

مدل سازی داده های میکروگرانی به روش رگرسیون خطی برای مدل استوانه شیب دار مورد بررسی: شفت واقع در سد سیاه بیشه

مرتضی عرفانیان نوروززاده^{۱*} و وحید ابراهیم زاده اردستانی^۲

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۳/۱۱/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۵/۳/۲۵)

چکیده

در این تحقیق از راه رابطه های محاسباتی جدید، پارامترهای هندسی چشمه بی هنجاری، براساس مدل استوانه شیب دار، محاسبه می شود. روش های گذشته عمدتاً روی حالت های افقی و عمودی استوانه بررسی می شد و علاوه بر این زاویه امتداد آن نیز در نظر گرفته نمی شد. روش مورد استفاده در این تحقیق با حل محدودیت های موجود در روش های پیشین، اجازه چرخش آزادانه استوانه در فضای زیرسطحی را فراهم می کند. در نهایت با این روش می توان تغییرات بیشتری از جمله زاویه شیب، امتداد، شعاع، عمق تا بالای چشمه و تباین چگالی استوانه را بررسی کرد. رابطه های جدید وارون سازی در این مقاله، رابطه های هایی هستند که در گذشته سو و همکاران بررسی کرده اند. در این مقاله نیز با ۳۸ مدل گوناگون و استفاده از الگوریتم وارون سازی مورد استفاده سو و همکاران، رابطه های جدید روی مدل های دیگر بررسی شده است. در اینجا نیز همانند تحقیق قبلی، برای وارون سازی از الگوریتم رگرسیون گیری خطی چندگانه و روش حداقل مربعات استفاده می شود. در این الگوریتم بین پارامترهای چشمه در نقش متغیر مستقل و یک سری نشانگرها در حکم متغیر وابسته، ارتباط خطی برقرار می شود. نشانگرها رابطه هایی هستند که از مختصات بخش های خاصی از بی هنجاری باقی مانده استخراج می شوند. این بخش ها قسمت هایی از خم بی هنجاری هستند که با تغییر پارامترها، تغییرات قابل ملاحظه ای دارند. در این مقاله از یک شفت در منطقه سیاه بیشه برای بررسی صحرائی استفاده شده است. زون ریزشی در این شفت با داده های میکروگرانی آشکارسازی، و به روش معرفی شده در این مقاله با استفاده از مدل استوانه شیب دار مدل سازی شده است.

واژه های کلیدی: رگرسیون خطی چندگانه، بی هنجاری گرانی، مدل استوانه، شفت معدنی.

۱. مقدمه

براساس مدل استوانه شیب دار استفاده می شود که در گذشته سو و همکاران (۲۰۱۲) معرفی کردند. بر مبنای این رابطه های، استوانه می تواند تحت اثر پارامترهای پیش گفته باشد و همچنین آزادانه در زیر سطح بچرخد (سو و همکاران، ۲۰۱۲). فرض می شود که بی هنجاری بوگه باقی مانده به طور خالص تحت اثر ساختار استوانه ای شکل تولید شده باشد. شدت و شکل نمودار بی هنجاری وابسته به پارامترهایی نظیر زاویه شیب، امتداد، اندازه، عمق فوقانی بی هنجاری و مشخصات فیزیکی چشمه است. رابطه هایی که در گذشته برای مدل استوانه استفاده می شد فقط محدود به حالت افقی و قائم بود ولی سو و همکاران (۲۰۱۲) رابطه های گذشته را اصلاح کردند و آن را به گونه ای توسعه دادند که استوانه بتواند در فضای زیرسطحی آزادانه امتداد و شیب

مدل های فیزیکی مانند صفحه، منشور یا کره، مدل های ساده ای هستند که بیشتر برای تفسیرهای سریع به کار می روند. روش های گذشته عمدتاً روی نیم رخ قطع کننده بی هنجاری بررسی می شدند و فرض می شد که جسم زیر صفحه نیم رخ باشد. مدل استوانه می تواند نماینده ساختارهای نزدیک به آن مانند ستون نمک در گنبد های نمکی و یا ساختار لوله ای شکل در کیمبرلیت ها و یا شیه آن در ماسیوسولفایدها و یا تونل ها، قنات ها و یا شفت های معدنی مدفون باشد (تلفورد و همکاران، ۱۹۸۱). پارامترهای گوناگون قابل بررسی با روش این مقاله برای استوانه شیب دار، عمدتاً شیب، امتداد، شعاع، طول، عمق فوقانی و تباین چگالی با اطراف است. در این مقاله از رابطه های ریاضی جدیدی برای محاسبه بی هنجاری باقی مانده گرانی

را به صورت یک میله باریک نیز در نظر گرفت. در مدل فرضی طول استوانه خیلی بزرگتر از شعاع است، باوجوداین اندازه شعاع نیز دارای اهمیت است زیرا دامنه بی‌هنجاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر استوانه در عمق زیاد ($H > 2a$) باشد، تفاوت بین میله و استوانه ناچیز خواهد بود.

خط D-E تصویر استوانه روی سطح، و نقطه F تصویر قائم از عنصر dl روی استوانه روی زمین است. محور Y به سمت شمال و محور X به سمت شرق و نقطه O مبدأ است. نقطه P ایستگاهی است که میدان گرانی روی آن در سطح زمین مشاهده می‌شود و همچنین Q تصویر نقطه P روی خط D-E است. به منظور برآورد میدان گرانی در نقطه P از رابطه (۱) استفاده می‌شود (سو و همکاران، ۲۰۱۲):

در رابطه (۱)، G ثابت جهانی گرانش ($G = 6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 / \text{g.s}^2$) و $\Delta\rho$ تباین چگالی استوانه با محیط اطراف است. S نیز سطح مقطعی برشی از استوانه است و در این حالت جزء قائم میدان گرانی در نقطه P به صورت شکل ۱ تعریف می‌شود. در رابطه پیش گفته θ به منزله زاویه امتداد، β زاویه شیب، L و H و α طول و عمق و شعاع چشمه هستند. انتگرال معادله فوق به روش عددی با استفاده از نرم افزار مَتَلَب قابل حل است.

براساس رابطه (۱)، شتاب گرانی برای ۳۶ مدل با پارامترهای متفاوت ایجاد می‌شود که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. این انتگرال را نگارنده در محیط مَتَلَب برنامه نویسی کرده است. و این برنامه پارامترهای متفاوت را دریافت می‌کند و بی‌هنجاری باقی مانده را محاسبه می‌کند. خطی سازی نشانگرها و پارامترهای این مدل‌ها هدف اصلی است. پارامترهای هر کدام از مدل‌های جدول ۱ با استفاده از مدل سازی وارون برآورد می‌شود.

داشته باشد (سو و همکاران، ۲۰۱۲). برای مدل سازی ساختارهای زمین شناسی از داده های ژئوفیزیکی، نیاز به حل مسئله های وارون است. مدل سازی وارون در ابتدا روی مدل های مستقیم و فرضی بررسی می شود و در صورت داشتن توانایی لازم برای بازسازی مدل، می توان آن را در مورد داده های صحرایی به کار برد. روش های غیرخطی عمدتاً از راه حل عددی و تکرار روش های بهینه سازی قابل حل هستند (ونگ، ۲۰۰۷). روش های دیگر مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تبرید شبیه سازی شده، مدل سازی وارون مارکوارت و روش وارون مونت کارلو نیز از دیگر روش های مورد استفاده بوده اند (بلکلی، ۱۹۹۶، اسمیس و همکاران، ۱۹۹۲، یاو و همکاران، ۲۰۰۳، شی و ونگ، ۲۰۰۷، ونگ، ۲۰۰۷). به تازگی از الگوریتم شبکه عصبی نیز در حل مسئله های مدل سازی وارون استفاده می شود (سن و استوفا، ۱۹۹۵، شی و همکاران، ۲۰۰۴). در مورد مسئله های چندمتغیره مانند تحقیق حاضر، رگرسیون خطی را می توان به مثابه روشی مناسب مورد استفاده قرار داد (سو و همکاران، ۲۰۱۲). این روش به صورت یک ابزار عددی برای حل مسئله های زمین شناسی نفت، پیشگویی سرعت امواج برشی، ارزیابی کیفیت تله های نفتی در غرب چین و همچنین جست و جو و طبقه بندی بی‌هنجاری زمان-دامنه الکترومغناطیس هوابرد کاربرد دارد (شی و همکاران، ۲۰۰۴؛ کلپرو و همکاران، ۲۰۰۸؛ اسکندری و همکاران، ۲۰۰۴؛ وندت و همکاران، ۱۹۸۶؛ سو و همکاران، ۲۰۱۲).

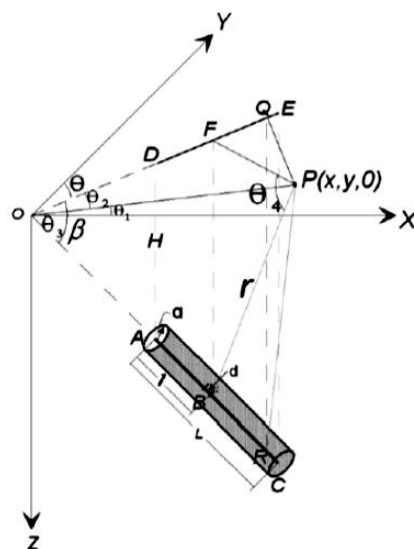
۲. مدل استوانه شیب دار

هندسه مدل استوانه شیب دار در زیر صفحه XOY نمایش داده شده (شکل ۱) و دارای زاویه شیب β ، $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ و زاویه امتداد θ ، $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ نسبت به شمال است. شعاع و L طول استوانه است و فرض می‌شود که شعاع استوانه نسبت به طول آن خیلی کوچک تر باشد تا بتوان آن

$$\int_0^L \frac{\left(\frac{H}{\sin \beta} + l\right) \cdot \sin \beta}{\left[\left(\frac{H}{\sin \beta} + l\right)^2 + x^2 + y^2 - 2\left(\frac{H}{\sin \beta} + l\right) \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \beta\right]^{3/2}} \cdot dl \Delta g = G \cdot \Delta \rho \cdot \pi \cdot \alpha^2 \quad (1)$$

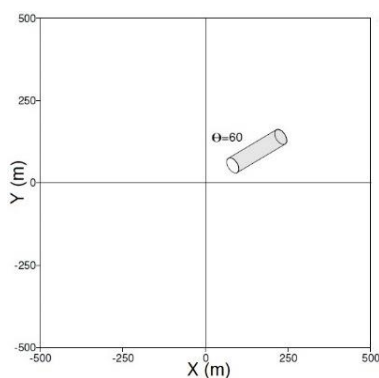
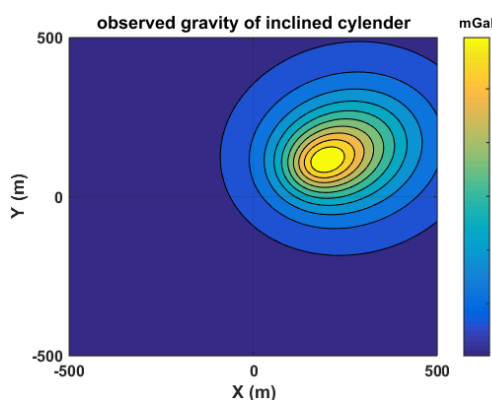
$$\int_0^L \frac{\left(\frac{H}{\sin \beta} + l\right) \cdot \sin \beta}{\left[\left(\frac{H}{\sin \beta} + l\right)^2 + x^2 + y^2 - 2\left(\frac{H}{\sin \beta} + l\right) \cdot \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin(\theta + \tan^{-1} \frac{y}{x}) \cdot \cos \beta\right]^{3/2}} \cdot dl \Delta g = G \cdot \Delta \rho \cdot \pi \cdot \alpha^2$$

نمودار و دامنه بی‌هنجاری تغییراتی ایجاد می‌کنند. تغییرات اثر امتداد روی نقشه کنتوری بی‌هنجاری باقی‌مانده برای امتدادهای ۶۰ و ۱۸۰ و ۳۳۰ درجه و همچنین اثر امتداد در شیب ۹۰ درجه در تصاویر ۲ و ۳ و ۴ و ۵ در سمت چپ نشان داده شده است. این مدل‌ها براساس پارامترهای موجود در جدول ۲ استخراج شده‌اند. تغییر امتداد در چشمه بی‌هنجاری باعث تغییر در آرایش و شکل‌گیری نقشه کنتوری می‌شود. هنگامی که چشمه به صورت قائم است، یک بی‌هنجاری متقارن از آن به وجود می‌آید و دیگر زاویه امتداد تاثیری در بی‌هنجاری ندارد. هنگامی که زاویه چشمه کمتر از ۹۰ درجه باشد آن‌گاه تاثیر زاویه امتداد روی خطوط کنتوری محسوس است. لازم به ذکر است که برای چشمه‌هایی که نسبت به شمال متقارن هستند بی‌هنجاری‌های متقارن حاصل می‌شود.

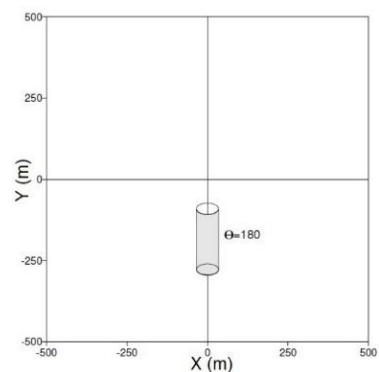
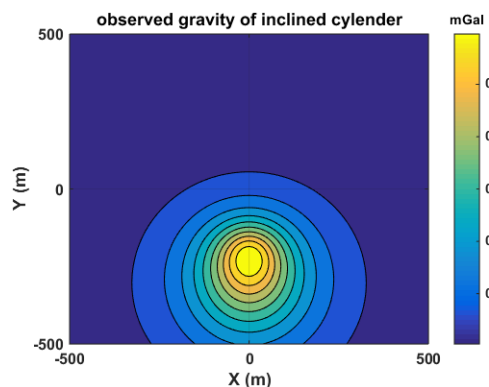


شکل ۱. هندسه مدل استوانه فرضی (سو و همکاران، ۲۰۱۲)

۳. تأثیر تغییر پارامترهای چشمه روی بی‌هنجاری
تغییر امتداد استوانه باعث تغییر در شکل بی‌هنجاری شده و امتدادهای مختلف نسبت به شمال در جهت گیری



شکل ۲. مدل‌های استوانه شیب‌دار در امتداد ۶۰ درجه



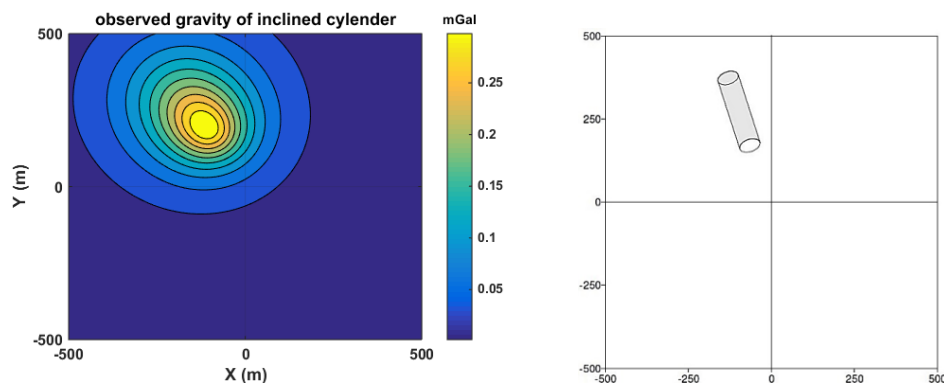
شکل ۳. مدل‌های استوانه شیب‌دار در امتداد ۱۸۰ درجه

جدول ۱. مدل‌های پیشرو

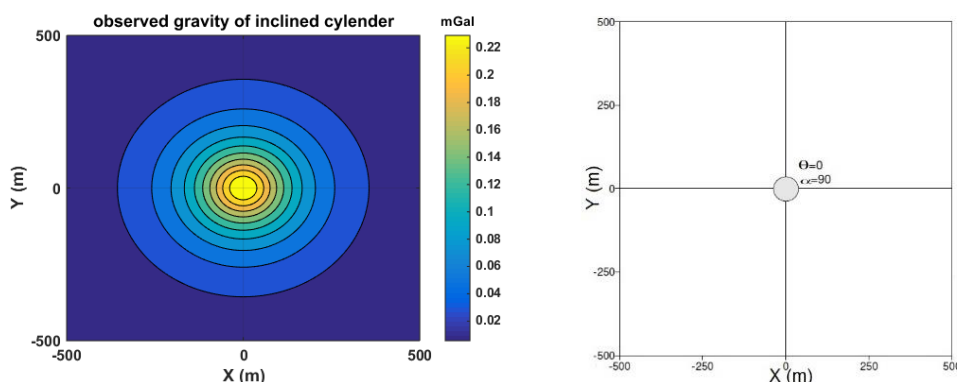
شماره	عمق (متر)	طول (متر)	شیب (درجه)	امتداد (درجه)	عمق (متر)	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	پیشینه مقدار بی‌متجاری باقی‌مانده (میلی گال)
۱	۲۰۰	۳۰۰	۳۰	۹۰	۴۰	۰/۸۵	۰/۱۱۰
۲	۱۰۰	۲۰۰	۷۵	۲۷۰	۲۰	۰/۶۶	۰/۰۳۷
۳	۱۰۰	۵۰۰	۱۵	۳۰۰	۵۰	۰/۲	۰/۱۳۳
۴	۲۰	۲۰۰	۴۵	۶۰	۲۰	۰/۲۲	۰/۰۸۹
۵	۳۰۰	۵۰۰	۴۵	۹۰	۴۰	۰/۸۵	۰/۰۶۸
۶	۵۰	۳۰۰	۴۵	۳۳۰	۲۰	۰/۸۴	۰/۱۳۶
۷	۱۵۰	۴۰۰	۶۰	۲۷۰	۳۰	۰/۷	۰/۰۶۸
۸	۱۰۰	۳۰۰	۶۰	۳۳۰	۳۰	۰/۴	۰/۰۶۰
۹	۱۰۰	۴۰۰	۴۵	۲۴۰	۳۰	۰/۳	۰/۰۵۱
۱۰	۱۵۰	۴۰۰	۶۰	۲۱۰	۴۰	۰/۳۸	۰/۰۶۵
۱۱	۱۰۰	۵۰۰	۷۵	۱۲۰	۵۰	۰/۶	۰/۲۶۵
۱۲	۲۰۰	۳۰۰	۷۵	۲۱۰	۴۰	۰/۳	۰/۰۳۰
۱۳	۲۰۰	۴۰۰	۷۵	۶۰	۴۰	۰/۶	۰/۰۶۸
۱۴	۵۰	۲۰۰	۳۰	۱۲۰	۲۰	۰/۳۹	۰/۰۶۷
۱۵	۱۰۰	۴۰۰	۳۰	۶۰	۴۰	۰/۲	۰/۰۶۹
۱۶	۱۰۰	۲۰۰	۴۵	۲۴۰	۳۰	۰/۴	۰/۰۵۷
۱۷	۱۰۰	۴۰۰	۳۰	۶۰	۴۰	۱	۰/۳۴۶
۱۸	۲۰	۱۰۰	۶۰	۶۰	۱۰	۰/۶۶	۰/۰۵۹
۱۹	۱۰۰	۳۰۰	۳۰	۲۷۰	۲۰	۰/۶۶	۰/۰۵۴
۲۰	۵۰	۲۰۰	۳۰	۱۲۰	۲۰	۰/۴۸	۰/۰۸۳
۲۱	۵۰	۳۰۰	۶۰	۲۷۰	۴۰	۰/۲۵	۰/۱۵۱
۲۲	۵۰	۵۰۰	۶۰	۲۴۰	۵۰	۰/۵	۰/۴۹۸
۲۳	۵۰	۴۰۰	۴۵	۶۰	۳۰	۰/۲	۰/۰۷۵
۲۴	۱۰۰	۳۰۰	۴۵	۱۵۰	۵۰	۰/۸۵	۰/۳۸۴
۲۵	۱۵۰	۵۰۰	۷۵	۲۷۰	۵۰	۰/۶	۰/۱۶۳
۲۶	۱۰۰	۵۰۰	۶۰	۹۰	۵۰	۰/۳	۰/۱۳۸
۲۷	۵۰	۳۰۰	۶۰	۱۲۰	۴۰	۰/۷	۰/۴۲۳
۲۸	۱۰۰	۴۰۰	۶۰۲	۹۰	۴۰	۰/۲۵	۰/۰۷۱
۲۹	۵۰	۳۰۰	۴۵	۳۳۰	۲۰	۱	۰/۱۶۲
۳۰	۱۰۰	۲۰۰	۴۵	۲۷۰	۳۰	۰/۹	۰/۱۳۰
۳۱	۲۰۰	۴۰۰	۷۵	۶۰	۴۰	۰/۵	۰/۰۵۶
۳۲	۵۰	۲۰۰	۳۰	۲۷۰	۲۰	۰/۳	۰/۰۵۱
۳۳	۱۰۰	۵۰۰	۷۵	۱۲۰	۵۰	۰/۳	۰/۱۳۴
۳۴	۵۰	۳۰۰	۳۰	۱۲۰	۲۰	۰/۳۴	۰/۰۶۲
۳۵	۲۰۰	۵۰۰	۷۵	۱۲۰	۴۰	۰/۴۲	۰/۰۵۱
۳۶	۲۰	۱۰۰	۴۵	۱۲۰	۱۰	۰/۳۴	۰/۰۳۲
۳۷	۱۵۰	۴۰۰	۶۰	۲۱۰	۴۰	۰/۵	۰/۰۸۶
۳۸	۵۰	۵۰۰	۶۰	۳۰	۵۰	۰/۵۵	۰/۵۴۸

جدول ۲. پارامترهای مدل‌های استفاده شده در بررسی تغییرات شیب چشمه

چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	شعاع (متر)	امتداد (درجه)	شیب (درجه)	طول (متر)	عمق (متر)	شکل مدل
۱	۴۰	۶۰	۳۰	۳۰۰	۱۰۰	مدل شکل (۲)
۱	۴۰	۱۸۰	۳۰	۳۰۰	۱۰۰	مدل شکل (۳)
۱	۴۰	۳۳۰	۳۰	۳۰۰	۱۰۰	مدل شکل (۴)
۱	۴۰	۶۰	۹۰	۳۰۰	۱۰۰	مدل شکل (۵)



شکل ۴. مدل‌های استوانه شیب‌دار در امتداد ۳۳۰ درجه



شکل ۵. مدل‌های استوانه شیب‌دار در امتدادهای متفاوت در حالت شیب ۹۰ درجه

پارامترها باعث افزایش پهنا و مقدار بیشینه بی‌هنجاری می‌شود.

۴. مدل‌سازی وارون

الگوریتم وارون‌سازی مورد استفاده در این مقاله روش رگرسیون‌گیری خطی چندگانه است. این الگوریتم زمانی به کار می‌رود که نیاز باشد تا بین یک متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل ارتباط خطی برقرار شود. در وارون‌سازی فرض می‌شود که بین پارامترهای چشمه و نشانگرها ارتباط خطی وجود دارد. نشانگرها باید به گونه‌ای باشند که ارتباط خطی بهترین برآورد را از مقدارهای پارامترها داشته باشد. از این جهت با توجه به تحقیقات قبلی از ۷ نشانگر که بهترین رابطه خطی را در رگرسیون داشتند، استفاده شد. ارتباط بین پارامترهای چشمه و نشانگرها به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$y_i = a_0x_{0i} + a_1x_{1i} + \dots + a_{m-1}x_{m-1,i} + a_m + \epsilon_i \quad (2)$$

در گذشته سو و همکاران اثر تغییرات هریک از پارامترهای مدل استوانه شیب‌دار را روی خم بی‌هنجاری باقی‌مانده بررسی کردند. در بررسی‌های آنها مشاهده شد که افزایش طول چشمه سبب افزایش پهنا بی‌هنجاری می‌شود ولی در مورد چشمه قائم، تاثیر تغییرات طول کمتر محسوس است. با افزایش زاویه شیب چشمه، از پهنا و بیشینه بی‌هنجاری باقی‌مانده کاسته می‌شود و وقتی که شیب چشمه ۹۰ درجه است بی‌هنجاری کمترین پهنا و بیشینه را دارد. این قضیه بیشتر شبیه اثر تونل‌های قائم معدنی است که در آن تباین چگالی بین هوا و سنگ میزبان زیاد است و تولید یک بی‌هنجاری شدیدی تولید می‌کند. سو و همکاران در تحقیقاتشان روشن ساختند که امتدادهایی که نسبت به شمال متقارن هستند، بی‌هنجاری‌های متقارن با مقدار بیشینه یکسان تولید می‌کنند. تغییرات شعاع و تباین چگالی چشمه، بیشترین تاثیرات را روی خم بی‌هنجاری باقی‌مانده دارد. کاهش شعاع و چگالی، پهنا بی‌هنجاری و همچنین مقدار بیشینه آن را به شدت کاهش می‌دهد و همچنین افزایش این

باقی مانده استخراج می شود و بیشتر اثرات تغییراتی از پارامترها را منعکس می کند که باعث تغییرات نقطه بیشینه می شوند. در جدول ۳، رابطه های مربوط به ۷ نشانگر استفاده شده در این مقاله، توضیح داده شده است.

تأثیر تغییر پارامترهای چشمه روی بی هنجاری باقی مانده بررسی شد، لذا می دانیم که تغییرات هر پارامتر کدام بخش از بی هنجاری را تحت تأثیر قرار می دهد. برای مثال تغییرات امتداد بیشتر باعث جابه جایی نقطه بیشینه بی هنجاری باقی مانده می شود و مقدار آن را در امتدادهای متقارن تغییر نمی دهد. براساس بررسی های پیشین، بی هنجاری مطابق شکل ۶، به ۴ بخش تقسیم می شود که به اندازه نصف بیشینه و یک چهارم آن است. مطابق شکل y_1 و y_2 نصف دامنه اکسترم بی هنجاری هستند و همچنین x_1 و x_2 به ترتیب مختصات محور افقی آنها می باشند. y_3 و y_4 یک چهارم مقدار بیشینه بی هنجاری اند که در دو طرف آن قرار دارند و همچنین x_3 و x_4 مختصات افقی آنها است. نشانگرهای حاصل از بی هنجاری گرانی به شرح زیر است:

با استفاده از الگوریتم رگرسیون گیری خطی چندگانه و تعیین ضریب های خطی سازی، رابطه های وارون سازی برای پارامترها به صورت زیر به دست می آید. این روش جزئیات بیشتری نیز در انتخاب نشانگرها دارد که سو و همکارانش در عرضه مراحل الگوریتم، جزئیات آن را توضیح داده اند. این رابطه ها را در گذشته سو و همکارانش به دست آورده بودند که در این مقاله برای وارون سازی از آنها استفاده می شود.

با استفاده از الگوریتم رگرسیون گیری خطی چندگانه و تعیین ضریب های خطی سازی، رابطه های وارون سازی برای پارامترها به صورت زیر به دست می آید. این روش جزئیات بیشتری نیز در انتخاب نشانگرها دارد که سو و همکارانش در عرضه مراحل الگوریتم، جزئیات آن را توضیح داده اند. این رابطه ها را در گذشته سو و همکارانش به دست آورده بودند که در این مقاله برای وارون سازی از آنها استفاده می شود.

در این رابطه خطی، y_i متغیر وابسته است که می تواند پارامترهای مدل باشد. x_i متغیر مستقل و در اینجا همان نشانگرها است. این معادله برای هر کدام از پارامترهای مدل استوانه و همچنین برای همه ۳۶ مدل، در میدان گرانی نوشته می شود. اگر برای همه این ۳۶ مدل، اختلاف بین مقدارهای به دست آمده از رابطه های خطی و همچنین مقدارهای واقعی چشمه کمینه شود، آن گاه بهترین ضریب های خطی سازی به دست می آید و در نتیجه بهترین رابطه خطی برقرار می شود. این قضیه با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات صورت می شود و در نتیجه اختلاف بین مقدارهای محاسبه ای و مقدارهای واقعی از فرمول (۳) محاسبه می شود (سو و همکاران، ۲۰۱۲).

$$q = \sum_{i=1}^{n-1} [y_i - (a_0 x_{0i} + a_1 x_{1i} + \dots + a_{m-1} x_{m-1,i} + a_m)]^2 \quad (3)$$

برای کمینه ساختن مقدار q کافی است که نسبت به ضریب های مشتق گرفته شود و با قرار دادن مشتق برابر صفر رابطه های (۴) و (۵) حاصل می شود.

$$(CC^T) \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{m-1} \\ a_m \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{n-2} \\ y_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = \begin{bmatrix} x_{00} & x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0,n-1} \\ x_{10} & x_{01} & x_{12} & \dots & x_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m-1,0} & x_{m-1,1} & x_{m-1,2} & \dots & x_{m-1,n-1} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

عنصرهای ماتریس C ضریب های خطی سازی در رابطه های وارون سازی پارامترها هستند. این ضریب های بین پارامترهای چشمه و نشانگرهای خم هر بی هنجاری رابطه خطی برقرار می کنند. نشانگرها رابطه هایی هستند که از بخش هایی خاص از بی هنجاری باقی مانده استخراج می شوند. این بخش ها در بررسی تغییرات پارامترهای مدل، واکنش مناسب را در تغییرات بی هنجاری باقی مانده دارند. این بخش ها شامل نقطه بیشینه خم، نقطه های نصف بیشینه و همچنین نقطه هایی با مقدار ربع بیشینه هستند. برای مثال نشانگر α_1 از روی بیشینه خم بی هنجاری

عمق:

$$H = -55/90 \times \alpha_1 + 2212/613 \times \alpha_2 + 1655/03 \times \alpha_3 - 3250/931 \times \alpha_4 - 464/091 \times \alpha_5 + 9485623 \times \alpha_6 - 857/754 \times \alpha_7 + 671/341 \quad (6)$$

طول:

$$L = -6506/249 \times \alpha_2 - 5882/137 \times \alpha_3 + 8508/451 \times \alpha_4 + 2523/032 \times \alpha_5 + 2042/171 \times \alpha_6 - 4575/77 \quad (7)$$

شیب:

$$\beta = 1043/717 \times \alpha_2 + 349/739 \times \alpha_3 - 1996/947 \times \alpha_4 - 20/278 \times \alpha_5 + 262/357 \times \alpha_6 - 214/796 \times \alpha_7 + 541/463 \quad (8)$$

امتداد:

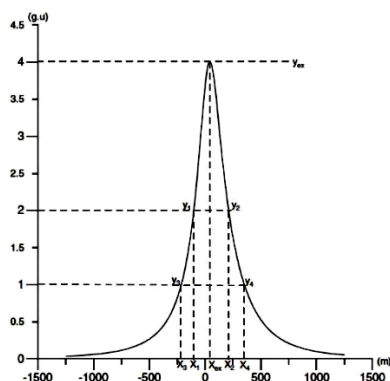
$$\theta = -53/375 \times \alpha_2 + 1462/129 \times \alpha_3 - 1078/221 \times \alpha_4 + 955/425 \times \alpha_5 - 1369/722 \times \alpha_6 + 788/557 \quad (9)$$

شعاع:

$$R = -290/952 \times \alpha_2 - 248/327 \times \alpha_3 + 213/820 \times \alpha_4 + 206/642 \times \alpha_5 + 167/516 \times \alpha_6 - 221/872 \quad (10)$$

تباین چگالی:

$$\rho = 2/889 \times \alpha_1 - 122/136 \times \alpha_2 + 112/643 \times \alpha_3 - 117/334 \times \alpha_4 - 35/044 \times \alpha_5 - 25/984 \times \alpha_6 + 77/181 \quad (11)$$



شکل ۶. بی هنجاری گرانی و بخش های گوناگون آن (سو و همکاران، ۲۰۱۲)

جدول ۳. نشانگرهای انتخابی از بی هنجاری گرانی (سو و همکاران، ۲۰۱۲)

علامت	نشانگرهای انتخاب شده
α_1	$\log(y_{ex})$
α_2	$\log(x_{ex} - x_1)$
α_3	$\log(x_{ex} - x_2)$
α_4	$\log(x_2 - x_1)$
α_5	$\log(x_{ex} - x_3)$
α_6	$\log(x_{ex} - x_4)$
α_7	$\frac{y_{ex} - y_2}{x_{ex} - x_2}$

صحت محاسبات را بر مبنای مقدار واقعی منبع بیان می کند. به طور کلی برای همه مدل ها، وارون سازی پارامترها صورت گرفت و در ادامه این الگوریتم روی داده های همراه با ۵ و ۱۰ درصد نوفه اعمال شد. عمدتاً فاکتور Cr برای اکثریت پارامترها مناسب است و نتایج آن در جداول ۵ و ۶ آمده است.

رابطه های وارون سازی روی خم بی هنجاری باقی مانده مدل های جدول ۱ به کار گرفته شد و در نهایت نتایج با مقدارهای اولیه مقایسه شد. جدول شماره ۴ نتایج وارون سازی ۴ مدل اول در حالت بدون نوفه را نشان می دهد.

در جدول ۴ Cr به صورت مقابل تعریف می شود که

جدول ۴. نتایج وارون سازی پارامترهای چهار مدل مصنوعی اول بدون نوفه

عمق	محاسبه عمق	Cr	طول	محاسبه طول	Cr	شیب	محاسبه شیب	Cr	امتداد	محاسبه امتداد	Cr	شعاع	محاسبه شعاع	Cr	چگالی	محاسبه چگالی	Cr
۲۰۰	۱۸۹/۱	۹۴/۵	۳۰۰	۳۱۵/۴	۹۴/۸	۳۰	۲۸/۴	۹۴/۶	۹۰	۸۲/۶	۹۱/۷	۴۰	۳۵/۷	۸۹/۲	۰/۸۵	۰/۷۹	۹۲/۹
۱۰۰	۹۲/۶	۹۲/۶	۲۰۰	۱۸۴/۳	۹۲/۱	۷۵	۷۹/۷	۹۳/۷	۲۷۰	۲۹۰/۴	۹۲/۴	۲۰	۲۲/۱	۸۹/۵	۰/۶۶	۰/۷۲	۹۰/۹
۱۰۰	۱۰۴/۵	۹۵/۵	۵۰۰	۴۶۲/۱	۹۲/۴	۱۵	۱۴/۱	۹۴	۳۰۰	۳۱۸/۷	۹۳/۷	۵۰	۴۶/۳	۹۲/۶	۰/۲	۰/۱۸	۹۰
۲۰	۲۱/۴	۹۳	۲۰۰	۱۸۷/۶	۹۳/۸	۴۵	۴۸/۳	۹۲/۶	۶۰	۶۴/۲	۹۳	۲۰	۱۸/۴	۹۲	۰/۲۲	۰/۲۱	۹۵/۴

جدول ۵. نتایج وارون‌سازی پارامترهای چهار مدل مصنوعی اول همراه با ۵٪ نوفه

Cr	محاسبه چگالی	چگالی	Cr	محاسبه شعاع	شعاع	Cr	محاسبه امتداد	امتداد	Cr	محاسبه شیب	شیب	Cr	محاسبه طول	طول	Cr	محاسبه عمق	عمق
۹۰/۵	۰/۷۷	۰/۸۵	۸۹/۷	۳۵/۹	۴۰	۹۰/۲	۸۱/۲	۹۰	۹۳	۲۷/۹	۳۰	۹۳/۹	۳۱۸/۲	۳۰۰	۹۳/۸	۱۸۷/۶	۲۰۰
۸۹/۳	۰/۷۳	۰/۶۶	۸۸/۵	۲۲/۳	۲۰	۹۲/۱	۲۹۱/۳	۲۷۰	۹۳/۲	۸۰/۱	۷۵	۹۱/۲	۱۸۲/۴	۲۰۰	۹۱/۷	۹۱/۷	۱۰۰
۹۰	۰/۱۸	۰/۲	۹۱/۸	۴۵/۹	۵۰	۹۲/۹	۳۲۱/۳	۳۰۰	۹۲	۱۳/۸	۱۵	۹۱/۹	۴۵۹/۹	۵۰۰	۹۶/۲	۱۰۳/۸	۱۰۰
۹۰/۹	۰/۲	۰/۲۲	۹۰/۵	۱۸/۱	۲۰	۹۲/۵	۶۴/۵	۶۰	۹۱/۷	۴۸/۷	۴۵	۹۰/۶	۱۸۱/۲	۲۰۰	۹۰/۵	۲۱/۹	۲۰

جدول ۶. نتایج وارون‌سازی پارامترهای چهار مدل مصنوعی اول همراه با ۱۰٪ نوفه

Cr	محاسبه چگالی	چگالی	Cr	محاسبه شعاع	شعاع	Cr	محاسبه امتداد	امتداد	Cr	محاسبه شیب	شیب	Cr	محاسبه طول	طول	Cr	محاسبه عمق	عمق
۹۰/۵	۰/۷۷	۰/۸۵	۸۸/۲	۳۵/۳	۴۰	۸۹/۶	۸۰/۷	۹۰	۸۹/۶	۲۶/۹	۳۰	۹۳/۱	۳۲۰/۶	۳۰۰	۹۲/۸	۱۸۵/۷	۲۰۰
۸۷/۸	۰/۷۴	۰/۶۶	۸۴/۵	۲۳/۱	۲۰	۹۰/۶	۲۹۵/۲	۲۷۰	۹۲/۵	۸۰/۶	۷۵	۹۰/۱	۱۸۰/۲	۲۰۰	۹۰/۱	۹۰/۱	۱۰۰
۸۵	۰/۱۷	۰/۲	۹۱/۴	۴۵/۷	۵۰	۹۱/۳	۳۲۵/۹	۳۰۰	۹۰/۶	۱۳/۶	۱۵	۹۲/۳	۴۶۱/۹	۵۰۰	۹۴/۱	۱۰۵/۹	۱۰۰
۹۰/۹	۰/۲	۰/۲۲	۹۰/۵	۱۸/۱	۲۰	۹۱/۱	۶۵/۳	۶۰	۹۱/۳	۴۸/۹	۴۵	۸۹/۶	۱۷۹/۲	۲۰۰	۸۹/۵	۲۲/۱	۲۰

$$\text{Prediction: مقدار پیش‌بینی شده} \quad \text{Theory: مقدار اصلی منبع} \quad \text{و} \quad Cr = (1 - \frac{\text{prediction} - \text{theory}}{\text{theory}}) \times 100$$

۵. داده‌های واقعی

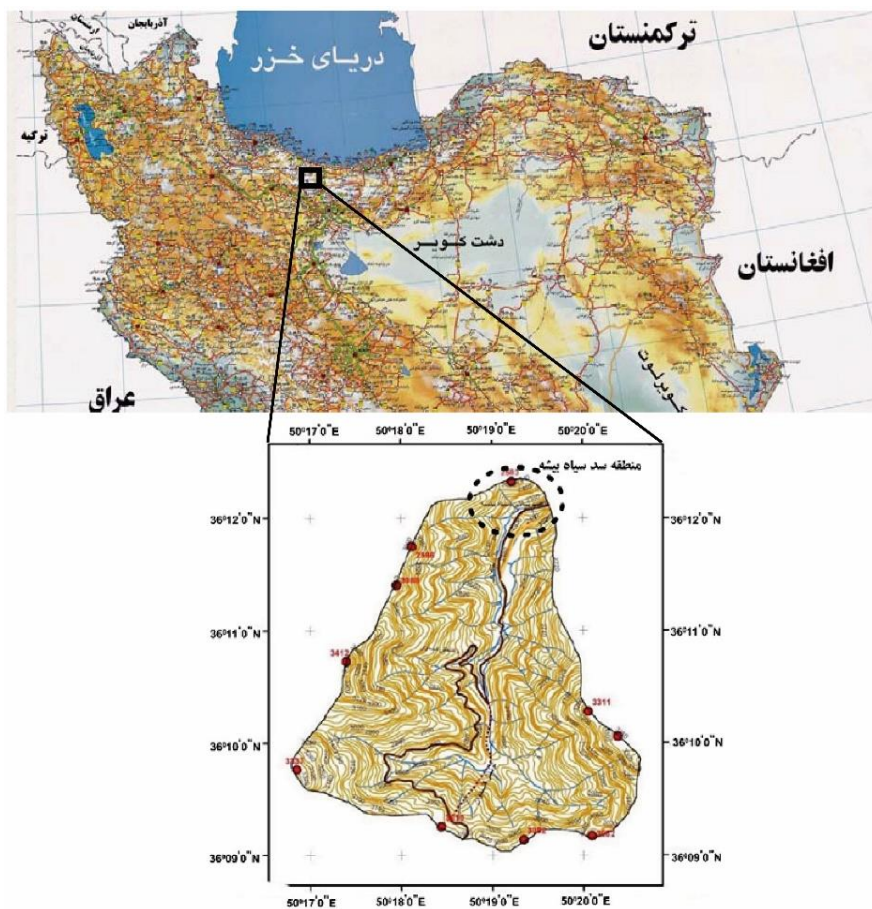
با استفاده از الگوریتم وارون‌سازی پارامترهای شفت معدنی واقع در سد سیاه‌بیشه محاسبه شد. در این منطقه برداشت میکروگرانی‌سنجی صورت گرفته است و پارامترهای نهایی از وارون‌سازی بی‌هنجاری باقی‌مانده محاسبه می‌شود. محدوده موردنظر برای بررسی‌های میکروگرانی‌سنجی قسمت کوچکی از محل در نظر گرفته شده برای ساخت سد تلمبه‌ای سیاه‌بیشه به مختصات نقطه شروع ۳۶/۲۲۸ درجه غربی و ۵۱/۳۰۴ درجه شمالی است. این نقطه‌ها روی یک تونل مورب که به محدوده ریزشی برخورد کرده قرار دارند. محدوده مورد بررسی جزئی از رشته کوه‌های البرز است که عمده تشکیلات زمین‌شناسی آن مربوط به آهک‌های الیکا و تشکیلات ماسه‌سنگی و شیلی شمشک هستند. در سایت موردنظر نیز طبقات آهکی در کنار آذرین‌های نفوذی دیده می‌شود که به شدت تحت تأثیر درز و شکاف‌ها و گسل‌های زمین‌ساختی قرار گرفته‌اند. تصویر ۷ مختصات محدوده سیاه‌بیشه و محدوده سد مورد بررسی را نشان می‌دهد.

تصویر ۸ نقشه میدان گرانی باقی‌مانده منطقه سیاه‌بیشه را نشان می‌دهد. شفت معدنی موردنظر به صورت بی‌هنجاری منفی در نقشه نمایان، و با نقطه چین مشخص شده است. این

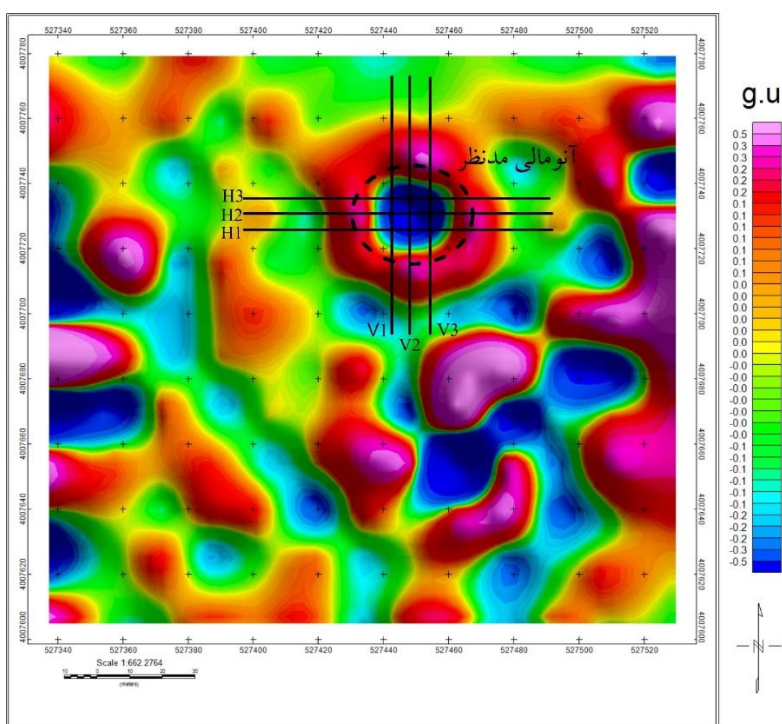
زون ریزشی به علت داشتن تباین چگالی کمتر نسبت با اطراف، بی‌هنجاری شدیدی تولید می‌کند که به سبب نزدیکی به مدل استوانه درحکم داده واقعی با این الگوریتم بررسی شد.

برای وارون‌سازی ۳ نیم‌رخ افقی و ۳ نیم‌رخ عمودی روی بی‌هنجاری انتخاب شد که موقعیت آنها در تصویر شماره ۸ آمده است. در این میان بهترین بی‌هنجاری‌ها برای وارون‌سازی انتخاب شد. همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است، بخش‌های مهم بی‌هنجاری با کمک الگوریتم وارون‌سازی خطی چندگانه بررسی می‌شود و نتایج در جدول ۷ برای سه نیم‌رخ متفاوت به دست می‌آید. از آنجا که مقدارهایی که از وارون‌سازی نیم‌رخ‌ها به دست می‌آید تفاوت کمی دارند، متوسط آنها به منزله نتیجه نهایی در نظر گرفته می‌شود.

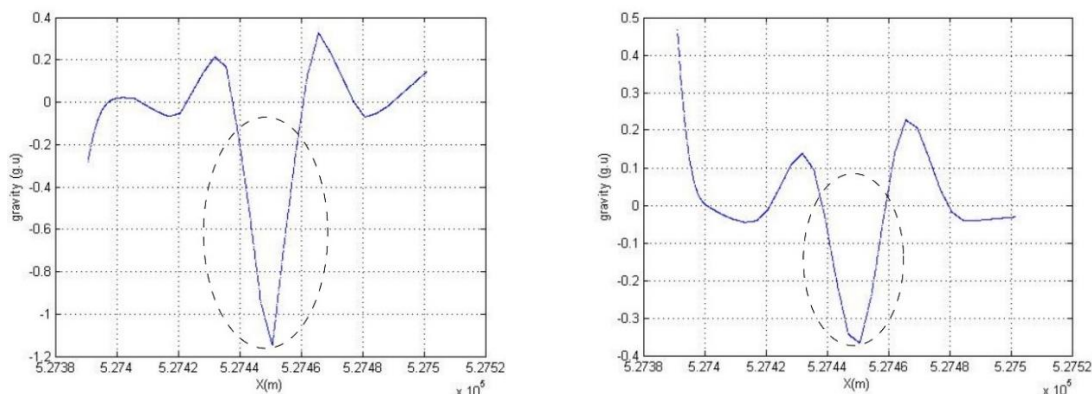
با استفاده از وارون‌سازی براساس مدل استوانه شیب‌دار روی نیم‌رخ‌های بالا، پارامترهای هندسی و زمین‌شناسی شفت معدنی درحکم یک بی‌هنجاری نزدیک به استوانه شیب‌دار به صورت جدول ۷ داده می‌شود.



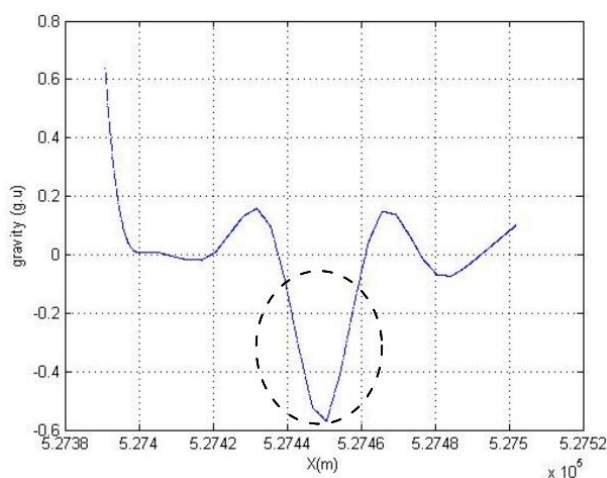
شکل ۷. موقعیت منطقه سد سیاه‌بیشه



شکل ۸. نقشه بی‌هنجاری گرانی باقی‌مانده محدوده برداشت شده



شکل ۹. (الف) نیم‌رخ H_1 و (ب) نیم‌رخ H_2



شکل ۱۰. نیم‌رخ H_3

جدول ۷. نتایج نهایی وارون‌سازی

نیم‌رخ	$H \text{ (m)}$	$L \text{ (m)}$	a° (درجه)	θ° (درجه)	$R \text{ (m)}$	$\rho \left(\frac{gr}{cm^3} \right)$
H_1	۱۱۸/۲	۶۷/۹	۷۳/۲	۳۲۷/۱	۳۸/۵	۱/۹
H_2	۱۲۳/۱	۷۲/۴	۶۶/۵	۳۴۹/۸	۴۳/۳	۲/۱
H_3	۱۲۳/۷	۷۴	۶۹/۵	۳۶۲/۸	۴۴/۱	۲/۲
متوسط	۱۲۱/۶	۷۱/۴	۶۹/۷	۳۴۶/۵	۴۱/۹	۲

۶. نتیجه‌گیری

روشی که در این مقاله از آن استفاده شد از رابطه‌های جدیدی الگو گرفت که می‌تواند پارامترهای مهمی از چشمه بی‌هنجاری را در اختیار ما قرار دهد. این پارامترها در مسئله‌های گوناگونی اهمیت دارد که شکل سه‌بعدی چشمه در آن حائز اهمیت‌اند. بحث تصمیم‌گیری‌های

مربوط به حفاری و یا مسئله‌های مربوط به تعیین ذخیره‌های چشمه زیرزمینی، مواردی‌اند که شکل چشمه در آنها اهمیت دارد. مدل استفاده شده از این الگوریتم در موارد گذشته در مدل‌سازی توده‌های گرانی و گراندیوریتی مورد استفاده بوده است. مورد بررسی شده در این مقاله، از لحاظ شباهت، نزدیک‌تر از موارد قبلی به

کردن ۱۰٪ نوفه تصادفی، نتایج وارون سازی چندان تغییر نکرد. این خود یکی از مزیت های مهم این الگوریتم است. با توجه به اینکه یکی از موارد وارون سازی چگالی چشمه است، می توان از این نتیجه نیز در حکم اطلاعات اولیه در سایر الگوریتم های وارون سازی روی توده های زمین شناسی مشابه استوانه به کار برد. این روش را می توان در میدان مغناطیسی نیز به کار برد و با مدل سازی و ایجاد رابطه های جدید در دو سامانه گرانی و مغناطیس نتایجی با تفسیر دو گانه ایجاد کرد که به واقعیت نزدیک تر نیز است.

یک مدل استوانه است و این امر سبب می شود نتایج وارون سازی بهتر شود. این الگوریتم را می توان روی چشمه های توده ای شکل نزدیک به مدل استوانه به کار برد. گنبد های نمکی، قنات ها و تونل های زیرزمینی و همچنین ذخیره های توده ای شکل معدنی نمونه هایی از این موارد هستند. به طور کلی در بررسی ۳۶ مدل چنین برداشت می شود که این الگوریتم در برآورد شیب چشمه قوی تر از برآورد امتداد عمل می کند. زیرا شیب چشمه را با همبستگی ۰/۹۴ پیش بینی، اما امتداد را با همبستگی ۰/۸۹ پیش بینی می کند. همان طور که مشاهده شد با اضافه

مراجع

- Blakely, J. R., 1996, Potential theory in gravity and agnetic, Cambridge University Press.
- Claproud, M., Chouteau, M. and Cheng, L. Z., 2008, Rapid detection and classification of airborne time-linear regression, Exploration Geophysics, 39, 1-17.
- Eskandari, H., Rezaee, M. R. and Mohammadnia, M., 2004, Application of multiple regression and artificial neural network techniques to predict shear wave velocity from well log data for a carbonate reservoir, south-west Iran, CSEG Recorder, 42-48.
- Sen, M. and Stoffa, P. L., 1995, Global optimization methods in geophysical inversion, in advances in exploration geophysics, In: Berkhout, A. J. (Ed.), Elsevier Science Publishing Co., p. 300.
- Shi, X. M. and Wang, J. Y., 2007, Lecture on non-linear inverse methods in geophysics (3). Simulated annealing method, Chinese Journal of Engineering Geophysics, 4(3), 165-174.
- Shi, G. R., Zhou, X. G., Zhang, G. Z., Shi, X. F. and Li, H. H., 2004, The use of artificial neural network analysis and multiple regression for trap quality evaluation: a case study of the Northern Kuqa depression of Tarim Basin in western China, Marine and Petroleum, 21, 411-420.
- Smith, M., Scales, J. A. and Fischer, T., 1992, Global search and genetic algorithms, The Leading Edge, 11(1), 22-26.
- Su, Y. J., Cheng, L. Z., Chouteau, M., Wang, X. B. and Zhao, G. X., 2012, New improved formulas for calculating gravity anomalies based on a cylinder model, Journal of Applied Geophysics, 36-43.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. and Keys, D. A., 1981, Applied geophysics, Cambridge University Press.
- Wang, J. Y., 2007, Lecture on non-linear inverse methods in geophysics (1). Introduction to geophysical inverse problems, Chinese Journal of Engineering Geophysics, 4(1), 1-3.
- Wendt, W. A., Sakurai, S. and Neson, P. H., 1986, Permeability prediction from well logs using multiple regression, In: L. W., Carroll, H. B. (Eds.), Reservoir characterization, Academic Press, Orlando, Florida, pp. 223-247.
- Yao, C. L., Hao, T. Y., Guan, Z. N. and Zhang, Y. W., 2003, High-speed computation and efficient storage in 3-D gravity and magnetic inversion based on genetic algorithms, Chinese Journal of Geophysics, 46(2), 252-258.