

تعیین اندازه پنجره و ضریب ساختار بهینه در تخمین عمق موهو به روش واهمامیخت اویلر (مطالعه موردی: محدوده ی زاگرس)

عبدالرضا صفری^۱، محمد علی شریفی^۱، عباس بحرودی^۲، سوران پرنگ^{۳*}

^۱دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران
{asafari, sharifi}@ut.ac.ir

^۲استادیار دانشکده مهندسی معدن- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران
bahroudi@ut.ac.ir

^۳کارشناس ارشد ژئودزی- گروه مهندسی نقشه برداری- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران
soran_parang@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت آذر ۱۳۹۲، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۳)

چکیده

ناپیوستگی موهو مرز بین پوسته و گوشته ی بالایی است که تفاوت دو محیط را با تغییرات در سرعت لرزه ای، ساختار شیمیایی، مواد تشکیل دهنده و مانند آن آشکار می سازد. هدف این تحقیق یافتن عمق موهو در محدوده ی زاگرس و برآوردی از ضخامت پوسته به روش واهمامیخت اویلر است. روش واهمامیخت اویلر یک روش خودکار برای برآورد عمق، شکل و مکان منبع های مغناطیسی و گرانی است که اساس آن به کارگیری مشتق های میدان در معادله همگن اویلر می باشد. در به کارگیری روش واهمامیخت اویلر تعیین ضریب ساختار و طول پنجره ی برآوردگر از پارامتر های بسیار مهم هستند که به شدت جواب ها را تحت تأثیر قرار می دهد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از ضرایب هارمونیک کروی مدل ژئوتانسیل EIGEN-GL04C، آنومالی جاذبه هوای آزاد در محدوده ی $53,75^{\circ}$ تا $48,25^{\circ}$ و $34,75^{\circ}$ تا $29,25^{\circ}$ در یک گرید $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ محاسبه شد، سپس با استفاده از داده های آنومالی جاذبه هوای آزاد و به کارگیری روش واهمامیخت اویلر عمق موهو به ازای ضریب ساختار های مختلف و اندازه پنجره های متفاوت برآورد شد و بهترین ضریب ساختار و اندازه پنجره از مقایسه عمق برآورد شده به روش واهمامیخت اویلر و عمق به دست آمده از روش تابع انتقال گیرنده (مطالعات لرزه ای) در ۱۴ ایستگاه لرزه ای موجود در منطقه، تعیین گشت و نتایج به دست آمده با مدل CRUST 2.0 مقایسه شد. بر اساس نتایج به دست آمده می توان گفت که به ازای ضریب ساختار ۰,۵ و اندازه پنجره ۴۰ تا ۴۵ کیلومتر بهترین جواب را در تخمین عمق موهو در محدوده ی مورد نظر خواهیم داشت.

واژگان کلیدی: واهمامیخت اویلر، عمق موهو، آنومالی جاذبه هوای آزاد، مدل ژئوتانسیل، ساختار پوسته

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

بررسی خصوصیات مربوط به ساختار پوسته قاره ای و گوشته بالایی یکی از هدف های مهم مطالعات ژئوفیزیکی است. در موارد بسیاری، پوسته را به صورت دو یا سه لایه تقریباً افقی و همگن در نظر می گیرند ولی تلاش بر این است که دید جزئی تر و دقیق تری نسبت به ساختار پوسته و پیچیدگی های موجود در آن، مخصوصاً عمق ناپیوستگی موهو^۱ و تغییرات جانبی آن به دست آید [۱]. ناپیوستگی موهو، ضمن تغییرات ترکیب شیمیایی در واقع بیانگر تغییرات قابل توجهی در سرعت امواج لرزه ای است، عمق موهو پارامتر مهمی در تعیین ساختار پوسته است و بستگی به تکامل زمین شناسی و تکتونیکی هر منطقه دارد. تغییرات جانبی موهو نقش مهمی در نحوه انتشار امواج لرزه ای دارد و کنترل کننده جنبش های شدید زلزله های مخرب در بعضی فواصل خاص است [۲]. عمق موهو و ساختار پوسته زمین را می توان با استفاده از داده های مختلف ژئوفیزیکی تعیین کرد که در عمل بیشتر از داده های لرزه ای استفاده می شود، امروزه عمق موهو و ساختار پوسته را با استفاده از روش های گرانی سنجی و روش های لرزه ای تعیین می کنند. روش های لرزه ای گران و وقت گیر بوده و از عدم پوشش جهانی داده ها رنج می برند ولی روش های گرانی سنجی ارزان بوده و در حال حاضر داده ها به صورت جهانی و منطقه ای موجود می باشد [۱]. از روش های تخمین عمق موهو و بررسی ساختار پوسته که عموماً مورد استفاده قرار می گیرند می توان به تحلیل امواج سطحی و حجمی زمین لرزه های ثبت شده در ایستگاه های لرزه ای، روش تحلیل تابع انتقال گیرنده بر اساس داده های امواج دور لرز ثبت شده در ایستگاه های لرزه ای و تحلیل پس لرزه های زمین لرزه، روش ژو و کاناموری، روش وارون سازی داده های ثقل زمینی و استفاده از داده های آنومالی جاذبه بوگه و آنومالی جاذبه هوای آزاد، آنالیز همبستگی طیفی اثرات ثقل زمینی، آنالیز حرارتی و استفاده از داده های ارتفاعی و آنومالی ژئوئید و داده های مختلف ژئودزی، روش های ایزوستازی، روش پارکر- اولدنبرگ، روش کالوکیشن کمترین مربعات و استفاده از فیلتر های مختلف در حیطه ی مکان و فرکانس اشاره کرد. در این تحقیق جهت

تخمین عمق موهو از داده های حاصل از مدل های ژئو پتانسیل^۲ و روش واهمامیختن اویلر^۳ بعدی^۴ استفاده شده است. روش واهمامیختن اویلر وابسته به یک عمق اولیه و محدودیت های چگالی نمی باشد [۴، ۳]. این روش به طور عمده در تعیین مکان منبع و تخمین عمق ناهنجاری های مغناطیسی و گرانی به کار برده می شود. بر اساس مطالعات [۵] و [۶] این روش در تعیین عمق کنتاکت^۴ های قائم و افقی به خوبی عمل می کند پس می توان از آن در تخمین عمق مرز گوشته - پوسته (عمق موهو) استفاده کرد.

اولین نقشه عمق موهو برای ایران توسط [۷] ارائه گردید این نقشه بر اساس وارون سازی داده های گرانی زمینی موجود در ایران محاسبه شده است. از آن پس مطالعات متعدد زلزله شناسی و گرانی سنجی عمق موهو را در مناطق مختلف ایران تخمین زده اند. تحقیقات گرانی سنجی [۷] نشان داد که حداکثر ضخامت پوسته ایران در بخش رورانده زاگرس (بین ۵۰ تا ۵۵ کیلومتر) و حداقل ضخامت در مکران و سواحل عمان (تقریباً ۲۵ کیلومتر) می باشد در ایران مرکزی ضخامت پوسته بین ۴۰ تا ۴۵ کیلومتر است. بر اساس بررسی های [۷] عمق موهو در پهنه سبزواری- تکنار را می توان در حدود ۴۲ تا ۴۷ کیلومتر در نظر گرفت و همچنین نتایج حاصل از این تحقیقات نشان می دهد که ضخامت پوسته در نوار سنجیدگ - سیرجان که بخش جنوب غربی ایران مرکزی را تشکیل می دهد، حدود ۵۰ تا ۵۵ کیلومتر؛ در امتداد کوه های البرز این ضخامت کمتر از ۳۵ کیلومتر؛ در کویر لوت کمتر از ۴۰ کیلومتر و در شرق ایران بین ۴۵ تا ۴۸ کیلومتر است.

در این تحقیق داده های آنومالی جاذبه ی هوای آزاد^۵ از مدل ژئوپتانسیل EIGEN-GL04C به دست آمده است. با استفاده از روش واهمامیختن اویلر^۳ بعدی، عمق موهو به ازای ضریب ساختار های مختلف و اندازه پنجره های متفاوت تخمین زده شد و بهترین ضریب ساختار و اندازه پنجره تعیین گشت و نتایج حاصل از تخمین عمق با مدل CRUST 2.0 مقایسه شد.

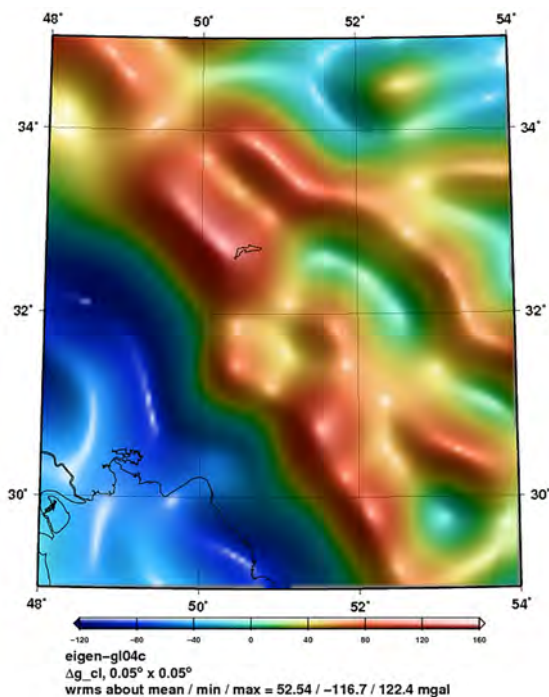
^۲ Geopotential Models

^۳ 3D Euler Deconvolution

^۴ Contact

^۵ Free Air Gravity Anomaly

^۱ Moho Depth



شکل ۱- آنومالی جاذبه هوای آزاد به دست آمده از مدل EIGEN-GL04C

۲- ایجاد شبکه منظم داده های آنومالی جاذبه

مدل های ژئو پتانسیل که همان ضرایب بسط پتانسیل زمین به هارمونیک های کروی (یا بیضوی) هستند، به علت استفاده از مشاهدات ماهواره ای با پوشش یکنواخت و تراکم زیاد در تعیین این ضرایب، طول موج های بلند تابعک های میدان گرانی را به خوبی نشان می دهند [۸]. داده های به کار رفته جهت تخمین عمق موهو، آنومالی جاذبه ی هوای آزاد حاصل از بسط ضرایب هارمونیک کروی مدل EIGEN-GL04C تا مرتبه ۳۶۰ می باشد [۹]. این مدل بعد از مقایسه با داده های GPS-Leveling به عنوان دقیق ترین مدل در ایران انتخاب شده است [۸]. با در نظر گرفتن یک گرید $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ از طریق معادله (۱)، آنومالی جاذبه هوای آزاد محاسبه شد (شکل ۱)؛ در این رابطه N ، λ و ϕ به ترتیب ارتفاع ژئوئید، طول و عرض جغرافیایی نقاط گرید می باشد [۱۰، ۱۱]. جهت تعیین گرادیان های میدان پتانسیل روی ژئوئید (WEIGEN-GL04C) و میدان پتانسیل نرمال روی بیضوی (UGRS80)، از بسط ضرایب هارمونیک کروی استفاده شده است [۱۰، ۱۲، ۱۳].

$$\Delta g_{Free-Air}(\lambda, \phi) = \left| \vec{\nabla} W^{EIGEN-GL04C}(\lambda, \phi, N) \right| - \left| \vec{\nabla} U^{GRS80}(\lambda, \phi, 0) \right| \quad (1)$$

۳- نظریه ی روش واهمامیخت اوپلر

در مدل سازی داده های مغناطیسی و گرانی، یکی از مهمترین پارامترهای مورد توجه در کارهای اکتشافی، تعیین محل و عمق توده ی هدف است. امروزه روش های گوناگونی مانند روش واهمامیخت اوپلر، حداقل مربعات، روش واهمامیخت ورنر و شبکه های عصبی برای چنین مدل سازی هایی وجود دارد [۱۴].

روش واهمامیخت اوپلر روشی خودکار برای برآورد عمق، شکل و مکان منبع های مغناطیسی و گرانی است که اساس آن به کار گیری مشتق های میدان در معادله همگن اوپلر می باشد.

[۱۵] معادله همگن اوپلر را برای تفسیر دو بعدی داده های مغناطیسی به عنوان یک روش خودکار (به نام EULDPH) به کار برد. بعد از ارائه ی روش اوپلر توسط [۱۵]؛ [۳]، [۴] و [۱۶-۲۳] این روش را تعمیم دادند و به شیوه های گوناگون از آن استفاده کردند.

۳-۱- تئوری واهمامیخت اوپلر

تابع V در دستگاه دکارتی به صورت $V(x, y, z)$ همگن از درجه N نامیده می شود اگر در معادله (۲) صدق کند:

$$x \frac{\partial V}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial y} + z \frac{\partial V}{\partial z} = -NV \quad (2)$$

با یک بار مشتق گرفتن از معادله (۲) نسبت به مؤلفه z و مرتب کردن جملات، معادله (۳) به دست می آید:

$$x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right) + y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right) + z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right) = -(N+1) \frac{\partial V}{\partial z} \quad (3)$$

معادله (۳) بیان می کند که مؤلفه های مشتق تابع همگن V از درجه N خود، همگن از درجه $N+1$ می باشد.

هنگامی که $V=GM/r$ باشد و پتانسیل گرانشی ناشی از جرم نقطه ای m را بیان کند، به ازای $N=1$ در معادله ی اویلر (معادله ۲) صدق می کند. شتاب گرانشی و یا پتانسیل مغناطیسی یک دوقطبی، شامل مشتق مرتبه اول فضایی تابع $V=1/r$ می شود، پس به ازای $N=2$ در معادله اویلر صدق می کند. به طور مشابه میدان پتانسیلی شکل های هندسی دیگر که مشتقات مراتب بالاتری از $N=1/r$ را شامل می شود؛ به ازای مقادیر بزرگتری از N در معادله اویلر صدق خواهد کرد [۳]. چشمه پتانسیلی ساده ای در موقعیت (x_0, y_0, z_0) را در نظر بگیرید. در نقطه ای به موقعیت (x_i, y_i, z_i) اندازه گیری شدت میدان مغناطیسی کل یا میدان گرانشی منجر به تابع $T(x_i, y_i, z_i)$ می شود که در آن $i=1, 2, 3, \dots, n$ صفحه مشاهده و برداشت داده ها صفحه $Z=0$ است و جهت مثبت محور Z رو به پایین انتخاب می شود. همواره میدان T ، میدان کل مغناطیسی یا گرانشی اندازه گیری شده یا مشاهده شده در هر نقطه است که به عنوان میدان (تابع) ورودی در روابط واهمامیختن اویلر در نظر گرفته می شود و میدان کل اندازه گیری شده یا مشاهده شده یعنی T که پارامتری معلوم است، دارای یک بخش منطقه ای بوده که با پارامتر B بیان می شود و در واقع B مقدار منطقه ای میدان کل است که به عنوان پارامتری مجهول در روش واهمامیختن اویلر در نظر گرفته می شود. میدان T باید در معادله اویلر با درجه N صدق کند، پس معادله (۴) حاصل می گردد:

$$(x_i - x_0) \frac{\partial T(x_i, y_i, z_i)}{\partial x} + (y_i - y_0) \frac{\partial T(x_i, y_i, z_i)}{\partial y} + (z_i - z_0) \frac{\partial T(x_i, y_i, z_i)}{\partial z} = -NT(x_i, y_i, z_i) \quad (4)$$

اگر میدان ثابت زمینه یا مقدار منطقه ای میدان کل (T)، B باشد، میدان ناشی از بی هنجاری موجود زیر زمین ATi خواهد بود، پس می توان معادله (۵) را نتیجه گرفت:

$$\Delta T_i = T(x_i, y_i, z_i) - B$$

$$(x_i - x_0) \frac{\partial \Delta T_i}{\partial x} + (y_i - y_0) \frac{\partial \Delta T_i}{\partial y} + (z_i - z_0) \frac{\partial \Delta T_i(x_i, y_i, z_i)}{\partial z} = -N \Delta T_i \quad (5)$$

رابطه کلی واهمامیختن اویلر برای میدان T اندازه گیری شده در نقطه (x_i, y_i, z_i) ، به صورت معادله (۶) نوشته می شود:

$$(x_i - x_0) \frac{\partial T_i}{\partial x} + (y_i - y_0) \frac{\partial T_i}{\partial y} + (z_i - z_0) \frac{\partial T(x_i, y_i, z_i)}{\partial z} = -N(T_i - B) \quad (6)$$

(x_i, y_i, z_i) پارامتر های معلوم هستند [۲۳]. پس در روابط بالا با معلوم بودن N ، پارامترهای B و (x_0, y_0, z_0) که به ترتیب میدان ثابت زمینه و موقعیت چشمه تولید کننده بی هنجاری هستند، با استفاده از روش کمترین مربعات به دست خواهد آمد. چند مورد که در روش اویلر برای رسیدن به نتایج اهمیت فراوانی دارند، عبارت اند از: انتخاب درست N که به آن ضریب ساختار^۱ می گویند، اندازه پنجره^۲ اویلر و عدم قطعیت عمق^۳ [۶]. روش اویلر نسبت به سایر روش ها موقعیت افقی چشمه ها را دقیق تر تعیین می کند، چون لبه های ناهنجاری ها را مشخص می کند. در نتیجه خطا را می توان به صورت متمرکز در تعیین عمق در نظر گرفت پس می توان معادله (۷) را نوشت:

$$(z_i - z_0) = -N \frac{T}{\partial T / \partial z} \quad (7)$$

با فرض دقیق بودن T و $\partial T / \partial z$ (بدون خطا)؛ هر خطایی در N مستقیم بر فاصله ی قائم چشمه تا نقطه مشاهده (عمق ناهنجاری) اثر خواهد گذاشت. به دلیل ثابت بودن موقعیت صفحه مشاهده، افزایش N منجر به افزایش عمق داده شده برای چشمه خواهد شد و برعکس. خطای نسبی در N هم باعث اعمال خطای نسبی یکدستی در

^۱ Structural Index(SI)

^۲ Window Size

^۳ Depth Uncertainty

شاهد پدیده های زمین شناسی قدیمی هستند بین ۰ و ۱ و برای مناطقی با پدیده های زمین شناسی جوان تر بین ۰ و ۳ می باشد. در جدول (۱) مقدار ضریب ساختار بر اساس نوع داده های مورد استفاده (مغناطیسی یا گرانی) و شکل منبع (چشمه) مورد جستجو با توجه به تحقیقات [۱۵] و [۲۷] ارائه شده است. بر اساس این جدول، مقدار ضریب ساختار برای داده های گرانی می تواند از ۰ تا ۲ تغییر کند که این مقدار (۰ تا ۲) بستگی به شکل منبع مورد جستجو، که در این تحقیق عمق موهو می باشد، دارد. [۲۴] بر روی اثر ضریب ساختار در عدم قطعیت عمق و مکان منبع با استفاده از یک آنومالی مصنوعی بحث کرده اند، تحقیقات آن ها نشان داد که عمق تخمین زده شده برای یک آنومالی می تواند با تغییر ضریب ساختار، به طور قابل توجهی تغییر کند در حالی که عدم قطعیت های مکانی (یعنی X- و Y-offset) دچار تغییر زیادی نمی شوند؛ بنابراین اگرچه ممکن است یک آنومالی با استفاده از ۲ ضریب ساختار مختلف پیدا شود اما تخمین عمق به دست آمده برای هر ضریب ساختار کاملاً متفاوت خواهد بود. جهت تخمین ضخامت پوسته با استفاده از روش واهمامیخت اوپلر فرض می کنیم که مرز گوشته- پوسته به صورت یک صفحه ی افقی است یا دارای بی هنجاری از نوع Sill می باشد که می تواند در یک فضای دو بعدی نا متناهی بیان شود. بر اساس شکل (۲)، Sill توده نفوذی صفحه ای شکل است که به صورت لایه های موازی در بین رسوبات دیده می شود و بنابراین با لایه بندی سنگ های اطراف حالت هم شیب دارد و در واقع نوعی ساخت اولیه توده های نفوذی است که موازی با امتداد لایه ها قرار می گیرد. بر اساس نتایج [۴] جهت تخمین عمق چنین نا هنجاری بهترین ضریب ساختار ۰.۵ می باشد که در این باره بیشتر بحث خواهیم کرد. پارامتر مهم دیگر اندازه پنجره می باشد، پهنای پنجره می تواند بر روی محدوده ی عمق به دست آمده در هر حل تأثیر بگذارد؛ در کل حل هایی با عمق های خیلی بزرگتر یا خیلی کوچکتر از پهنای پنجره غیر قابل قبول می باشند و در این حالت منبع به دست آمده نمی تواند بر روی هندسه ی مدل فرض شده فیت شود. [۳] رابطه بین عمق آنومالی و اندازه پنجره را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که حداقل عمق قابل قبول تقریباً برابر اندازه پنجره و

اعداد داده شده برای عمقها می شود. اگر ΔN خطای مطلق و $(N \pm \Delta N)/N$ کسر (درصد) افزایش یا کاهش N باشد، می توان معادله (۸) را نوشت:

$$\left(z_i - z_0\right) \left(\frac{N \pm \Delta N}{N}\right) = -N \left(\frac{N \pm \Delta N}{N}\right) \frac{T}{\partial T / \partial z} \quad (8)$$

درصد خطای فیزیکی برای چشمه هایی با عمق کم، پایین است و بر عکس. در انتخاب N باید دقت فراوان داشت؛ برای مثال، یک انتخاب اشتباه برای N متعلق به یک چشمه سه بعدی (وقتی که $N=2$ صحیح بوده و $N=3$ انتخاب شود) $(N \pm \Delta N)/N = 1.5$ می شود یعنی برای یک ساختار زمین شناسی که عمق واقعی آن ۱ کیلومتر باشد این عمق ۰.۵ کیلومتر بیشتر و برای یک برداشت هوابرد که فاصله واقعی چشمه تا نقطه ی مشاهده ۲۰ کیلومتر باشد، این عدد ۱۰ کیلومتر بیشتر برآورد خواهد شد.

برای اعمال روش اوپلر روی داده ها، به دلیل حجم زیاد داده های مورد استفاده در روش های مغناطیسی یا گرانشی و عدم دستیابی به دقت و کیفیت لازم در پردازش یکباره و کلی داده ها در کل شبکه، پنجره مربعی اوپلر تعریف می شود که روی شبکه جابه جا شده و عملیات پردازشی درون پنجره صورت می گیرد. این پنجره باید دو مشخصه ی زیر را داشته باشد [۲۵]:

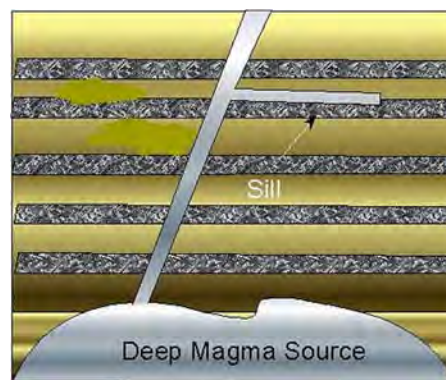
الف) باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا تغییرات اساسی میدان را در بر بگیرد؛

ب) باید به اندازه کافی کوچک باشد تا اثر چند چشمگی در پنجره رخ ندهد. یعنی پنجره در یک موقعیت فقط شامل یک چشمه باشد.

۳-۲- عوامل موثر در انتخاب ضریب ساختار و اندازه پنجره

ضریب ساختار یا درجه همگنی (N) در واقع نرخ به صفر رسیدن شدت میدان مغناطیسی یا گرانشی نسبت به فاصله از چشمه و معیاری برای تمایز قائل شدن بین شکل های مختلف چشمه می باشد که بر اساس تحقیقات [۱۷]، مقدار ضریب ساختار برای مناطقی که

حداکثر عمق قابل قبول تقریباً سه برابر اندازه پنجره می باشد، همچنین اندازه پنجره باید به اندازه ی کافی کوچک باشد تا اثر چند چشمگی رخ ندهد و به اندازه ی کافی بزرگ باشد تا تغییرات اساسی میدان را در بر گیرد بنابراین حل هایی که از مرکز پنجره فاصله زیادی دارند، غیر قابل قبول می باشند.



شکل ۲- توده نفوذی صفحه ای شکل Sill

[۲۵] نشان دادند که پارامترهای $x0,y0$ (موقعیت مسطحاتی منبع) را می توان با انتخاب یک پهناى پنجره مناسب با شرایط مدل، بدون توجه به مقدار N با خطای بسیار کم به دست آورد. اما برای برآورد پارامتر عمق $(z0)$ ، که مهم ترین پارامتر در تفسیر داده های گرانی محسوب می شود، باید در انتخاب ضریب ساختار دقت بسیار زیادی اعمال کرد. پهناى پنجره، تابعی از عمق مدل است و برای عمق های زیاد، پهناى پنجره کوچک دارای خطایی به مراتب بیش تر از عمق های کمتر است؛ چرا که توده های عمیق دارای ناهنجاری های وسیع تری هستند و برای این که پنجره قسمت عمده ای از این ناهنجاری را در برگیرد، باید دارای پهناى بزرگ تری باشد [۲۶]. به طور ساده ترمی توان گفت که برای ناهنجاری های کم عمق، پنجره کوچک جواب بهتری می دهد تا پنجره های بزرگ و بالعکس برای ناهنجاری های عمیق پنجره های بزرگ خطای کمتری در برآورد عمق دارند [۲۶]. توجه به این نکته الزامی است که در آن واحد نباید بیش از یک ناهنجاری در پنجره قرار گیرد، زیرا روش اولبر بر این فرض استوار است که در یک پنجره، داده های مربوط به یک ناهنجاری وجود دارد. در غیر این صورت جواب های به دست آمده کاملاً غیر قابل قبول خواهد بود. ضریب ساختار کاملاً به شرایط چشمه بستگی دارد و برای انتخاب این عدد، به دلیل نامشخص

بودن شرایط چشمه، باید از مشاهدات زمین شناسی و اطلاعات قبلی استفاده شود. همچنین رابطه بین ضریب ساختار با خطای برآورد عمق، رابطه ای خطی است. پس اشتباه در انتخاب ضریب ساختار باعث ایجاد خطای قابل توجهی در برآورد عمق می شود. ضریب ساختار در واقع نرخ به صفر رسیدن شدت میدان مغناطیسی یا گرانشی نسبت به فاصله از چشمه و معیاری برای تبعیض قائل شدن بین شکل های متفاوت چشمه است [۲۷]. باید توجه داشت که یک ضریب ساختار صفر بیان گر این است که میدان بدون در نظر گرفتن فاصله از مدل منبع، یک مقدار ثابت است. در مورد یک کنتاکت گرانی، میدان نامحدود خواهد بود. چنین شرایطی از نظر فیزیکی برای داده های واقعی غیر محتمل است، و یک ضریب ساختار صفر یک حد فیزیکی را نشان می دهد که تنها می تواند به عنوان به اصطلاح ابعاد نامحدود افزایش منبع واقعی حاصل شود. در عمل، ضریب ساختار ۰,۵ جهت دستیابی به نتایج منطقی و قابل قبول هنگامی که ضریب ساختار صفر جوابی غیر قابل قبول را نشان دهد، می تواند مورد استفاده قرار گیرد [۲۷]. این مسئله هنگامی رخ می دهد که قصد داریم نتایج را از یک مدل کنتاکت بر اساس داده های گرانی به دست آوریم. یک راه حل این مسئله، کارکردن با مشتق قائم مرتبه ی اول میدان گرانی اصلی است که این امر نرخ fall-off یا نزول (به واسطه ی یک ضریب ساختار) را افزایش داده و همچنین مقدار ضریب ساختار گرانی را با مقدار ضریب ساختار مغناطیسی برای یک مدل منبع یکسان، برابر می سازد [۲۷].

جدول ۱- مقدار ضریب ساختار بر اساس شکل منبع و نوع داده های مورد استفاده

ضریب ساختار	میدان مغناطیسی	میدان گرانی
0	Contact	Sill/Dyke/Step
0.5	Thick Step	Ribbon
1	Sill/Dyke	Pipe
2	Pipe	Sphere
3	Sphere	-

۴- تخمین عمق موهو به روش واهمامیخت اولر

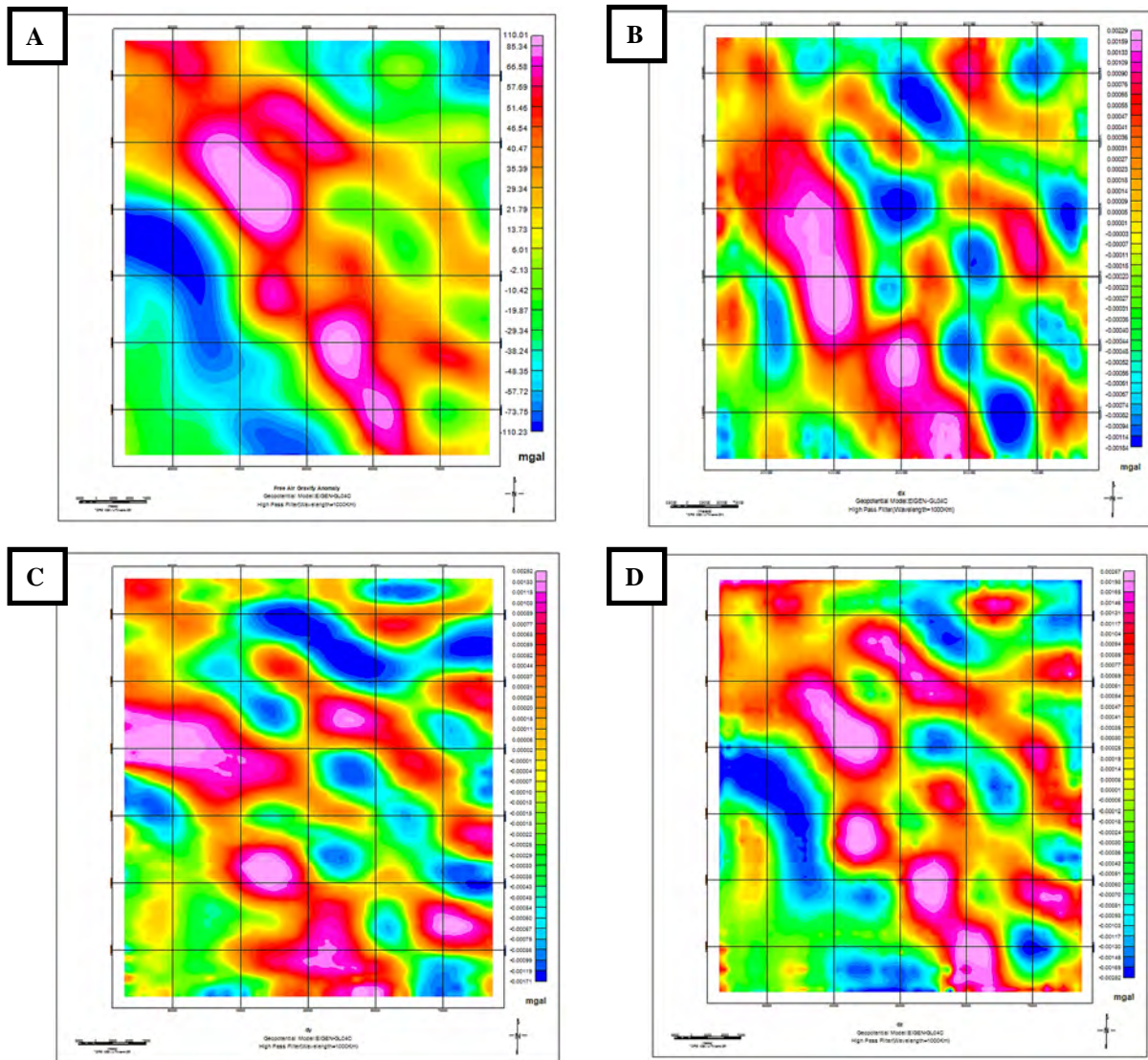
داده های مورد استفاده در تخمین عمق موهو، داده های طول موج بلند (تا مرتبه ۳۶۰) آنومالی جاذبه هوای آزاد حاصل از مدل ژئو پتانسیل EIGEN-GL04C در محدوده $\lambda = 48,25^{\circ} - 53,75^{\circ}$ و $\phi = 29,25^{\circ} - 34,75^{\circ}$ در یک گرید $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ می باشد. در روش واهمامیخت اولر به گرید های میدان گرانی و مشتق میدان در سه راستا نیاز داریم؛ از طرفی دیگر فاصله ی بین نقاط در گرید های مذکور بایستی $1/8$ تا $1/4$ برابر فاصله ی بین نقاطی باشد که در آن ها میدان گرانی مشاهده یا محاسبه شده است [۵]. از آن جا که فاصله بین نقاطی که در آن ها آنومالی جاذبه هوای آزاد محاسبه شده است؛ $0,25^{\circ}$ می باشد (فاصله بین دو نقطه ای که طول جغرافیایی یکسانی دارند ولی عرض جغرافیایی آن ها $0,25^{\circ}$ با هم اختلاف دارد، تقریباً ۲۸ کیلومتر است؛ فاصله بین دو نقطه ای که عرض جغرافیایی یکسانی دارند ولی طول جغرافیایی آن ها $0,25^{\circ}$ با هم اختلاف دارد بسته به عرض جغرافیایی آن ها می تواند متفاوت باشد از آن جا که در این تحقیق عرض جغرافیایی بین $29,25^{\circ}$ تا $34,75^{\circ}$ است پس فاصله تقریباً از ۲۴,۲۵ کیلومتر تا ۲۲,۸۵ کیلومتر تغییر می کند) پس برای تولید هر یک از گرید ها، Grid Cell Size را ۵ کیلومتر (یا تقریباً $0,05^{\circ}$) در نظر می گیریم. از آن جا که در این تحقیق، هدف یافتن عمق موهو (مرز گوشته-پوسته) می باشد پس می توان گفت، عمق هایی که به دنبال آن ها هستیم زیر ۱۰۰ کیلومتر خواهند بود پس بایستی با استفاده از یک فیلتر بالا گذر مرتبه های (فرکانس های) پایین تر را که مربوط به توده های عمیق تر است یا به عبارت دیگر اثر توده های نزدیک مرز هسته-گوشته را حذف کنیم و تنها فرکانس های بالاتر را عبور دهیم [۲۸]. براساس رابطه (۶)، در روش واهمامیخت اولر علاوه بر میدان کل اندازه گیری شده یا محاسبه شده به مشتقات میدان در سه راستا نیز نیاز داریم که در این تحقیق جهت تعیین مشتق های میدان گرانی در راستای x و y از فیلتر کانولوشن ۹ نقطه ای ساده و همچنین جهت تعیین مشتق میدان گرانی در

راستای z از تبدیل فوریه سریع (FFT) استفاده شده است. در شکل (۳) گرید آنومالی جاذبه ی هوای آزاد به همراه گرید های مشتق میدان در سه راستا پس از اعمال فیلتر بالا گذر با طول موج ۱۰۰۰ کیلومتر نشان داده شده است.

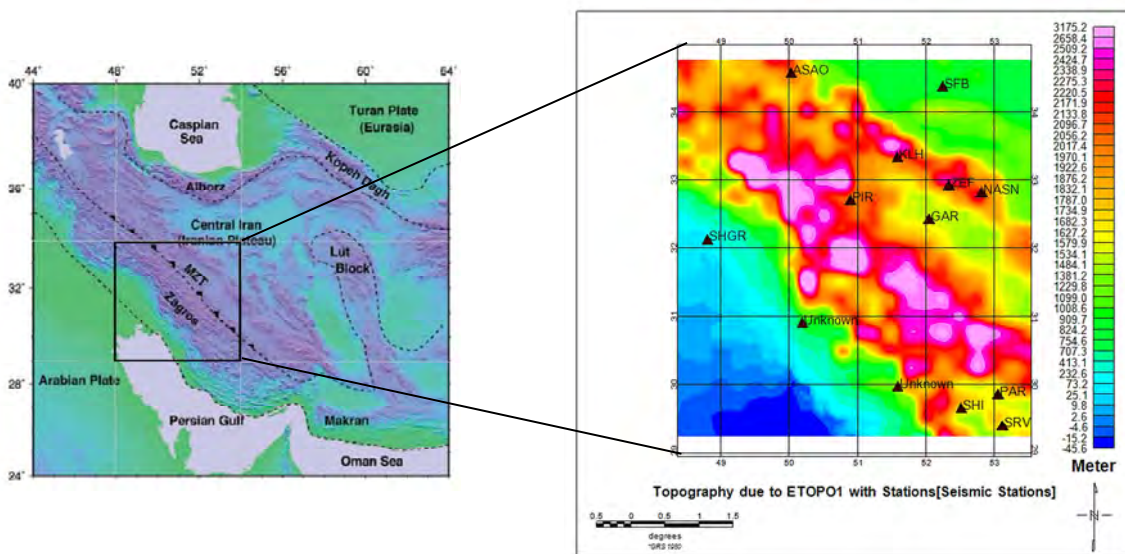
در این تحقیق جهت تعیین بهترین ضریب ساختار و اندازه پنجره از مقایسه مقادیر عمق موهو به دست آمده از روش واهمامیخت اولر و مقادیر عمق موهو به دست آمده به روش تابع انتقال گیرنده (بر اساس مطالعات لرزه ای) در ایستگاه های لرزه ای موجود در محدوده ی مطالعاتی استفاده شده است در جدول (۲) مشخصات ایستگاه ها به همراه عمق موهو به دست آمده در هر ایستگاه به روش تابع انتقال گیرنده بیان شده است و در شکل (۴) موقعیت ایستگاه ها در محدوده ی مطالعاتی بر روی نقشه توپوگرافی به دست آمده از مدل ETOPO1 نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات ایستگاه های لرزه ای موجود در محدوده ی مطالعاتی

Station	Phi(deg)	Lambda(deg)	Seismic Depth(Km)
'PAR' [29]	29.8419	53.0485	56.5
'SRV' [29]	29.3817	53.1133	47.5
'SHI' [29]	29.6418	52.5133	48.5
'ZEF' [30]	32.8956	52.3291	38.5
'PIR' [30]	32.6841	50.8917	39.5
'KLH' [30]	33.319	51.5787	39.5
'GAR' [30]	32.4038	52.0418	43
'SHGR' [31]	32.108	48.801	38
'Unknown' [32]	29.96	51.58	49
'Unknown' [32]	30.89	50.19	49
'Ashtian-Arak (ASAO)' [33]	34.549	50.024	46
'Naein (NASN)' [33]	32.799	52.808	56
'Shooshtar (SHGR)' [33]	32.108	48.801	42
'SFB' [34]	34.3539	52.2365	53.5



شکل ۳- A. آنومالی جاذبه هوای آزاد به دست آمده از مدل EIGEN-GL04C پس از اعمال فیلتر بالا گذر به طول موج ۱۰۰۰ کیلومتر؛ B. مشتق آنومالی جاذبه هوای آزاد در راستای x؛ C. مشتق آنومالی جاذبه هوای آزاد در راستای y؛ D. مشتق آنومالی جاذبه هوای آزاد در راستای Z



شکل ۴- موقعیت ایستگاه ها در محدوده ی مطالعاتی بر روی نقشه توپوگرافی به دست آمده از مدل ETOPO1

۴-۱- تعیین اندازه پنجره و ضریب ساختار بهینه

جهت تعیین ضریب ساختار و اندازه پنجره بهینه در تخمین عمق موهو، ابتدا ضریب ساختار را ثابت در نظر گرفته و تنها اندازه پنجره را تغییر می دهیم تا بهترین اندازه پنجره از طریق مقایسه جواب های به دست آمده از روش اوپلر با نتایج حاصل از مطالعات لرزه ای تعیین شود و بعد از تعیین بهترین اندازه پنجره، اندازه پنجره را روی مقدار بهینه ثابت فرض کرده و تنها ضریب ساختار را تغییر می دهیم تا بهترین مقدار برای ضریب ساختار از طریق مقایسه جواب ها، مشخص شود.

در این تحقیق ابتدا ضریب ساختار را ۰.۵ در نظر گرفته و اندازه پنجره را از ۱۵ کیلومتر تا ۵۵ کیلومتر تغییر می دهیم و پس از تعیین اندازه پنجره بهینه، اندازه پنجره را ثابت در نظر گرفته و تنها ضریب ساختار را تغییر می دهیم تا به ازای مقادیر ۰.۵، ۱.۰، ۱.۵، ۲.۰ بهترین ضریب ساختار تعیین شود. در جدول (۳)، عمق موهو به دست آمده به روش واهمامیخت اوپلر در ۱۴ ایستگاه لرزه ای موجود در محدوده ی مطالعاتی و میزان اختلاف جواب ها با عمق موهو به دست آمده از مطالعات لرزه ای به روش تابع انتقال گیرنده بیان شده است.

برای تعیین بهترین اندازه پنجره به ازای ضریب ساختار ۰.۵، باید میزان اختلاف جواب های به دست آمده از روش واهمامیخت اوپلر با عمق موهو حاصل از روش تابع انتقال گیرنده (به دست آمده از مطالعات لرزه ای) را، در اندازه پنجره های مختلف با هم مقایسه کرد. جهت این کار میزان اختلاف های به دست آمده را به بازه های (۶) $[0, [6, 11], [11, 16], [16, 21], [21, 26], [26, 31], [31, 36], [36, 41], [41, 46], [46, 51], [51, 56], [56, 61], [61, 66], [66, 71], [71, 76], [76, 81], [81, 86], [86, 91], [91, 96], [96, 101], [101, 106], [106, 111], [111, 116], [116, 121], [121, 126], [126, 131], [131, 136], [136, 141], [141, 146], [146, 151], [151, 156], [156, 161], [161, 166], [166, 171], [171, 176], [176, 181], [181, 186], [186, 191], [191, 196], [196, 201], [201, 206], [206, 211], [211, 216], [216, 221], [221, 226], [226, 231], [231, 236], [236, 241], [241, 246], [246, 251], [251, 256], [256, 261], [261, 266], [266, 271], [271, 276], [276, 281], [281, 286], [286, 291], [291, 296], [296, 301], [301, 306], [306, 311], [311, 316], [316, 321], [321, 326], [326, 331], [331, 336], [336, 341], [341, 346], [346, 351], [351, 356], [356, 361], [361, 366], [366, 371], [371, 376], [376, 381], [381, 386], [386, 391], [391, 396], [396, 401], [401, 406], [406, 411], [411, 416], [416, 421], [421, 426], [426, 431], [431, 436], [436, 441], [441, 446], [446, 451], [451, 456], [456, 461], [461, 466], [466, 471], [471, 476], [476, 481], [481, 486], [486, 491], [491, 496], [496, 501], [501, 506], [506, 511], [511, 516], [516, 521], [521, 526], [526, 531], [531, 536], [536, 541], [541, 546], [546, 551], [551, 556], [556, 561], [561, 566], [566, 571], [571, 576], [576, 581], [581, 586], [586, 591], [591, 596], [596, 601], [601, 606], [606, 611], [611, 616], [616, 621], [621, 626], [626, 631], [631, 636], [636, 641], [641, 646], [646, 651], [651, 656], [656, 661], [661, 666], [666, 671], [671, 676], [676, 681], [681, 686], [686, 691], [691, 696], [696, 701], [701, 706], [706, 711], [711, 716], [716, 721], [721, 726], [726, 731], [731, 736], [736, 741], [741, 746], [746, 751], [751, 756], [756, 761], [761, 766], [766, 771], [771, 776], [776, 781], [781, 786], [786, 791], [791, 796], [796, 801], [801, 806], [806, 811], [811, 816], [816, 821], [821, 826], [826, 831], [831, 836], [836, 841], [841, 846], [846, 851], [851, 856], [856, 861], [861, 866], [866, 871], [871, 876], [876, 881], [881, 886], [886, 891], [891, 896], [896, 901], [901, 906], [906, 911], [911, 916], [916, 921], [921, 926], [926, 931], [931, 936], [936, 941], [941, 946], [946, 951], [951, 956], [956, 961], [961, 966], [966, 971], [971, 976], [976, 981], [981, 986], [986, 991], [991, 996], [996, 1001]$ و $\{21 \geq \text{abs(Diff)}\}$ طبقه بندی یا کلاسه بندی می کنیم. در جدول (۴) تعداد نقاط موجود در هر یک از کلاسه ها (طبقه ها) به ازای اندازه پنجره های مختلف (برحسب کیلومتر)، بیان شده است.

بر اساس جداول (۳) و (۴) می توان گفت که تنها از اندازه پنجره ۴۰ کیلومتر تا اندازه پنجره ۵۰ کیلومتر دو کلاسه ی $\{21 \geq \text{abs(Diff)}\}$ فاقد عضو بوده یا به عبارت دیگر تنها به ازای اندازه پنجره ۴۰ کیلومتر تا اندازه پنجره ۵۰ کیلومتر در تمامی ایستگاه ها اختلاف عمق کمتر از ۱۶ کیلومتر است. و از طرفی دیگر به ازای

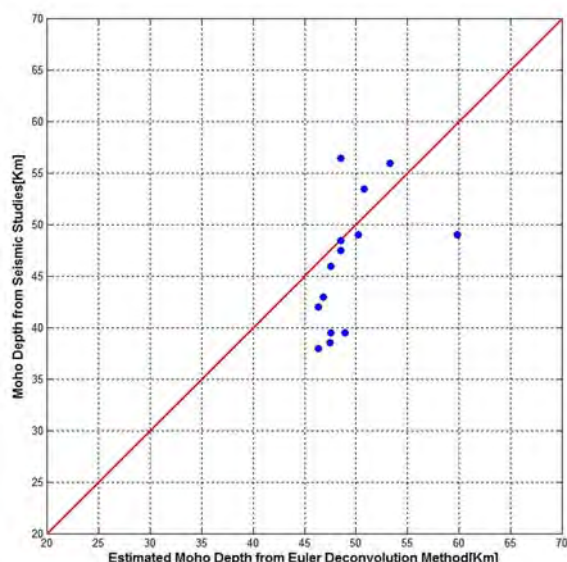
اندازه پنجره ۴۰ کیلومتر بیشترین تعداد ایستگاه ها (۹) ایستگاه از ۱۴ ایستگاه) در کلاسه ی (۰،۶) قرار می گیرد و ۳ ایستگاه مربوط به کلاسه ی (۶،۱۱) و ۲ ایستگاه مربوط به کلاسه ی (۱۱، ۱۶) می باشد. بعد از اندازه پنجره ی ۴۰ کیلومتر، به ازای اندازه پنجره ۴۵ کیلومتر ایستگاه های بیشتری (۸ ایستگاه از ۱۴ ایستگاه) در کلاسه ی (۰،۶) قرار می گیرد و ۶ ایستگاه دیگر مربوط به کلاسه ی (۶،۱۱) می باشد. در کل می توان گفت که به ازای اندازه پنجره ۴۰ کیلومتر در ۶۴ درصد ایستگاه ها (۹ ایستگاه از ۱۴ ایستگاه) اختلاف عمق کمتر از ۶ کیلومتر و تقریباً در ۸۵ درصد ایستگاه اختلاف عمق زیر ۱۱ کیلومتر می باشد به عبارت دیگر به جز ۳ ایستگاه SFB، PAR و Unknown که در آن اختلاف عمق به ترتیب ۱۰،۷، ۱۲،۹ و ۱۲ می باشد در ۱۱ ایستگاه باقی مانده اختلاف عمق تقریباً ۷ کیلومتر و زیر ۷ کیلومتر است ولی از طرف دیگر به ازای اندازه پنجره ۴۵ کیلومتر، در ۵۷ درصد ایستگاه ها (۸ ایستگاه از ۱۴ ایستگاه) اختلاف عمق زیر ۶ کیلومتر و در همه ی ایستگاه (هر ۱۴ ایستگاه) اختلاف عمق زیر ۱۱ کیلومتر است و از طرفی با توجه به شکل های (۵) و (۶) می توان گفت که به ازای اندازه پنجره ی ۴۵ کیلومتر نقاط موجود در صفحه در مقایسه با اندازه پنجره ۴۰ کیلومتر به خط $X=Y$ (محور X بیانگر عمق موهو تخمین زده شده در ایستگاه های موجود به روش واهمامیخت اوپلر و محور Y بیانگر عمق موهو تخمین زده شده به روش تابع انتقال گیرنده بر اساس مطالعات لرزه ای می باشد) نزدیک تر هستند و نقاط نسبت به خط $X=Y$ متمرکز ترند ولی بر اساس آن چه که گفته شد به ازای اندازه پنجره ۴۰ کیلومتر تقریباً در ۷۸ درصد نقاط اختلاف عمق ۷ کیلومتر و زیر ۷ کیلومتر است و در ایستگاه های بیشتری اختلاف عمق زیر ۶ کیلومتر می باشد پس به این ترتیب می توان گفت، بهترین اندازه پنجره به ازای ۴۰ کیلومتر تا ۴۵ کیلومتر می باشد ولی تا حدی می توان گفت که به ازای اندازه پنجره ۴۵ کیلومتر جواب های به دست آمده بهتر است چراکه هم تمرکز جواب ها حول $X=Y$ بیشتر بوده و هم در تمامی ایستگاه ها اختلاف عمق زیر ۱۱ کیلومتر است.

جدول ۳- عمق موهو به دست آمده در ۱۴ ایستگاه لرزه ای موجود در منطقه به روش واهمامیخت اوپلر و میزان اختلاف جواب ها با عمق موهو به دست آمده به روش تابع انتقال گیرنده(به دست آمده از مطالعات لرزه ای) (ED: عمق موهو به دست آمده به روش واهمامیخت اوپلر بر حسب کیلومتر، Diff: اختلاف بین عمق موهو به دست آمده به روش واهمامیخت اوپلر و عمق موهو به دست آمده به روش تابع انتقال گیرنده بر حسب کیلومتر) عمق موهو حاصل از روش واهمامیخت اوپلر - عمق موهو به دست آمده به روش تابع انتقال گیرنده، Window Size: اندازه پنجره در نظر گرفته شده در هر مرحله بر حسب کیلومتر)

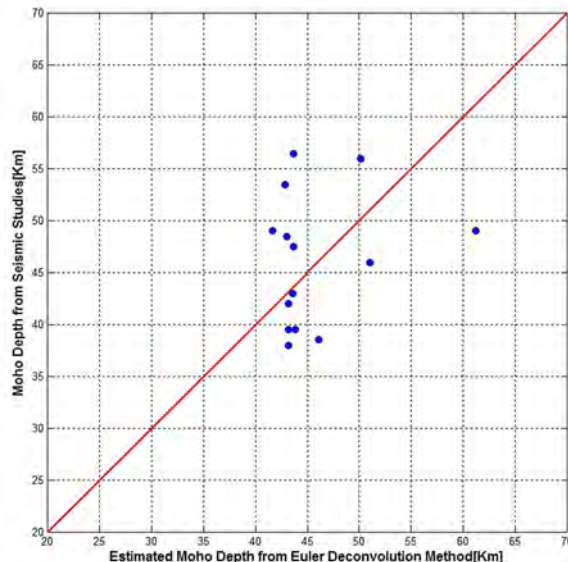
Station	ED	Diff	ED	Diff	ED	Diff	ED	Diff	ED	Diff	ED	Diff	ED	Diff	ED	Diff	ED	Diff
'PAR'	41.03	15.5	41.7	14.8	35.54	21	47.6	8.89	37.54	19	43.6	12.9	48.5	7.961	53.3	3.23	60.3	-3.8
'SRV'	41.47	6.03	26.6	20.9	27.47	20	37.2	10.3	38.13	9.4	43.6	3.87	48.5	-1.04	52.9	-5.4	59.3	-12
'SHI'	38.32	10.2	38	10.5	35.83	12.7	35.9	12.6	37.4	11	43	5.52	48.5	-0.04	53.3	-4.8	59.3	-11
'ZEF'	32.34	6.16	27.1	11.4	31.49	7.01	49.8	-11	43.55	-5	46.1	-7.6	47.5	-8.97	52.4	-14	57.3	-19
'PIR'	37.95	1.55	41.2	-1.71	39.24	0.26	44.2	-4.7	43.67	-4.2	43.2	-3.7	47.6	-8.06	53.1	-14	60.9	-21
'KLH'	44.91	-5.4	61.4	-21.9	46.34	-6.8	39	0.46	53.23	-14	43.9	-4.4	48.9	-9.43	52.4	-13	58.7	-19
'GAR'	37.62	5.38	43.1	-0.08	36.42	6.58	42.4	0.63	42.34	0.7	43.6	-0.6	46.8	-3.84	52.4	-9.4	57.7	-15
'SHGR'	42.64	-4.6	48.8	-10.8	35.64	2.36	45.4	-7.4	38.41	-0.4	43.2	-5.2	46.3	-8.34	51.9	-14	55.9	-18
'Unknown'	42.59	6.41	49.4	-0.35	52.73	-3.7	58.8	-9.8	59.55	-11	61.2	-12	59.8	-10.8	59.5	-11	60.7	-12
'Unknown'	42.24	6.76	45.2	3.79	42.16	6.84	44.1	4.9	43.85	5.1	41.6	7.37	50.2	-1.21	51.6	-2.6	60.1	-11
'Ashtian-Arak (ASAO)	26.51	19.5	49.4	-3.37	54.18	-8.2	49.8	-3.8	51.67	-5.7	51.1	-5.1	47.5	-1.51	54	-8	57.5	-11
'Naein (NASN)'	41.85	14.2	44.6	11.4	48.27	7.73	44.8	11.2	48.73	7.3	50.1	5.85	53.3	2.682	53.3	2.72	57.3	-1.3
'Shooshtar (SHGR)'	42.64	-0.6	48.8	-6.8	35.64	6.36	45.4	-3.4	38.41	3.6	43.2	-1.2	46.3	-4.34	51.9	-9.9	55.9	-14
'SFB'	33.39	20.1	24	29.5	26.56	26.9	32.4	21.1	37	17	42.8	10.7	50.7	2.756	52.1	1.42	58.7	-5.2
Window Size, SI=0.5	15	15	20	20	25	25	30	30	35	35	40	40	45	45	50	50	55	55

جدول ۴- تعداد نقاط موجود در هر یک از کلاسه های در نظر گرفته شده برای اختلاف عمق موهو

Window Size, SI=0.5	abs(Diff): [0,6)Km	abs(Diff): [6,11)Km	abs(Diff): [11,16)Km	abs(Diff): [16,21)Km	abs(Diff): ≥21 Km
15	5	5	2	2	0
20	5	3	3	1	2
25	3	7	1	2	1
30	6	4	3	0	1
35	7	3	2	2	0
40	9	3	2	0	0
45	8	6	0	0	0
50	6	4	4	0	0
55	3	1	6	3	1

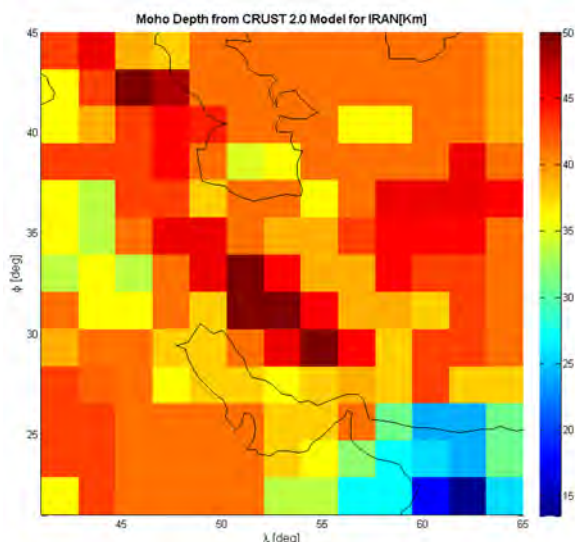


شکل ۶- پراکندگی و اختلاف جواب های حاصل از روش واهمامیخت اوپلر نسبت به عمق های به دست آمده از روش تابع انتقال گیرنده، به ازای اندازه پنجره ۴۵ کیلومتر و ضریب ساختار ۰.۵



شکل ۵- پراکندگی و اختلاف جواب های حاصل از روش واهمامیخت اوپلر نسبت به عمق های به دست آمده از روش تابع انتقال گیرنده، به ازای اندازه پنجره ۴۰ کیلومتر و ضریب ساختار ۰.۵

میانی و پوسته زیرین در تمام مناطق کره زمین است [۳۶]. با توجه به شکل (۷) در زاگرس مرتفع، پوسته ی ایران دارای بیشترین ضخامت (در حدود ۵۰ کیلومتر) بوده و در دریای عمان با پوسته اقیانوسی کمترین ضخامت (در حدود ۲۰ کیلومتر) را داراست.



شکل ۷- عمق موهو به دست آمده از مدل CRUST 2.0 برای ایران

بر اساس شکل های (۸) و (۹)، با مقایسه مقادیر عمق موهو به دست آمده از روش واهمامیخت اولر به ازای اندازه پنجره ۴۵ کیلومتر و ضریب ساختار ۰,۵ با عمق موهو به دست آمده از مدل جهانی CRUST 2.0 در منطقه، می توان نتیجه گرفت که در ۴ موزاییک از ۶ موزاییک موجود در منطقه (با توجه به طول و عرض جغرافیایی محدوده ی مطالعاتی تنها ۶ موزاییک از مدل CRUST 2.0 در این محدوده قرار می گیرد) مقدار اختلاف عمق زیر ۳ کیلومتر بوده و تنها در ۲ موزاییک A و B مقدار اختلاف عمق بر اساس شکل (۹) به ترتیب در حدود ۸ کیلومتر و ۹ کیلومتر می باشد و در هر ۶ موزاییک اختلاف عمق زیر ۱۰ کیلومتر است و همچنین به ازای اندازه پنجره ۴۰ کیلومتر و ضریب ساختار ۰,۵ می توان گفت که تنها در سلول A مقدار اختلاف عمق بالای ۶ کیلومتر است و در سایر سلول ها یا موزاییک ها مقدار اختلاف عمق زیر ۴ کیلومتر است پس می توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از تخمین عمق موهو به روش واهمامیخت اولر با مدل CRUST 2.0 سازگاری مناسبی دارد.

حال در مرحله بعد باید بهترین ضریب ساختار را به دست آوریم که جهت تعیین ضریب ساختار بهینه، اندازه پنجره را ۴۰ کیلومتر و ثابت فرض می کنیم و تنها ضریب ساختار را تغییر می دهیم، در جدول (۵) تعداد نقاط موجود در هر یک از کلاسه های در نظر گرفته شده برای اختلاف عمق موهو به ازای ضریب ساختارهای ۱,۰,۵,۰,۰,۵,۱,۵,۲ بیان شده است.

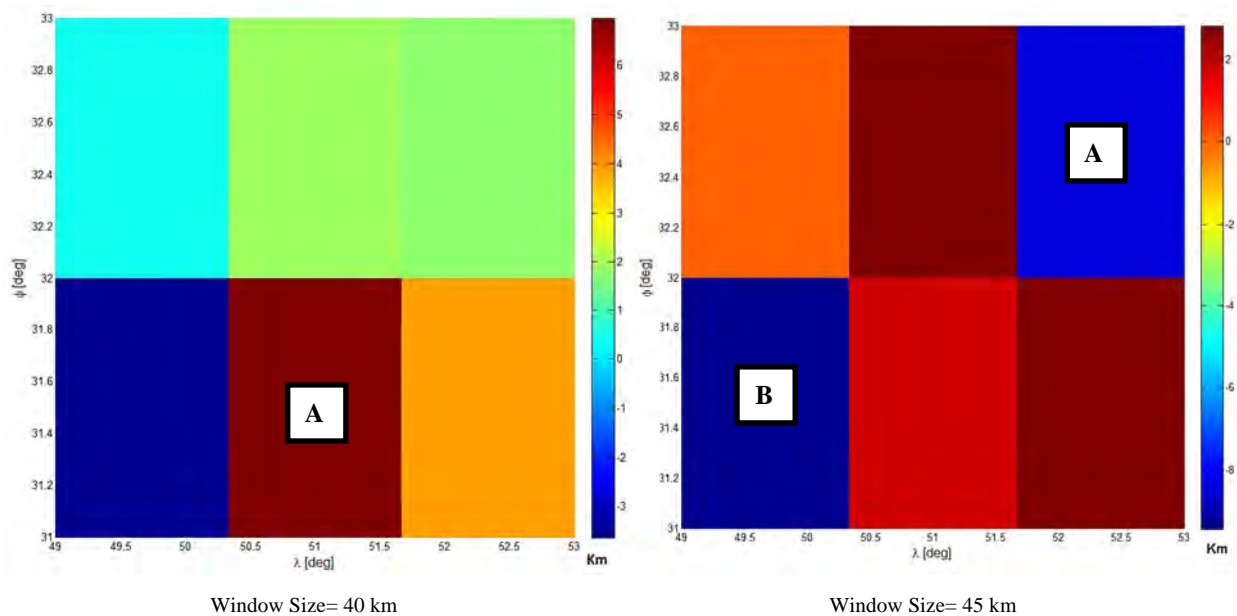
بر اساس جدول (۵) می توان گفت، به ازای ضریب ساختار ۰,۵ کلاسه ی [۰,۶] دارای بیشترین عضو بوده و از ۱۴ ایستگاه موجود ۹ ایستگاه (تقریباً ۶۴ درصد ایستگاه ها) دارای اختلاف عمق کمتر از ۶ کیلومتر و ۱۲ ایستگاه (تقریباً ۸۵ درصد ایستگاه ها) دارای اختلاف عمق کمتر از ۱۱ کیلومتر می باشند و به ازای ضریب ساختار های ۱,۵, ۲ و ۳ به ترتیب، ۴ ایستگاه (تقریباً ۲۸ درصد ایستگاه ها)، ۳ ایستگاه (تقریباً ۲۱ درصد ایستگاه ها) و ۵ ایستگاه (تقریباً ۳۵ درصد ایستگاه ها) دارای اختلاف عمق کمتر از ۶ کیلومتر و ۸ ایستگاه (تقریباً ۵۷ درصد ایستگاه ها)، ۴ ایستگاه (تقریباً ۲۸ درصد ایستگاه ها) و ۸ ایستگاه (تقریباً ۵۷ درصد ایستگاه ها) دارای اختلاف عمق کمتر از ۱۱ کیلومتر می باشند و به ازای ضریب ساختار صفر تنها می توان در ۳ ایستگاه (تقریباً ۲۱ درصد ایستگاه ها) عمق موهو را تخمین زد چراکه حل های به دست آمده از روش واهمامیخت اولر به ازای ضریب ساختار صفر در محدوده ی مطالعاتی بسیار کم بوده (۲۳۵ حل) و به ازای ضریب ساختار صفر حل های به دست آمده بر روی محدوده ی مطالعاتی دارای پراکندگی و تراکم بسیار نامناسبی است و نمی توان در همه ی ایستگاه ها عمق موهو را به خوبی تخمین زد. پس بر اساس نتایج به دست آمده بهترین ضریب ساختار جهت تخمین عمق موهو به روش واهمامیخت اولر ۰,۵ می باشد که با نتایج [۴] و [۳۵] همخوانی دارد.

۴-۲- مقایسه ی نتایج با مدل CRUST 2.0

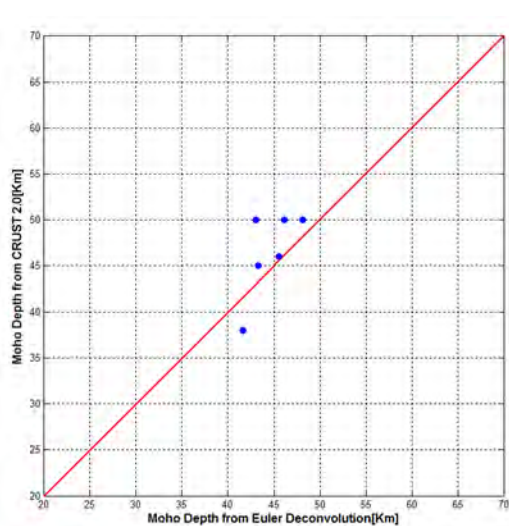
شکل (۷) بیانگر ضخامت پوسته ایران است که با استفاده از داده های مدل CRUST 2.0 تهیه شده است. این مدل شامل یک موزاییک بندی با ابعاد دو درجه ای از سرعت امواج لرزه ای P و S، دانسیته و ضخامت لایه های یخ، آب، رسوب نرم، رسوب سخت، پوسته بالایی، پوسته

جدول ۵- تعداد نقاط موجود در هر یک از کلاسه های در نظر گرفته شده برای اختلاف عمق موهو

SI, Window Size=40 Km	abs(Diff): [0,6)Km	abs(Diff): [6,11)Km	abs(Diff): [11,16)Km	abs(Diff): [16,21)Km	abs(Diff): ≥ 21 Km
0	2	1	0	0	0
0.5	9	3	2	0	0
1	4	4	5	0	1
1.5	3	1	5	2	3
2	5	3	1	1	2

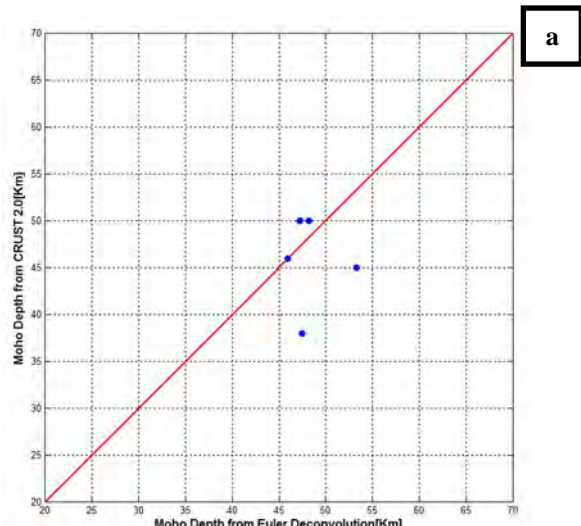


شکل ۸- نقشه ی اختلاف عمق موهو حاصل از روش واهمامیخت اویلر و مدل CRUST 2.0



0.4563	1.9159	1.7153
-3.64	6.9672	3.8536

Window Size= 40 km



0.0733	2.7827	-8.318
-9.434	1.8105	2.8173

Window Size= 45 km

شکل ۹- a. پراکندگی و اختلاف جواب های حاصل از روش واهمامیخت اویلر نسبت به عمق های به دست آمده از مدل CRUST 2.0; b. مقدار اختلاف عمق به دست آمده (بر حسب کیلومتر) در هر یک از موزاییک های در نظر گرفته شده در شکل (۸)

۵- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق جهت تخمین عمق موهو از داده های حاصل از مدل های ژئوتانسیل و روش واهمامیخت اوایلر ۳ بعدی استفاده شد، همواره در عمل از روش واهمامیخت اوایلر جهت تخمین عمق توده های معدنی استفاده می شود و امروزه محاسبه ی عمق موهو بیشتر از طریق داده های لرزه ای و اغلب به روش تابع انتقال گیرنده صورت می گیرد که از نظر دقت دارای کیفیت بهتری نسبت به روش وارون سازی داده های گرانی می باشند ولی استفاده از مشاهدات گرانی دارای این مزیت است که این داده ها اولاً ارزان تر بوده و ثانياً از پوشش سطحی مناسب تری برخوردارند داده های گرانی مورد استفاده در این تحقیق داده های آنومالی جاذبه هوای آزاد حاصل از مدل ژئوتانسیل EIGEN-GL04C بود که شامل ضرایب هارمونیک کروی میدان ثقل زمین تا مرتبه ۳۶۰ (طول موج های بلند میدان ثقل) می باشد. استفاده از داده های حاصل از مدل های ژئوتانسیل به دلیل دارا بودن طول موج های بلند میدان ثقل زمین جهت تخمین عمق موهو بسیار مناسب می باشند زیرا در تخمین عمق موهو نیاز به طول موج های کوتاه و

متوسط میدان ثقل نداریم. در این تحقیق ابتدا با استفاده از ضرایب هارمونیک کروی مدل ژئوتانسیل EIGEN-GL04C، آنومالی جاذبه هوای آزاد در محدوده ی زاگرس ($\lambda = 48,25^\circ - 53,75^\circ$) و $34,75^\circ - 29,25^\circ$ در یک گرید $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ محاسبه شد سپس با استفاده از داده های آنومالی جاذبه هوای آزاد و به کارگیری روش واهمامیخت اوایلر عمق موهو به ازای ضریب ساختار های مختلف و اندازه پنجره های متفاوت برآورد شد و بهترین ضریب ساختار و اندازه پنجره از مقایسه عمق بر آورد شده به روش واهمامیخت اوایلر و عمق به دست آمده از روش تابع انتقال گیرنده در ۱۴ ایستگاه لرزه ای موجود در منطقه، تعیین گشت و نتایج به دست آمده با مدل CRUST 2.0 مقایسه شد. بر اساس نتایج به دست آمده می توان گفت که به ازای ضریب ساختار ۵، و اندازه پنجره ۴۰ تا ۴۵ کیلومتر بهترین جواب را در تخمین عمق موهو در محدوده ی مورد نظر خواهیم داشت. به ازای اندازه پنجره ۴۰ کیلومتر، میانگین عمق موهو تقریباً 46 ± 5 (km) و به ازای اندازه پنجره ۴۵ کیلومتر میانگین عمق موهو تقریباً 50 ± 4 (km) به دست آمد.

مراجع

- [1] Asgharzadeh, M.F. (2007). "Geodynamical Analysis of the Iranian Plateau and Surrounding Regions". The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- [2] Radjaee, A., Rham, D., Mokhtari, M., Tatar, M., Priestley, K. & Hatzfeld, D. (2010). "Variation of Moho depth in the central part of the Alborz Mountains, northern Iran". Geophys. J. Int., Vol. 181, PP. 173-184.
- [3] Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J. & Somerton, I.W. (1990). "Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution". Geophysics, Vol. 55, PP. 80-91.
- [4] Mushayandebvu, M.F., van Driel, P., Reid, A.B. & Fairhead, J.D. (2001). "Magnetic source parameters of two-dimensional structures using extended Euler deconvolution". Geophysics, Vol. 66, PP. 814-823.
- [5] Keating, P.B. (1998). "Weighted Euler deconvolution of gravity data". Geophysics, Vol. 63, PP. 1595-1603.
- [6] Silva, J.B.C. & Barbosa, V.C.F. (2003). "3D Euler deconvolution: theoretical basis for automatically selecting good solutions". Geophysics, Vol. 68, PP. 1962-1968.
- [7] Dehghani, G.A. & Makris, J. (1984). "The gravity field and crustal structure of Iran". Neues Jahrb. Geol. Palaeontol., Vol. 168, PP. 215-229.

[۸] شریفی، م. ع.، نیکخو، م. و عباس زاده، م. (۱۳۸۹). "روشی نوین جهت ارزیابی دقت مدل های ژئوتانسیل، منطقه مورد مطالعه: ایران". مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۶، شماره ۴.

- [9] Förste, C., Flechtner, F., Schmidt, R., König, R., Meyer, U., Stubenvoll, R., Rothacher, M., Barthelmes, F., Neumayer, K.H., Biancale, R., Bruinsma, S., Lemoine, J.-M., Loyer, S. (2006). "A mean global gravity field model from the combination of satellite mission and altimetry/gravimetry surface data - EIGEN-GL04C". *Geophys. Res. Abstr.*, Vol. 8, 03462.
- [10] Barthelmes, F. (2009). "Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models". Scientific Technical Report 09/02, GFZ Publications, Germany.
- [11] Jekeli, C. (2000). "Heights, the geopotential, and vertical datums". Tech. Rep. 459, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- [12] Hofmann-Wellenhof, B. & Moritz, H. (2005). "Physical geodesy". Springer Wien New York, Institut für Navigation und Satellitengeodäsie Technische Universität Graz, Graz, Austria.
- [13] Vaniček, P. & Kleusberg, A. (1987). "The Canadian geoid-Stokesian approach". *Manuscripta Geodaetica*, Vol. 12, No. 2, PP. 86-98.
- [14] Salem, A., Ravat, D., Mushayandebvu, M. F. & Ushijima, K. (2004). "Linearized least-squares method for interpretation of potential-field data from sources of simple geometry". *Geophysics*, Vol. 69, No. 3, PP. 783-788.
- [15] Thompson, D.T. (1982). "EULDPH a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data". *Geophysics*, Vol. 47, PP. 31-37.
- [16] Klingele, E.E., Marson, I. & Kahle, H. G. (1991). "Automatic interpretation of gravity gradiometric data in two dimensions: Vertical gradient". *Geophys. Prospect.*, Vol. 39, PP. 407-434.
- [17] Ravat, D. (1996). "Analysis of the Euler method and its applicability in environmental magnetic investigations". *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 1, PP. 229-238.
- [18] Hsu, S. K. (2002). "Imaging magnetic sources using Euler's equation". *Geophysical Prospecting*, Vol. 50, PP. 15-25.
- [19] Hansen, D. T. & Suci, L. (2002). "Multiple-source Euler deconvolution". *Geophysics*, Vol. 67, PP. 525-535.
- [20] Keating, P. & Pilkington, M. (2004). "Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation". *Geophysical Prospecting*, Vol. 52, PP. 165-182.
- [21] FitzGerald, D., Reid, A. & McInerney, P. (2004). "New discrimination techniques for Euler deconvolution". *Computers and Geoscience*, Vol. 30, PP. 461-469.
- [22] Bin Doo, W., Hsu, S. K. & Yeg, Y. (2007). "A derivative-based interpretation approach to estimating source parameters of simple 2D magnetic sources from Euler deconvolution, the analytic-signal method and analytical expressions of the anomalies". *Geophysical Prospecting*, Vol. 55, PP. 255-264.
- [23] Cooper, G. (2008). "Euler deconvolution with improved accuracy and multiple different structural indices". *Journal of China University of Geosciences*, Vol. 19, No. 1, PP. 72-76.
- [24] Mushayandebvu, M.F., Lesurz, V., Reid, A.B. & Fairhead, J.D. (2004). "Grid Euler deconvolution with constraints for 2D structures". *Geophysics*, Vol. 69, PP. 489-496.
- [25] Barbosa, V. C. F., Silva, J. B. C., & Medeiros, W. E. (2000). "Making Euler deconvolution applicable to ground magnetic surveys". *J.Appl. Geophys.*, Vol. 43, PP. 55-68.
- [26] Stavrev, P. Y. (1997). "Euler deconvolution using differential similarity transformations of gravity or magnetic anomalies". *Geophys. Prospect.*, Vol. 45, PP. 207-246.
- [27] Blakely, R. J. (1995). "Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications". Cambridge University Press.
- [28] Bowin, C.O. (1983). "Depth of principal mass anomalies contributing to the Earth's geoidal undulations and gravity anomalies". *Marine Geodesy*, Vol. 7, No. 1, PP. 61-100.

- [۲۹] افسری، ن.، تقی زاده فرهمند، ف.، قیطانچی، م. ر. و سلیمانی، ا. (۱۳۹۱). "تغییرات عمق موهو در زیر زاگرس مرکزی (منطقه شیراز) با استفاده از امواج تبدیل یافته PS". مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۸، شماره ۳.
- [۳۰] سدیدخوی، ا.، علیخانی، ز. و صدودی، ف. (۱۳۹۱). "تغییرات عمق موهو و نسبت V_p/V_s در گستره ی اصفهان با استفاده از تحلیل تابع انتقال گیرنده، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۸، شماره ۳.
- [۳۱] قاسمی، م. و جوان دولویی، غ. (۱۳۸۸). "تعیین سرعت انتشار امواج لرزه ای پوسته و جبه بالای ناحیه مشترک ایران، عراق و کویت". فصلنامه زمین، جلد ۴، شماره ۲.
- [32] Al-Amri, A. M. & Gharib, A. (2000). "Lithospheric seismic structure of the eastern region of the Arabian Peninsula". *Journal of Geodynamics*, Vol. 29, No. 125- 139.
- [33] Nasrabadi, A., Tatar, M., Priestley, K. & Sepahvand, M.R. (2008). "Continental lithosphere structure beneath the Iranian Plateau, from analysis of receiver functions and surfaces waves dispersion". *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008 October 12–17, Beijing, China.
- [34] Sodoudi, F., Yuan, X., Kind, R., Heit, B. & Sadidkhouy, A. (2009). "Evidence for a missing crustal root and a thin lithosphere beneath the Central Alborz by receiver function studies". *Geophys. J. Int.*, Vol. 177, PP. 733–742.
- [35] Tedla, G. E., van der Meijde, M., Nyblade, A. A. & van der Meer, F. D. (2011). "A crustal thickness map of Africa derived from a global gravity field model using Euler deconvolution". *Geophys. J. Int.*, Vol. 187, PP. 1–9.
- [36] Bassin, C., Laske, G. & Masters, G. (2000). "The current limits of resolution for surfacewave tomography in North America". *EOS, Trans. Am. geophys. Un.*, Vol.81, F897.