(مقاله پژوهشی)

مدلسازی همبستگی متقابل سهبعدی دادههای مغناطیسسنجی معدن شواز، یزد، ایران

ایمان احمدی'، احمد قربانی*'، عبدالحمید انصاری'، امین حسین مرشدی'

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: اسفند ۱۳۹۸، پذیرش: آبان ۱۳۹۹)

چکیدہ

در این مقاله به معرفی روش همبستگی متقابل سهبعدی برای تفسیر دادههای مغناطیسسنجی و گرادیان قائم آنها پرداختهشده است که روشی بسیار سریع برای مدلسازی دادهها در فضای احتمال، تشخیص مناطق بیهنجاری و نحوه گسترش پیرامونی و عمقی تودههای مدفون است. در این مقاله برای نخستین بار و باهدف مدلسازی توده کانساری، از این روش در محیط معدنی استفادهشده است. در این روش ابتدا زمین به یک شبکه منظم سهبعدی تقسیم بندی شده، سپس مقدار همبستگی هر گرهی شبکه نسبت به کل شبکه برداشت محاسبه شده و در انتها توموگرام این مقادیر رسم می شود. مناطق با بیشترین مقدار قدر مطلق، محتمل ترین محل برای وجود تودههای مدفون می باشند. باید توجه داشت که نتایج در محدوده [1+1–] قرار دارند که بیانگر فزونی یا کسری مغناطش یا خودپذیری مغناطیسی تودهی بی هنجاری نسبت به مغناطش یا خودپذیری مغناطیسی توده میزبان قدرت تفکیک عرضی روش، از دو مکعب با مقادیر متفاوت خودپذیری مغناطیسی، تشکیل شده است. هر دو مدل در محیطی همگن قدرت تفکیک عرضی روش، از دو مکعب با مقادیر متفاوت خودپذیری مغناطیسی، تشکیل شده است. هر دو مدل در محیطی همگن قدرا داشته و مقدار مغناطیس بازماند در تودهها صفر در نظر گرفته شده است. نتایج نشانده است. هر دو مدل در محیطی همگن است. این روش بر روی دو مدل مصنوعی اعمال شد. مدل اول ساده ترین مدل و شامل یک مکعب و دومین مدل به منظور سنجش قدرت تفکیک عرضی روش، از دو مکعب با مقادیر متفاوت خودپذیری مغناطیسی، تشکیل شده است. هر دو مدل در محیطی همگن است. این روش بر روی دو مدل مصنوعی اعمال شد. مدل اول ساده ترین مدل و شامل یک مکعب و دومین مدل در محیطی همگن اعمار داشته و مقدار مغناطیس بازماند در تودهها صفر در نظر گرفته شده است. نتایج نشانده ندهی معدن شواز و گرادیان قائم آنها اعمال شد. نتایج حاصل با مدلسازی پیشین صورت گرفته و اطلاعات حاصل از گمانههای موجود در محدوده، مقایسه گردیده و رماه این مانی از مانی معدن شواز و گرادیان قائم آنها

كلمات كليدى

مغناطیسسنجی، همبستگی متقابل، خودپذیری مغناطیسی، شواز، مدلسازی

^{*}عهدهدار مكاتبات: aghorbani@stu.yazd.ac.ir

۱ ـ مقدمه

امروزه اكتشاف به روش مغناطيسسنجي، نقش مهم و گستردهای در بسیاری از شاخههای علوم زمین نظیر مطالعات تكتونيك، اكتشاف معدني، اكتشاف ميدانهاي گازی و نفتی، مسائل محیط زیستی دارد. اولین هدف در برداشت مغناطیسسنجی، تحقیق در مورد زمینشناسی زیرسطحی ساختارهای مدفون در اثر خواص مغناطیسی ساختارهای سنگی زیرسطحی است. برای افزودن جزئیات بیشتر و داشتن دیدی بهتر جهت تفسیر دادههای مغناطیس سنجی، می توان از گرادیان داده ها نیز استفاده نمود که می تواند به شکل گرادیان افقی، قائم یا مجموع باشد. گرادیان قائم دادهها معمولاً با اعمال روش فوریه یا سایر روشها بر روی دادههای مغناطیس سنجی شبکهبندی شده به دست میآید [۱]. در کارهای پیشین صورت گرفته نظیر مطالعات گمی و همکاران (۱۹۹۷) و دال و همکاران (۲۰۰۶)، به تفصیل در مورد مزایا و معایب استفاده از گرادیان دادهها صحبت شده است [۲، ۳].

مهمترین گام در تفسیر کمی دادههای مغناطیسسنجی (یا گرادیان قائم این دادهها) وارونسازی است که جهت تخمین عمق و خواص تودههای مدفون زیرسطحی به کار میرود. دو رویکرد عمده در وارونسازی دادههای مغناطیسسنجی وجود دارد. رویکرد اول شامل استفاده از الگوریتمهای خطی و غیرخطی است. این رویکرد مشکلات عدیدهای دارد که از آن جمله میتوان به عدم یکتایی پاسخها^۱، نیازمند بودن به مدل اولیه^۲ و همچنین صرف زمان زیاد برای وارونسازی دادههای مغناطیسسنجی اشاره کرد که به علت تعداد بالای دادهها و پارامترهای مدل میباشد [۴]. راهکارهای متعددی در طی چند دهه اخیر جهت رفع این مشکلات ارائهشده است.

اما رویکرد دیگری نیز برای مدلسازی دادههای مغناطیسسنجی و گرادیان قائم این دادهها نیز وجود دارد و آن استفاده از روش همبستگی متقابل سهبعدی^۳ میباشد که بدون هیچ گونه محدودیت خارجی و هرگونه خطی سازی و در فضای احتمال میباشد. این روش نخستین بار توسط پاتلا (۱۹۹۷) برای تفسیر دادههای پتانسیل خودزا (SP) جهت مکانیابی بیهنجاریهای زیرسطحی معرفی شد و سپس این روش برای میدانهای الکترومغناطیسی القایی با منبع

توسعه داده شد. توموگرافی احتمال جهت تفسیر سه مؤلفه میدان مغناطیسی نیز استفادهشده است [۵–۱۲]. این روش همچنین برای منابع چندقطبی SP جهت تعیین مکانهای محتمل مراکز و مرزهای آنها مورداستفاده قرار گرفت [۱۳]. در تحقیقات بعدی ژو و همکاران (۲۰۱۱)، این روش را بر روی دادههای گرادیان قائم گرانی مورداستفاده قراردادند [۱۴]. مطالعات پیشین نشان داد که این روش مانند روشهای وارونسازی معمول نیاز به تکرار مدل پیشرو ندارد، درنتیجه طرف دیگر این روش قادر به بازیابی خواص فیزیکی تودههای بیهنجاری نیست، بنابراین در صورت نیاز به یافتن خصیصه فیزیکی نظیر مغناطش^۶ یا خودپذیری مغناطیسی^۵ توده یا تودههای مدفون، میتوان از نتایج حاصل از این روش بهعنوان مدل اولیهای، برای وارونسازیهای بعدی به کمک روشهای دیگر استفاده نمود.

در این مقاله، به معرفی روش همبستگی متقابل سهبعدی بر رویدادههای میدان مغناطیس کل و گرادیان قائم آن پرداخته و سپس با اعمال این روش بر روی دو مثال مصنوعی، نقاط ضعف و قوت این روش به بحث گذاشته مى شود. مدل مصنوعى اول، سادەترىن حالت، شامل مكعبى با اختلاف خودپذیری مغناطیسی ۲۰۰۱ (SI) نسبت به زمینهای همگن میباشد. در مدل دوم، بهمنظور ارزیابی توانایی روش در تفکیک عرضی بی هنجاری ها، دو مکعب با مقادیر اختلاف خودپذیری متفاوت نسبت به زمینه و یکدیگر، در محیطی همگن قرار داده شدند. لازم به ذکر است مقادیر مغناطیس بازماند برای هر دو مدل مصنوعی صفر بوده و در هر دو مدل، تودههای مدفون در جهت میدان مغناطیسی زمین، مغناطیده⁶ شدهاند. درنهایت، با اعمال این روش بر روی دادههای برداشت مغناطیس سنجی معدن آهن شواز واقع در یزد و گرادیان قائم این دادهها، به بحث در مورد مدلسازی سهبعدی توده کانسار آهن پرداخته میشود.

۲-روش تحقیق

برداشت بر روی صفحه افقی (x,y) و با فرض جهت z به سمت پائین در سیستم مختصاتی کارتزین صورت می گیرد. فرض شده است که محل المان کروی شکل همگن مغناطیده ^γ در سیستم مختصات کارتزین به صورت $q(x_q, y_q, z_q)$ ، حجم این المان p_i ، مغناطش کلی آن $p_i e$ ممان مغناطیس آن $p_q = J_q v_q$ است. زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی زمین را به

ترتیب I_0 و A'_0 در نظر گرفته درحالی که این مقادیر برای مغناطش کره برابر با I و A' هستند. این المان کروی شکل بهعنوان یک دوقطبی مغناطیسی فرض شده است. اگر برداشت بر روی ایستگاه تصادفی $P = (x_i, y_i, z_i)$ صورت گیرد، مقدار بی هنجاری میدان کل مغناطیسی تئوری بهصورت رابطه (۱) محاسبه می شود [۵]:

$$\Delta T_q(x_i, y_i, z_i) = \frac{\mu_0 M_q}{4\pi} . B_q(x_i, y_i, z_i)$$
(1)

که μ_0 تراوایی مغناطیسی خلاً و $B_q(x_i, y_i, zi)$ تابع هندسی دوقطبی q است که به صورت رابطه (۲) محاسبه می شود:

$$B_{q}(x_{i}, y_{i}, z_{i}) = \frac{1}{r_{i}^{5}} [a.(x_{q} - x_{i})^{2} + b.(y_{q} - y_{i})^{2} + c.(x_{q} - x_{i}).(z_{q} - z_{i}) + d.(y_{q} - y_{i}).(z_{q} - z_{i}) + e.(x_{q} - x_{i}).(y_{q} - y_{i}) + f.(z_{q} - z_{i})^{2}]$$

$$+ e.(x_{q} - x_{i}).(y_{q} - y_{i}) + f.(z_{q} - z_{i})^{2}]$$

$$+ c.(x_{q} - x_{i})^{2} + (y_{q} - y_{i})^{2} + (z_{q} - z_{i})^{2} + (z_{q} - z_{i})^{2}$$

$$\begin{split} \mathbf{a} &= 2 \cdot \mathbf{l} \cdot \mathbf{L} - \mathbf{n} \cdot \mathbf{N} - \mathbf{m} \cdot \mathbf{M}, \, \mathbf{b} &= 2 \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{M} - \mathbf{l} \cdot \mathbf{L} - \mathbf{n} \cdot \mathbf{N} \\ \mathbf{c} &= 3 \cdot (\mathbf{l} \cdot \mathbf{N} + \mathbf{n} \cdot \mathbf{L}), \, d = 3 \cdot (m \cdot N + n \cdot M) \\ \mathbf{e} &= 3 \cdot (\mathbf{l} \cdot \mathbf{M} + \mathbf{m} \cdot \mathbf{L}), \, f = 2 \cdot n \cdot N - m \cdot M - l \cdot L \\ \mathbf{N} &= \sin\mathbf{I}, \, \mathbf{L} = \cos\mathbf{I}^* \cos A' \\ \mathbf{M} &= \cos\mathbf{I} * \sin\mathbf{A}' \\ \mathbf{M} &= \cos\mathbf{I} * \sin\mathbf{A}' \\ \mathbf{n} &= \mathbf{cosI} * \sin\mathbf{cosI}, \, \mathbf{c} = \mathbf{cosI} \cdot \mathbf{c} \\ \mathbf{n} &= \mathbf{cosI} * \sin\mathbf{a}' \\ \mathbf{n} &= \mathbf{cosI} = \mathbf{cosI} \cdot \mathbf{c} \\ \mathbf{n} &= \mathbf{cosI} + \mathbf{cosI} \\ \mathbf{n} &= \mathbf{cosI} = \mathbf{cosI} \\ \mathbf{n} &= \mathbf{cosI} + \mathbf{cosI} \\ \mathbf{n} &= \mathbf{cosI} + \mathbf{cosI} \\ \mathbf{n} &= \mathbf{cosI} \\ \mathbf{n} \\ \mathbf{n} &= \mathbf{cosI} \\ \mathbf{n} \\ \mathbf{n$$

$$\frac{\partial \Delta T_q(x_i, y_i, z_i)}{\partial z} = \frac{\mu_0 M_q}{4\pi} \cdot B_{z,q}(x_i, y_i, z_i) \tag{(7)}$$

که (B_{z.q}(xi,yi,zi) تابع هندسی گرادیان قائم در اثر المان دوقطبی q میباشد و بهصورت رابطه (۴) محاسبه میشود:

$$B_{z,q}(x_i, y_i, z_i) = \frac{5.(z_q - z_i)}{r_i^2} B_q(x_i, y_i, z_i)$$

$$-\frac{1}{r_i^5} [c.(x_q - x_i) + d.(y_q - y_i) + 2f.(z_q - z_i)]$$
(*)

حال ضریب همبستگی متقابل میان دادههای بی هنجاری میدان کل مغناطیسی مشاهداتی و مقدار تئوری آن در اثر المان دوقطبی *q* به صورت رابطه (۵) • تعریف می شود [۱۵]:

$$C_{q} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{s}} \Delta T(x_{i}, y_{i}, z_{i}) \Delta T_{q}(x_{i}, y_{i}, z_{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{s}} \Delta T^{2}(x_{i}, y_{i}, z_{i}) \sum_{i=1}^{N_{s}} \Delta T_{q}^{2}(x_{i}, y_{i}, z_{i})}} \quad (\Delta)$$

که در رابطه (۵) (۵) $\Delta T(x_i, y_i, z_i)$ بیهنجاری میدان کل N_s مغناطیسی مشاهداتی در ایستگاه $P = (x_i, y_i, z_i)$ مغناطیسی مشاهداتی در ایستگاه میباشد. با فرض مثبت تعداد کل ایستگاههای مشاهداتی میباشد. با فرض مثبت

بودن مغناطش المان و با جایگذاری رابطههای (۱) و (۲) در رابطه (۵) خواهیم داشت (رابطه (۶)) [۱۵]:

$$Cq = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \Delta T(x_i, y_i, z_i) B_q(x_i, y_i, z_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_s} \Delta T^2(x_i, y_i, z_i) \sum_{i=1}^{N_s} B_q^2(x_i, y_i, z_i)}} \qquad (\pounds)$$

 C_q بیان کننده مقدار همبستگی متقابل میان دادههای بیهنجاری میدان مغناطیسی کل مشاهداتی و مقادیر تئوری حاصل از المان دوقطبی q میباشد. بنا به اصل نابرابری کوشی-شوارتز[^] خواهیم داشت: $1+\geq_{\rm Q} \leq 1-$ به صورت مشابه تابع ضریب همبستگی متقابل برای گرادیان قائم میدان مغناطیس کل به صورت رابطه (۲) محاسبه می شود [۱۵]:

$$C_{z,q} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \frac{\partial \Delta T(x_i, y_i, z_i)}{\partial z} B_{z,q}(x_i, y_i, z_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_s} \left(\frac{\partial \Delta T(x_i, y_i, z_i)}{\partial z}\right)^2 \sum_{i=1}^{N_s} B_{z,q}^2(x_i, y_i, z_i)}} \quad (Y)$$

که $\frac{\partial \Delta T(x_i, y_i, z_i)}{\partial z}$ گرادیان قائم دادههای مشاهداتی در نقطهی P میباشد. $C_{z,q}$ درجه همبستگی میان دادههای گرادیان قائم مشاهداتی و تئوری حاصل از المان دوقطبی pمیباشد. به صورت مشابه بنا به اصل نابرابری کوشی-شوارتز در این مورد نیز مقدار $C_{z,q}$ احتمال همواره [+1-] خواهد بود.

مقادیر C_{zq} و C_{q} مشخص کننده ی مقدار احتمالی می اشند که المان جرمی p تا چه میزان، در تولید دادههای مشاهداتی نقش دارد. هر چه قدر مطلق این مقادیر پائین تر باشد به معنی احتمال کمتر رخداد یک دوقطبی مغناطیسی در نقطه p است در حالی که مقادیر مثبت بالا مبین احتمال بالاتر برای حضور یک دوقطبی مغناطیسی است.

برای انجام فرآیند همبستگی متقابل سهبعدی، باید ابتدا زیر سطح زمین به شبکه منظم سهبعدی تقسیمبندی شود. سپس با استفاده از رابطههای (۷) و (۶) میتوان ضریب همبستگی میان هر گره این شبکه سهبعدی را با شبکه برداشت داده محاسبه نمود.

۳- مثالهای مصنوعی

در این قسمت بهمنظور ارزیابی توانایی روش تصویرسازی همبستگی متقابل سهبعدی، این روش بر روی دو مدل مصنوعی مختلف اعمالشده و نقاط قوت و ضعف این روش به بحث گذاشتهشده است. لازم به ذکر است برنامهنویسی روش موردنظر در نرمافزار Matlab R2019b و بر روی رایانه شخصی با مشخصات Intel CoreTM i5-2430M و مقدار

حافظهای به میزان هشت گیگابایت صورت گرفته است. جهت شبیهسازی محیط واقعی برداشت دادهها، در هر دو مثال، از زاویه میل، زاویه انحراف و شدت میدان مغناطیسی زمین شبیه به محدودهی معدنی شواز استفاده شده است.

۲-۱- مثال مصنوعی ۱

اولین مدل شامل یک مکعب با مقدار خودپذیری مغناطیسی SI) ۰٬۰۰۱ و بدون مغناطیس بازماند می باشد که در محیطی همگن قرارگرفته است. ابعاد مکعب ۲×۲×۲ مترمکعب بوده و مرکز آن در عمق ۲ متری قرار دارد. زاویه میل، زاویه انحراف و شدت میدان مغناطیسی زمین به ترتیب ۵۰ درجه، ۴ درجه و ۴۶۰۰۰ نانو تسلا بوده و توده در جهت میدان مغناطیسی زمین، مغناطیده شده است. برداشت بافاصله بین ایستگاهی و پروفیلی ۱ متر در شبکهای به ابعاد



بهمنظور انجام فرآيند مدلسازى سهبعدى همبستكى متقابل، محیط برداشت به یک فضای زیرسطحی به ابعاد ۵×۱۰×۱۰ مترمکعبی با اندازه هر سلول ۵٫۰×۵٫۵×۵ C_q مترمکعب در نظر گرفته شده است. سپس مقادیر $C_{z,q}$ و به ازای هر سلول این شبکه محاسبه شده و نتایج رسم خواهند شد. شکل ۲ و ۳ به ترتیب نتایج حاصل از همبستگی متقابل بر رویدادههای بیهنجاری میدان کل مغناطیس و گرادیان قائم دادهها را نمایش میدهند. همان گونه که در تصاویر قابلمشاهده است، در هر ۲ تصویر گسترش و عمق توده بهخوبی با محل با بیشترین مقدار ضریب همبستگی در مرکز تصاوير، منطبق است.





توده مکعبی شکل. در هر دو تصویر، توده دارای مقدار خودپذیری مغناطیسی ۰٬۰۰۱ میباشد. ابعاد مکعب ۲×۲×۲ مترمکعب بوده و مرکز آن در عمق ۲ متری قرار دارد. محل این توده در مرکز تصاویر، با مربع سیاهرنگ مشخصشده است. زاویه میل، زاویه انحراف و شدت میدان مغناطیسی زمین به ترتیب ۵۰ درجه، ۴ درجه و ۴۶۰۰۰ نانو تسلا است. برداشت بافاصله بین ایستگاهی و پروفیلی ۱ متر در شبکهای به ابعاد ۱۰×۱۰ مترمربع صورت گرفته است. محل نقاط برداشت در تصاویر، بهصورت نقاط سفیدرنگ، مشخص شده است.



شکل ۲– تصویر حاصل از اعمال روش همبستگی متقابل بر بیهنجاری میدان مغناطیسی کل حاصل از توده مکعب شکل. محل این توده در مرکز تصویر، با مکعب سیاه رنگ مشخص شده است.



شکل ۳– تصویر حاصل از اعمال روش همبستگی متقابل بر گرادیان قائم میدان مغناطیسی کل حاصل از توده مکعب شکل. محل این توده در مرکز تصویر، با مکعب سیاهرنگ مشخصشده است.

۲-۳- مثال مصنوعی ۲

به منظور آزمودن قدرت تفکیک عرضی روش همبستگی متقابل و سنجش میزان حساسیت این روش به تغییرات خودپذیری مغناطیسی، دومین مدل شامل دو مکعب با دو مقدار متفاوت خودپذیری مغناطیسی در محیطی همگن است. هر دو مکعب دارای ابعاد ۵۰×۱۰۰×۱۰۰ مترمکعب بوده و مرکز هر ۲ مکعب در عمق ۷۵ متری قرار دارد. مکعب سمت راست دارای خودپذیری مغناطیس ۱ و مکعب سمت چپ ۵/۰ میباشد. زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی

زمین به ترتیب ۵۰ و ۴ درجه بوده و مقدار آن ۵۰۰۰۰ نانو تسلا است. در این مثال نیز، تودهها فاقد مغناطیس بازماند بوده و تودهها در جهت میدان مغناطیسی زمین مغناطیده شدهاند. برداشت بافاصله بین ایستگاهی و پروفیلی ۲۰ متر در شبکهای به ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ مترمربع صورت گرفته و نویز تصادفی گوسی با انحراف معیار ۵ درصد به دادهها افزودهشده است. شکل ۴ نقشههای حاصل از برداشت میدان مغناطیس کل و گرادیان قائم این ۲ توده را نشان میدهد. خطوط سیاه نشاندهندهی محل حضور مکعبها بر روی صفحه (x,y) هستند.



شکل ۴– الف) نقشه بیهنجاری میدان مغناطیس کل حاصل از دو توده مکعبی شکل. ب) نقشه گرادیان قائم میدان مغناطیس کل حاصل از دو توده مکعبی شکل. هر دو مکعب دارای ابعاد ۵۰×۱۰۰×۱۰۰ مترمکعب بوده و مرکز هر دو مکعب در عمق ۷۵ متری قرار دارد. محل این تودهها در تصاویر، با مربعهای سیاهرنگ مشخصشده است. خودپذیری مغناطیسی توده سمت راست ۱ و توده سمت چپ ۵٫۵ می باشد. زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی زمین به ترتیب ۵۰ و ۴ درجه بوده و شدت آن ۵۰۰۰۰ نانو تسلا است. محل نقاط برداشت در تصاویر،

بهمنظور انجام فرآيند همبستكي متقابل، محيط برداشت به صورت یک فضای زیر سطحی به ابعاد ۱۵۰×۱۰۰۰×۱۰۰۰ مترمکعبی با اندازه هر سلول ۱۰×۲۰×۲۰ متر در نظر گرفته شد. سپس مقادیر $C_{z,q}$ و C_q به ازای هر سلول این شبکه محاسبه شده و نتایج رسم شد. شکل ۵ و ۶ به ترتیب نتایج حاصل از همبستگی متقابل بر رویدادههای بیهنجاری میدان مغناطیسی کل و گرادیان قائم دادهها را نمایش میدهند. همان گونه که در تصاویر قابلمشاهده است، در هر ۲ تصویر گسترش و عمق تودهها به خوبی با محل با بیشترین مقادیر ضریب همبستگی، منطبق است. با توجه به کمتر بودن مقادیر خودپذیری مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی کل توده سمت چپ، نسبت به توده سمت راست، انتظار می رود که مقادیر ضریب همبستگی توده سمت چپ نیز به نسبت توده سمت راست کمتر باشد که این امر کاملاً در تصاویر مشخص می باشد. البته در شکل ۶ مقادیر همبستگی متقابل برای دادههای گرادیان قائم، مقادیر

بالاتری را برای توده با مقدار خودپذیری کمتر نسبت به شکل ۵، نشان میدهند. این موضوع نشان از دقت بیشتر حاصل از اعمال روش بر روی دادههای گرادیان قائم در این مثال دارد.

۴- معدن شواز

پس از حصول اطمینان از دقت روش همبستگی متقابل سهبعدی در تعیین عمق و گسترهی تودههای مدفون، حال این روش، بر روی دادههای میدان کل مغناطیس معدن سنگآهن شواز و گرادیان قائم این دادهها، واقع در جنوب غرب استان یزد به کار گرفته شد. محدوده موردمطالعه در ایران مرکزی و در حاشیه شمالی زون سنندج-سیرجان قرار دارد (شکل ۷). محدوده در یک پهنه دشتی که از غرب به کفه تاقستان منتهی شده، قرار داشته و ارتفاعاتی با روند شمال غرب-جنوب شرق در شمال آن قرار دارند (شکل ۸).



شکل ۵– تصویر حاصل از اعمال روش همبستگی متقابل بر بیهنجاری میدان مغناطیسی کل حاصل از دو توده مکعب شکل. محل این تودهها در تصویر، با مکعبهای سیاهرنگ مشخصشده است.



شکل ۶– تصویر حاصل از اعمال روش همبستگی متقابل بر گرادیان قائم میدان مغناطیسی کل حاصل از دو توده مکعب شکل. محل این تودهها در تصویر، با مکعبهای سیاهرنگ مشخصشده است.



شکل ۷- محل قرارگیری محدوده موردمطالعه در نقشه زمین شناسی – ساختاری ایران [۱۶].



شکل ۸- قرارگیری محدوده اکتشافی در پهنه دشت (جنوب سری آتشفشانی ائوسن) [۱۶].

در این پهنه دشتی که از جنوب نائین شروعشده و تا شرق دهشیر ادامه دارد، شمار زیادی عدسی با کانیسازی آهن (عموماً مگنتیت) وجود دارد که تعداد از آنها در کنار واحدهای کربناته کرتاسه و پرمین به وجود آمدهاند و برخی او آنها در کنار دایکهای حد واسط تشکیل شدهاند. بر همین از آنها در کنار دایکهای حد واسط تشکیل شدهاند. بر همین نظر میرسد در ارتباط با فعالیتهای ماگمایی منطقه پدیدار گشتهاند [17].

اولین شواهد وجود کانه زایی سنگ آهن مگنتیتی در زیر آبرفتهای عهد حاضر توسط برداشتهای مغناطیس سنجی کشف شد. دادههای مغناطیس سنجی در ۱۹۸۰ ایستگاه با ابعاد شبکه ۱۰×۲۰ و ۲۰×۴۰ متر در مساحت ۴۹ هکتار

برداشتشدهاند. پس از انجام تصحیحات لازم، مشخص شد که بازه تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی از ۳۸۹۶۸ تا ۶۸۱۰۸ نانو تسلا متغیر است که این بازه بزرگ میتواند نشانه وجود سنگآهن مگنتیتی در محدوده برداشت باشد. ترسیم نقشه شدت کل میدان مغناطیسی نشاندهنده یک دوقطبی مغناطیسی است که این موضوع احتمال وجود ماده معدنی مگنتیتی را قوت میبخشد. شکل ۹ نقشه میدان مغناطیسی محدوده موردمطالعه، پس از حذف مقدار IGRF از دادههای شدت کل و نقشه گرادیان قائم این دادهها پس از حذف نویزهای سطحی و اعمال فیلتر برگردان به قطب^۹ را نمایش میدهد.



شکل ۹– الف) نقشه دادههای باقیمانده (محلی) مغناطیس سنجی پس از حذف IGRF. ب) نقشه گرادیان قائم دادههای باقیمانده پس از حذف نویزهای سطحی و اعمال فیلتر برگرداندن به قطب دادهها.

عدسیهای دارای کانیسازی آهن، عموماً در زیر آبرفتهای عهد حاضر مدفون هستند و تعدادی نیز برونزد دارند که این برونزدها با طول چند ده متر به رنگ قهوهای تیره در پهنههای دشتی نمایان هستند. در برخی نواحی، آلتراسیون بر آنها اثر نموده است و پیشرفت آلتراسیون در بعضی قسمتها باعث تبدیل مگنتیت به هماتیت و هماتیت بعضی قسمتها باعث تبدیل مگنتیت به هماتیت و هماتیت نموزی قسمتها باعث تبدیل مگنتیت به مواتیت و ماتیت محدوده قابل مشاهده است. در محدوده یک گسل پنهان در زیر محدوده قابل مشاهده است. کانی سازی سنگآهن در ارتباط با این گسل صورت گرفته است. به نظر می رسد کانهزایی براثر بازشدگی گسل و نفوذ محلولهای سرشار از آهن به درون

واحدهای قدیمی تر صورت پذیرفته است [۱۶]. بهطور کلی هیچ رخنمون سنگی در محدوده وجود ندارد و ازاینرو مشکلات عمدهای در خصوص تعیین نوع کانسار و درک فرآیندهای تشکیل دهنده آن به قوت خود باقی است. تنها نتایج حفاریهای مغزه گیری در محدوده موجود است که نشان می دهد کانی سازی مگنتیت به شکل رگه در درون توف تشکیل شده است (جدول ۱). شکل ۱۰ نتایج مدل سازی این توده کانساری حاصل از وارون سازی دادههای گرانی سنجی را نمایش می دهد که پیش تر بر روی این دادهها صورت گرفته است [۱۶].



شکل ۱۰– مدلسازی توده کانسار حاصل از دادههای گرانیسنجی. گمانههای اکتشافی بهصورت ستونهایی قائم نمایش دادهشدهاند و مقدار عیار FeO در هر گمانه با محل آن با حلقههای رنگی نمایش دادهشده است [۱۶].

X_UTM	Y_UTM	طول گمانه (متر)	FeO%	از (متر)	به (متر)	ID
٧٢٧۵٠۴	۳۵۰۷۳۵۱	- - - - - - - - - -	٩٫٨٢	•	٣	S 10
			14/41	٣	٧	
			14/42	٧	11	
			٨,٣۶	11	١٢	
			۸٫۳۶	١٢	14	
			۸٫۳۶	۱۵	18	
			$\mathbf{N} \cdot \mathbf{A}$	١٨	١٩	
			۱۰٫۸۱	١٩	۲.	
			۱۰٫۸۱	۲۰	۲۱	
٢٢٧۵١٩	30.7200	٣٠	19,7X	•	٣	S 11
٧٢٧۵٢٢	30.1262	۳۶	۱ ٧,٩	77	78	S 17
٧٢٧۵۴٠	۳۵۰۷۳۴۰	_ ۱۰۰ _	18/11	١٨	۲۳	Н 7
			۱۸٬۸۳	۲۳	۲۸	
			51,48	۳۵	47	
			$A_{j}A$	47	48	
۷۲۷۵۰۰	۳۵۰۷۳۷۰	۹۰ _	T •, % F	•	$\Lambda_{/}\Delta$	P1
			14/14	$A_{/}\Delta$	١۶,۵	
			14/11	۲۱	۲۳	
			$A_{j}A$	۲۳	۲۷	
۷۲۷۵۰۰	۳۵۰۷۳۱۰	Y1 -	۱۹ /۶	۷٫۵	١٣	P 2
			١٣/٧۴	١٣	١٩	

جدول۱- گمانههای حفرشده در معدن سنگ آهن شواز. از آوردن سایر گمانههایی که در آنها نمونهبرداری نشده است، صرفنظر شده است.

به منظور انجام فرآیند همبستگی متقابل، محیط برداشت به یک فضای زیرسطحی به ابعاد ۲۰۰×۸۰۰×۸۰۰ مترمکعبی با اندازه هر سلول ۵×۲۰×۲۰ مترمکعبی تقسیم بندی شد. زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی زمین در مرکز این محدوده، به ترتیب ۴۹٬۲۳۹ و ۳٬۳۴۳ درجه و مقدار آن F۶۵۰۰ محدوده، به ترتیب ۴۹٬۲۳۹ و ۴۹٬۳۴۰ درجه و مقدار آن انجام این فرآیند در نظر گرفته شد. سپس مقادیر C_{2} و C_{2} به ازای هر سلول این شبکه محاسبه شده و نتایج رسم شد. انجام این فرآیند بر روی رایانه شخصی با مشخصات Intel انجام این فرآیند بر روی رایانه شخصی با مشخصات Intel نزدیک ۴ دقیقه انجام پذیرفت. شکل ۱۱ نتایج حاصل از اعمال روش بر داده های میدان کل را نمایش می دهد.

بهمنظور نمایش بهتر نتایج حاصل از روش همبستگی متقابل سهبعدی بر روی دادهها، نتایج حاصل از اعمال روش در اعماق ۲۰، ۵۰، ۳۰ و ۱۰ متر در شکل ۱۲ نمایش

داده شده است. نتایج حاصل از اعمال روش بر روی داده های میدان کل معدن شواز، نشان دهنده ی حضور یک توده بی هنجاری با مقادیر همبستگی متقابل مثبت و بالا می باشد که می توان آن را مر تبط با توده ی کانسار آهن مگنتیتی مور دنظر دانست که در زیر آبرفت های عهد حاضر مدفون شده است.

این توده کانساری را بهخوبی میتوان با تودهی هممقدار همبستگی متقابل ۰٫۵ در شکل ۱۱ تقریب زد. با توجه به شکل ۱۲، بهخوبی میتوان دریافت که با افزایش عمق، مقادیر همبستگی در محل تودهی بیهنجار افزایش مییابد و این روند ادامه مییابد و در عمق ۲۰ متر دوباره از مقادیر کاسته میشود.



شکل ۱۱– تصویر سهبعدی حاصل از اعمال روش همبستگی متقابل بر دادههای میدان کل مغناطیس معدن سنگ آهن شواز. محل تودهی هممقدار ۰٫۵ با رنگ قرمز در پسزمینهای با شفافیت کمتر در توموگرام مقادیر همبستگی متقابل کل محدوده نمایش دادهشده است. همچنین مقدار عیار FeO در هر گمانه با محل آن با حلقههای رنگی نمایش دادهشده است.



شکل ۱۲– نقشه حاصل از اعمال روش همبستگی متقابل بر دادههای میدان کل مغناطیس معدن سنگ آهن شواز. (الف) در عمق ۱۰ متر. (ب) در عمق ۳۰ متر. (ج) در عمق ۵۰ متر. (د) در عمق ۷۰ متر. (د) در عمق ۲۰ متر.

نتیجه وارون سازی پیشین صورت گرفته بر روی دادههای مغناطیس محدود مور دمطالعه (شکل ۱۰)، عمق تقریبی توده را بین ۱۰ تا ۴۰ متر تخمین زده است اما شکل ۱۱ نشان دهنده ی عمیق تر بودن توده ی بی هنجاری مدفون است. نتیجه حاصل از همبستگی متقابل سهبعدی (شکل ۱۱)، هم خوانی خوبی با نتایج حاصل از حفاری گمانه ها به خصوص گمانه ۲۲ دارد که دقیقاً در مرکز توده ی هم مقدار ۵٫۰ قرار گرفته است. با توجه به جدول ۱، در گمانه ۲۲، عمق توده از مرز ۴۰ متر (تخمین زده شده توسط وارون سازی پیشین صورت گرفته) نیز تجاوز نموده است. بنا بر مدل سازی

صورت گرفته توسط این روش بر روی دادههای میدان کل، می توان عمق تقریبی برای کانسار آهن شواز را، ۱۰ تا ۶۰ متر در نظر گرفت. شکل ۱۳ نتایج حاصل از اعمال روش همبستگی متقابل بر دادههای گرادیان قائم معدن شواز را نمایش می دهد. به منظور نمایش بهتر نتایج حاصل از روش همبستگی متقابل سه بعدی بر روی دادهها، نتایج در اعماق همبستگی متقابل سه بعدی بر روی دادهها، نتایج در اعماق با مشاهده می شکل ۱۳ می توان دریافت که نتایج حاصل از اعمال روش بر روی دادههای گرادیان قائم، نشان دهنده ی حضور یک توده بی هنجاری با مقادیر همبستگی بالاتر نسبت

به شکل ۱۱ میباشد. میتوان این توده کانساری را با توده ی هم مقدار همبستگی متقابل ۰٫۵ در شکل ۱۳ تقریب زد که با رنگ قرمز در پس زمینه ای با شفافیت کمتر در تومو گرام مقادیر همبستگی متقابل کل محدوده نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱۳ و ۱۴، گستره ی تقریبی کانسار از عمق ۱۰ تا ۹۰ متر می باشد. نسبت به نتیجه ی حاصل از

مدل سازی توده با دادههای میدان کل، در اینجا توده عمیق تر تخمین زدهشده است اما موقعیت مکانی توده با نتایج حاصل از مدل سازی پیشین (شکل ۱۰) و نتایج حاصل از اعمال روش بر روی دادههای میدان کل (شکل ۱۱) هم خوانی خوبی دارد.



شکل ۱۳– تصویر سهبعدی حاصل از اعمال روش همبستگی متقابل بر دادههای گرادیان قائم معدن سنگآهن شواز. محل تودهی هممقدار ۲٫۵ با رنگ قرمز در پسزمینهای با شفافیت کمتر در توموگرام مقادیر همبستگی متقابل کل محدوده نمایش دادهشده است.



شکل ۱۴– نقشه حاصل از اعمال روش همبستگی متقابل بر دادههای گرادیان قائم معدن سنگ آهن شواز. (الف) در عمق ۱۰ متر. (ب) در عمق ۳۰ متر. (ج) در عمق ۶۰ متر. (د) در عمق ۹۰ متر. (د) مر عمق ۹۰ متر

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به معرفی و بررسی روش همبستگی متقابل جهت تصویرسازی سهبعدی دادههای میدان کل مغناطیس و گرادیان قائم این دادهها پرداخته شد. این روش ابتدا بر

روی دو مدل مصنوعی مختلف اعمال شد و نقاط قوت این روش در تصویرسازی تودههای مدفون به بحث گذاشته شد. در هر دو مدل، محیط همگن بوده و تودههای مدفون، فاقد مغناطیس بازماند می باشند. در هر دو مثال، تودهها در جهت [2] Gamey, T. J., Holladay, J. S., Mahler, R. (1997). Airborne measured analytic signal for UXO detection. In Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.

[3] Doll, W. E., Gamey, T. J., Beard, L. P., & Bell, D. T. (2006). Airborne vertical magnetic gradient for near-surface applications. The Leading Edge, *25*(1), 50–53.

[4] Rezaie M., Moradzadeh A., Kalate A.N., Aghajani H., Kahoo A.R., Moazam S. (2017). 3D modelling of Trompsburg Complex (in South Africa) using 3D focusing inversion of gravity data. Journal of African Earth Sciences, 130, 1–7.

[5] Mauriello, P., & Patella, D. (1999a). Principles of probability tomography for natural-source electromagnetic induction fields. Geophysics, 64(5), 1403–1417.

[6] Mauriello, P., & Patella, D. (1999b). Resistivity anomaly imaging by probability tomography. Geophysical Prospecting, 47(3), 411–429.

[7] Mauriello, P., & Patella, D. (2001a). Localization of maximum-depth gravity anomaly sources by a distribution of equivalent point masses. Geophysics, 66(5), 1431–1437.

[8] Patella, D. (1997). Self-potential global tomography including topographic effects. Geophysical Prospecting, *45*(5), 843–863.

[9] Mauriello, P., & Patella, D. (2001b). Gravity probability tomography: a new tool for buried mass distribution imaging. Geophysical Prospecting, *49*(1), 1–12.

[10] Mauriello, P., & Patella, D. (2005). Localization of magnetic sources underground by a data adaptive tomographic scanner. ArXiv Preprint Physics/0511192.

[11] Mauriello, P., & Patella, D. (2008). Localization of magnetic sources underground by a probability tomography approach. Progress In Electromagnetics Research M, 3(November 2005), 27–56. http://www.jpier.org/PIERM/pier.php? paper= 08050504.

[12] Chianese, D., & Lapenna, V. (2007). Magnetic probability tomography for environmental purposes: test measurements and field applications. Journal of Geophysics and Engineering, 4(1), 63–74.

[13] Alaia, R., Patella, D., & Mauriello, P. (2009). Imaging multipole self-potential sources by 3D probability tomography. Progress In Electromagnetics Research, 14, 311– 339.

[14] Guo, L., Meng, X., & Shi, L. (2011). 3D correlation imaging of the vertical gradient of gravity data. Journal of Geophysics and Engineering, 8(1), 6–12.

[15] Guo, L., Shi, L., & Meng, X. (2011). 3D correlation imaging of magnetic total field anomaly and its vertical gradient. Journal of Geophysics and Engineering, 8(2), 287.

[16] Ghalenoee, M. H., (2018). Inversion of potential field data, a method for modelling of bodies's geometric and geological formations. PhD dissertation. Yazd University, Iran.

احمدي و همكاران

میدان مغناطیسی زمین، مغناطیده شدهاند. نتایج نشان،دهنده دقت و سرعت بالای روش همبستگی متقابل سهبعدی در تعیین محل، گستره و عمق تقریبی تودههای مدفون می باشد. لازم به یادآوری است که این روش قادر به بازیابی خصیصه فیزیکی توده موردنظر نظیر خودیذیری یا مغناطش نیست و درصورتی که بازیابی این خصیصه، ضروری و موردنیاز باشد، می توان از نتایج حاصل از روش همبستگی متقابل، بهعنوان مدل اولیه برای سایر روشهای وارونسازی متداول استفاده نمود. درروش همبستگی متقابل همان گونه كه اشاره شد احتياج به هيچگونه مدل، محدوديت اوليه و خطی سازی های متداول نیست و به همین علت انجام این فرآيند با سرعت بسيار بالا نسبت به ساير روشها و نرمافزارهای تجاری متداول برای وارونسازی، صورت می گیرد. در انتها این روش برای اولین بار بهمنظور مدل سازی تودههای مدفون معدنی، بر روی دادههای میدان کل مغناطیس معدن سنگآهن شواز و گرادیان قائم آنها اعمال شد. انجام این فرآیند در مدت ۴ دقیقه با ابعاد سلولی ۵×۲۰×۲۰ مترمکعبی در محدودهای به وسعت ۸۰۰×۸۰۰× ۸۰۰ مترمکعب صورت یذیرفت. تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی در محدوده و نتایج حاصل از حفاریها، حاکی از وجود ماده معدنی مگنتیتی در منطقه است. نتایج حاصل از اعمال روش همبستگی متقابل سهبعدی بر روی دادههای میدان کل و گرادیان قائم آنها، با مدلسازی پیشین صورت گرفته و نتایج حاصل از گمانههای موجود در محدوده مقایسه گردید. این نتایج نشان دهندهی عميقتر بودن تودهي كانساري نسبت به مدلسازي پيشين است. این نتیجه گیری با نتایج حاصل از حفاری در گمانه H7 که در آن عمق توده از مرز ۴۰ متر نیز (تخمین زدهشده توسط وارونسازی پیشین صورت گرفته) تجاوز نموده است، همخوانی دارد.

مراجع

[1] Gamey, T. J., Doll, W. E., Beard, L. P., & Bell, D. T. (2002). Airborne vertical magnetic gradient for UXO detection. In Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.

⁶ Magnetized

⁷ Homogeneously magnetized spherical element

⁸ Cauchy-Schwarz Inequality

⁹ Redauction to pole (RTP)

¹ Non-uniqueness of the solution

² A priori model

³ 3D Cross Correlation

⁴ Magnetization

⁵ Susceptibility