دفن شده در جدول ۵ نشان داده شده است. در مرحله اول کل ناحیه با یک شبکه برداشت مربعی ۱۰ متری مطالعه شده است و بی هنجاری حاصله در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این مرحله ۴ قسمت کوچکتر برای مرحله بعد تشخیص داده شد. دیگر قسمت های محتمل ناشی از نوبزهای قوی در این ناحیه می باشد و ناشی از آنومالی های مورد نظر نیست.

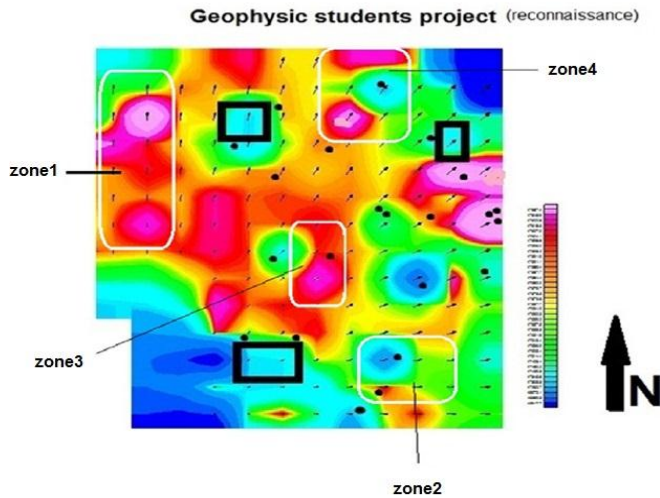
جدول ۵: مشخصات و عمق دفن ساختارهای مدفون در محوطه ژئومغناطیس موسسه ژئوفیزیک

دانشگاه تهران

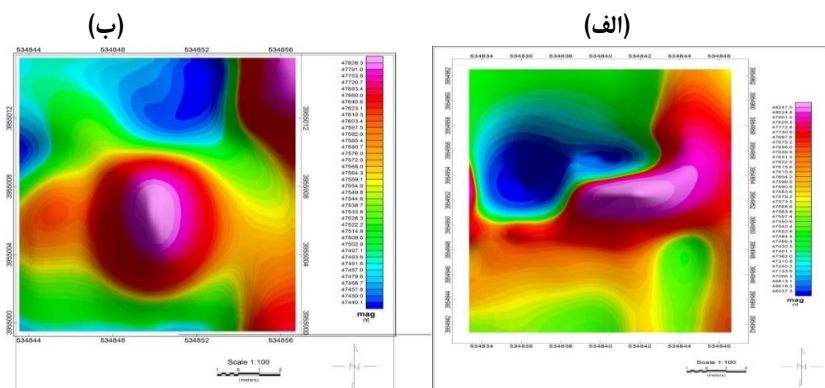
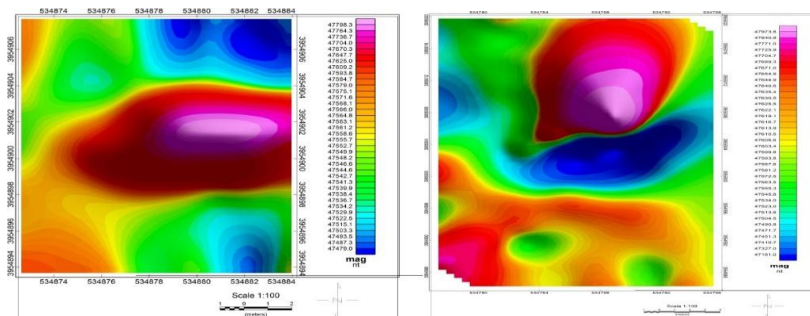
ساختارها	طول (متر)	عرض (قطر) (متر)	ضخامت (میلیمتر)	عمق دفن (متر)
ورقه (لایه های)	۶	۱/۵	حدود ۱۰	۱
گسلی (دو ورقه در عمق های متفاوت)	۱۲	۱/۵	حدود ۱۰	۰/۵ و ۱
لوله توخالی (توخالی)	۵/۵	۰/۵	حدود ۵	۰/۵
تیر آهن (میله ای)	۶	-	-	۰/۵

در مرحله جستجو ۴ ناحیه مشخص شده با یک شبکه برداشت ۲*۲ مورد بررسی تفصیلی قرار گرفت و نتایج بی‌هنجاری حاصل در شکل ۶ به صورت مجزا برای هر ناحیه نمایش داده شده است. در شکل ۶ برای کاهش نویزهای سطحی از فیلتر گسترش فراسوی ۰/۵ متری استفاده شده است

در شکل ۵ میدان مغناطیسی اشیای سطحی گفته شده به صورت بی‌هنجاری موضعی و بهم فشرده نمایان شده‌اند. ساختارهای مدفون در محوطه به صورت ۴ ناحیه مشخص گردیده‌اند که بی‌هنجاری‌های ناحیه ۱ ساختار میله ای، ناحیه ۲ ساختار استوانه ای، ناحیه ۳ ساختار گسلی و ناحیه ۴ ساختار ورقه‌ای می‌باشد.



شکل ۵: بی‌هنجاری داده واقعی حاصل از برداشت مغناطیسی در محوطه موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران



(د)

(پ)

شکل ۶: بی‌هنجاری مغناطیسی ± 0.5 متر گسترش یافته به بالا، حاصل از ساختارهای مدفون در محوطه ژئومغناطیس موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران. (الف) ناحیه ۱ (ب) ناحیه ۲ (پ) ناحیه ۳ (د) ناحیه ۴

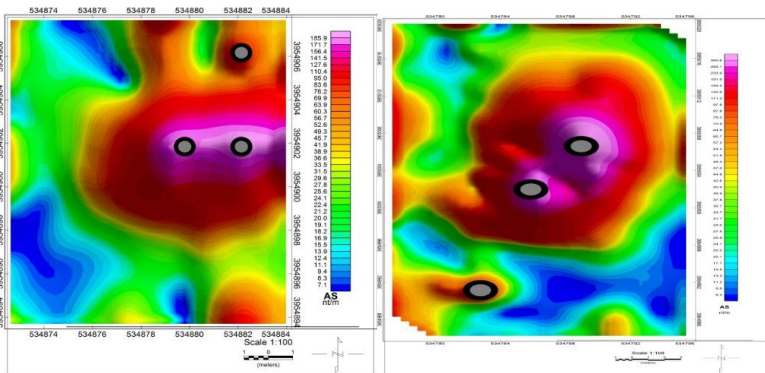
در شکل (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی ناحیه ۱ حاصل از ساختار میله ای به صورت یک دوقطبی با امتداد شمالی-جنوبی نمودار شده است. گسترش طولی این بی‌هنجاری (فاصله مرکز منفی تا مرکز مثبت دوقطبی) حدود $5/5$ متر است که نسبت به طول میله مدفون $8/5$ درصد خطا دارد.

در شکل (ب) بی‌هنجاری مربوط به ساختار استوانه ای (ناحیه ۲) نسبت به بی‌هنجاری ناحیه ۱ کشیده تر و مقادیر میدان مثبت، دارای امتداد شمال شرق-جنوب غرب است. این بی‌هنجاری تحت تاثیر میدان حاصل از دیرک پرچمی که در سمت شمال غربی آن واقع شده، قرار گرفته است. گسترش طولی این بی‌هنجاری حدود $6/25$ متر است که با توجه به طول واقعی استوانه دارای خطای $13/6$ درصد است.

در شکل (۶ پ) بی هنجاری مربوط به ساختار گسلی (ناحیه ۳) با کشیدگی بیشتر روی قسمت شمالی نمودار شده است. گسترش طولی آن حدود ۱۲/۵ متر است.

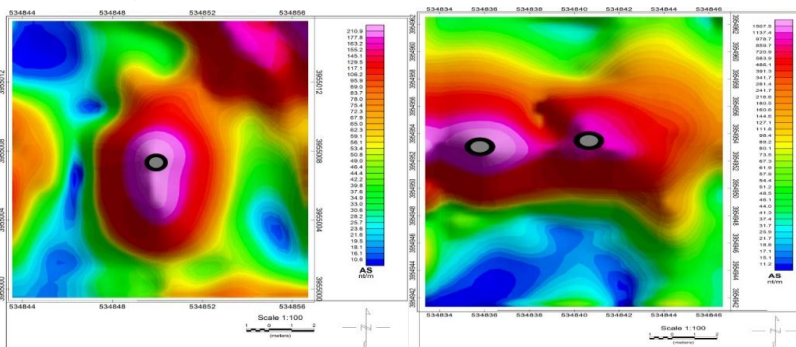
در شکل (۶ د) بی هنجاری ساختار ورقه ای (ناحیه ۴) در مقایسه با سه بی هنجاری قبلی به صورت نامشخص تری خود را نشان می دهد. علت این امر می تواند عمق دفن بیشتر آن نسبت به دیگر ساختارها باشد.

در ادامه روش سیگنال تحلیلی بر روی داده ها اعمال گردید تا مرزهای آنومالی ها مشخص گردند، سپس با استفاده از الگوریتم بلکلی محل ساختارهای احتمالی شناسایی می شود. که محل این ساختارها در شکل ۷ بر روی نقشه سیگنال تحلیلی با گسترش ۰/۵ متر به سمت بالا نشان داده شده است. در این مرحله تعدادی آژیر غلط نیز شناسایی می شود. که با استفاده از مشاهدات زمین شناسی می توان تعدادی از آنها را حذف کرد.



(ب)

(الف)



(د)

(پ)

شکل ۷ نتایج الگوریتم بلکلی بر روی نقشه سیگنال تحلیلی داده های پتانسیل +۰.۵ متر گسترش یافته به سمت بالا مغناطیسی، حاصل از ساختارهای مدفون در محوطه ژئومغناطیسی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران. سیمبل دایره محل های بدست آمده از پیاده سازی الگوریتم بلکلی می باشد

(الف) زون ۱ (ب) زون ۲ (پ) زون ۳ (د) زون ۴

ناحیه ۱- در این زون سه ساختار احتمالی با الگوریتم بلکلی کشف گردید که ساختار کوچک پایینی ناشی از عوارض سطحی می باشد.

ناحیه ۲- در این زون نیز سه ساختار احتمالی با الگوریتم بلکلی مشخص گردید که ساختار کوچک بالای اثر نویز سطحی می باشد که با توجه به مشاهدات در حین برداشت قابل حذف می باشد.

ناحیه ۳- در این زون دو ساختار احتمالی با الگوریتم بلکلی مکان یابی گردید.

ناحیه ۴- در این زون یک ساختار احتمالی با الگوریتم بلکلی مکان یابی شد.

الگوریتم بلکلی در واقع نقاطی را که دارای دامنه بیشتر نسبت به اطراف خود می باشد را به عنوان محل احتمالی ساختار مدفون شناسایی می کند.

در ادامه روش اویلر مکانی به صورت مجزا بر روی هر ۴ ناحیه اعمال گردید که نتایج حاصل در جدول ۶ و شکل ۸ برای هر زون بصورت مجزا نشان داده شده است.

جدول ۶- نتایج روش اویلر مکانی (الف) ناحیه ۱ (ب) ناحیه ۲ (ج) ناحیه ۳ (د) ناحیه ۴

Zone1	x Euler	YEuler	Depth
1	534791.23	3954988.62	0.8
2	534783.21	3954990.79	0.38
3	534785.03	3955001.77	0.71
4	534788.97	3955006.19	0.67

الف

Zone2	x Euler	YEuler	Depth
1	534878.03	3954902.05	1.34
2	534883.16	3954902.13	0.71
3	534881.82	3954906.43	0.11

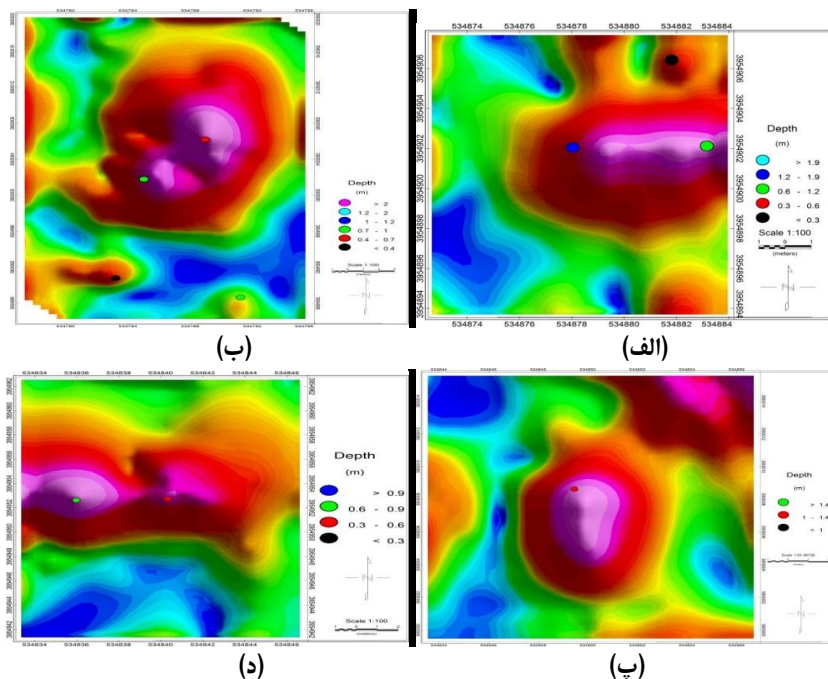
ب

Zone3	x Euler	YEuler	Depth
1	534835.98	3954952.63	0.73
2	534840.33	3954952.75	0.57

ج

Zone4	x Euler	YEuler	Depth
1	534849.47	3955008.62	1.25

د



شکل ۸: نتایج روش اویلر مکانی بر روی نقشه سیگنال تحلیلی با ۵/۰ متر گسترش فراسوی
 (الف) ناحیه ۱ (ب) ناحیه ۲ (پ) ناحیه ۳ (د) ناحیه ۴

ناحیه ۱- در این ناحیه، ۴ ساختار احتمالی با روش اویلر مکانی کشف گردید، عمق و مکانشان محاسبه گردیده که دو ساختار کوچک پایینی ناشی از عوارض سطحی می باشد و عمق و مکان محاسبه شده برای دو ساختار باقی مانده دارای خطای ناچیزی ۰/۲ متری بوده که قابل چشم پوشی است.

ناحیه ۲- در این ناحیه، ۳ ساختار احتمالی با روش اویلر مکانی کشف گردید، عمق و مکانشان محاسبه گردیده که ساختار کوچک پایینی با عمق ناچیز ناشی از عوارض سطحی می باشد و برای دو ساختار باقی مانده عمق و مکان محاسبه شده دارای خطای ناچیزی بوده که قابل چشم پوشی است.

ناحیه ۳- در این ناحیه، ۲ ساختار احتمالی با روش اویلر مکانی کشف گردید، عمق و مکانشان محاسبه گردیده دارای خطای ناچیزی بوده که قابل چشم پوشی است.

ناحیه ۴- در این ناحیه، ۱ ساختار احتمالی با روش اویلر مکانی کشف گردید که عمق و مکان محاسبه گردیده دارای خطای ناچیزی بوده و قابل چشم پوشی است.

همانطور که مشاهده گردید روش اویلر به خوبی و با خطای ناچیز عمق و مکان ساختارهای مدفون را در مدل ساختگی و واقعی مشخص کرد و می توان گفت روش اویلر یکی از

روش‌های نیمه اتوماتیک مناسب برای مشخص کردن عمق و مکان ساختارهای مدفون می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

یکی از دغدغه‌های مهم پس از جنگ تحمیلی پاکسازی زمین از مین‌ها و بمب‌های عمل نکرده مدفون در آن می‌باشد که متأسفانه هر ساله عده‌ای از هم وطنان عزیزمان کشته و یا زخمی می‌شوند. روش مغناطیسی یکی از بهترین روش‌ها در اکتشاف ساختارهای فلزی مدفون می‌باشد که می‌تواند بیشتر ساختارهای مدفون را شناسایی کند. در صورتی که ساختارهای مدفون کوچک مقیاس بوده و دارای دامنه ضعیفی باشند احتمال اکتشاف کمی دارند. همچنین در صورتی که یک ساختار در مجاورت ساختار بزرگتر با دامنه خیلی قوی‌تر قرار بگیرد احتمال شناسایی کمی دارد. در این تحقیق داده‌های ساختگی ۱۶ مدل کروی کشیده و ۲ استوانه قائم و داده‌های واقعی حاصل از یک مطالعه تحقیقاتی در محوطه موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران مورد بررسی قرار گرفتند. در ابتدا فیلتر کاهش به قطب مغناطیسی بر روی داده‌ها اعمال گشت تا محل ساختارها منطبق بر واقعیت باشد سپس با اعمال فیلتر گسترش فراسو سعی در کاهش نویزهای سطحی شد. در مرحله بعد با محاسبه سیگنال تحلیلی داده‌ها دید مناسبی از محل بی‌هنجاری‌ها بدست آمد. در ادامه با اعمال الگوریتم بلکلی مکان ساختارها بر روی نقشه سیگنال تحلیلی مشخص گردیده و سپس با استفاده از روش اویلر عمق و مکان ساختارها به صورت عددی محاسبه گردید. روش اویلر از جمله روش‌هایی است که در صورت بکارگیری آن بر روی داده‌های پتانسیل مغناطیس پارامترهای عمق و مکان هدف مورد جستجو تخمین زده می‌شود. لازم بذکر است اعمال این روش به همراه الگوریتم تعیین محل بلکلی بر روی ساختارهای شبیه سازی شده ساختگی و واقعی منجر به کشف درصد بالای از ساختارهای مدفون شد. همچنین در ادامه با تعریف دو پارامتر جدید X و Y سعی شد تا با استفاده از این دو پارامتر حد آستانه‌ای مشخصی برای اکتشاف ساختارها با استفاده از روش بلکلی و اویلر تعریف گردد، به گونه‌ای که ساختارها با X بیشتر از حد آستانه ۶۶ و Y بیشتر از حد آستانه ۷۹ قابل شناسایی هستند. لازم بذکر است این حد آستانه برای ساختارهای که تحت تاثیر نویز شدید زمین‌شناسی بوده یا تحت تاثیر ساختارهای مجاور با دامنه قوی‌تر است دچار مشکل می‌شود و این حد آستانه برای ساختارهای فلزی مدفون تعریف شده است.

۷- تعارض منافع

نویسنده گان اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

۸- دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۹- منابع

- [1] Drahor, M.G., Berge, M.A., Öztürk, C., 2011. Integrated geophysical surveys for the subsurface mapping of buried structures under and surrounding of the Agios Voukolos Church in Izmir, Turkey. *Journal of Archaeological Science* 38, 2231-2242.
- [2] Sravanthi, S., Malik, J.N., Vikrama, B., 2012. Ground penetrating radar investigations at Ahichhatra: an attempt to identify buried subsurface structures, 2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). *IEEE*, pp. 625-630.
- [3] HOINKES, G., HAUZENBERGER, C., FELFERNIG, A., 1998. Gravimetric and magnetometric anomalies in the Sierras Pampeanas of San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 53, 549-552.
- [4] Fedi, Maurizio, Giovanni Florio, and Antonio Rapolla. "A method to estimate the total magnetization direction from a distortion analysis of magnetic anomalies 1." *Geophysical Prospecting* 42.3 (1994): 261-274.
- [5] Mancinelli, Paolo, et al. "Three dimensional gravity local inversion across the area struck by the 2016–2017 seismic events in Central Italy." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125.2 (2020): e2019JB018853.
- [6] Tschirhart, V., et al. "3D geophysical inversions of the north- east Amer Belt and their relationship to the geologic structure." *Geophysical Prospecting* 61 (2013): 547-560.

- [7] Thompson, D. T. "EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data." *Geophysics* 47.1 (1982): 31-37.
- [8] Ravat, D. "Analysis of the Euler method and its applicability in environmental magnetic investigations." *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 1.3 (1996): 229-238.
- [9] Reid, Ab B., et al. "Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution." *Geophysics* 55.1 (1990): 80-91.
- [10] Salem, Ahmed, and Dhananjay Ravat. "A combined analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of magnetic data." *Geophysics* 68.6 (2003): 1952-1961.
- [11] Salem, Ahmed, et al. "Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives." *The leading edge* 26.12 (2007): 1502-1505.
- [12] Erkan, Kamil, and Christopher Jekeli. "A comparative analysis of geophysical fields for multi-sensor applications." *Journal of Applied Geophysics* 74.2-3 (2011): 142-150.
- [13] Zhou, Shuai, Danian Huang, and Chao Su. "Magnetic anomaly depth and structural index estimation using different height analytic signals data." *Journal of Applied Geophysics* 132 (2016): 146-151.
- [14] Hegyi, A., Urdea, P., Floca, C., Ardelean, A., Onaca, A., 2019. Mapping the subsurface structures of a lost medieval village in South- Western Romania by combining conventional geophysical methods. *Archaeological Prospection* 26, 21-32.
- [15] Ebrahimi, A., Narasimman Sundararajan, and V. Ramesh Babu. "A comparative study for the source depth estimation of very low frequency electromagnetic (VLF-EM) signals." *Journal of Applied Geophysics* 162 (2019): 174-183.
- [16] Fedi, Maurizio, and Antonio Rapolla. "3-D inversion of gravity and magnetic data with depth resolution." *Geophysics* 64.2 (1999): 452-460.
- [17] Fedi, Maurizio, Per Christian Hansen, and Valeria Paoletti. "Analysis of depth resolution in potential-field inversion." *Geophysics* 70.6 (2005): A1-A11.

[18] Fedi, Maurizio. "DEXP: A fast method to determine the depth and the structural index of potential fields sources." *Geophysics* 72.1 (2007): I1-I11.

[19] Thompson, D. T. "EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data." *Geophysics* 47.1 (1982): 31-37.

[20] Reid, Ab B., et al. "Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution." *Geophysics* 55.1 (1990): 80-91.

[21] Ravat, D. "Analysis of the Euler method and its applicability in environmental magnetic investigations." *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 1.3 (1996): 229-238.