

# جداسازی آنومالی میدان پتانسیل با استفاده از تجزیه مد تجربی

امین روشندل کاهو<sup>(۱)\*</sup> و علی نجاتی کلاته<sup>۱</sup>

۱. استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۲/۳

## چکیده

آنومالی‌های میدان پتانسیل معمولاً بصورت برهم‌نهی آنومالی‌های مربوط به ساختارهای عمیق و بزرگ مقیاس و آنومالی‌های مربوط به ساختارهای سطحی و کوچک مقیاس می‌باشند که جداسازی این دو دسته از آنومالی‌ها، مهمترین مرحله در تعبیر و تفسیر داده‌ها می‌باشد. روش‌های مختلفی برای این کار معرفی شده‌اند که نیمه اتوماتیک می‌باشند. در این مقاله از روش تجزیه مد تجربی برای جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای و باقیمانده استفاده شده است. این روش اتوماتیک بر مبنای استخراج مدهای ذاتی نوسانی از داده می‌باشد. قابلیت این روش بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی ناحیه تراکپسبرگ آفریقای جنوبی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج جداسازی با استفاده از این روش نسبت به روش متداول برازش چندجمله‌ای از دقت بالاتری برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** جداسازی میدان پتانسیل، آنومالی ناحیه‌ای، آنومالی باقیمانده، تجزیه مد تجربی، ترامپسبرگ

## مقدمه

آنومالی‌های میدان پتانسیل معمولاً بصورت برهم‌نهی آنومالی‌های مربوط به ساختارهای عمیق و بزرگ مقیاس و آنومالی‌های مربوط به ساختارهای سطحی و کوچک مقیاس می‌باشند (Nabighian et al., 2005). مرحله اساسی در تعبیر و تفسیر داده‌های میدان پتانسیل، جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای از آنومالی‌های باقیمانده می‌باشد. یکی از روش‌های اولیه برای جداسازی آنومالی‌ها استفاده از روش پنجره میانگین متحرک<sup>۱</sup> می‌باشد. Griffin (1949) با استفاده از یک پنجره دایروی بر روی داده‌های شبکه‌بندی شده و محاسبه تفاضل میانگین داده‌های داخل دایره و مقدار مرکزی به جداسازی آنومالی‌ها پرداخت. Roy (1958) نشان داد که این میانگین‌گیری معادل استفاده از مشتق قائم دوم می‌باشد. AgoCS (1951) و Skeels (1947) از برازش چندجمله‌ای‌ها با استفاده از روش کمترین مربعات برای جداسازی استفاده نمودند.

Pawłowski and Hansen (1990) از روش فیلتر وینر در حوزه عدد موج برای این هدف استفاده کردند. Gusspi and Introcaso (2000) با استفاده از فیلتر کردن مولفه‌های عدد موج بالا و پایین در طیف داده‌های مشاهده شده عمل جداسازی آنومالی‌ها را انجام دادند. Sheriff (2010) با استفاده از فیلتر تطبیقی برای جداسازی آنومالی‌های مغناطیسی استفاده نموده است. Huang et al. (1998) تبدیل هیلبرت - هوانگ را برای آنالیز طیفی سیگنال‌های خطی و غیرخطی در دو حالت پایا و ناپایا معرفی نمود. این تبدیل در زمینه‌های مختلفی از علوم مانند ژئوفیزیک، پردازش سیگنال‌ها و پزشکی بکار برده می‌شود. هسته اصلی در این تبدیل، تجزیه مد تجربی<sup>۲</sup> بود. هدف اساسی در EMD، تجزیه یک سیگنال به مولفه‌های سازنده آن تحت عنوان توابع مد ذاتی<sup>۳</sup> می‌باشد. در این مقاله، برای جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای و باقیمانده در

\* نویسنده مرتبط roshandel@shahroodut.ac.ir

1- moving average  
2- Empirical mode decomposition  
3- Intrinsic mode function

پایین مطابق رابطه (۱). چنانچه  $h_1(n)$  شرایط مربوط به یک تابع مد ذاتی را داشته باشد، به عنوان اولین تابع مد ذاتی،  $imf_1(n)$  در نظر گرفته شده و محاسبات به مرحله بعدی الگوریتم منتقل می‌شود. در غیر اینصورت مراحل اول تا چهارم دوباره تکرار می‌شود با این تفاوت که الگوریتم به جای سیگنال اولیه  $x(n)$  بر روی  $h_1(n)$  اعمال می‌شود.

$$h_1(n) = x(n) - m_1(n) \quad (1)$$

مرحله پنجم: محاسبه باقیمانده مطابق رابطه (۲)

$$r_1(n) = x(n) - imf_1(n) \quad (2)$$

مرحله ششم: چنانچه باقیمانده دارای حداقل دو اکسترمم باشد، مراحل اول تا پنجم تکرار می‌شود و در غیر اینصورت الگوریتم متوقف می‌شود و آخرین باقیمانده به عنوان باقیمانده سیگنال در نظر گرفته می‌شود.

پس از اینکه تجزیه داده‌های پروفیل گرانی به IMF های مربوطه انجام شد، باقیمانده تجزیه بعنوان آنومالی ناحیه‌ای در نظر گرفته می‌شود و اختلاف میان داده‌های مشاهده‌ای و آنومالی ناحیه‌ای بعنوان آنومالی باقیمانده در نظر گرفته می‌شود.

### اعمال الگوریتم بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی

در این مقاله داده‌های مصنوعی با استفاده از روش تالوانی (Blakley, 1995) برای توزیع آنومالی‌ها با تباین چگالی مثبت و منفی بصورت شکل ۱ تولید شده است. داده‌های گرانی مذکور ناشی از چهار آنومالی می‌باشد که آنومالی‌های قهوه‌ای رنگ دارای

داده‌های گرانی سنجی از روش EMD استفاده شده است. در این روش پس از تجزیه داده‌های پروفیل گرانی به IMF های مربوطه، باقیمانده تجزیه بعنوان آنومالی ناحیه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

### تجزیه مد تجربی (EMD) و جداسازی آنومالی‌ها

اساس تئوری تجزیه مد تجربی را یک فرضیه ساده تشکیل می‌دهد. مطابق این فرضیه هر داده‌ای شامل مدهای ذاتی نوسانی ساده مختلفی می‌باشد. هر مد ذاتی، خطی یا غیرخطی، یک نوسان ساده می‌باشد که دارای نقاط اکسترمما<sup>۱</sup> و نقاط صفر<sup>۲</sup> یکسانی می‌باشد (Huang and Shen, 2005). یک داده ممکن است در یک زمان دارای چندین مد ذاتی باشد.

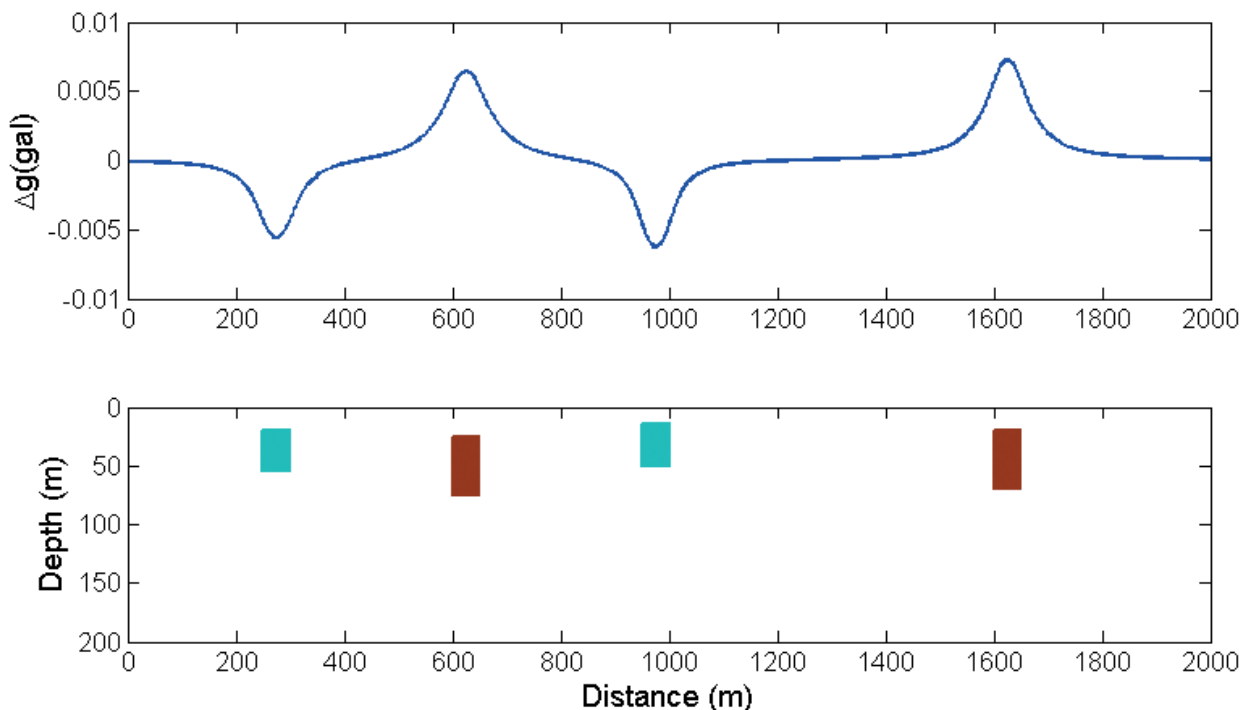
در واقع یک تابع مد ذاتی مشابه یک هارمونیک می‌باشد با این تفاوت که مانند یک هارمونیک دارای دامنه و فرکانس ثابت نمی‌باشد و دارای فرکانس‌های مختلف با دامنه‌های مختلف می‌باشد. الگوریتم زیر برای بدست آوردن توابع مد ذاتی یک سیگنال مانند  $x(n)$  معرفی شده است (Huang et al., 1998; Huang and Shen, 2005):

مرحله اول: تعیین نقاط بیشینه و کمینه محلی سیگنال  $x$ .

مرحله دوم: بدست آوردن پوش بالایی و پایینی سیگنال با استفاده از برازش نقاط بیشینه و کمینه محلی به روش کوبیک اسپلاین<sup>۳</sup>.

مرحله سوم: محاسبه میانگین پوش بالا و پایین داده با نام  $m_1(n)$

مرحله چهارم: محاسبه اختلاف میان داده و میانگین پوش بالا و



شکل ۱. مدل مصنوعی و داده‌های حاصل از مدل بدون روند ناحیه‌ای (رنگ آبی نشان‌دهنده تباین چگالی منفی و رنگ قهوه‌ای نشان‌دهنده تباین چگالی مثبت می‌باشد).

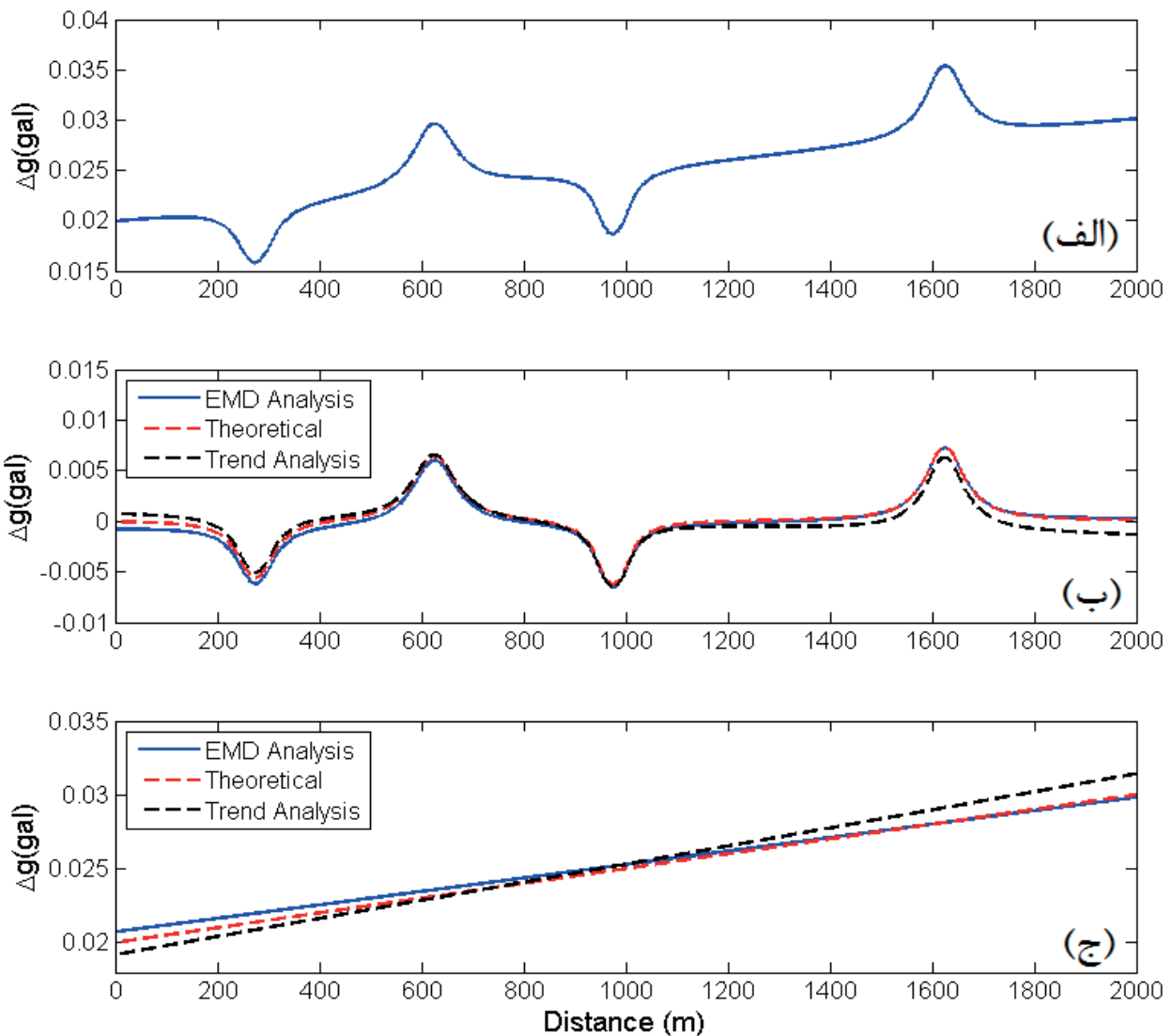
1- extrema  
2- Zero-cross  
3- Cubic spline

نقطه‌چین سیاه، بترتیب آنومالی باقیمانده با استفاده از دو روش EMD و آنالیز برازش خطی را نشان می‌دهند. در شکل ۲ ج روندهای ناحیه‌ای بدست آمده با روش EMD (آبی توپر) و آنالیز برازش خطی (نقطه‌چین سیاه) با روند ناحیه‌ای اضافه شده (خط‌چین قرمز) مقایسه شده است.

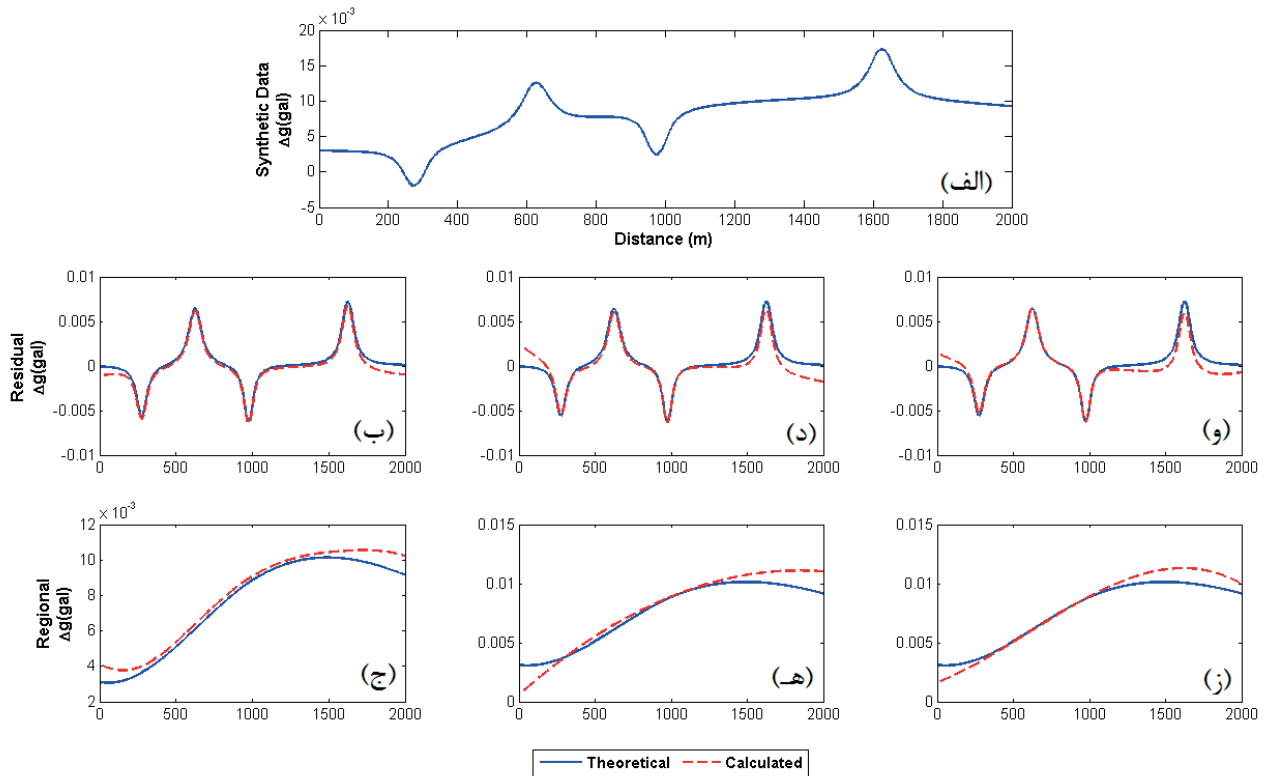
حال به داده‌های مدل مصنوعی، یک روند غیرخطی (منحنی خط‌چین قرمز شکل ۳ ج) اضافه شده است که داده حاصل در شکل ۳ الف نشان داده شده است. در شکل ۳ ب منحنی خط‌چین قرمز، داده بدون روند و منحنی‌های آبی توپر آنومالی باقیمانده با استفاده از روش EMD را نشان می‌دهد. در شکل ۳ د و ۳ بترتیب نتایج مربوط به آنالیز برازش چندجمله‌ای درجه ۲ و ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳ ج روند ناحیه‌ای بدست آمده با

تباين چگالی مثبت و آنومالی‌های آبی رنگ دارای تباين چگالی منفي می‌باشند. بیشینه مقدار داده‌های گرانی مصنوعی برابر با ۷/۲ میلی‌گال و کمینه مقدار برابر با ۶/۳- میلی‌گال می‌باشد. با داده‌های تولید شده فاقد روند ناحیه‌ای می‌باشند. برای نشان دادن قابلیت روش دو روند خطی و غیر خطی به داده‌های مذکور اضافه گردید. جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای و باقیمانده با دو روش برازش چندجمله‌ای و EMD بر روی داده‌های حاصل، انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

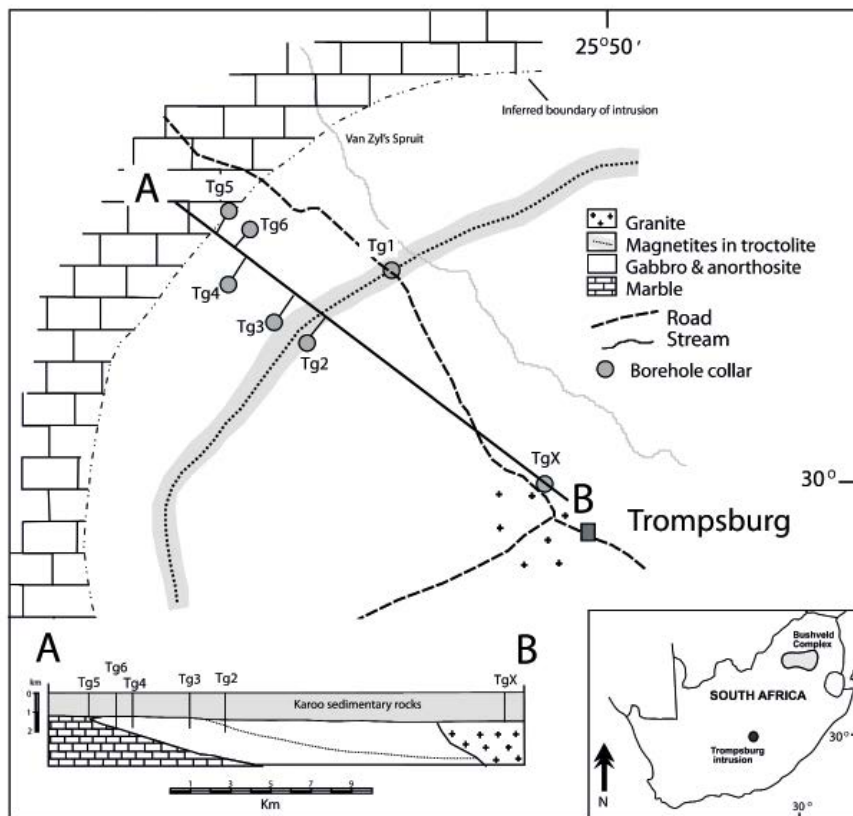
به داده‌های مدل مصنوعی، یک روند خطی منحنی خط‌چین قرمز در شکل ۲ ج اضافه شده است که داده حاصل در شکل ۲-الف نشان داده شده است. در شکل ۲ ب منحنی خط‌چین قرمز، داده بدون روند را نشان می‌دهد. منحنی‌های آبی توپر و



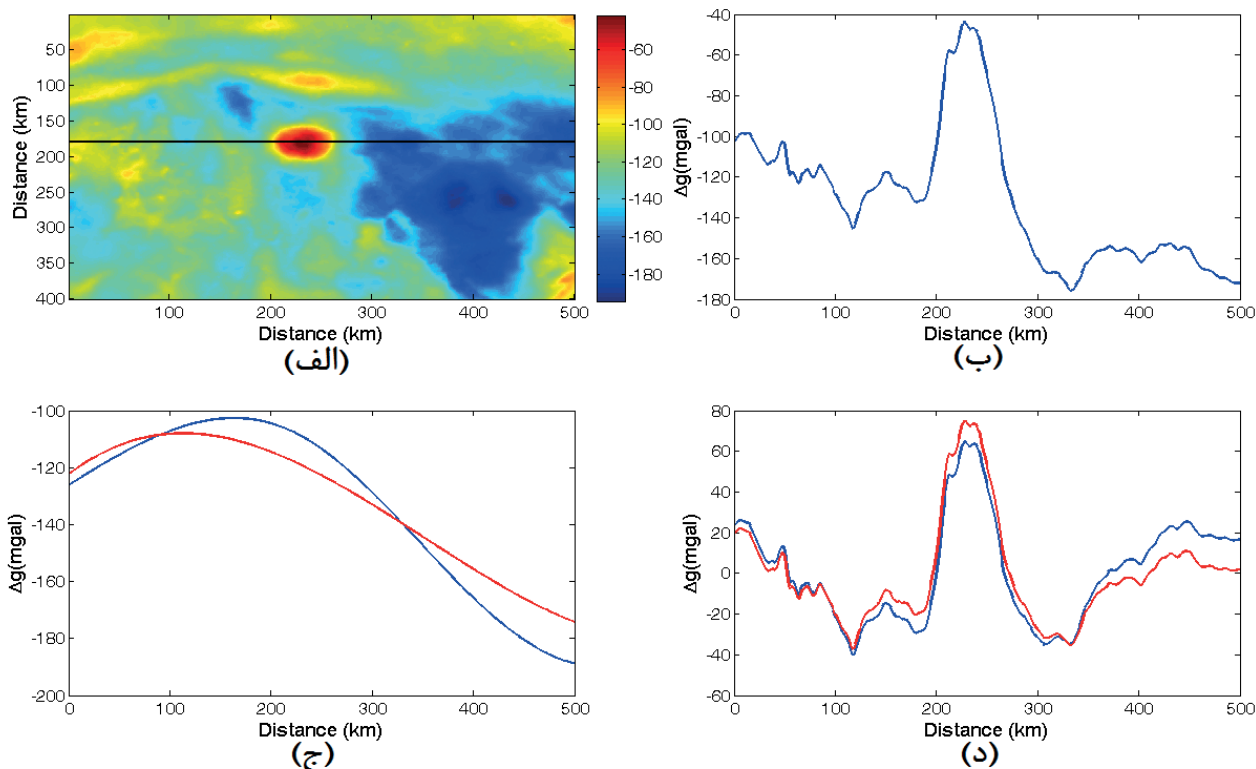
شکل ۲. الف) داده‌های مصنوعی با روند خطی، ب) آنومالی‌های باقیمانده بدست آمده با روش EMD (آبی توپر) و آنالیز برازش خطی (نقطه‌چین سیاه) و داده‌های حاصل از مدل بدون روند ناحیه‌ای (خط‌چین قرمز) و ج) روندهای ناحیه‌ای بدست آمده با روش EMD (آبی توپر) و آنالیز برازش خطی (نقطه‌چین سیاه) و روند اضافه شده (خط‌چین قرمز).



شکل ۳. (الف) داده‌های مصنوعی با روند غیرخطی، (ب)، (د) و (و) بترتیب آنومالی‌های باقیمانده بدست آمده با روش EMD و آنالیز برازش غیرخطی درجه ۲ و ۳ (آبی توپر) و داده‌های حاصل از مدل بدون روند ناحیه‌ای (خط چین قرمز) و (ج)، (ه) و (ز) روندهای ناحیه‌ای بدست آمده با روش EMD و آنالیز برازش غیرخطی درجه ۲ و ۳ (آبی توپر) روند اضافه شده (خط چین قرمز).



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی ناحیه ترامسبرگ واقع در آفریقای جنوبی (Maier et al., 2003).



شکل ۵. الف) داده‌های گرانی‌سنجی مربوط به ناحیه ترامسبرگ، ب) داده‌های گرانی‌سنجی پروفیل A-B، ج) آنومالی ناحیه‌ای و د) آنومالی باقیمانده بدست آمده از روش EMD (منحنی آبی) و روش برازش چندجمله‌ای با درجه ۳ (منحنی قرمز).

### نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش EMD بمنظور جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای و باقیمانده استفاده شده است. با توجه به اینکه در سایر روش‌های جداسازی مانند پنجره متحرک میانگین و روش آنالیز روند، پارامترهایی مانند طول پنجره و درجه برازش چندجمله‌ای می‌بایست از قبل تعیین شود، بنابراین انتخاب پارامترهای متفاوت تاثیر مستقیم در نتایج جداسازی بدنبال دارد. اما در روش EMD چون جداسازی بر مبنای خصوصیات ذاتی و فیزیکی داده‌ها انجام می‌شود، هیچ نیازی به تعیین پارامتری از قبل نبوده و پردازش داده‌ها کاملاً بصورت اتوماتیک انجام می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، جداسازی آنومالی‌ها با استفاده از روش EMD در مقایسه با روش متداول برازش چندجمله‌ای به مقادیر تئوری نزدیکتر می‌باشد و عمل جداسازی با دقت بالاتر صورت گرفته است.

### منابع

- Agocs, W.B., 1951. Least-squares residual anomaly determination. *Geophysics*, 16, 686–696.
- Blakely, R.J., 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, 464.
- Buchmann, J.P., 1960. Exploration of a geophysical anomaly at Trompsburg, orange free state, South Africa. *Transactions of the Geological Society of South Africa*, 63, 1–10.

روش EMD (آبی توپر) و روند ناحیه‌ای اضافه شده (خط چین قرمز) رسم شده است. در شکل ۳ هـ و ۳ ز نتایج مربوط به روند محاسبه شده با استفاده از آنالیز برازش چندجمله‌ای درجه ۲ و ۳ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده از روش EMD در مقایسه با روش برازش چندجمله‌ای همخوانی بیشتری با داده بدون روند در هر دو حالت روند خطی و غیرخطی از خود نشان می‌دهد. داده واقعی مورد مطالعه مربوط به ناحیه ترامسبرگ واقع در آفریقای جنوبی می‌باشد. در این ناحیه توده نفوذی که منشا آن بر اساس مطالعات انجام شده یک سیل گرانیته می‌باشد (Buchmann, 1960; Cooper and Cowan, 2003; Cooper, 2009). در شکل ۴ نقشه زمین‌شناسی ناحیه مربوطه نشان داده شده است که مقطع قائم در راستای پروفیل A-B رسم شده است.

در شکل ۵ الف داده‌های گرانی‌سنجی مربوط به ناحیه ترامسبرگ نشان داده شده است. این داده‌ها در یک شبکه با فاصله برداشت یک کیلومتر در دو جهت اندازه‌گیری شده است. بمنظور جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای از باقیمانده، یک پروفیل مطابق شکل ۵ الف (پروفیل A-B) انتخاب گردید که در شکل ۵ ب نمایش داده شده است. آنومالی‌های ناحیه‌ای و باقیمانده بدست آمده از روش EMD بترتیب در شکل ۵ ج و ۵ د با منحنی‌های آبی رنگ و آنومالی‌های ناحیه‌ای و باقیمانده بدست آمده از روش برازش چندجمله‌ای با درجه ۳ بترتیب در شکل ۵ ج و ۵ د با منحنی‌های قرمز رنگ نشان داده شده است.

- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2003. Sunshading geophysical data using fractional order horizontal gradients. *The Leading Edge*, 22, 204-205.
- Cooper, G.R.J., 2009. A solution-space approach to the Euler deconvolution of map data. 11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition, Swaziland, 300-302.
- Griffin, W.R., 1949. Residual gravity in theory and practice. *Geophysics*, 14, 39-56.
- Guspi, F. and Introcaso, B., 2000. A sparse spectrum technique for gridding and separating potential field anomalies. *Geophysics*, 65, 1154-1161.
- Huang, N.E. and Shen, S.S.P., 2005. Hilbert-Huang Transform and its Applications, World Scientific Publishing Company, 324.
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.L., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung C.C. and Liu, H.H., 1998. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis. *Proceeding of the Royal Society London A*, 454, 903-995.
- Maier, W.D., Peltonen, P., Grantham, G. and Manttari, I., 2003. A new 1.9 Ga age for the Trompsburg intrusion. South Africa: *Earth and Planetary Science Letters*, 212, 351-360.
- Nabighian, M.N., Ander, M.E., Grauch, V.J.S., Hansen, R.O., LaFehr, T.R., Li, Y., Pearson, W.C., Peirce, J.W., Phillips, J.D. and Ruder, M.E., 2005. Historical development of gravity method in exploration. *Geophysics*, 70, 63ND-89ND.
- Pawlowski, R.S. and Hansen, R.O., 1990. Gravity anomaly separation by Wiener filtering. *Geophysics*, 55, 539-548.
- Roy, A., 1958. Letter on residual and second derivative of gravity and magnetic maps. *Geophysics*, 23, 860-861.
- Sheriff, S.D., 2010. Matched filter separation of magnetic anomalies caused by scattered surface debris at archaeological sites. *Near Surface Geophysics*, 8, 145-150.
- Skeels, D.C., 1947. Ambiguity in gravity interpretation. *Geophysics*, 12, 43-56.

Archive of SID