



رساله دکتری

بررسی قابلیت روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی
در تعیین پتانسیل هیدروکربوری تله‌های نفتی

حمید آقاجانی

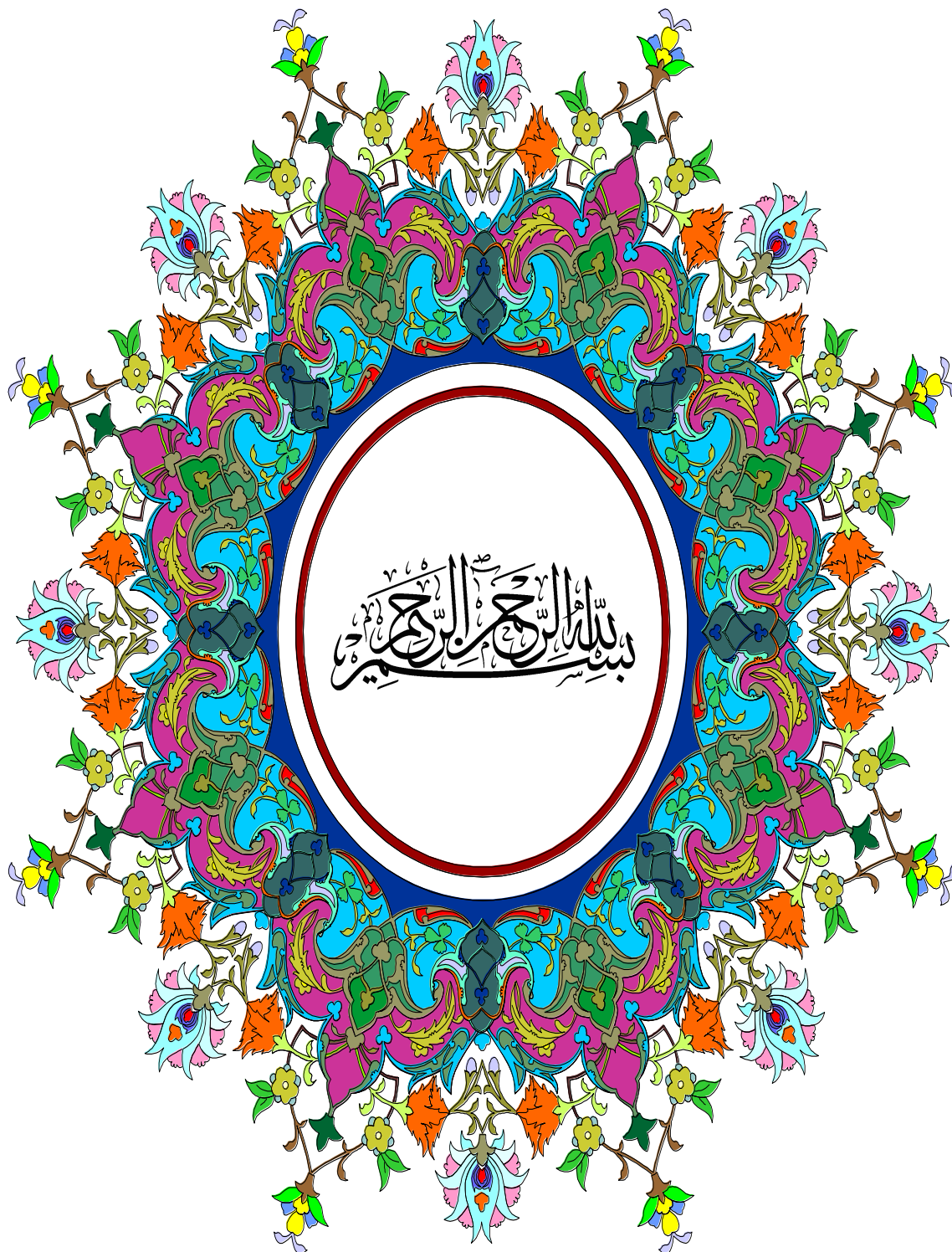
اساتید راهنما:

دکتر علی مرادزاده
پروفسور هوآلین زنگ

استاد مشاور:

دکتر سیدهاشم طباطبایی

بهمن ماه ۱۳۸۸





دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه اکتشاف

بررسی قابلیت روش گرادیان کل شمال داده های کرانی
در تعیین پتانسیل هیدروکربوری تله های نفتی

حمید آقاچانی

استاد راهنما:

دکتر علی مرادزاده پروفیسور هواآمین زنگ

استاد مشاور:

دکتر سید هاشم طباطبائی

رسانه جهت اخذ درجه دکتری



بهمن ماه ۱۳۸۸

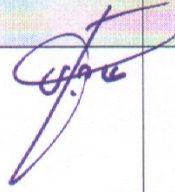
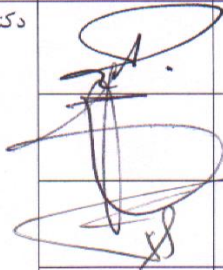
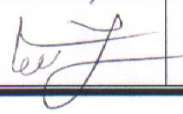
دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده: معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه: اکتشاف

رساله دکتری آقای حمید آقاجانی

تحت عنوان: بررسی قابلیت روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی
در تعیین پتانسیل هیدروکربوری تله‌های نفتی

در تاریخ ۱۳۸۸/۱۱/۱۵ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک دکتری مورد ارزیابی و با
درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	دکتر سیدهاشم طباطبایی		دکتر علی مرادزاده
			پروفسور هوالین زنگ

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر آرزو عابدی		دکتر سیدوحید ابراهیم‌زاده اردستانی
			دکتر عبدالحمید انصاری
			دکتر فرامرز دولتی ارده‌جانی
			دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

تقدیم به:

به روح همیشه جاوید خواهرم که در شروع دوره دکتری، جهان افلاکی را بر کره خاکی ترویج داد.
پدر و مادر عزیزتر از جان؛ فرشتگان زندگیم که با مهر و محبت خویش صفحه سفید زندگیم را به زیبایی رنگ آمیزی کردند.

برادران گرامی و خواهران مهربان

,

همسر فداکار و امیر محمد عزیزم

که بدون همراهی آنها این کار به مقصد نمی رسید.

تقدیر و تشکر

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش فرید نعمت...

سعدی

شایسته است که از زحمات کلیه کسانی که در به ثمر رسیدن این مجموعه مایاری نموده اند تشکر نمایم. از استاد راهنمای رساله آقای دکتر علی مرادزاده که با دقت و وسواس کوزه خویش در طول دوره دکتری و به ویژه در مراحل پایانی کار از راهنماییهای ارزنده ایشان بهره برده ام، صمیمانه سپاسگزارم.

بجین از استاد راهنمای دوم پروفسور هوشیار زنگ از دانشگاه علوم زمین چین (چین) که امکان یک دوره کوتاه مدت فرصت مطالعاتی را فراهم نمودند تشکر می نمایم. از استادی داور دکتر حمید ابراهیم زاده اردستانی، دکتر عبدالمجید انصاری، دکتر فرامرز دولتی و دکتر ابوالقاسم کاکار روحانی به جهت مطالعه این رساله و ارائه نظرات ارزشمندشان سپاسگزارم. دریافت داده های واقعی را دیون حیات های دیروپرسنل محترم مدیریت اکتشاف نفت به ویژه آقای دکتر سید هاشم طباطبائی، استاد شاور صنعتی، می باشم؛ بدین وسیله از آقایان مهندس صحت، زاده محمدی، خراسانی، نائینی، سرویان، قمی، شهبالی، صفاری، تیموری، ایوبی و تهرانی و همچنین آقای دکتر عبدالملکی فرد و سرکار خانم هاشمی، جالیان و مرآتضوی تشکر و قدردانی می کردم. همچنین از دیگر دوستانی که از طریق ایمیل یا به صورت حضوری از نظرات آنها استفاده کرده ام سپاسگزارم:

- دانشگاه علوم زمین چین: پروفسور خانم شیان هونگ منگ، پروفسور چنگ لی یان، دکتر کویون ژانگ، جانشین چن و لیان خونی کوآ
- دکتر علی آیدین از دانشگاه پالمو کاله ترکیه، دکتر پرویز امیدری از دانشکده علوم دانشگاه صنعتی شاهرود، دکتر تران توآن دونگ از انستیتو تحقیقات اقیانوس شناسی هانوی، دکتر کوردون کوراز از دانشگاه وایت واترزند آفریقای جنوبی، دکتر مارک پیل لیگلتن از سازمان زمین شناسی کانادا و دکتر پاستا از دانشگاه کومینوس اسلواکی
- از کلیه استادیو و کارکنان محترم دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود به ویژه آقایان دکتر رضا کاکالی، دکتر فرامرز دولتی و دکتر رضا غوامی به لحاظ فراهم آوردن محیط مناسب در جایگاه ریاست دانشکده و مدیریت گروه اکتشاف و بنگارهای های خودم آقایان احمد آریافر، مهرداد سلیمانی، علیرضا عرب امیری تشکر و قدردانی می کردم.

حمید آقاجانی - بهمن ماه ۱۳۸۸

حمید آقاجانی تأیید می‌نماید که مطالب مندرج در این رساله نتیجه تحقیقات خودش می‌باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد.

بهمن ماه ۱۳۸۸

چکیده

روش گرانی سنجی برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی مرتبط با منابع هیدروکربوری در مراحل اولیه اکتشافات مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف اصلی روش‌های تفسیر آنومالی‌های میدان گرانی در اکتشاف منابع هیدروکربوری شناخت ساختارهایی است که بتوانند شرایط یک نفتگیر را داشته باشند. در این راستا روش‌های متعددی که عمدتاً کیفی بوده برای شناسایی اینگونه ساختارها و تا حدودی تخمین عمق آن‌ها استفاده می‌گردند. روش گرادیان کل نرمال از جمله این روش‌ها می‌باشد که علاوه بر موارد فوق برای تشخیص و تفکیک ساختارهای حاوی مواد هیدروکربوری از سایر ساختارها در دهه ۱۹۶۰ میلادی مطرح گردید. در این روش تابع میدان پتانسیل براساس یکسری توابع سینوسی و کسینوسی و بر مبنای سری‌های فوریه بیان می‌شود.

علی‌رغم توانمندی این روش در شناسایی آنومالی‌های میدان پتانسیل، به ویژه در اکتشاف منابع هیدروکربوری، هنوز پارامترهای تعیین کننده و موثری در محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال نظیر تعداد جملات هارمونیک سری‌های فوریه، توان تابع هموارساز لانکزوس (μ)، طول بهینه پروفیل‌ها و ابعاد شبکه اکتشاف و فواصل نقاط اندازه‌گیری داده‌های گرانی وجود دارند که چگونگی تعیین آن‌ها معلوم نمی‌باشد. علاوه بر این، توانمندی این روش در شناسایی تله‌های هیدروکربوری مرتبط با گنبد های نمکی دو و سه بعدی مورد آزمون قرار نگرفته است. به همین دلیل بررسی و تعیین بهینه پارامترهای فوق و در کنار آن تعیین شاخصی برای شناسایی نفتگیرهای مرتبط با گنبد نمکی که حاوی هیدروکربور بوده همراه با ارائه الگوریتم محاسبه گرادیان کل نرمال دو بعدی و همچنین ارائه روش جدیدی برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی جزو اهداف اصلی مطالعه حاضر است.

به منظور نیل به اهداف فوق، ابتدا مدل‌های مختلفی که تداعی کننده تله‌های نفتی با ساختارهای تاقدیسی و گنبد نمکی بودند، طراحی شدند. سپس با تهیه الگوریتم محاسبه اثر گرانی آن‌ها، برنامه‌های کامپیوتری مورد نیاز در محیط نرم‌افزار Matlab کد نویسی گردید. در ادامه با لحاظ پارامترهای مورد نظر، الگوریتم و برنامه محاسبه گرادیان کل نرمال دو بعدی تهیه شد و عملکرد آن‌ها با داده‌های مختلف مصنوعی و واقعی بررسی شد. با توجه به سه بعدی بودن بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی مرتبط با تله‌های هیدروکربوری سعی گردید تا با بهره‌گیری از سری فوریه دوگانه روش جدیدی برای محاسبه گرادیان کل نرمال سه بعدی ارائه شود و عملکرد آن با داده‌های مصنوعی و واقعی گرانی و مغناطیسی و دیگر روش‌های شبه سه بعدی مورد مقایسه قرار گیرد.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی‌ها به تعداد بهینه جملات هارمونیک جهت محاسبه ضرایب سری فوریه وابسته است. تعیین این پارامتر تاکنون براساس داده‌های تکمیلی اکتشافی و به روش سعی و خطا انجام می‌شده است. در این رساله روش جدیدی بنام بیشینه نسبی مقدار گرادیان کل نرمال به صورت تابعی از تعداد جملات هارمونیک ارائه شد که بدون نیاز به داده‌های اضافی این پارامتر را تعیین می‌کند. با لحاظ نمودن چنین مقداری برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال هر پروفیل و ترسیم مقاطع مربوط و با شناسایی محل بیشینه یا کمینه آن‌ها، می‌توان موقعیت افقی و عمق توده‌های آنومال را با دقت مناسبی تعیین کرد. از دیگر عوامل موثر روی مقادیر گرادیان کل نرمال توان تابع هموارساز لانکزوس است که به منظور حذف و تعدیل اثرات نوفه موجود در داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با مدل‌سازی‌های

انجام شده در این تحقیق مشخص شد که عدد ۲ و یا ۳ برای این پارامتر می‌تواند مناسب‌ترین جواب را برای تعیین و تخمین عمق ارائه نماید.

نتایج مدل‌سازی‌های صورت گرفته روی داده‌ها نشان می‌دهد که برای کسب جواب‌های دقیق‌تر از محل و عمق توده آنومال، مناسب‌ترین طول پروفیل اکتشافی داده‌های گرانی بایستی حداقل ۱۳ برابر عمق قرارگیری جسم یا توده آنومال مورد اکتشاف باشد. همچنین فاصله بهینه نقاط اندازه‌گیری داده‌های میدان پتانسیل روی پروفیل برای کسب نتیجه مناسب باید به اندازه نصف تا عرض کامل گسترش افقی جسم آنومال مدفون تعیین شود. همچنین نشان داده شد که بزرگی مقدار اختلاف چگالی تأثیری در تعداد جملات هارمونیک و موقعیت منحنی‌های بسته کمینه و بیشینه روی مقاطع گرادیان کل نرمال ندارد. بنابراین اگر بتوان مقدار اختلاف چگالی ناشی از اجسام آنومال را اندازه‌گیری نمود با این روش می‌توان موقعیت آن‌ها را آشکار نمود. همان‌طور که انتظار می‌رود شکل اجسام کاملاً در تعداد بهینه جملات هارمونیک و موقعیت منحنی‌های بسته بیشینه یا کمینه گرادیان کل نرمال موثر است.

از مزیت‌های اصلی روش گرادیان کل نرمال نسبت به سایر روش‌های شناسایی و تفسیر آنومالی گرانی، تفکیک تله‌های حاوی هیدروکربور از تله‌های خشک می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته در این کار تحقیقی نشان می‌دهد که موقعیت و عمق ساختارهای گنبد نمکی مرتبط با منابع هیدروکربوری همانند تله‌های تاقدیسی حاوی هیدروکربور روی مقاطع گرادیان کل نرمال دو بعدی با منحنی‌های بسته کمینه‌ای مشخص می‌شود که توسط منحنی‌های بیشینه محصور شده است و یا اینکه در نقشه‌های تهیه شده گرادیان کل نرمال سه بعدی برای اعماق مختلف، تله‌های سه بعدی حاوی هیدروکربور بصورت منحنی‌های بسته کمینه محصور با منحنی‌های بیشینه نمایان می‌گردند. بنابراین وجود منحنی‌های بسته با مقادیر کمینه گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی شاخصی برای اکتشاف آنومالی‌های چگالی وابسته به مخازن احتمالی نفت و گاز تعیین می‌شود.

با توجه به سه بعدی بودن غالب تله‌های حاوی مواد هیدروکربوری سعی شد تا ضمن توسعه روابط ریاضی مربوط و همچنین بهره‌گیری از سری‌های فوریه دو بعدی، روش جدیدی برای محاسبه گرادیان کل نرمال سه بعدی ارائه شود. در ادامه به منظور اعتبار سنجی روش دو بعدی با لحاظ پارامترهای بهینه و همچنین بررسی قابلیت‌های روش جدید گرادیان کل نرمال سه بعدی معرفی شده در اکتشاف منابع هیدروکربوری مرتبط با تله‌های تاقدیسی و گنبد نمکی شکل و همچنین منابع معدنی، این روش روی چندین مجموعه داده واقعی گرانی و مغناطیسی بکار گرفته شد. استفاده از این روش برای تفسیر و مدل‌سازی داده‌های واقعی فوق‌الذکر حاکی از توانمندی بالای آن در شناسایی موقعیت افقی و عمقی تله‌های حاوی مواد هیدروکربوری و یا توده‌های معدنی است. علاوه بر آن نتایج حاصل از این روش انطباق خوبی با نتایج حاصل از داده‌های حفاری منابع عمیق هیدروکربوری مرتبط با نفتگیرهای تاقدیسی و گنبد نمکی دو و سه بعدی دارد. همچنین نتایج مطالعه نشان می‌دهد که روش گرادیان کل نرمال سه بعدی به علت استفاده همزمان سری فوریه در دو جهت X-Y نتایج مناسب‌تری نسبت به گرادیان کل نرمال دو بعدی و سایر روش‌های شبه سه بعدی ارائه می‌نماید. بنابراین از این روش می‌توان در تفکیک ساختارهای حاوی هیدروکربور، انتخاب محل حفر و عمق چاه‌های اکتشافی و همچنین جهت برنامه‌ریزی برای فعالیت‌های اکتشافی بیشتر استفاده نمود.

کلید واژه‌ها: آنومالی گرانی، تله نفتی (تاقدیسی و گنبد نمکی)، گرادیان کل نرمال، تعداد جملات هارمونیک، سری فوریه، اکتشاف مخازن نفت و گاز

لیست مقالات مستخرج از رساله

مقالات ژورنالی:

1. **Aghajani, H.**, Moradzadeh, A., and Zeng, H., 2009, Normalized Full Gradient of Gravity Anomaly Method and Its Application to the Mobaruz Sulfide Body, Canada, *World Applied Sciences Journal [WASJ]*, Vol. 6 (3): 393-400.
2. **Aghajani, H.**, Moradzadeh, A., and Zeng, H., 2009, Estimation of Depth to Anomalous Body from Normalized Full Gradient of Gravity Anomaly, *Journal of Earth Science*, Vol. 20 (6): 1012-1016.
- ۳- آقاجانی، حمید، علی مرادزاده و هوآلین زنگ، ۱۳۸۸، تخمین موقعیت افقی و عمق آنومالی‌های گرانی به کمک گرادیان کل نرمالایز شده، مجله علوم زمین سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، (پذیرش و آماده چاپ).
4. **Aghajani, H.**, Moradzadeh, A., and Zeng, H., 2010, "Predicting high potential oil & gas field using normalized full gradient of gravity anomalies: a case study in the Tabas basin, east of Iran, *Pure & Applied Geophysics (Accepted)*.
5. **Aghajani, H.**, and Moradzadeh, A., 2008, "the use of gradient Techniques to detection of the gravity anomalies with special emphasis on harmonics analysis, international journal mining and environmental of Iran (**Accepted with revise**)

مقالات کنفرانسی:

1. **Aghajani, H.**, Moradzadeh, A., Aydin, A. & Tabatabaei, S.H., 2009, Using normalized full gradient method to interpret gravity anomalies on synthetic and field data, *The 9th International Multidisciplinary Geo-Conference & EXPO SGEM 2009*, Bulgaria, pp. 725-733.
2. **Aghajani, H.**, Moradzadeh, A., and Zeng, H., 2009, Determining of optimum the length of profile in normalized full gradient method, *First International Petroleum Conference & Exhibition*, Shiraz, Iran, p. 4 (Proceeding in CD).
3. **Aghajani, H.** and Moradzadeh, A., 2008, Salt domes' depth estimation using normalized full gradient of gravity data. *21th World Mining Congress & Expo*, Poland, pp. 11-19 (Proceeding in CD).
4. **Aghajani, H.**, Moradzadeh, A., and Zeng, H., and Chen, Z., 2008, Detection of iron deposits using 3D normalized full gradient method: Ojatabad deposit, Iran, *The Chinese Geophysics annual*, Beijing, p. 194 (Abstract).
5. **Aghajani, H.** and Moradzadeh, A., 2007. Detection of iron deposits by normalized full gradient method: Ojatabad deposit, Iran. *7th International Scientific Conference SGEM 2007*, Albena Co., Bulgaria, pp. 59 (1-7), No. 31-7173
- ۶- آقاجانی، حمید و علی مرادزاده، ۱۳۸۶، شناسایی ساختارهای زیرسطحی به روش گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی، یازدهمین گردهمایی انجمن زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، (مجموعه مقالات به صورت CD)
- ۷- آقاجانی، حمید و علی مرادزاده، ۱۳۸۵، تشخیص گنبد‌های نمکی به روش گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی، گردهمایی ۲۵ علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، (مجموعه مقالات به صورت CD)

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: کلیات و اهداف رساله
۲	۱-۱ مقدمه
۵	۲-۱ تله‌های نفتی
۷	۱-۲-۱ تله‌های ساختاری
۸	۲-۲-۱ تله‌های چینه‌ای
۸	۳-۱ روش گرانی سنجی
۱۰	۴-۱ آنومالی گرانی
۱۳	۵-۱ تفکیک آنومالی گرانی
۱۴	۱-۵-۱- روش گسترش میدان به سمت پایین
۱۵	۲-۵-۱- روش مشتق قائم
۱۸	۳-۵-۱- گرادیان افقی
۱۸	۶-۱ بررسی مزایا و معایب روش‌های تفکیک آنومالی‌های گرانی
۲۲	۷-۱ معرفی روش گرادیان کل نرمال
۲۴	۸-۱ سابقه تحقیق و بکارگیری روش گرادیان کل نرمال
۳۱	۹-۱ مزایای و محدودیت‌های روش گرادیان کل نرمال
۳۲	۱۰-۱- ضرورت انجام تحقیق
۳۵	۱۱-۱- فرضیه‌های تحقیق
۳۶	۱۲-۱- اهداف و مراحل انجام تحقیق
۳۷	۱۳-۱- ساختار رساله
۳۹	فصل دوم: اصول و مبانی روش گرادیان کل نرمال و چگونگی محاسبه آن
۴۰	۱-۲- مقدمه
۴۲	۲-۲- اصول روش
۵۴	۳-۲- استاندارد سازی آنومالی‌های گرانی مشاهده‌ای
۵۶	۴-۲- روش محاسبه گرادیان کل نرمال
۶۳	فصل سوم: تهیه الگوریتم‌های مورد نیاز جهت مدل سازی دو و سه بعدی
۶۴	۱-۳- مقدمه
۶۵	۲-۳- مدل‌های گرانی سنجی
۶۷	۳-۳- پاسخ گرانی توده‌های با شکل منظم هندسی
۶۷	۱-۳-۳- اثر گرانی ناشی از وجود یک استوانه افقی مدفون
۶۸	۲-۳-۳- محاسبه اثر گرانی اجسام دو بعدی هندسی ساده به روش تیغه‌های قائم نازک
۷۰	۳-۳-۳- اثر گرانی ناشی از وجود یک کره مدفون
۷۱	۴-۳-۳- اثر گرانی ناشی از وجود یک استوانه قائم
۷۴	۴-۳- آنومالی‌های گرانی ناشی از مدل‌های پیچیده با اشکال نامنظم

- ۷۴ ۱-۴-۳- محاسبه اجسام دو بعدی به روش تالوانی
- ۷۷ ۲-۴-۳- محاسبه گرانی اجسام دو بعدی به روش ون و بویس
- ۸۰ ۳-۴-۳- محاسبه اثر گرانی اجسام سه بعدی به روش برانبارش لایه‌های نازک
- ۸۷ ۱-۳-۴-۳- ارائه الگوریتم محاسبه مقدار گرانی یک جسم سه بعدی به روش تالوانی

فصل چهارم: بررسی ویژگی‌های گرادیان کل نرمال دو بعدی و بهینه سازی پارامترهای موثر

- ۹۲ ۱-۴- مقدمه
- ۹۳ ۲-۴- رابطه گرادیان کل نرمال (NFG) با تعداد هارمونیک (N)
- ۹۵ ۳-۴- تخمین مقدار بهینه تعداد جملات هارمونیک
- ۹۸ ۴-۴- رابطه NFG با طول پروفیل گرانی
- ۱۰۱ ۵-۴- تاثیر توان تابع هموارساز (μ) روی مقدار N و گرادیان کل نرمال
- ۱۰۷ ۶-۴- تاثیر مقدار اختلاف چگالی جسم آنومال روی گرادیان کل نرمال و N
- ۱۱۲ ۷-۴- تاثیر فواصل نقاط اندازه‌گیری روی مقدار N و گرادیان کل نرمال
- ۱۱۵ ۸-۴- تاثیر شکل جسم آنومال روی مقدار N و گرادیان کل نرمال
- ۱۱۸ ۹-۴- مدل تاقدیس
- ۱۲۰ ۱-۹-۴- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی یک تله تاقدیسی فاقد هیدروکربور
- ۱۲۱ ۲-۹-۴- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی تله تاقدیسی حاوی مواد هیدروکربوری
- ۱۲۴ ۳-۹-۴- بررسی دو تاقدیس با و بدون حضور هیدروکربور روی یک مقطع NFG
- ۱۲۶ ۱۰-۴- مدل گنبد نمکی
- ۱۲۹ ۱-۱۰-۴- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی ناشی از یک گنبد نمکی
- ۱۳۴ ۲-۱۰-۴- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی یک گنبد نمکی نفتدار
- ۱۳۸ ۳-۱۰-۴- بررسی و مقایسه ویژگی‌های گرادیان کل نرمال مدل‌های مختلف گنبد نمکی
- ۱۳۹ ۱-۳-۱۰-۴- مدل گنبد نمکی
- ۱۴۱ ۲-۳-۱۰-۴- مدل گنبد نمکی با تله نفتی
- ۱۴۳ ۳-۳-۱۰-۴- مدل گنبد نمکی با تله نفت و گاز
- ۱۴۵ ۴-۳-۱۰-۴- مدل گنبد نمکی با تله نفت و آب

فصل پنجم: توسعه و ارائه روش جدیدی برای گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی

- ۱۴۸ ۱-۵- مقدمه
- ۱۴۹ ۲-۵- بسط هارمونیکی میدان گرانی
- ۱۵۲ ۳-۵- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی با استفاده از سری فوریه دو بعدی
- ۱۵۵ ۴-۵- مدل‌سازی ساختارهای سه بعدی
- ۱۶۳ ۱-۴-۵- مدل کره
- ۱۶۳ ۲-۴-۵- مدل استوانه قائم
- ۱۶۶ ۳-۴-۵- مدل تاقدیس سه بعدی
- ۱۶۹ ۱-۳-۴-۵- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی ناشی از یک تاقدیس فاقد هیدروکربور
- ۱۷۰ ۲-۳-۴-۵- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی ناشی از یک تاقدیس حاوی هیدروکربور
- ۱۷۲ ۴-۴-۵- مدل گنبد نمکی
- ۱۷۵

- ۱۷۶ ۵-۴-۴-۱- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی ناشی از یک گنبد نمکی
- ۱۸۰ ۵-۴-۴-۲- محاسبه مقدار NFG سه بعدی آنومالی گرانی از یک گنبد نمکی حاوی هیدروکربور
- ۱۸۳ ۵-۴-۵- مدل‌های ترکیبی

فصل ششم: کاربرد روش گرادیان کل نرمال روی داده‌های واقعی

- ۱۸۹ ۱-۶- مقدمه
- ۱۹۰ ۲-۶- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی جنوب شرق ویتنام
- ۱۹۱ ۶-۲-۱- تخمین تعداد هارمونیک بهینه جهت محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی
- ۱۹۳ ۶-۲-۲- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی
- ۱۹۶ ۶-۲-۳- بررسی آماری چاه‌های اکتشافی در منطقه اکتشافی جنوب شرق ویتنام
- ۲۰۱ ۶-۲-۴- پارامترهای آماری توزیع چاه‌ها
- ۲۰۲ ۶-۳- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی میدان نفتی آبادان
- ۲۰۴ ۶-۳-۱- مقدمه
- ۲۰۴ ۶-۳-۳- اطلاعات ژئوفیزیکی
- ۲۰۵ ۶-۳-۴- اطلاعات چینه شناسی چاه اروند
- ۲۰۵ ۶-۳-۵- داده‌های گرانی سنجی
- ۲۰۸ ۶-۳-۵-۱- تعیین تعداد جملات سری فوریه برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال
- ۲۰۹ ۶-۳-۵-۲- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی داده‌های گرانی
- ۲۱۰ ۶-۳-۵-۳- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی
- ۲۱۲ ۶-۴- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی در حوضه نفتی قم
- ۲۱۴ ۶-۴-۱- مقدمه
- ۲۱۴ ۶-۴-۲- چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه
- ۲۱۵ ۶-۴-۲-۱- تاقدیس البرز شرقی
- ۲۱۷ ۶-۴-۲-۲- تاقدیس البرز غربی
- ۲۱۷ ۶-۴-۳- گنبد نمکی قم
- ۲۱۸ ۶-۴-۴- داده‌های گرانی سنجی
- ۲۱۹ ۶-۴-۵- مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی داده‌های گرانی
- ۲۲۰ ۶-۴-۶- مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی
- ۲۲۵ ۶-۵- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی در میادین هیدروکربوری منطقه قشم
- ۲۲۸ ۶-۵-۱- مقدمه
- ۲۲۸ ۶-۵-۲- داده‌های گرانی سنجی و چینه‌شناسی ناحیه
- ۲۳۳ ۶-۵-۳- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی داده‌های گرانی
- ۲۳۶ ۶-۵-۴- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی
- ۲۳۹ ۶-۶- پیش بینی مناطق پتانسیل بالای هیدروکربوری در حوضه طبس
- ۲۳۹ ۶-۶-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه طبس
- ۲۴۰ ۶-۶-۲- زمین شناسی منطقه طبس
- ۲۴۳ ۶-۶-۳- محاسبه گرادیان کل نرمال دو بعدی داده‌های گرانی منطقه
- ۲۴۶ ۶-۶-۴- محاسبه گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی منطقه

۲۴۹	۷-۶- تفسیر آنومالی ناشی از گنبد نمکی هومبل
۲۵۴	۸-۶- تفسیر آنومالی گرانی ناشی از معدن مس مسیو سولفاید موبرون
۲۵۴	۱-۸-۶- مقدمه
۲۵۶	۲-۸-۶- تعیین N بهینه و محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی
۲۶۰	۹-۶- بررسی آنومالی‌های مغناطیسی کانسار آهن أجت‌آباد
۲۶۰	۱-۹-۶- مقدمه
۲۶۱	۲-۹-۶- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه
۲۶۳	۳-۹-۶- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی آنومالی مغناطیسی
۲۶۶	۴-۹-۶- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی مغناطیسی
۲۷۱	فصل هفتم: نتایج و پیشنهادات
۲۷۲	۱-۷- جمع‌بندی و نتایج
۲۸۰	۲-۷- پیشنهادات
۲۸۱	پیوست‌ها
۲۸۲	پیوست الف: روش‌های تفکیک آنومالی‌های گرانی
۲۹۰	پیوست ب: روش‌های عددی حل انتگرال محاسبه ضرایب فوریه
۲۹۹	پیوست ج: الگوریتم محاسباتی گرادیان کل نرمال شبه سه بعدی
۳۰۵	منابع فارسی
۳۰۷	منابع انگلیسی
	چکیده انگلیسی

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

فصل اول: کلیات و اهداف رساله

- شکل ۱-۱: برش عرضی ایده آل از یک نفتگیر تاقدیسی که در اثر چین خوردگی یک سازند متخلخل... ۵
- شکل ۲-۱: تله های نفتی موجود در یک میدان نفتی حاصل از دیپیریسیم ۶
- شکل ۳-۱: انواع نفتگیرهای ساختمانی ۸
- شکل ۴-۱: نمودار گردشی تصحیح مقادیر گرانی مشاهده‌ای در ایستگاه اندازه‌گیری ۱۲
- شکل ۵-۱: رفتار میدان گسترش یافته گرانی برای یک منبع خطی طویل همگن در عمق واحد. ۱۶

فصل دوم: اصول و مبانی روش گرادیان کل نرمال و چگونگی محاسبه آن

- شکل ۱-۲: تغییرات میدان گرانی Δg (در گسترش به سمت پایین) برای یک استوانه افقی... ۳۹
- شکل ۲-۲: تغییرات مشتق قائم در راستای محور طول‌ها میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی... ۴۴
- شکل ۳-۲: تغییرات مشتق قائم در راستای محور عمق میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی... ۴۵
- شکل ۴-۲: گرادیان کل آنومالی گرانی با استفاده از مقادیر مشتق قائم در ... ۴۶
- شکل ۵-۲: تغییرات گرادیان کل نرمال میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی در افق ۵۰ متری... ۴۷
- شکل ۶-۲: گرادیان کل نرمال میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی ... ۴۸
- شکل ۷-۲: یک استوانه افقی مدفون ۴۹
- شکل ۸-۲: نمایش تغییرات گرادیان کل (الف) و گرادیان کل نرمال (ب) داده‌های گرانی ۵۱
- شکل ۹-۲: اثر گرانی در راستای یک پروفیل الف) استاندارد نشده و ب) استاندارد شده ۵۴
- شکل ۱۰-۲: پدیده گیس برای برخی توابع ۵۶
- شکل ۱۱-۲: فلوچارت مراحل محاسبه گرادیان کل نرمال دو بعدی ۵۹

فصل سوم: تهیه الگوریتم های مورد نیاز جهت مدل سازی دو و سه بعدی

- شکل ۱-۳: یک جسم سه بعدی با چگالی $\rho(x', y', z')$ و با شکل دلخواه در نقطه مشاهده‌ای $P(x, y, z)$. ۶۳
- شکل ۲-۳: الف) یک استوانه افقی مدفون ... و ب) اثر گرانی قائم محاسبه شده در نقطه P استوانه افقی... ۶۵
- شکل ۳-۳: الف) محاسبه اثر گرانی یک تیغه مستطیلی قائم و ب) محاسبه اثر گرانی جسم به اجزای نازک ۶۸
- شکل ۴-۳: الف) اثر گرانی قائم یک کره از یک نقطه دلخواه P و ب) نمودار تغییرات گرانی قائم کره... ۶۹
- شکل ۵-۳: اثر گرانی قائم یک استوانه قائم از روی نقطه‌ای واقع بر روی محور آن ۷۰
- شکل ۶-۳: الف) اثر گرانی قائم یک استوانه قائم ضخیم در یک نقطه دلخواه مانند P ... ۷۱
- شکل ۷-۳: تقریب یک جسم دو بعدی بوسیله یک n ضلعی ۷۲
- شکل ۸-۳: تقریب چند ضلعی برای مقطع یک جسم دو بعدی ۷۵
- شکل ۹-۳: چند ضلعی مورد استفاده در محاسبه مقدار گرانی آن به روش دستی ۷۸
- شکل ۱۰-۳: الف) نمایشی از جسم سه بعدی و ب) المان‌های هندسی موثر در محاسبه مقدار آنومالی گرانی ۸۱
- شکل ۱۱-۳: نمودار مقدار اثر گرانی یک جسم سه بعدی با برانبارش اثر ۵ لایه مجزا نسبت به عمق ۸۴
- شکل ۱۲-۳: محاسبه اثر گرانی جسم سه بعدی با استفاده از روش برانبارش لایه‌های نازک... ۸۴
- شکل ۱۳-۳: فلوچارت محاسبه اثر گرانی جسم سه بعدی با استفاده از روش برانبارش لایه‌های نازک ۸۹

- فصل چهارم: بررسی ویژگی‌های گرادیان کل نرمال دو بعدی و بهینه سازی پارامترهای موثر
- ۹۲ شکل ۱-۴: مدل استوانه افقی با پارامترهای مورد نیاز
- ۹۵ شکل ۲-۴: الف) آنومالی گرانی ناشی از یک استوانه افقی و مقادیر گرادیان کل نرمال
- ۹۷ شکل ۳-۴: مقدار گرادیان کل نرمال به ازای تعداد جملات متفاوت سری فوریه در عمق‌های مختلف...
- ۹۹ شکل ۴-۴: نمودار تغییرات گرادیان کل نرمال و تعداد جملات سری فوریه
- ۱۰۰ شکل ۵-۴: الف) تغییرات تابع $F(L)$ نسبت به L و b) مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی
- ۱۰۳ شکل ۶-۴: الف) طول پروفیل ۲۵ کیلومتر، b) طول پروفیل ۳۰ کیلومتر و c) طول پروفیل ۳۹ کیلومتر
- ۱۰۴ شکل ۴-۷: الف) نمودار تعداد هارمونیک‌ها نسبت به تغییر طول پروفیل b) تغییرات مقدار گرادیان کل ...
- ۱۰۶ شکل ۴-۸: تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال به ازای تغییرات تعداد هارمونیک‌ها برای اندازه‌های...
- ۱۰۶ شکل ۴-۹: الف) تغییرات فیلتر نوسانی (H) نسبت به تغییر تعداد هارمونیک‌ها با لحاظ نمودن تابع ...
- ۱۰۸ شکل ۴-۱۰: گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی از یک مدل استوانه افقی مدفون در عمق ۲ کیلومتری
- ۱۱۰ شکل ۴-۱۱: نمودار تغییرات تعداد جملات هارمونیک (N) نسبت به توان تابع هموارساز (μ) در دو ...
- ۱۱۱ شکل ۴-۱۲: نمودار تغییرات مقادیر گرادیان کل نرمال (NFG) نسبت به تعداد جملات هارمونیک
- ۱۱۱ شکل ۴-۱۳: گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی از یک مدل استوانه افقی مدفون در عمق ۲ کیلومتری
- ۱۱۳ شکل ۴-۱۴: آنومالی گرانی ناشی از یک جسم دو بعدی با سطح مقطع مربعی در عمق ۲ کیلومتری
- ۱۱۴ شکل ۴-۱۵: گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی ناشی از یک جسم دو بعدی با سطح مقطع مربعی
- ۱۱۵ شکل ۴-۱۶: نمودار تغییرات گرادیان کل نرمال (NFG) نسبت به تعداد جملات هارمونیک
- ۱۱۶ شکل ۴-۱۷: گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی از یک مدل کروی مدفون در عمق سه کیلومتری با
- ۱۱۷ شکل ۴-۱۸: نمودار تغییرات مقادیر گرادیان کل نرمال بیشینه نسبت به تعداد جملات هارمونیک
- ۱۱۹ شکل ۴-۱۹: مقاطع گرادیان کل نرمال برای سه مدل الف) استوانه افقی $N=34$ ، b) مدل با سطح ...
- ۱۱۹ شکل ۴-۲۰: مدل سازی یک تاقدیس بدون اشباع از هیدروکربور و اشباع از هیدروکربور
- ۱۲۰ شکل ۴-۲۱: فلوچارت محاسبه اثر گرانی مدل تاقدیس دو بعدی حاوی یا فاقد مواد هیدروکربور
- ۱۲۲ شکل ۴-۲۲: آنومالی گرانی مدل تاقدیسی و مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی
- ۱۲۳ شکل ۴-۲۳: تغییرات گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی (شکل ۴-۲۲) نسبت به تعداد هارمونیک
- ۱۲۴ شکل ۴-۲۴: الف) آنومالی گرانی یک تاقدیس دو بعدی اشباع از مواد هیدروکربور و مقاطع گرادیان ...
- ۱۲۵ شکل ۴-۲۵: الف) اثر گرانی ناشی از دو تاقدیس یک تاقدیس با مواد هیدروکربور و بدون
- ۱۲۸ شکل ۴-۲۶: تغییرات گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی نسبت به تعداد هارمونیک
- ۱۲۹ شکل ۴-۲۷: مدل سازی یک گنبد نمکی دو بعدی
- ۱۳۰ شکل ۴-۲۸: فلوچارت محاسبه اثر گرانی یک گنبد نمکی دو بعدی ساده و همچنین دارای تله حاوی
- ۱۳۱ شکل ۴-۲۹: الف) اثر گرانی یک گنبد نمکی بدون تله حاوی هیدروکربور (شکل ۴-۲۷)، و مقادیر
- ۱۳۳ شکل ۴-۳۰: تغییرات گرادیان کل نرمال بیشینه آنومالی‌های گرانی یک گنبد نمکی نسبت به تعداد هارمونیک‌ها
- ۱۳۴ شکل ۴-۳۱: الف) مدل دو بعدی یک گنبد نمکی به همراه تله هیدروکربنی در اطراف آن
- ۱۳۴ شکل ۴-۳۲: الف) اثر گرانی یک گنبد نمکی حاوی هیدروکربور، و مقاطع گرادیان کل نرمال این
- ۱۳۶ شکل ۴-۳۳: نمودار تغییرات مقادیر گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد هارمونیک‌ها برای مدل گنبد نمکی ...
- ۱۳۷ شکل ۴-۳۴: نمودار تغییرات نوفه اضافه شده به داده‌های گرانی در راستای پروفیل اندازه‌گیری
- ۱۳۸ شکل ۴-۳۵: مدل گنبد نمکی فاقد تله نفتی ...
- ۱۴۰ شکل ۴-۳۶: مدل گنبد نمکی دارای تله نفتی، الف) اثر گرانی مدل با حضور نوفه‌های تصادفی ...
- ۱۴۲ شکل ۴-۳۷: گنبد نمکی دارای تله نفت و گاز، الف) اثر گرانی مدل با حضور نوفه تصادفی.....
- ۱۴۴

- شکل ۴-۳۸: گنبد نمکی دارای تله نفت و آب، الف) اثر گرانی مدل با حضور نوفه تصادفی ... ۱۴۶
- فصل پنجم: بسط، توسعه و ارائه روش جدیدی برای گرادیان کل نرمال سه بعدی داده های گرانی** ۱۴۸
- شکل ۵-۱: فلوچارت اصلی محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی با سری فوریه دو بعدی ۱۵۹
- شکل ۵-۲-الف: فلوچارت محاسبه ضرایب سری فوریه دو بعدی (دوگانه) ۱۶۰
- شکل ۵-۲-ب: فلوچارت محاسبه مقادیر مشتق های سه گانه در سه جهت ۱۶۱
- شکل ۵-۲-ج: فلوچارت محاسبه مقدار گرادیان کل و گرادیان کل نرمال سه بعدی ۱۶۲
- شکل ۵-۳: الف) اثر گرانی کره مدفون در عمق ۳ کیلومتری، ب) مدل کره مدفون در عمق ۳ کیلومتری ... ۱۶۴
- شکل ۵-۴: مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی در عمق های مختلف برای مدل کره ۱۶۵
- شکل ۵-۵: الف) اثر گرانی مدل استوانه قائم، ب) مدل استوانه قائم مدفون در عمق یک کیلومتری ۱۶۷
- شکل ۵-۶: الف) اثر گرانی استوانه قائم مدفون در عمق یک کیلومتری بر روی پروفیل گذرنده از ۱۶۸
- شکل ۵-۷: مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی مدل استوانه قائم مدفون در ۱۶۹
- شکل ۵-۸: الف) اثر گرانی سه بعدی ناشی از یک تاقدیس سه بعدی فاقد هیدروکربور، ب) مدل سه بعدی ۱۷۱
- شکل ۵-۹: مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی ناشی از یک مدل تاقدیسی فاقد ... ۱۷۲
- شکل ۵-۱۰: الف) اثر گرانی سه بعدی ناشی از یک تاقدیس سه بعدی حاوی هیدروکربور، ب) مدل ۱۷۳
- شکل ۵-۱۱: مقادیر گرادیان کل نرمال گرانی از تاقدیس سه بعدی حاوی مواد هیدروکربوری ۱۷۵
- شکل ۵-۱۲: الف) اثر گرانی ناشی از یک گنبد نمکی، ب) مدل سه بعدی یک گنبد نمکی ۱۷۷
- شکل ۵-۱۳: گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی های گرانی ناشی از یک گنبد نمکی ۱۷۹
- شکل ۵-۱۴: الف) اثر گرانی مدل، ب) مدل سه بعدی یک گنبد نمکی به همراه تله هیدروکربوری ۱۸۱
- شکل ۵-۱۵: گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی های گرانی ناشی از یک گنبد نمکی همراه با تله نفتی ۱۸۲
- شکل ۵-۱۶: اثر گرانی ناشی از یک مدل ترکیبی شامل چند جسم آنومال که مشخصات آن ها ۱۸۴
- شکل ۵-۱۷: الف) اثر گرانی ناشی از چند جسم آنومال در راستای پروفیل AB در شکل ۱۸۵
- شکل ۵-۱۸: گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی های گرانی ناشی از یک مدل ترکیبی با چند جسم ۱۸۷
- شکل ۵-۱۹: گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی های گرانی یک مدل ترکیبی با چند جسم آنومال ۱۸۸
- فصل ششم: کاربرد روش گرادیان کل نرمال روی داده های واقعی** ۱۸۹
- شکل ۶-۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه ۱۹۲
- شکل ۶-۲: نقشه آنومالی گرانی در ناحیه مورد مطالعه، برحسب میلی گال ۱۹۲
- شکل ۶-۳: آنومالی باقی مانده گرانی براساس روش روند سطحی مرتبه ۳، پروفیل های ۱۹۴
- شکل ۶-۴: گرادیان کل نرمال آنومالی های گرانی روی مقطع عرضی عبوری از چاه Y15 با تعداد ۱۹۵
- شکل ۶-۵: تغییرات تعداد جملات هارمونیک نسبت به مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال ۱۹۶
- شکل ۶-۶: گرادیان کل نرمال روی مقطع عرضی عبوری از چاه شماره ۱۵، تعداد جملات ۴۰ ۱۹۷
- شکل ۶-۷: گرادیان کل نرمال آنومالی های گرانی به روش شبه سه بعدی تران (۲۰۰۴) ۱۹۸
- شکل ۶-۸: گرادیان کل نرمال آنومالی های گرانی به روش سه بعدی با محاسبه سری فوریه دو بعدی ۱۹۹
- شکل ۶-۹: نقشه گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی های گرانی برای افق ۳۵۰۰ متری، همراه با ... ۲۰۱
- شکل ۶-۱۰: هیستوگرام فراوانی نسبی چاه های اکتشافی روی نقشه گرادیان کل نرمال سه بعدی ۲۰۲
- شکل ۶-۱۱: ستون چینه شناسی چاه اکتشافی اروند ۲۰۶
- شکل ۶-۱۲: آنومالی گرانی بوگه در منطقه مطالعاتی دشت آبادان، فاصله منحنی ها یک میلی گال... ۲۰۹

- شکل ۶-۱۳: نقشه آنومالی‌های باقی‌مانده باقی‌مانده منطقه دشت آبادان و موقعیت چاه‌های ... ۲۱۱
- شکل ۶-۱۴: مقادیر گرادیان کل نرمال دو بعدی روی پروفیل های ۲۱۱
- شکل ۶-۱۵: نمایش سه بعدی مقادیر گرادیان کل نرمال با تعداد جملات ۲۴ در اعماق مختلف ۲۱۳
- شکل ۶-۱۶: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به حوضه نفتی البرز قم ۲۱۴
- شکل ۶-۱۷: زمین‌شناسی حوضه نفتی البرز- سراج، نیمه شرقی برگرفته از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ آرآن ۲۱۵
- شکل ۶-۱۸: موقعیت گنبد نمکی قم در ساختمان چین خورده البرز ۲۱۹
- شکل ۶-۱۹: آنومالی‌های گرانی در ناحیه مورد مطالعه ۲۲۰
- شکل ۶-۲۰: آنومالی‌های باقی‌مانده گرانی سنجی براساس روش روند سطحی با مرتبه سوم، محل حفر ... ۲۲۱
- شکل ۶-۲۱: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی باقی‌مانده گرانی در حوضه هیدروکربوری البرز قم ... ۲۲۲
- شکل ۶-۲۲: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی باقی‌مانده گرانی، الف) روی پروفیل EF گذرنده از چاه ... ۲۲۵
- شکل ۶-۲۳: الف) نقشه زمین شناسی ... ب) گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی‌های گرانی ۲۲۷
- شکل ۶-۲۴: آنومالی بوگه منطقه اکتشافی قشم ۲۲۹
- شکل ۶-۲۵: آنومالی باقی‌مانده گرانی براساس روش روند سطحی با مرتبه ۴ ۲۳۰
- شکل ۶-۲۶: ستون چینه شناسی در چاه های اکتشافی الف) سو رو ۲ و ب) سرخون ۷ ۲۳۳
- شکل ۶-۲۷: مقاطع گرادیان کل نرمال دو بعدی، عمق تقریبی برای نواحی امید بخش ۲۳۵
- شکل ۶-۲۸: الف) نقشه موقعیت میدین و چاه‌های اکتشافی در منطقه ب) نقشه مقادیر گرادیان کل نرمال ۲۳۸
- شکل ۶-۲۹: موقعیت جغرافیایی حوزه دشت جنوب طیس بر روی نقشه ایران ۲۳۹
- شکل ۶-۳۰: نقشه زمین شناسی منطقه اکتشافی طیس ۲۴۱
- شکل ۶-۳۱: نقشه کنوری آنومالی باقی‌مانده ... ۲۴۴
- شکل ۶-۳۲: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی در راستای پروفیل‌های مختلف ... ۲۴۵
- شکل ۶-۳۳: نقشه کنوری گرادیان کل نرمال سه بعدی ... ۲۴۷
- شکل ۶-۳۴: نقشه زمین شناسی، ب) نقشه آنومالی گرانی، ج) نقشه مناطق پتانسیل بالای ۲۴۸
- شکل ۶-۳۵: آنومالی گرانی گنبد نمکی هومبل ۲۴۹
- شکل ۶-۳۶: الف) اثر گرانی گنبد نمکی هومبل در راستای پروفیل، ب) مقاطع گرادیان کل نرمال دو ... ۲۵۱
- شکل ۶-۳۷: الف) اثر گرانی گنبد نمکی هومبل و ب) نقشه گرادیان کل نرمال سه بعدی ۲۵۳
- شکل ۶-۳۸: نقشه آنومالی گرانی ناشی از وجود توده معدنی موبرون و محل حفر چاه‌های اکتشافی ۲۵۵
- شکل ۶-۳۹: مقطع عرضی از چاه‌های اکتشافی و داده‌های ژئوفیزیکی روی کانسار مسیو سولفاید موبرون ۲۵۶
- شکل ۶-۴۰: الف) آنومالی گرانی در راستای پروفیل A-B در شکل ۶-۳۳، ب) مقطع گرادیان کل ۲۵۷
- شکل ۶-۴۱: نقشه مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی موبرون در عمق‌های ۱۵ تا ۸۵ متری ۲۵۸
- شکل ۶-۴۲: مقطع افقی از ماده معدنی در عمق ۴۵ متری و موقعیت چاه‌های اکتشافی ۲۵۹
- شکل ۶-۴۳: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه ۲۶۱
- شکل ۶-۴۴: نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه ۲۶۲
- شکل ۶-۴۵: نقشه آنومالی باقی‌مانده مغناطیسی (نانوتسلا) به روش روند سطحی درجه ۷ ۲۶۴
- شکل ۶-۴۶: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی مغناطیسی در راستای پروفیل گذرنده از آنومالی‌های E و D ۲۶۴
- شکل ۶-۴۷: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال آنومالی های مغناطیسی کانسار آهن اجت‌آباد ۲۶۵
- شکل ۶-۴۸: الف) نقشه آنومالی مغناطیسی منطقه اجت‌آباد، ب) نقشه کنوری گرادیان کل نرمال سه بعدی ۲۶۸

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

۶۳	فصل سوم: تهیه الگوریتم‌های مورد نیاز جهت مدل سازی دو و سه بعدی
۸۲	جدول ۱-۳: مختصات رئوس چند ضلعی مورد نظر و اختلاف مقدار رئوس مورد نظر نسبت به نقطه محاسبه
۹۲	فصل چهارم: بررسی ویژگی‌های گرادیان کل نرمال دو بعدی و بهینه سازی پارامترهای موثر
۱۰۱	جدول ۱-۴: مقادیر تغییرات گرادیان کل نرمال به ازای تعداد جملات هارمونیک در طول محور Z
۱۲۰	جدول ۲-۴: پارامترهای مورد استفاده در مدل تاقدیسی
۱۲۷	جدول ۳-۴: پارامترهای مورد استفاده در مدل تاقدیسی (شکل ۴-۲۵-ب)
۱۳۰	جدول ۴-۴: پارامترهای مورد استفاده در مدل گنبد نمکی دو بعدی
۱۳۵	جدول ۵-۴: پارامترهای مورد استفاده در مدل تله نفتی گنبد نمکی نشان داده شده در شکل (۴-۳۱)
	فصل پنجم: بسط، توسعه و ارائه روش جدیدی برای گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی
۱۶۴	جدول ۱-۵: مقادیر عددی پارامترهای مدل کره مدفون
۱۶۷	جدول ۲-۵: پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی استوانه قائم
۱۷۰	جدول ۳-۵: پارامترهای مورد استفاده در مدل تاقدیس سه بعدی فاقد هیدروکربور
۱۷۳	جدول ۴-۵: پارامترهای مورد استفاده در مدل تاقدیس سه بعدی حاوی هیدروکربور
۱۷۸	جدول ۵-۵: پارامترهای مورد استفاده در مدل گنبد نمکی شکل (۵-۱۴)
۱۸۰	جدول ۶-۵: پارامترهای مورد استفاده در مدل گنبد نمکی به همراه تله نفتی
۱۸۴	جدول ۷-۵: پارامترهای مورد استفاده در یک مدل ترکیبی حاوی چند جسم آنومال
۱۸۹	فصل ششم: کاربرد روش گرادیان کل نرمال روی داده‌های واقعی
۱۹۶	جدول ۱-۶: تغییرات تعداد جملات هارمونیک نسبت به مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال
۲۰۰	جدول ۲-۶: طبقه بندی مقادیر گرادیان کل نرمال در شش بازه مشخص
۲۰۳	جدول ۳-۶: پارامترهای مورد نیاز برای تعیین حدود اطمینان مقادیر NFG کمینه
۲۵۲	جدول ۴-۶: مقایسه نتایج حاصل از روش‌ها برای تفسیر گنبد نمکی هومبل
۲۶۶	جدول ۵-۶: نتایج حاصل از روش‌های مدل سازی دو بعدی وارون و گرادیان کل نرمال دو بعدی
۲۶۷	جدول ۶-۶: نتایج حاصل از روش‌های مدل سازی دو بعدی وارون و گرادیان کل نرمال سه بعدی

فهرست علائم و اختصارات:

g_{obs} : مقدار گرانی مشاهده‌ای یا اندازه‌گیری

γ_{ϕ} : مقدار گرانی نرمال (تئوری)

ϕ : عرض جغرافیایی

α : امتداد حرکت وسیله نقلیه (سکوی اندازه‌گیری)

V : سرعت حرکت وسیله نقلیه (سکوی اندازه‌گیری)

C_E : تصحیح اتووش

C_{FA} : تصحیح هوای آزاد

C_B : تصحیح بوگه

C_T : تصحیح توپوگرافی

C_i : تصحیح ایزوستازی

Δg_{FA} : آنومالی هوای آزاد

Δg_B : آنومالی بوگه

$\Delta\rho$: اختلاف چگالی جسم آنومال و سنگ‌های اطراف آن

λ : چگالی سطحی یک جسم

G : ثابت جهانی شتاب جاذبه $G = 6.672 \times 10^{-11} N.m^2/kg^2$

Δg : میدان گرانی

B_n : ضرایب فوریه یک بعدی

B_{mn} : ضرایب فوریه دو بعدی

$G(x,z)$: گرادیان کل در صفحه X-Z (Full Gradient: FG)

$G_m(z)$: گرادیان کل متوسط در یک افق در راستای پروفیل

$G_n(x,z)$: گرادیان کل نرمال (Normalized Full Gradient: NFG)

$Q(\mu)$: تابع هموارساز لانکزوس

μ : توان تابع هموارساز لانکزوس

v : عملگر تابع گرادیان کل

N : تعداد جملات هارمونیک

H : فیلتر نوسانی

NTG : گرادیان کامل نرمال (Normalized Total Gradient)

لازم به ذکر است که برای نوشتن کدهای مورد نیاز از محیط نرم افزار Matlab استفاده گردید.

همچنین برای تحلیل، مدل‌سازی و ترسیم نقشه‌ها از نرم‌افزارهای ModelVision، Grav2DC،

Geogrid، Surfer و Excel استفاده شده است.

فصل اول

کلیات و اهداف رساله

به طور کلی ژئوفیزیک علمی است که با استفاده از علوم ریاضی و فیزیک به مطالعه خصوصیات فیزیکی زمین و محیط اطراف آن می‌پردازد. در عمل این مطالعه به صورت محض، کاربردی و اکتشافی دنبال می‌شود. اولین مطالعات ژئوفیزیکی به کشف گیلبرت^۱ در سال ۱۶۰۰ بر می‌گردد که زمین را مانند یک مغناطیس غول پیکر عنوان نمود. اما اولین قدم در کاربرد این علم برای اکتشاف مواد معدنی استفاده از تئودولیت مغناطیسی توسط فون ورده^۲ در سال ۱۸۴۳ برای اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین به منظور اکتشاف توده‌های آهن بود [Telford et al, 1991].

ژئوفیزیک اکتشافی که بیشتر در اکتشاف مواد معدنی و هیدروکربوری مورد استفاده قرار می‌گیرد بسته به نوع خواص فیزیکی مورد استفاده، به روش‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شود. هر یک از این روش‌ها براساس اختلاف فیزیکی یک یا چند پارامتر و ویژگی فیزیکی منطقه مورد هدف (بی‌هنجاری) با سنگ‌های اطراف بنا می‌شوند. به عبارت دیگر، روش‌های لرزه‌ای مبتنی بر خواص کشسانی^۳ سنگ‌ها، روش گرانی سنجی براساس اختلاف چگالی (دانسیته) سنگ‌ها، روش مغناطیس سنجی براساس خاصیت مغناطیسی شدن سنگ‌ها در یک میدان مغناطیسی، روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی براساس اختلاف مقاومت (و یا هدایت) الکتریکی ویژه طبقات زیرسطحی و روش‌های رادیومتری با خاصیت رادیواکتیو سنگ‌های مرتبط استوار می‌باشند.

با کاربرد این روش‌ها، اطلاعاتی از ساختارهای مدفون زمین‌شناسی به دست می‌آید که می‌توان از آن‌ها به صورت مستقیم یا غیر مستقیم در اکتشاف هیدروکربورها [Grant and West, 1965; Berezkin, 1973; Nettelton, 1976; Berezkin, 1978; Mudretsova et al, 1979; McCulloh, 1980; Ferguson et al, 1988; Gupta and Ramani, 1982;] مواد معدنی [Telford et al, 1991]، [Blizkovsky, 1979; Linford, 2006]، باستان‌شناسی [Hammer et al, 1945; Seigel, 1957];

^۱. Gilbert

^۲. Von Werede

^۳.Elastic

بررسی‌های مهندسی و زیست محیطی] Butler, 1984; Silva et al, 2009; Lanz et al, 1998; [
[Hinze, 1990; آب‌های زیرزمینی] Van Overmeeren, 1975 and 1981; Tóth et al, 2004; [
[Völgyesi and Tóth, 2004] و ... استفاده نمود.

در اوایل قرن بیستم، تقاضای روز افزون بازار به فلزات و افزایش بی‌سابقه استفاده از نفت، گاز و مشتقات آن‌ها منجر به توسعه بسیاری از روش‌های ژئوفیزیکی شد. در زمینه ابداع و توسعه دستگاه‌های ژئوفیزیکی نیز از زمان جنگ جهانی دوم پیشرفت‌های بسیاری حاصل شد. از آغاز دهه ۱۹۶۰ با استفاده گسترده از کامپیوتر در پردازش و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی، تحول عظیمی در این شاخه از دانش ایجاد شد [Telford et al, 1991].

آشکارسازی تفاوت خواص فیزیکی مناطق مورد نظر با محیط اطراف یا به عبارتی مناطق بی‌هنجار^۴ (زون‌های آنومال) با سنگ میزبان (زمینه) ابتدا با اندازه‌گیری‌های مختلفی به کمک دستگاه‌های مخصوص در سطح زمین، روی دریا، در هوا یا درون گمانه‌ها صورت می‌گیرد و پس از آن با تجزیه و تحلیل داده‌های برداشت شده مناطق بی‌هنجار و هندسه آنها مشخص می‌گردند. در صورتی که تفاوت قابل توجه خواص فیزیکی بین مناطق آنومال و سنگ درونگیر آن وجود داشته باشد، می‌توان از ژئوفیزیک سطحی برای کشف ماده معدنی مربوطه استفاده کرد.

انتخاب نوع روش یا روش‌های ژئوفیزیکی در عمل به عوامل مختلفی مثل شکل، نوع ماده معدنی (منابع مورد نظر)، عمق قرارگیری و ... بستگی دارد. همچنین روش ژئوفیزیکی ممکن است نشانگر آن باشد که آیا شرایط برای تشکیل یک منبع طبیعی مساعد است یا خیر؟ به عنوان مثال بهره‌گیری از روش مغناطیس‌سنجی در اکتشاف نفت، به عنوان ابزار تعیین ضخامت رسوبات تا سنگ بستر است و مشخص می‌کند که آیا رسوبات به اندازه کافی ضخیم هستند که قابلیت نگهداری مقادیر قابل توجه هیدروکربور را در خود دارا باشند؟ یا اینکه در روش لرزه‌نگاری برای اکتشاف مواد هیدروکربوری،

^۴ . Anomaly zones

هدف شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی است که ممکن است به عنوان محلی برای تجمع نفت و گاز اهمیت داشته باشند.

برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی به جهت اکتشاف منابع هیدروکربوری در مراحل ابتدایی از روش‌های مغناطیسی و گرانی سنجی و در ادامه از روش‌های لرزه‌نگاری استفاده می‌گردد. بخش زیادی از هزینه‌ها در عملیات اکتشاف منابع هیدروکربوری صرف روش اکتشاف لرزه‌ای می‌شود که ناشی از حجم عملیات و دستگاه‌های مورد استفاده می‌باشد. ولی اندازه‌گیری اختلاف چگالی و نیز خاصیت مغناطیسی ساختارهای زیر سطحی در روش‌های غیر مستقیم گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی به نسبت ارزان قیمت، قابل حمل و بدون تخریب محیط زیست می‌باشد. همچنین تجزیه و تحلیل داده‌ها در این حالات سریع‌تر و راحت‌تر می‌باشد [Telford et al, 1991].

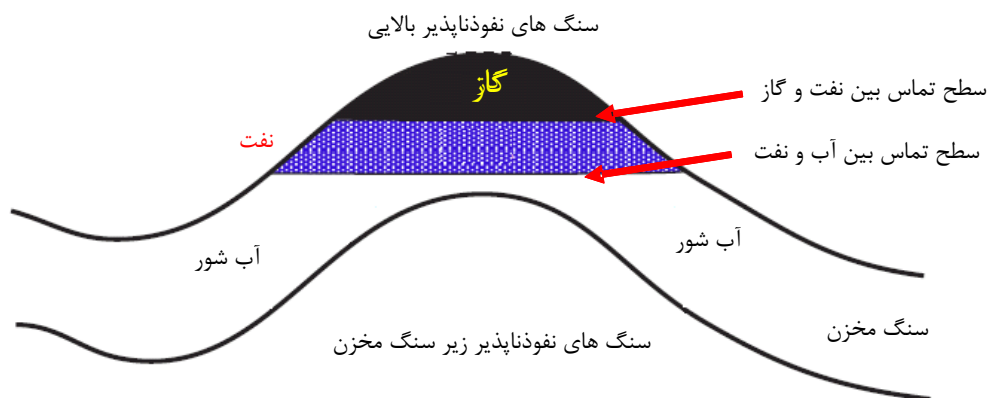
کاربرد مرسوم و عمده روش گرانی سنجی در اکتشاف منابع هیدروکربوری شناخت ساختارهایی است که بتوانند شرایط یک مخزن را داشته باشند. ولی در این رساله سعی می‌شود ضمن معرفی و توسعه روشی کاربردی در تفسیر آنومالی‌های گرانی، دامنه کاربرد روش گرانی از حالت مرسوم افزایش یابد. به عبارت دیگر به کمک این روش علاوه بر شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و تعیین حدود عمق آن‌ها، ساختارهایی که حاوی منابع هیدروکربوری هستند از سایر ساختارها تفکیک و متمایز می‌شوند. بدین ترتیب بر اساس این روش، مناطقی که دارای پتانسیل بالایی از مواد هیدروکربوری باشند، قابل تشخیص است.

از آنجایی که هدف مطالعه حاضر بکارگیری روش گرانی سنجی و ارائه روش خاصی برای تفسیر داده‌های آن جهت شناسایی تله‌ها و مخازن هیدروکربوری می‌باشد، در ادامه پس از شرح مختصر انواع تله‌های نفتی یا مخازن هیدروکربوری، روش گرانی، آنومالی‌های گرانی و روش‌های تفسیر و تفکیک آنومالی‌ها به طور مختصر توضیح داده می‌شود. پس از بررسی مشکلات و محدودیت‌های روش‌های

جداسازی آنومالی‌ها، روش گرادیان کل نرمال^۵ معرفی، و در ادامه با عنایت به پیشینه مطالعاتی آن، سوالات موجود مطرح و اهداف رساله حاضر تبیین می‌شوند.

۱-۲- تله‌های نفتی^۶

تله‌های نفتی یا نفت‌گیرها به یک سازند متخلخل و نفوذپذیری گفته می‌شود که ممکن است در اثر چین خوردگی به صورت یک تله تاقدیسی در آمده (شکل ۱-۱) و بین سنگ‌های نفوذناپذیر قرار گیرد یا در اثر دیاپیریسم به صورت یک تله گنبد نمکی بین سنگ‌های غیرقابل نفوذ واقع شود (شکل ۱-۲). در برخی مواقع در تله‌های نفتی اگر نفت حاوی هیدروکربورهای سبک باشد و شرایط درجه حرارت و فشار وجود یک زون مجزای گازی را فراهم نماید یک پوشش گازی در بخش بالایی نفتگیر تشکیل می‌شود. سطح تماس بین آب و نفت در نفتگیر پایین‌ترین نقطه دسترسی به نفت می‌باشد. منطقه آبدار مخزن بلافاصله در زیر منطقه حاوی هیدروکربور مطابق شکل (۱-۱) قرار می‌گیرد.

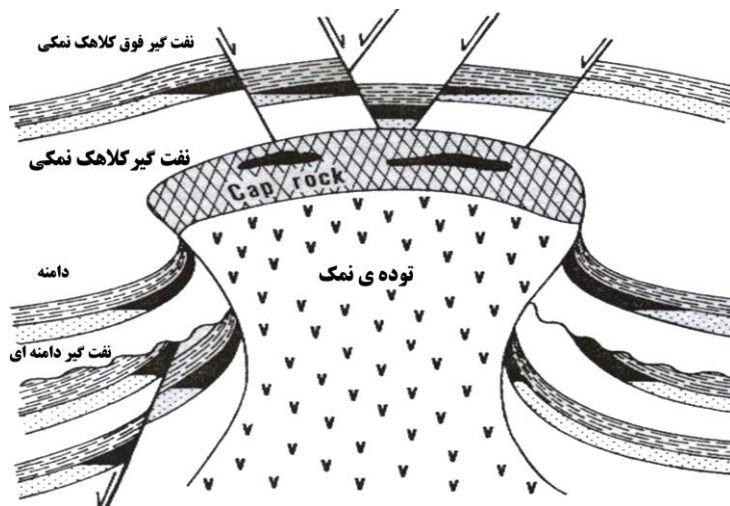


شکل ۱-۱: برش عرضی ایده‌آل از یک نفتگیر تاقدیسی حاوی هیدروکربور که در اثر چین خوردگی یک سازند متخلخل نفوذپذیر بین سنگ‌های نفوذناپذیر تشکیل شده است [Tiab and Donaldson, 2004; Hughes, 1999].

^۵. Normalized Full Gradient (NFG)

^۶. Oiltraps

میدان نفتی ناحیه‌ای است که یک یا چند مخزن حاوی نفت روی یک نفتگیر مانند گنبد نمکی وجود داشته باشد (شکل ۱-۲). اسم میدان نفتی براساس موقعیت جغرافیایی نوع سازند تله نفتی می‌باشد که به همراه جنس سنگ مخزن تشکیل شده بیان می‌شود. به عنوان نمونه میدان نفتی آهکی آسماری یا میدان گازی پارس جنوبی را می‌توان ذکر نمود.



شکل ۱-۲: تله های نفتی موجود در یک میدان نفتی حاصل از دیاپیرسیسم [Hyne, 2001]

گنبد نمکی مطابق (شکل ۱-۲) توده بزرگی از نمک است که اغلب سایر رسوبات رویی خود را قطع کرده و به علت وزن مخصوص کم تر به سمت بالا حرکت نموده و به صورت یک ساختار قارچی شکل در می‌آید. با توجه به ترکیب شیمیایی سنگ نمک و حلالیت بالای آن، مقدار زیادی از آن در حین بالا آمدن در اثر تماس با آب موجود در رسوبات فوقانی حل می‌شود. معمولاً حدود ۵ درصد نمک را انیدرید نامحلول تشکیل می‌دهد. با حل شدن نمک، یک لایه نامحلولی در بخش بالایی گنبد نمکی ایجاد می‌شود که به نام سنگ پوششی معروف است (شکل ۱-۲). ضخامت این بخش پوششی (کلاهک پوششی) از ۳۰ متر تا ۳۰۰ متر متغیر است [Hyne, 2001].

یک گنبد نمکی به تنهایی می تواند حاوی چندین مخزن یا تله نفتی باشد. گنبد بای مرچند^۷ یکی از گنبدهای نمکی در آب های کم عمق خلیج مکزیک در جنوب نیواورلئان^۸ می باشد. این گنبد دارای ۱۲۵ مخزن مولد بوده که حدود ۶۱۵ میلیون بشکه نفت تولید می کند [Hyne, 2001].

یک ساختار تاقدیسی نیز ممکن است که دارای چندین تله نفتی مجزا از هم باشد که به وسیله سنگ های نفوذناپذیر مثل شیل از هم تفکیک شده باشند. همچنین به لحاظ نوع سنگ مخزن، نفتگیرها دارای انواعی از ماسه ای، آهکی و یا دولومیتی می باشند [Tiab and Donaldson, 2004].

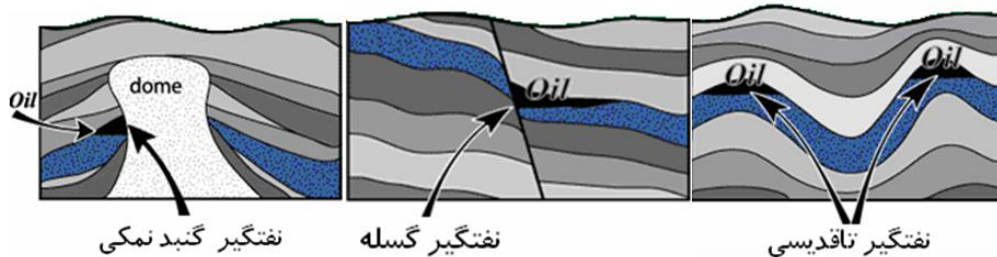
به طور کلی به لحاظ منشا تشکیل، دو نوع نفتگیر ساختاری و چینه ای وجود دارد. نفتگیرهای ساختمانی با دگرشکلی سنگ مخزن به صورت یک چین بوجود می آیند. نفتگیرهای چینه ای به دو صورت اولیه و ثانویه طبقه بندی می شوند که نوع اولیه آن با نهشته شدن رسوب و تشکیل سنگ مخزن مانند یک ماسه سنگ متخلخل یا یک آهک ریفی که توسط سنگ نفوذناپذیر شیلی احاطه شده باشد. نوع ثانویه این گروه در اثر ناپیوستگی شیب دار یا دگرشیبی به وجود می آیند. نفتگیرهایی هم وجود دارد که ترکیبی از دو گروه نفتگیرهای ساختاری و چینه ای می باشند [Hyne, 2001].

۱-۲-۱- تله های ساختاری

تله های ساختاری در اثر فرآیندهای تکتونیکی طبقات رسوبی تشکیل شده اند. این گروه از نفتگیرها ممکن است به صورت ساختارهای زمین شناسی مجزا در اثر چین خوردگی و گسله شدگی طبقات رسوبی پدید آیند. این تله ها را می توان به سه گروه تله های تاقدیسی شکل، تله های نفتی گسله که در اثر حرکات تکتونیکی پدید می آیند و تله دیاپیری یا گنبد نمکی که در اثر نفوذ دیاپیرهای نمکی یا گلی به درون سنگ های مجاور و رویی ایجاد می شوند، تقسیم نمود (شکل ۱-۳).

^۷ . Bay Marchand

^۸ . New Orlean



شکل ۱-۳: انواع تله‌های نفتی ساختمانی [Hyne, 2001]

۱-۲-۲- تله‌های چینه‌ای

تله‌های چینه‌ای با تغییر رخساره‌های سنگی سازندهای متخلخل و نفوذپذیری مثل توده‌های ماسه‌ای عدسی یا بالشتکی شکل توسط شیل‌های نفوذناپذیر پدید می‌آیند. فرآیندهای تشکیل این گروه که نتیجه تغییرات محیط رسوبگذاری می‌باشد، پیچیده‌تر از نوع ساختاری می‌باشند. علاوه بر موارد مذکور، تله‌های چینه‌ای همچنین در اثر ناپیوستگی‌های رسوبگذاری در یک حوضه رسوبی پدید می‌آیند [Hyne, 2001]. باتوجه به اینکه این گروه از تله‌ها جزء بحث رساله نمی‌باشد به همین مقدار بسنده می‌شود.

۱-۳-۱- روش گرانی سنجی

در روش گرانی سنجی، همانند روش‌های مغناطیس سنجی، رادیومتری و برخی روش‌های الکتریکی، میدان پتانسیل طبیعی زمین اندازه‌گیری می‌شود. اولین بار گالیله^۹ تاثیر میدان گرانی زمین بر روی اجسام با وزن‌های مختلف را کشف نمود. حدود یک قرن بعد پس از او نیوتن^{۱۰} قوانین عمومی جاذبه زمین را ارائه نمود که مبنای روش گرانی سنجی قرار گرفت [Reynolds, 1997].

پیر بوگه^{۱۱} در طی سال‌های ۱۷۳۵ تا ۱۷۴۵ بسیاری از روابط اساسی گرانی سنجی از جمله تغییرات مقدار گرانی نسبت به تغییر ارتفاع، عرض جغرافیایی و تخته بوگه را به دست آورد و در سال

^۹ . Galileo

^{۱۰} . Newton

^{۱۱} . Pierre Bouguer

۱۸۱۷ اولین دستگاه اندازه‌گیری میدان گرانی؛ آونگ مرکب؛ توسط کاپیتان هنری کیت^{۱۲} ابداع شد. اولین برداشت گرانی سنجی توسط لورند اوتوش^{۱۳} روی دریاچه یخی والاتون انجام شد و به تدریج این روش مطالعاتی گسترش یافت. در اکتشافات مواد هیدروکربوری روش گرانی سنجی به همراه روش مغناطیس سنجی به عنوان یک ابزار شناسایی کاربرد دارد. اکتشاف ژئوفیزیکی نفت در اوایل دهه ۱۹۲۰ با اندازه‌گیری‌های گرانی سنجی روی گنبد‌های نمکی نواحی ساحلی تگزاس و لویزیانا^{۱۴} آغاز و در سال ۱۹۲۲ منجر به کشف میدان نفتی اسپین دلتا^{۱۵} شد. بزرگترین میدان نفتی جهان، در غوار^{۱۶} عربستان سعودی در اثر پیمایش گرانی سنجی در سال ۱۹۴۸ کشف گردید. این میدان نفتی توسط ماسه‌های بادی پوشیده شده بود ولی یک آنومالی بیشینه گرانی بزرگی آن را نشان داد [Hyne, 2001].

در روش گرانی سنجی اندازه‌گیری تغییرات میدان گرانی زمین در نقاط مختلف آن انجام می‌شود. با توجه به بستگی میدان گرانی و چگالی توده‌های مختلف زیرسطحی، با ثبت میدان گرانی و انجام تصحیحات لازم می‌توان اجسام آنومال با چگالی بیشتر یا کمتر از سنگ‌های درونگیر را کشف نمود. داده‌های گرانی سنجی اطلاعاتی درباره چگالی سنگ‌های زیرسطحی فراهم می‌آورد. به دلیل وجود دامنه وسیعی از چگالی در میان انواع سنگ‌ها، مفسر داده‌ها می‌تواند درباره توزیع طبقات زیرسطحی که ممکن است در تله انداختن نفت و گاز مطلوب باشد، تفسیر لازم را ارائه نماید.

اندازه‌گیری دقیق گرانی این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان تفسیر مناسبی از توزیع چگالی در زیر سطح زمین به دست آورد. یک توده سنگی با جرم کمتر مانند گنبد نمکی یا یک توده ریفی متخلخل آهکی به علت میزان چگالی کمتر قابل تشخیص از سنگ‌های اطراف می‌باشد. همچنین یک توده سنگی با چگالی بیشتر مثل پی‌سنگ در مغزه گنبد نمکی و یا یک تاقدیس با افزایش میزان گرانی

^{۱۲}. Henry Kater

^{۱۳}. Baron Loránd von Eötvös, 1901

^{۱۴}. **Louisiana**

^{۱۵}. SpineDelta

^{۱۶}. Ghawar

نسبت به مقدار گرانی نرمال ناحیه شناخته می‌شود. مقدار گرانی ثبت شده توسط دستگاه‌های خاص بر حسب گال (یک گال مساوی یک سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است) به افتخار آقای گالیلو خوانده می‌شود که به علت کوچک بودن مقدار تغییرات آن، در عمل از واحد کوچک‌تری به نام میلی‌گال استفاده می‌شود. در حالت ایده‌آل برای اکتشاف نفت و گاز، دقت اندازه‌گیری داده‌های گرانی بایستی ۰/۰۱ میلی‌گال باشد، ولی در عمل دقت اندازه‌گیری مقادیر گرانی در پیمایش‌ها با چنین دقتی مشکل می‌باشد [McCulloh, 1980].

۱-۴- آنومالی گرانی

آنومالی گرانی، اختلاف بین مقدار گرانی واقعی زمین و مقدار گرانی نرمال برای یک زمین همگن و ایده‌آل در یک ایستگاه مشخص در سطح ژئوئید می‌باشد [Li and Gotze, 2001]. مقدار گرانی به عواملی نظیر عرض جغرافیایی نقطه مشاهده‌ای که در محاسبه مقدار نرمال گرانی در فرمول منظور می‌شود، ارتفاع h ، فاصله قائم بین سطح آب‌های آزاد و نقطه مشاهده‌ای، که دامنه تغییرات آن از نقطه مشاهده‌ای تا مرکز زمین می‌باشد و توزیع جرم زیر سطحی بستگی دارد [Blakely, 1995]. مقدار گرانی نرمال که به صورت تابعی از عرض جغرافیایی برای یک مدل زمین همگن است، براساس فرمول بین‌المللی GRS80 مقدار گرانی بیضوی نرمال سال به صورت معادله زیر بر حسب میلی‌گال محاسبه می‌شود [Heiskanen and Moritz, 1967; Moritz, 1984; Hilst, 2004]:

$$\gamma_{\varphi} = 978032.7(1 + 0.0053024 \sin^2 \varphi - 0.0000058 \sin^2 2\varphi) \quad (1-1)$$

که در آن:

γ_{φ} ؛ مقدار گرانی نرمال (تئوری) در عرض جغرافیایی نقطه مشاهده‌ای بر حسب میلی‌گال و

φ ؛ عرض جغرافیایی نقطه مشاهده‌ای بر حسب درجه است.

از آن جا که مقدار آنومالی گرانی حاصل از اندازه‌گیری تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله ارتفاع ایستگاه، عرض جغرافیایی، توپوگرافی منطقه و... هستند، بنابراین بایستی اثرات این عوامل را با اعمال تصحیحات مختلف (بر حسب نیاز) بر روی داده‌ها حذف نمود یا به حداقل ممکن کاهش داد. برای

رسیدن به این هدف برای توصیف تصحیحات مناسب است که هر کدام از آن‌ها به عنوان بخشی از گرانی مشاهده‌ای در نظر گرفته شود. در رابطه (۲-۱) مجموعه مولفه‌هایی که در گرانی مشاهده‌ای موثر هستند به همراه تصحیح مورد نظر آن بیان شده است [Blakely, 1995].

گرانی مشاهده‌ای = شتاب ناشی از بیضوی مرجع (گرانی نرمال) + اثر ارتفاع بالای سطح دریا (هوای آزاد) + اثر جرم نرمال بالای سطح دریا (بوگه و توپوگرافی) + اثر جرم‌های ناشی از بارهای توپوگرافی (ایزوستازی) + اثر حرکت (تصحیح اتووش) + تغییرات وابسته به زمان (جزر و مد ناشی از اثر خورشید و ماه) + اثر تغییرات چگالی محلی (زمین‌شناسی) (۲-۱)

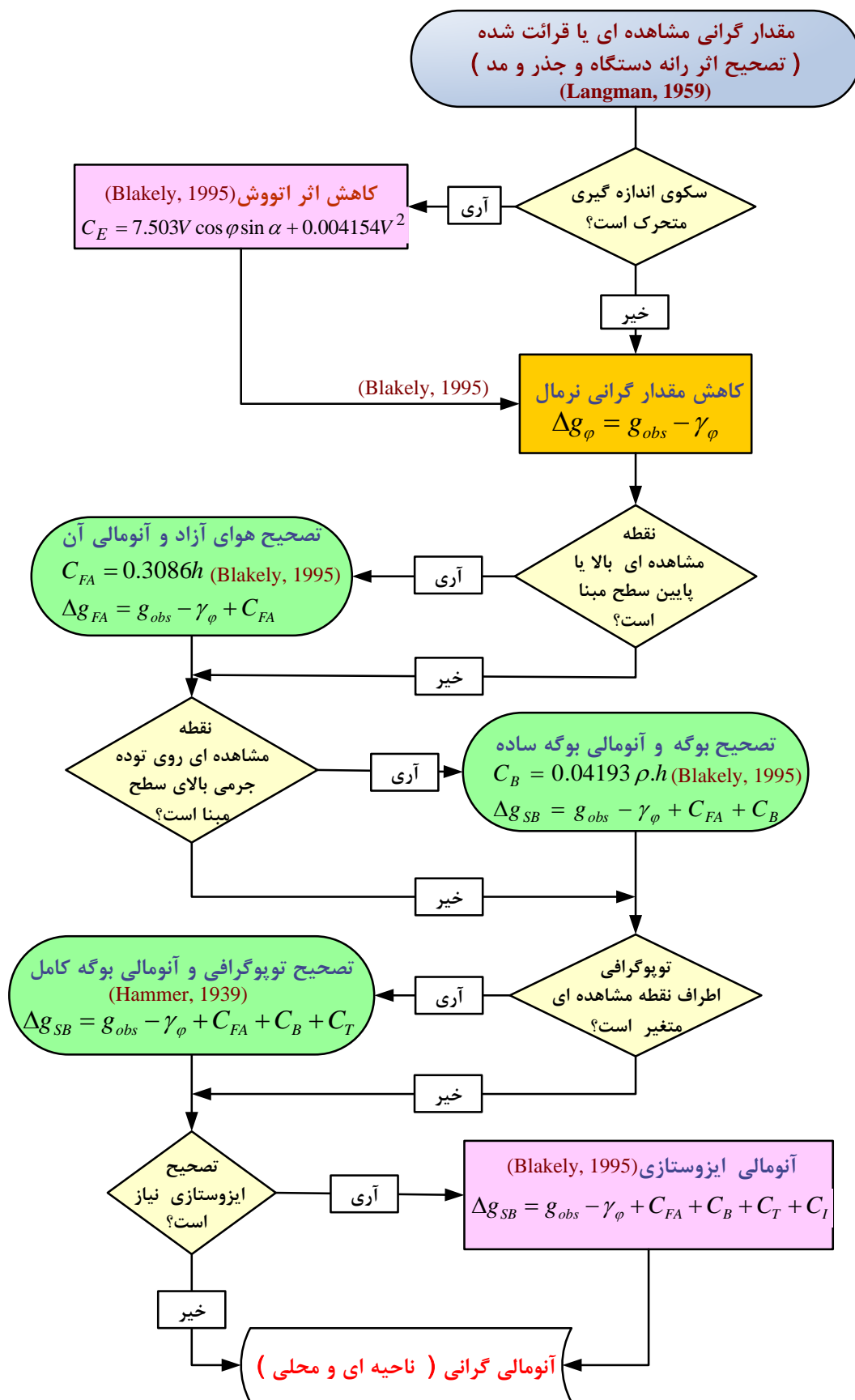
هدف نهایی در گرانی سنجی تفکیک مقدار کمیت آخر در رابطه (۲-۱) از سایر بخش‌ها می‌باشد که ناشی از اثر اختلاف چگالی محلی طبقات در اعماق مختلف بوده و نسبت به سایر پارامترها بخش کوچکی از گرانی مشاهده‌ای است. مقدار گرانی در سطح زمین تقریباً $9/8$ متر بر مجذور ثانیه (980 گال) می‌باشد، در حالی که آنومالی‌های ناشی از تغییرات چگالی به طور مشخص کمتر از 100 میلی-گال، کمتر از $0/01$ درصد مقدار کل گرانی مشاهده‌ای است. گرانی‌سنج‌های سیار قابلیت اندازه‌گیری گرانی تا حدود $10^{-7} \times 1$ متر بر مجذور ثانیه یعنی حدود 10 میکروگال ($0/01$ میلی‌گال) را دارند [Lacoste, 1973; Telford et al, 1991; Ander et al, 1999]، ولی تصحیحات گوناگون بر روی گرانی مشاهده‌ای با فرضیات پیچیده، توانایی ما را در یافتن مقدار مولفه زمین‌شناسی داده‌های مشاهده‌ای محدود می‌کند. با توجه به عوامل موثر در اندازه‌گیری، به ویژه جرم توده‌های اطراف نقطه اندازه‌گیری، اختلاف بین مولفه زمین‌شناسی گرانی از سایر مولفه‌ها، از $0/1$ تا 5 میلی‌گال تغییر می‌کند [Blakely, 1995].

به منظور اکتشاف تله‌های (ساختارهای) هیدروکربوری به روش گرانی سنجی، اندازه‌گیری و قرائت مقادیر عددی گرانی روی هر یک از نقاط شبکه در سطح زمین لازم می‌باشد. سپس روی مقادیر مشاهده‌ای، براساس شکل (۴-۱)، تصحیحات لازم بنا به نیاز انجام گرفته و سپس نقشه مقادیر آنومالی بوگه به صورت مقادیر کنتوری رسم می‌شود. این مقادیر گرانی نشان دهنده تغییرات زمین‌شناسی منطقه که منتج از اختلاف چگالی ناشی از آنومالی‌های ناحیه‌ای^{۱۷} و محلی^{۱۸} (باقی‌مانده^{۱۹}) می‌باشند.

^{۱۷}. Regional anomaly

¹⁸. Local anomalies

¹⁹. Residual anomalies



شکل ۴-۱: فلوچارت تصحیح مقادیر گرانی مشاهده ای در ایستگاه اندازه گیری

چون هدف اصلی شناسایی تغییرات حاصل از آنومالی‌های باقی‌مانده در محدوده‌ی اندازه‌گیری گرانی است، بنابراین به نحوی بایستی مقادیر ناحیه‌ای که بیانگر تاثیرات زمینه روی منحنی‌های آنومالی است حذف و یا اثر آن حداقل شود. مقادیر غیرعادی گرانی بر روی نقشه کنترولی گرانی باقی مانده مبین وجود اجسام آنومال (بی‌هنجار) است.

۱-۵- تفکیک آنومالی گرانی

اثر پدیده‌های زمین‌شناسی زیادی در مقدار گرانی بوگه جمع شده است. هر الگوی دیده شده در نقشه گرانی بوگه مجموع گرانی‌های منابع محلی و منابع ناحیه‌ای وسیع‌تر یا دورتر است. بنابراین در هیچ جا نمی‌توان آنومالی از یک منبع را اندازه گرفت به طوری که با آنومالی‌هایی ناشی از منابع دیگر پوشیده نشده باشد. مسلماً در برخی مناطق اثر گرانی ناشی از یک منبع آنومال آن قدر زیاد است که باعث تضعیف اثرات دیگر آنومالی‌ها می‌شود. به همین سبب در غالب موارد آنومالی‌های اهداف مورد توجه، به وسیله آنومالی‌های ناحیه‌ای پنهان می‌شود.

داده‌های برداشت شده در یک منطقه، طیفی از آنومالی‌های سطحی یا محلی تا آنومالی‌های عمیق یا ناحیه‌ای را شامل می‌گردد. آنومالی‌های ناحیه‌ای دارای فرکانس‌های فضایی پایین و طول موج بلند می‌باشند در حالی که آنومالی‌های محلی که مربوط به اجسام نزدیک سطح زمین می‌باشند دارای

فرکانس فضایی بالا و طول موج کوتاه هستند [Nettleton, 1954; Li and Oldenburg, 1998]

در کارهای اکتشافی برای تفکیک آنومالی‌های باقی‌مانده، آنومالی‌های ناحیه‌ای از آنومالی‌های مشاهده‌ای کم می‌گردد. اغلب تفسیر و مدل‌سازی عددی برای داده‌های میدان باقی‌مانده انجام می‌شود و اعتبار تفسیر به درجه جداسازی آنومالی‌های باقی‌مانده بستگی دارد. بنابراین لازم است این دو دسته آنومالی‌ها به طریقی از یکدیگر تفکیک شوند تا بدین ترتیب آنومالی‌های مورد نظر آشکارسازی شوند.

این کار با روش‌های مختلف از جمله روش گرافیکی، شبکه‌بندی یا عددی کردن داده‌ها، هموار کردن به روش میانگین‌گیری^{۲۰}، میانگین‌گیری وزنی، تفکیک به روش طول موجی^{۲۱}، روش گریفین^{۲۲}، روش روند سطحی^{۲۳}، روش مشتق قائم^{۲۴}، گسترش میدان گرانی به سمت بالا^{۲۵} و گسترش میدان گرانی به سمت پایین^{۲۶} و گرادیان افقی^{۲۷} انجام می‌پذیرد [Reynolds, 1997; Telford et al, 1991].

با توجه به اهمیت روش‌های گسترش به سمت پایین و مشتق قائم و گرادیان افقی و کاربرد آن‌ها در روش گرادیان کل نرمال، در ادامه بحث تنها این روش‌ها توضیح داده می‌شوند و سایر روش‌ها در پیوست الف شرح داده شده است.

۱-۵-۱- روش گسترش میدان به سمت پایین

در روش تحلیلی گسترش میدان به سمت پایین، داده‌های گرانی از سطح برداشت بر روی سطوح تراز پایین‌تر از سطح برداشت داده‌ها تصویر می‌شوند. برای اعمال این روش ابتدا مقادیر آنومالی بوگه برای رئوس شبکه‌های منظم مربعی محاسبه می‌گردند. سپس دوایری با شعاع‌های مختلف به مرکز رئوس شبکه رسم شده و مقادیر میدان گرانی گسترش یافته به سمت پایین با فرض سیستم مختصات قطبی با فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند [Bhattacharyya, 1972; Robinson and Coruh, 1988].

$$g(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} \int_0^{2\pi} \frac{g(r, \theta) z r dr d\theta}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3-1)$$

که در آن $x = r \cos \theta$ و $y = r \sin \theta$ است.

اگر $\bar{g}(r)$ به عنوان مقدار میانگین $g(r, \theta)$ در اطراف دوایر به شعاع r و به صورت زیر تعریف شود:

20 . Average

21 . Wave length

22 . Griffin method

23 . Trend surface method

24 . Vertical derivative method

25 . Upward continuation method

26 . Downward continuation method

27 . Horizontally gradient

$$\bar{g}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g(r, \theta) d\theta \quad (4-1)$$

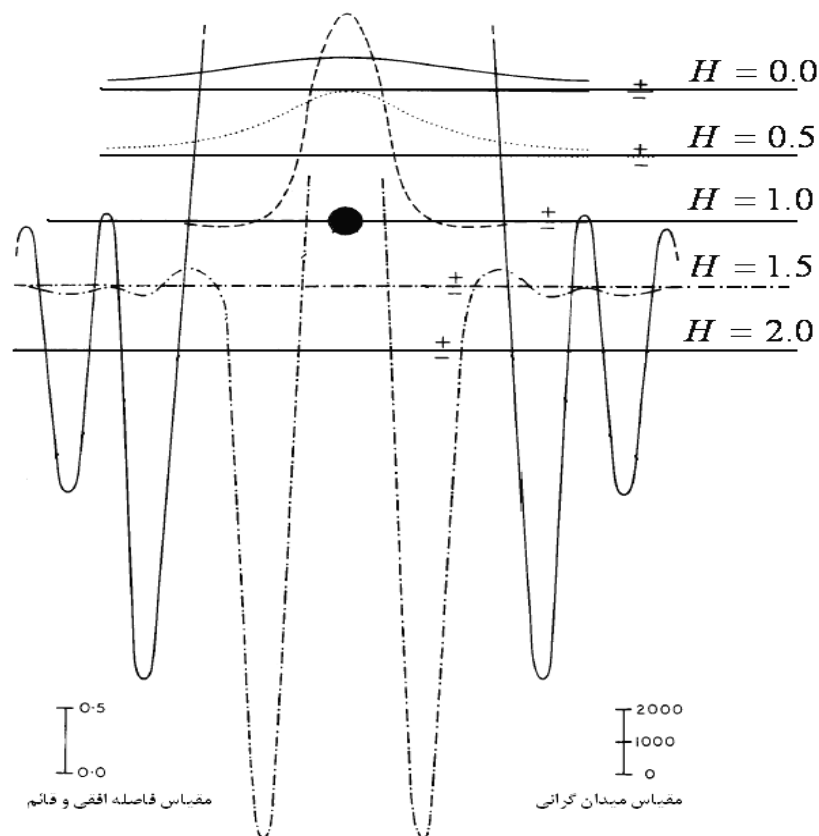
آنگاه مقدار میدان گسترش یافته به سمت پایین (با فرض مثبت بودن Z به طرف پایین) به صورت معادله زیر خواهد شد:

$$g(x, y, z) = \int_0^{\infty} \frac{\bar{g}(r).z.rdr}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \quad (5-1)$$

اگرچه نقشه‌های تهیه شده از مقادیر گسترش یافته میدان گرانی به سمت پایین اثرات توام با مولفه‌های باقی‌مانده و مولفه ناحیه‌ای مربوط به ساختارهای عمیق را شامل می‌شود ولی ساختارها یا توده‌های واقع در اعماق کمتر به خوبی و با یک تیزی خاصی در این نقشه‌ها قابل تعقیب هستند [مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۵]. فیلتر مذکور یک ابزار توانمند برای مطالعه آنومالی‌های نزدیک سطح زمین است، اما مطابق شکل (۵-۱) اثر بخشی این روش به چگونگی رفع نوفه‌های احتمالی در عبور گسترش میدان از مرکز جسم آنومال به طرف پایین است که یکسری بی‌ثباتی در نتایج را به همراه دارد [Roy, 1966; Cooper, 2004].

۱-۵-۲- روش مشتق قائم

این روش به عنوان یک ابزار مناسب جهت آشکارسازی مولفه‌های میدان پتانسیل با طول موج کوتاه‌تر مربوط به آنومالی‌های کم عمق می‌باشد [Robinson and Coruh, 1988; Ager, 1982]. بدین معنی که روش مشتق توانایی آشکارسازی مؤلفه‌های با عدد موج بلندتر میدان پتانسیل را دارد [Gerkens, 1989] (عدد موج‌ها مشابه فضایی فرکانس هستند که برحسب رادیان بر ثانیه بیان شده و با طول موج نسبت عکس دارند و واحد آن رادیان یا سیکل بر کیلومتر می‌باشد در صورتی که متغیر طول بر حسب کیلومتر اندازه‌گیری شده باشد. عدد موج‌ها به ویژه در روش سری یا تبدیل فوریه کاربرد دارد؛ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$). عمل جداسازی اثرات محلی از ناحیه‌ای با تعیین مشتق‌های g نسبت به عمق انجام می‌شود [Gupta and Ramani, 1982; Boschetti, 2005].



شکل ۱-۵: رفتار میدان گسترش یافته گرانی برای یک منبع خطی طویل همگن در عمق یک کیلومتر. مقادیر میدان گسترش یافته مضربی از $2G.m \times 10^3$ می باشد که G ثابت شتاب جاذبه زمین و m جرم واحد طول منبع می باشد مقایسه پروفیل گرانی در سطح اندازه گیری و مقادیر نوفه ای که در اثر گسترش میدان بیش از یک کیلومتر پدید می آید در شکل به وضوح دیده می شود [Roy, 1966].

مشتق اول قائم میدان گرانی در یک نقطه مشخص در جهت قائم عبارت است:

$$g = G \frac{m}{r^2} \Rightarrow \frac{\partial g}{\partial z} = -\frac{\partial g}{\partial r} = \frac{2}{r} g \quad (۶-۱)$$

مشتق دوم قائم^{۲۸} به طور معمول در آشکارسازی آنومالی‌های محلی که توسط آنومالی‌های ناحیه-ای محو شده‌اند و نیز برای تشخیص لبه‌های اجسام آنومال، بکار می‌رود [Boschetti, 2005]. یک منبع زمین‌شناسی کم عمق (گنبد نمکی) که از اطراف به وسیله ساختارهای دیگر محدود شده به طور مشخص دارای آنومالی با انحنای بیشتر از میدان ناحیه‌ای (ناشی از منابع عمیق) می‌باشد که روی هم منطبق شده‌اند. مشتق دوم، آنومالی‌های محلی را نسبت به آنومالی ناحیه‌ای بزرگتر نشان

^{۲۸}. Second vertical derivative(SVD)

می‌دهد. مشتق قائم همانند فیلترهای گذر بالا می‌باشند که آنومالی‌های ناشی از منابع کوچک را آشکار می‌کنند در حالی که توسط آنومالی‌های ناحیه‌ای طول موج بلندتر متاثر شده‌اند [Dobrin and Savit, 1988]. فرمول محاسبه مشتق دوم قائم به صورت زیر است:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = \frac{6}{r^2} g, \quad r^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (Y-1)$$

براساس معادلات بالا می‌توان دید که مشتق‌های اول و دوم اثرات جرم توده‌های آنومال کم عمق به عمیق را به وسیله ضرایب $\frac{6}{r^2}, \frac{2}{r}$ آشکار می‌کند. پتانسیل حاصل از توده آنومالی را می‌توان به صورت زیر نوشت [Telford et al, 1991]:

$$U = G \int_x \int_y \int_z \frac{\rho}{r} dx dy dz \quad (8-1)$$

چون g شتاب جاذبه جهت محور Z (جهت مثبت به طرف پایین) است با فرض ثابت گرفتن مقدار چگالی (دانسیته ρ) خواهیم داشت:

$$g = \frac{-\partial U}{\partial z} = G\rho \int_x \int_y \int_z \frac{z}{r^3} dx dy dz \quad (9-1)$$

براساس معادله (9-1) مشتق اول قائم g به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial g}{\partial z} = \frac{-\partial^2 U}{\partial z^2} = -U_{zz} = -G\rho \int_x \int_y \int_z \left(\frac{1}{r^3} - \frac{3z^2}{r^5} \right) dx dy dz \quad (10-1)$$

اغلب اندازه‌گیری داده‌های گرانی، میزان گرادیان قائم را ارائه می‌دهد. مشتق دوم قائم در تفسیر گرانی برای گسترش به سمت بالا و پایین و برای آشکارسازی آنومالی‌های کوچک، استفاده می‌شود. این مشتق به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = -U_{zzz} = 3G\rho \int_x \int_y \int_z \left(\frac{5z^3}{r^7} - \frac{3z}{r^5} \right) dx dy dz \quad (11-1)$$

در عمل برای محاسبه مشتق دوم قائم از روش‌های تحلیلی استفاده می‌شود. در این روش‌ها پس از محاسبه مقدار گرانی بر روی رئوس شبکه مربعی چند دایره متحدالمركز با شعاع‌های مختلف بکارگرفته می‌شود و به اثر هر دایره یک ضریب وزنی داده می‌شود [Telford et al, 1991].

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = \frac{c}{s^2} (k_0 g_0 + k_1 \bar{g}_1 + k_2 \bar{g}_2 + \dots) \quad (12-1)$$

که در آن \bar{g}_i مقدار متوسط گرانی بر روی هر یک از دواير به شعاع r_i ، ضرایب وزنی $(\sum_{i=0}^n k_i = 0)$

و $g(0)$ مقدار آنومالی بوگه بر روی مرکز دواير می‌باشند. در معادله فوق C یک ضریب عددی و S فواصل شبکه‌بندی داده‌ها است. به عنوان مثال برای یک شبکه مربعی به ضلع S و دواير متحدالمرکز به شعاع‌های s ، $s\sqrt{2}$ ، $s\sqrt{5}$ معادله (12-1) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = 2(3g_0 - 4\bar{g}_1 + \bar{g}_2) / s^2 \quad (13-1)$$

۱-۵-۳- گرادیان افقی

با مشتق‌گیری از تابع پتانسیل و شتاب جاذبه g در راستای محور X می‌توان مؤلفه گرادیان افقی گرانی (U_{xz}) را محاسبه کرد. به طور مشابه می‌توان مؤلفه افقی جهت Y را به صورت (U_{yz}) نمایش داد [Telford, et al, 1991].

$$U_{xz} = \frac{-\partial g}{\partial x} = 3G\rho \iiint_{x,y,z} \left(\frac{xz}{r^5} \right) dx dy dz \quad (14-1)$$

گرادیان افقی را می‌توان از داده‌های پروفیل‌های گرانی و یا نقشه کنتوری به صورت نرخ تغییر g با جابجایی افقی به دست آورد. گرادیان افقی در اکتشاف ساختارهای زیرسطحی زمین‌شناسی و همچنین تعیین لبه‌ها، گوشه‌ها و عمق توده‌ها یک ابزار مفید و سودمند است [Stanley, 1977; Thyssen-Bornemlsza and Stackler, 1962].

۱-۶- بررسی مزایا و معایب روش‌های تفکیک آنومالی‌های گرانی

هر یک از روش‌های مورد اشاره جهت تفکیک آنومالی‌های محلی از ناحیه‌ای قابل استفاده هستند، ولی دارای نواقصی بوده که کاربرد آن‌ها را محدود می‌نماید. اگر چه روش‌های تحلیلی که بیشتر بر اصول هموارسازی استوار هستند با استفاده از ضرایب وزنی ارائه شده می‌توانند آنومالی‌ها را نسبتاً

تفکیک نمایند ولی یکی از معایب اصلی کلیه این روش‌ها حذف یک سری از داده‌های اصلی در چهار گوشه نقشه آنومالی بوگه می‌باشد که با افزایش شعاع دوایر استفاده شده، اطلاعات بیشتری حذف خواهد شد. این مسأله یکی از مهم‌ترین اشکالات این روش‌های تحلیلی در بعد زمانی می‌باشد [Telford et al, 1991]. همچنین ضرایب وزنی استفاده شده در روش‌های تحلیلی ممکن است در هر منطقه‌ای صدق نکنند. اما با تبدیل آنومالی‌های گرانی به مولفه‌های مختلف آن به صورت سری فوریه و یا تبدیلات فوریه از بعد زمان به بعد فرکانس می‌توان ضرایب وزنی مناسبی برای هر منطقه‌ای تولید نمود که در این صورت برخی از اشکالات روش‌های مذکور بر طرف می‌شود [Robinson and Coruh, 1988].

در روش‌های هموارسازی گرافیکی (پیوست الف-۱) تعیین محل دقیق پروفیل یا منحنی گذرنده آنومالی ناحیه‌ای کیفی بوده و روش مشخصی وجود ندارد. بنابراین هیچ دو مفسری قضاوت یکسانی در این باره نخواهند داشت. از طرفی تفکیک آنومالی‌های محلی و ناحیه‌ای به این روش، وقت‌گیر بوده و برای تحلیل مناطق بزرگ با ساختارهای پیچیده گرانی بوگه غیرعملی است [Robinson and Coruh, 1988].

یکی از انعطاف پذیرترین روش‌های تحلیلی برای تعیین اثرات ناحیه‌ای، روش روند سطحی است (پیوست الف-۲). در این روش، میدان ناحیه‌ای از مقادیر مشاهده‌ای بوسیله روش کمترین مربعات یا روش اورتونرمال تقریب زده می‌شود [Oldham and Sutherland, 1955]. این روش براساس محاسبه سطحی (به روش ریاضی) استوار است که بهترین تطابق را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای داشته باشد [Unwin, 1978; Wren, 1973]. پیچیدگی معادله ریاضی سطح مورد نظر به روند موجود در داده‌های مشاهده‌ای بستگی دارد و تعیین دقیق این درجه با توجه عدم شناخت کامل ساختارهای زیر سطحی سبب مشکلاتی در تعیین معادله سطح و تفسیر می‌گردد [Sarma and Selvaraj, 1990; Draper and Smith, 1981].

روش‌های تخمین مقدار آنومالی ناحیه‌ای، براساس متوسط وزنی مقادیر نقاط اطراف نقطه اندازه‌گیری (پیوست الف-۳)، به لحاظ عددی بودن و پردازش سریعتر آن‌ها با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری سودمندتر هستند. البته این روش‌ها زمانی کاملاً مفید می‌باشند که شبکه اندازه‌گیری منظم و با فواصل مساوی باشند ولی در عمل همیشه چنین حالتی امکان پذیر نبوده و لازم است که مقادیر گرانی بوگه در یک شبکه منظمی از نقاط، قبل از جداسازی آنومالی‌های محلی محاسبه شود. به علت این که در حاشیه‌های نقشه امکان محاسبه آنومالی ناحیه‌ای وجود ندارد بدین جهت این امر از محدودیت‌های این روش‌ها می‌باشد [Telford et al, 1991; Nettleton; 1954]

در تفکیک آنومالی‌ها به روش طول موجی با استفاده از توابع متناوب به شناسایی الگوی تغییرات منطقه‌ای پرداخته می‌شود (پیوست الف-۴). در این روش مشکل اصلی یافتن توابع متناوب مناسب می‌باشد و در این راستا هیچ کدام از عملیات فیلتر کردن به طور کامل آنومالی‌های ارزشمند را از انواع نوفه تفکیک نمی‌نماید، ولی سبب بارز شدن آنومالی‌های محلی می‌گردند [Zurflueh, 1967; Ulrych, 1968].

روش مشتق اول قائم به عنوان یک ابزار مناسب جهت آشکارسازی مولفه‌های میدان پتانسیل با طول موج کوتاه‌تر مربوط به آنومالی‌های کم عمق می‌باشد. و مشتق دوم قائم به طور معمول در آشکارسازی آنومالی‌های محلی که توسط آنومالی‌های ناحیه‌ای محو شده‌اند و نیز برای تشخیص لبه‌های اجسام آنومال، بکار می‌رود. مشتق دوم، آنومالی‌های محلی را نسبت به آنومالی ناحیه‌ای بزرگتر نشان می‌دهد. مشتق قائم همانند فیلترهای گذر بالا^{۲۹} می‌باشند که آنومالی‌های ناشی از منابع کوچک را آشکار می‌کنند در حالی که توسط آنومالی‌های ناحیه‌ای طول موج بلندتر نیز متاثر می‌شوند [Gupta and Ramani, 1982; Dobrin and Savit, 1988; Gerken, 1989; Kligele et al, 1991].

یکی دیگر از روش‌های تفکیک آنومالی میدان‌های پتانسیل، روش گسترش میدان به سمت بالا می‌باشد (پیوست الف-۵)، که سبب حذف تأثیرات سطحی و تقویت اثرات عمیق می‌گردند. روش

^{۲۹}. High pass filter

گسترش به سمت بالا اثر آنومالی ناحیه‌ای را به صورت قابل ملاحظه‌ای برجسته می‌سازد و این در حالی است که این روش در واقع آنومالی محلی را از ناحیه‌ای جدا نمی‌کند. بلکه آنها را به گونه‌ای نشان می‌دهد که آنومالی ناحیه‌ای بخش غالب و مهم می‌شود [Jackson, 1987; Fedi et al, 1999].

در روش گسترش به سمت پایین اثر آنومالی‌های سطحی با فرکانس بالا برجسته تر از اثرات آنومالی‌های ناحیه‌ای با فرکانس پایین می‌باشند. در نقشه‌های تهیه شده با این فیلتر ساختارهای واقع در اعماق کمتر (آنومالی‌های محلی) با وضوح بیشتر و با یک حالت تیزی خاص نمایان می‌گردند [Roy, 1966; Grant, 1972; Bergeron, et al, 1990]. با توجه به موارد فوق فیلتر مورد نظر یک ابزار قدرتمند برای مطالعه آنومالی‌های نزدیک سطح زمین می‌باشد اما اثر بخشی این روش به چگونگی رفع نوفه‌های احتمالی در عبور از مرکز جسم آنومال در حین فرآیند گسترش میدان به سمت پایین دارد که باعث ایجاد یکسری بی‌ثباتی در نتایج می‌شود.

در کلیه روش‌های مذکور جهت تفکیک آنومالی‌های محلی از ناحیه‌ای از مقدار میدان گرانی و یا مولفه قائم آن استفاده شده و سعی در حذف یا تضعیف یکی از آنها برای تقویت دیگری می‌باشد. در عمده این روش‌ها عمق منبع آنومالی به صورت کمی مشخص نمی‌شود و به طور کیفی محدوده آنومالی مشخص می‌گردد.

تفکیک آنومالی گرانی محلی مرتبط به منابع هیدروکربوری از آنومالی مشاهده‌ای کار مشکلی است که با روش‌های مذکور با انتخاب فیلترهای مناسب انجام می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که آنومالی‌های گرانی جهت آشکارسازی منابع نفت و گاز با صحت بالاتر، نیازمند تبدیل به اشکال دیگر میدان می‌باشد. یکی از روش‌های تبدیل، روش گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی است که در افق‌های مختلف امکان تعیین نقاط تکین^{۳۰} (مراکز جرم و یا گوشه اجسام آنومال) که مرتبط به منابع آنومالی هستند را فراهم می‌نماید [Zeng, et al, 2002]. در این روش علاوه بر این که موقعیت افقی و

^{۳۰} . Singular points

عمق (تفسیر کیفی و کمی) منابع آنومال مشخص می‌شود، در بحث اکتشاف منابع هیدروکربوری، تاکدیس‌های حاوی منابع نفت و گاز از تاکدیس‌های خشک تفکیک می‌شود.

۷-۱- معرفی روش گرادیان کل نرمال

روش گرادیان کل نرمال یکی از روش‌های تفکیک آنومالی‌ها می‌باشد که علاوه بر گرادیان قائم از گرادیان‌های افقی میدان پتانسیل نیز استفاده می‌نماید و به این ترتیب تغییرات جانبی منابع آنومال مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، عمق و شکل آنومالی را در یک مقطع دو بعدی می‌توان مشخص نمود. این روش ابتدا در دهه ۱۹۶۰ توسط برزکین جهت شناسایی منابع نفتی با داده‌های گرانی مطرح گردید [Berezkin, 1967; Berezkin and Buketov, 1965]، که محاسبه آن بر روی یک پروفیل براساس توابع سینوسی و کسینوسی طبق سری‌های فوریه به صورت زیر انجام می‌شود.

$$\Delta g(x, z) = \sum_{n=1}^N B_n \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \exp\left(\frac{n\pi}{L} z\right) \quad (15-1)$$

که در آن L طول پروفیل نقاط اندازه‌گیری میدان گرانی، N تعداد جملات سری فوریه (تعداد هارمونیک) و B_n ضرایب سری سینوسی فوریه می‌باشد که توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردند [Berezkin, 1967; Berezkin and Buketov, 1965].

$$B_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L \Delta g(x, 0) \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx \quad (16-1)$$

مطابق رابطه (۱۵-۱) عامل گسترش میدان به سمت پایین در این روش همانند روش گسترش به پایین با استفاده از یک جمله نمایی تابعی از عمق می‌باشد. به منظور حذف اثرات ناشی از نوفه‌هایی که در حین گسترش میدان به سمت پایین ایجاد می‌شود مقدار تابع گرانی با سری فوریه در یک جمله سینوسی ضرب می‌شود که به تابع لانکوزوس^{۳۱} معروف است و به صورت زیر ارائه می‌شود.

^{۳۱} . Lanczos

$$Q = \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}{\frac{\pi}{N}} \right]^{\mu} \quad (17-1)$$

که در آن μ عدد صحیحی است که نمایانگر درجه هموارکنندگی است و میزان انحنای تابع Q را کنترل می‌کند.

مقدار گرادیان کل^{۳۲} در صفحه $Z-X$ به صورت زیر محاسبه می‌شود [Berezkin, 1967]:

$$G(x_i, z_k) = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial g(x_i, z_k)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g(x_i, z_k)}{\partial z} \right)^2 \right]^v}, \quad (18-1)$$

که در آن $x_i = i.dx$ ، $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ، $z_k = k.dz$ ، $k = 0, 1, 2, \dots, n_z$ ، v درجه عملگری گرادیان

کل، $\frac{\partial g(x_i, z_k)}{\partial x}$ و $\frac{\partial g(x_i, z_k)}{\partial z}$ گرادیان میدان گرانی در راستای محور طول و عمق می‌باشد.

بنابراین مقدار گرادیان کل نرمال گرانی دو بعدی^{۳۳} به صورت زیر تعریف می‌شود [Berezkin, 1967]:

$$G_N(x_i, z_k) = \frac{G(x_i, z_k)}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G(x_i, z_k)} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n_z \Rightarrow z_k = k.dz \quad (19-1)$$

که در آن M تعداد نقاط مشاهده‌ای روی پروفیل اندازه‌گیری داده‌های گرانی، $G(x_i, z_k)$ مقدار گرادیان کل در فضای دو بعدی و $G_N(x_i, z_k)$ مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی داده‌های گرانی می‌باشد.

علی‌رغم توانمندی این روش در شناسایی آنومالی‌های میدان پتانسیل، در کل مطالعاتی کمی روی این مساله صورت گرفته است که دارای ابهامات زیادی در بعضی از پارامترهای آن وجود دارد. در ایران نیز بکارگیری این روش محدود به یک مورد برای شناسایی قنات‌های مدفون به کمک داده‌های گرانی

بوده است [Ebrahimzadeh Ardestani, 2004].

^{۳۲} . Full gradient (FG)

^{۳۳} . 2D Normalized full gradient (2D-NFG)

۸-۱ - سابقه تحقیق و بکارگیری روش گرادیان کل نرمال

به ظاهر میلر^{۳۴} اولین کسی بود که در سال ۱۹۳۱ به مقدار گرانی کمینه مرتبط با تاقدیس‌های حاوی نفت پرداخت و در سال ۱۹۵۹ مدووسکی و کوماروا^{۳۵} طی تحقیقی به این نتیجه رسیدند که چنین گرانی محلی ناشی از منابع نفت و گاز می‌باشد [Zeng, et al, 2002]. با ساخت گرانی‌سنج‌های با دقت بالا، اندازه‌گیری آنومالی‌های گرانی با دقت در حد ۰/۱ تا ۰/۱ میلی‌گال برای آشکارسازی آثار گرانی ناشی از ذخایر هیدروکربوری امکان‌پذیر شده است [Ander et al, 1999].

برزکین و بوکتف^{۳۶} (۱۹۶۵) برای تفسیر آنومالی گرانی از روش آنالیز هارمونیکی یعنی سری‌های فوریه استفاده نمودند که در روش گرادیان کل بکار رفت. بررسی سوابق نشان می‌دهد که یکی از بهترین راه‌های تعیین محل ذخایر استفاده از روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی می‌باشد که توسط برزکین (۱۹۶۷) ارائه گردید. وی از این روش در سال ۱۹۷۳ برای شناسایی مخازن نفت و گاز در شوروی سابق استفاده نمود. بدین وسیله برزکین (۱۹۷۸) به طور مستقیم از روش‌های ژئوفیزیکی برای اکتشاف منابع نفتی استفاده نمودند.

سین‌کیارا و مارکاک^{۳۷} (۱۹۷۹)، روش نقاط تکین و فیلتر کردنی که مشابه روش گرادیان کل نرمال می‌باشد، را ارائه نمودند. ایشان در این روش از فیلتر گسترش میدان پتانسیل استفاده و با محاسبه مقادیر بزرگی بردار گرانش و تغییرات فاز آن، آنومالی‌های گرانی ناشی از مدل‌های مصنوعی و واقعی را تفسیر کردند. همچنین نشان دادند که با استفاده از این روش نوفه‌هایی که در حین استفاده از روش‌های گسترش میدان پدید می‌آید کاسته شده و مرز ساختارها و پدیده‌های زمین‌شناسی مانند گسل‌ها و واحدهای سنگی با وضوح بیشتری آشکار می‌شوند.

³⁴. Miler, 1931

³⁵. Medvoskiy & Komarova, 1959

³⁶. Berezkin & Buketov, 1965

³⁷. Cinciara & Marcak, 1979

مک‌کولاه^{۳۸} (۱۹۸۰) خاطر نشان کرد که اختلاف چگالی منفی خیلی بزرگ بین سنگ‌های مخزن متخلخل اشباع از نفت و گاز و سنگ‌های مخازنی که مواد نفتی روی ناحیه آبدار واقع شده‌اند (۰/۱ تا ۰/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) وجود دارد. همچنین اختلاف چگالی بزرگ‌تری بین چنین سنگ‌ها و طبقات بین لایه‌ای غیرقابل نفوذ (۰/۲ تا ۰/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب) وجود دارد که برای محاسبه آنومالی گرانی منفی نسبی مرتبط با میدان‌های نفت و گاز طبیعی مناسب است. آثار گرانی فرضی محاسبه شده از مدل‌های چگالی مرتبط با میدان‌های نفتی حفاری شده در کالیفرنیا انواع و بزرگی اثراتی که انتظار می‌رفت را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از این آنالیزها نشان می‌دهد که آثار گرانی منفی مرتبط با منابع هیدروکربوری متوسط تا بزرگ حجم در اکثر نقاط به وسیله روش‌های برداشت گرانی‌سنجی سطحی دقیق و مرسوم قابل آشکارسازی خواهد بود. بنابراین ممکن است آنومالی‌های وابسته به ذخایر هیدروکربوری با استفاده از اندازه‌گیری‌های گرانی آشکار شوند [McCulloh, 1980].

زیائو^{۳۹} (۱۹۸۱) روش گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی را اولین بار در چین مطرح نمود و سپس در سال ۱۹۸۴ به همراهی ژانگ از این روش در شناسایی و اکتشاف منابع نفت و گاز استفاده کرد [Xiao and Zhang, 1984]

الیسیوا^{۴۰}، یکی از شاگردان برزکین، از این روش برای تفسیر آنومالی گرانی و مغناطیسی با تکیه بر ویژگی‌های طیفی استفاده کرده است ولی متأسفانه بیشتر مقالات منتشر شده از ایشان و همکارانش به زبان روسی بوده و با توجه به شرایط کشور روسیه (شوروی سابق) دسترسی و استفاده از آن‌ها غیر ممکن بوده است. با این حال برخی از منابع و مقالات منتشر یافته از ایشان و همکاران نشان می‌دهد که ایشان بیشتر علاقمند بوده که روی ویژگی‌های طیفی این روش و استفاده از سری‌های

³⁸ . McCulloh, 1980

³⁹ . Xiao, 1981

⁴⁰ . Eliseeva, 1972

سینوسی و کسینوسی فوریه برای حل مسائل موجود استفاده نماید. وی از روش فیلون^{۴۱} (۱۹۲۸) برای آنالیز طیفی یا محاسبه ضرایب سری فوریه در بکارگیری روش گرادیان کل نرمال استفاده نمود [Eliseeva et al, 1972]. وی از فیلتر کردن مکرر در طی تبدیل و استفاده از گرادیان نرمال میدان گرانی برای اکتشاف منابع هیدروکربوری استفاده [Eliseeva, 1987] و اهمیت ویژگی‌های طیفی تبدیل گرادیان کل نرمال را بررسی نموده است [Eliseeva, 1988].

برزکین (۱۹۸۸) روش گرادیان کل نرمال (NTG^{۴۲}) آنومالی‌های گرانی را به تفصیل بررسی نمود و کاربرد آن را در اکتشاف منابع نفت و گاز ارائه و این روش را در اکتشاف منابع هیدروکربوری به طور مستقیم کاملاً مفید دانسته است.

از اوایل دهه ۱۹۹۰ وزارت نفت چین که کار روی دومین میدان بزرگ نفتی این کشور (میدان نفتی شینگ لی^{۴۳}) را شروع کرد، توجه ویژه‌ای روی پی‌جویی و اکتشاف غیرلرزه‌ای برای نفت به ویژه برداشت دقیق داده‌های گرانی معطوف داشت. برخی داده‌های گرانی به دست آمده از میدان نفتی مذکور، پایه‌ای را برای تحقیق روی آشکارسازی ذخایر این چینی با استفاده از روش گرانی بنا نهاده و شرایط اساسی برای بررسی نتایج این روش فراهم نموده است. از سال ۱۹۹۳ تحقیقات جدیدی در این راستا شروع شد که نتایج آن توسط زنگ و همکارانش انتشار یافت [Zeng et al, 2002].

یوان^{۴۴} و همکارانش (۱۹۹۵) با برداشت گرانی‌سنجی در تعدادی از مخازن در میدان نفتی هنان^{۴۵} بخش مرکزی چین نشان دادند که منطقه اشباع از گاز طبیعی در بخش نیمه عمیق می‌تواند آنومالی‌های قابل تشخیص در حد ۰/۰۷ میلی‌گال تولید نماید و پروفیل گرانی مشاهده شده همبستگی خوبی بین مقدار کمینه گرانی و مخازن هیدروکربنی نشان داد. آن‌ها همچنین نشان دادند که آنومالی گرانی

^{۴۱} . Filon, 1928

^{۴۲} . Normalized Total Gradient(NTG)

^{۴۳} . Shengli

^{۴۴} . Yuan

^{۴۵} . Henan

حدود ۰/۲۵۷ میلی‌گال می‌تواند ناشی از میدان نفتی بزرگ شوآن‌گه^{۴۶} باشد. آشکارسازی این نوع آنومالی‌ها، با استفاده از روش گرانی‌سنجی که با دقت حدود ۰/۰۳ میلی‌گال اندازه‌گیری شده باشد، امکان پذیر است [Yuan et al, 1995].

الیسوا^{۴۷}(۱۹۹۵) و به همراه همکارانش (۱۹۹۷ و ۱۹۹۸) در موسسه ژئوفیزیک VNIИ روسیه، طی بررسی‌های زیاد روی ویژگی‌های طیفی گرادیان کل نرمال، آن‌ها را توسعه داده و روش جدیدی ابداع نمودند که به نقاط شبه تکین^{۴۸} (QSP) معروف شد. آن‌ها این روش را برای حل برخی مسائل موجود در شناسایی ساختارهای زیر سطحی بکار بردند. آن‌ها با انجام بررسی‌هایی روی روش NFG برزکین نشان دادند که این روش دارای نواقصی مانند الف) فقدان معیار مناسب برای انتخاب تعداد بهینه جملات سری فوریه (N_{opt}) جهت محاسبه گرادیان کل، ب) تغییرپذیری کم ویژگی‌های طیفی عملگر تابع گرادیان کل نرمال (U) و ج) نبود یک معیار تحلیلی مناسب برای موقعیت یکتایی مطابق با تغییرات میدان‌های گرادیان کل نرمال دو بعدی می‌باشد. ایشان با تعریف تابع طیفی که وابسته به متغیر Z بوده برخی از مشکلات و مسائل موجود را پاسخ گفته و در تخمین موقعیت اجسام آنومال و شناسایی ساختارهای زیرسطحی نتایج خوبی به دست آوردند [Eliseeva et al, 1997, 1998; Eliseeva, 1995].

پاستکا^{۴۹} (۱۹۹۶) روش ابداعی توسط الیسوا (۱۹۸۸) را جهت تعیین توزیع منابع آنومال استفاده نمود و سپس در سال ۲۰۰۰ این روش را با روش‌های واپیچی ورنر^{۵۰} و اوپلر^{۵۱} به عنوان روش‌های نیمه خودکار برای مدل ساده و نیز تفسیر ساختارهای زیر سطحی به روش معکوس انجام داد و در

^{۴۶}. Shuanghe

^{۴۷}. Eliseva, 1995

^{۴۸}. Quasi Singular Points (QSP)

^{۴۹}. Pasteka

^{۵۰}. Werner deconvolution

^{۵۱}. Euler deconvolution

نهایت نتیجه گرفت که تفسیر مناسب و خوب بستگی به نوع مساله معکوس دارد که در مدل سازی منظور می شود [Pasteka, 2000].

آیدین^{۵۲} (۱۹۹۷) در رساله دکتری روش گرادیان کل نرمال را برای تحلیل داده‌های گرانی جهت شناسایی منابع هیدروکربنی ناحیه حسن کاله هوراسون^{۵۳} ترکیه با تلفیق روش‌های آماری و آندریف-گریفین استفاده نمود. ایشان در تحقیقش برای پارامتر عملگر تابع گرادیان (V) که مقدار بزرگی دامنه منحنی و عرض آنومالی NFG را کنترل می‌کند، عدد یک را پیشنهاد کرد. علاوه بر این، وی و همکارانش از این روش در سال‌های بعد برای تفسیر داده‌های گرانی و مغناطیس استفاده نمودند [Aydin et al, 2002; Aydin, 2005].

الیسیوا و پاستکا (۲۰۰۱) و به همراه سایر همکارانش (۲۰۰۲) روش نقاط شبه تکین را برای تفسیر داده‌های گرانی دو بعدی بکار برده و توانمندی آن را در حل مسائل معکوس ساختاری؛ یعنی مطالعه محیط‌های زمین شناسی چند لایه نشان دادند.

چرونف^{۵۴} و همکارانش (۲۰۰۱) برای آشکارسازی مناطق ضعیف و تکتونیکی که به صورت تله‌های نفتی هستند از تبدیل داده گرانی و مغناطیسی با رابطه پواسون و به کمک روش گرادیان کل نرمال استفاده نمودند.

کارسلی^{۵۵} (۲۰۰۱) در رساله دکتری خویش از روش گرادیان کل نرمال برای تحلیل داده‌های لرزه-ای استفاده کرد و به این نتیجه رسید که با مقادیر بیشتر عدد توان عملگر گرادیان کل نرمال (V)، عرض سیگنال ثبت شده باریک‌تر می‌گردد و بدین ترتیب قدرت تفکیک لرزه‌ای بهبود می‌یابد.

زنگ و همکارانش (۲۰۰۲) آنومالی‌های حاصل از تاقدیس‌های خشک و تاقدیس‌های اشباع از مواد هیدروکربور را به روش گرادیان کل نرمال بررسی و نتیجه گرفتند که تاقدیس‌های اشباع از

^{۵۲} . Aydin

^{۵۳} . Hasankale-Horasan

^{۵۴} . Chernov

^{۵۵} . Karsli

هیدروکربور به وسیله مقادیر کمینه از NFG مشخص می‌شوند که توسط بیشینه‌هایی احاطه شده است. به این ترتیب آنان پایداری و صحت این روش را در آشکارسازی ذخایر نفت و گاز تایید نمودند. ایشان همچنین با ابداع روش گرادیان کل نرمال شبه سه بعدی^{۵۶}، مقادیر گرادیان کل نرمال را در افق های مختلف برای دو میدان نفتی در چین محاسبه و با مشخص نمودن مقادیر کمینه و بیشینه NFG روی افق‌های مختلف، نقاط امیدبخش نفتی را برای حفاری‌های جدیدی معرفی نمودند.

زنگ و همکارانش (۲۰۰۲) همچنین عنوان نمودند که مقدار گرادیان کل نرمال به شدت به انتخاب تعداد جملات سری فوریه برای محاسبه آن وابسته است و تغییر کوچک در مقدار آن سبب تغییرات بزرگی در مقدار NFG خواهد شد. بعلاوه آنان تاثیر طول پروفیل روی مقادیر NFG و نیز موقعیت مقادیر کمینه و بیشینه NFG روی نقشه دو بعدی X-Z را بررسی نموده و خاطر نشان کردند که طول پروفیل بایستی حداقل ۱۰ برابر مقدار عمق مورد بررسی جسم آنومال باشد. توضیحات بیشتر در این زمینه به همراه فلوجارت روش محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال شبه سه بعدی زنگ و همکارانش در فصل پنجم و پیوست ج-۱ ارائه شده است.

تران^{۵۷} (۲۰۰۴) با کاربرد روش گرادیان کل نرمال دو بعدی [Berezkin, 1973] و شبه سه بعدی [Zeng et al, 2002] و استانداردسازی و فیلتر کردن [Cianciara and Marcak, 1979] داده‌های مشاهده‌ای گرانی، قابلیت روش NFG را برای مشخص نمودن نواحی پتانسیل‌دار نفت و گاز در حوضه رسوبی زیردریایی در جنوب شرقی ویتنام مورد بررسی قرار داد. نتایج وی با داده‌های حفاری و اطلاعات لرزه‌نگاری تایید شد. روش محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال در حالت شبه سه بعدی ترن به این ترتیب بوده که مقادیر گرادیان کل نرمال در راستای یک بعد (مثل محور طول) برای کلیه نقاط در هر پروفیل محاسبه شده و سپس برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال، مقدار گرادیان کل در هر نقطه از یک افق خاص بر متوسط مقادیر گرادیان کل کلیه نقاط اندازه‌گیری در سطح مورد نظر تقسیم

^{۵۶} . Quasi-three dimensional NFG

^{۵۷} . Tran Tuan Dong, 2004

می‌شود. فلوجارت روش محاسبه وی به همراه توضیحات بیشتر در فصل پنجم و پیوست ج-۲ ارائه شده است.

ابراهیم‌زاده اردستانی (۲۰۰۴)، از این روش در آشکارسازی آنومالی گرانی نزدیک سطح زمین استفاده کرد. وی با مدل‌سازی منشورهای مستطیلی دو بعدی عمق سطح فوقانی آنها را متناسب با محل بیشینه منشورها بیان نموده و بدین ترتیب از روش گرادیان کل نرمال برای آشکارسازی محل و عمق قنات‌ها استفاده نمود.

دون‌دورور^{۵۸} (۲۰۰۵) از روش NFG برای تحلیل داده‌های الکترومغناطیس جهت شناسایی و تخمین عمق اجسام لایه‌ای شکل شیبدار استفاده نمود. وی در تحقیق خود به این نتیجه رسید که این روش نسبت به روش گسترش به سمت پایین برای داده‌های الکترومغناطیس ساده‌تر می‌باشد و به آسانی قابل کدنویسی بوده و به زمان محاسباتی کمی نیاز دارد. همچنین وی نشان داد که این روش در تخمین عمق اهداف حتی برای اجسام رسانای افقی می‌تواند سودمند باشد.

آقاجانی و مرادزاده (۱۳۸۵) روش گرادیان کل نرمال را جهت شناسایی موقعیت قرارگیری و عمق گنبد نمکی دیبادیب^{۵۹} شمال تونس [Jallouli et al, 2005] بکار بردند و با این روش توانستند موقعیت و عمق گنبد نمکی را مشخص نمایند. آن‌ها همچنین طی کار جداگانه‌ای برای تفکیک و مدل‌سازی آنومالی‌های مغناطیسی کانسار آهن اجت‌آباد سمنان [مرادزاده و دولتی، ۱۳۸۵] از این روش استفاده نمودند. نقشه‌های دو بعدی به دست آمده از این روش نشان داد که آنومالی‌های مغناطیسی در محدوده عمقی ۱۰ تا ۶۰ متری سطح زمین قرار دارند [Aghajani and Moradzadeh, 2007].

^{۵۸}. Dorman Dondorur, 2005

^{۵۹}. Dibadib salt dome

آیدین^{۶۰} (۲۰۰۷) روش گرادیان کل نرمال را مجدداً برای تحلیل داده‌های گرانی منطقه حسن کاله هوراسون در ترکیه استفاده نمود. در این حالت وی مقادیر ضرایب سری فوریه را براساس روش فیلون (۱۹۲۸) تعیین کرد و عنوان نمود که با این روش میزان خطای محاسباتی کمتر بوده و همچنین با تعداد جملات هارمونیک کمتری مقادیر گرادیان کل نرمال به دست می‌آید. وی در پایان نتیجه‌گیری نموده که با استفاده از این روش می‌توان آنومالی هیدروکربنی را تفکیک نمود.

سیندیگی^{۶۱} و همکاران (۲۰۰۸) روش گرادیان کل نرمال دو بعدی را برای تفسیر آنومالی‌های حاصل از روش الکتریکی پتانسیل خودزا در معدن مس ایرگانی^{۶۲} در جنوب شرق ترکیه بکار برد. ایشان نیز مثل آیدین (۲۰۰۷) با روش سعی و خطا تعداد جملات هارمونیک مورد نیاز برای محاسبه مقادیر ضرایب سری فوریه را در محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال تعیین نمود و در نهایت روش مذکور را برای تفسیر آنومالی پتانسیل خودزا مفید دانسته است.

اروچ و کسکین سیزر^{۶۳} (۲۰۰۸) روش گرادیان کل نرمال آنومالی مغناطیس هوایی از ناحیه شرق دریای مرمره را برای آشکارسازی توده‌های مغناطیسی بکار برد. ایشان نشان دادند که مقدار بیشینه گرادیان کل نرمال در هر افق مشخص، اطلاعات با ارزشی از لبه‌های توده‌های آنومال ارائه می‌دهد. همچنین نتایج این روش را با روش واپیچی اوپلر مقایسه نموده و اظهار داشته‌اند که کاربرد همزمان این دو روش می‌تواند نتایج بهتر و مناسب‌تری در تفسیر آنومالی‌ها داشته باشد.

آقاجانی و همکارانش در طی سال‌های اخیر با بررسی‌های جداگانه‌ای از این روش استفاده و با حل برخی مسائل موجود و بهینه سازی عوامل موثر در محاسبه مقدار آن، روش سه بعدی جدیدی نیز ارائه نمودند [Aghajani et al, 2009a-d]

۹-۱- مزایای و محدودیت‌های روش گرادیان کل نرمال

^{۶۰} . Aydin

^{۶۱} . Sindirgi

^{۶۲} . Irgani

^{۶۳} . Oruc & Keskinsezer

روش گرادیان کل نرمال می‌تواند یک روش موثر جهت آشکارسازی آنومالی‌های کم چگال وابسته به ذخایر ناشناخته باشد. کاربرد این روش، با استاندارد سازی داده‌های مشاهده‌ای و فیلتر کردن به روش گسترش به پایین باعث حذف منابع کاذب می‌شود و نیز سبب آشکارسازی نقاط تکین مرتبط با منابع آنومال گرانی می‌گردد. همچنین این روش با مشخص کردن نواحی پتانسیل‌دار نفت و گاز، می‌تواند در تعیین حفر چاه‌های اکتشافی برای شناسایی منابع هیدروکربنی مورد استفاده قرار گیرد. عمق به دست آمده از منحنی‌های گرادیان کل نرمال به عنوان یک ابزار عملی جهت تخمین مقدار عمق اجسام آنومال در میدان پتانسیل استفاده می‌شود [Dondurur, 2005].

مزیت اصلی روش گرادیان کل نرمال در طی فرآیند گسترش به سمت پایین این است که هنگام عبور از عمق منبع آنومالی نوسانات و اغتشاشات جانبی تولید نمی‌کند و بنابراین ممکن است که به اعماق پایین‌تر از منبع آنومالی ادامه یابد [Aydin, 2007]. این روش به نسبت از لحاظ محاسباتی نسبت به روش‌های گسترش میدان پتانسیل ساده‌تر بوده و به آسانی قابل کدنویسی و به زمان محاسباتی کمی نیاز دارد. ویژگی اصلی مقاطع گرادیان کل نرمال میدان گرانی در شناسایی منابع نفت و گاز در ساختارهای تاقیدیسی این است که محل تمرکز آن‌ها به صورت منحنی‌های بسته کمینه‌ای است که توسط مقادیر بیشینه محدود شده شناخته می‌شود.

با وجود همه توانمندی‌های روش گرادیان کل نرمال برخی از محدودیت‌های این روش را می‌توان به صورت زیر عنوان نمود که نیازمند بررسی روی آن‌ها می‌باشد.

- عدم وجود یک معیار روشن برای انتخاب تعداد بهینه جملات هارمونیک در سری فوریه برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی
- انتخاب مقدار توان جمله هموارکننده لانکزوس μ
- استفاده از عدد یک برای عملگر گرادیان کل نرمال و نبود یک قاعده مشخص برای انتخاب آن
- استفاده از مشتق‌های مرتبه اول تابع آنومالی گرانی برای محاسبه مقدار NFG

۱-۱- ضرورت انجام تحقیق

اگرچه بیشتر منابع هیدروکربوری مرتبط با تله‌های تاقدیسی شکل هستند ولی منابع نفتی جدید و موجود در تله‌های نفتی غیرتاقدیسی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. این گونه تله‌های نفتی متعلق به ساختارهای غیرمتراکم، مناطق تکتونیزه، تله‌های نفتی کنترل شده به وسیله گرابن‌ها، مناطق شکستگی درون توده‌های ریفی شکل، نفتگیرهای گسلی و از همه مهم‌تر گنبد‌های نمکی هستند. بررسی مناسب تله‌های نفتی غیرتاقدیسی اساساً با اندازه‌گیری دقیق و توام گرانی سنجی و مغناطیس سنجی و کاربرد روش‌های موثر تفسیر احتمالاً می‌تواند امکان پذیر باشد [Chernov et al, 2001].

همان طور که پیشتر ذکر گردید، مقادیر گرادیان کل نرمال که به صورت محدوده‌های کمینه و بیشینه روی نقشه مقاطع به دست می‌آید، بیانگر موقعیت و عمق اجسام آنومال به ویژه محل‌های متناسب تمرکز منابع هیدروکربوری می‌باشد. از طرفی این مقادیر به شدت وابسته به تعداد جملات انتخابی برای سری فوریه می‌باشد. عمده کارهای تحقیقی انجام شده در این روش استفاده از روش سعی و خطا با استفاده داده‌های تکمیلی نظیر حفاری برای تعیین مقادیر بهینه تعداد جملات هارمونیک جهت محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال می‌باشد.

سوابق کارهای انجام شده، نشان می‌دهد که روش گرادیان کل نرمال غالباً برای نفتگیرهای تاقدیسی مورد استفاده قرار گرفته است در حالی که ساختارهای غیرتاقدیسی (مانند گنبد‌های نمکی و...) جزء تله‌های نفتی مهم می‌باشند. از طرفی هیچگونه سابقه‌ای در مورد بکارگیری این روش در شناسایی تله‌های هیدروکربوری گنبد نمکی وجود ندارد. با توجه به این که بیشتر ساختارهای زمین-شناسی مرتبط با منابع هیدروکربوری حالت سه بعدی دارند، بنابراین بررسی تغییرات سه بعدی گرادیان کل نرمال به طبع تفسیر بهتری از این ساختارها ارائه می‌دهد. به همین منظور افرادی نظیر زنگ و همکارانش (۲۰۰۲) و تران (۲۰۰۴) در این راستا بررسی‌هایی انجام داده‌اند. اما با بررسی الگوریتم محاسباتی آن‌ها می‌توان گفت که این روش‌ها یک حالت شبه سه بعدی بوده است.

ایشان در محاسبه مقدار و مشتقات تابع گرانی در نقاط مختلف تنها از سری فوریه یک بعدی استفاده نموده‌اند، یعنی تغییرات در یک شبکه اندازه‌گیری داده‌ها را به صورت یکسان فرض نموده‌اند. به عبارت دیگر آنان سری فوریه را فقط در راستای یک پروفیل تاثیر داده و تابع گرانی را به صورت سری فوریه با بسط سری سینوسی در راستای پروفیل بیان کرده‌اند. ولی حقیقت امر این است که در حالت سه بعدی تغییرات گرادیان کل نرمال میدان گرانی بایستی در هر افق خاص با تغییرات مقادیر گرانی در صفحه $X-Y$ محاسبه گردد. بدین ترتیب محاسبه ضرایب فوریه دو بعدی یا دوگانه لازم می‌باشد تا براساس آن مقدار تابع گرانی سه بعدی به صورت سری‌های فوریه در هر نقطه‌ای محاسبه گردد. از آنجایی که هنوز مطالعه جامعی در مورد گرادیان کل نرمال سه بعدی و قابلیت‌های آن در اکتشاف تله‌های نفتی تاقدیسی و غیرتاقدیسی و چگونگی ارتباط آن با پارامترهای مختلف صورت نگرفته است، بنابراین مطالعه در این زمینه ضروری می‌باشد. علاوه بر آن برای یافتن پاسخی مناسب به پرسش‌های زیر، تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری بنظر می‌رسد.

- با توجه به کاربرد روش گرانی در اکتشاف منابع هیدروکربوری که در مراحل ابتدایی کار است و هیچگونه داده تکمیلی به جزء زمین شناسی سطحی وجود ندارد، مقدار بهینه جملات هارمونیک چگونه تعیین و انتخاب می‌شود؟
- آیا این مقدار بهینه تعداد جملات هارمونیک (N) به وضعیت و شکل تله‌های نفتی و شرایط اختلاف چگالی و زمین شناسی بستگی دارد؟
- چه رابطه‌ای می‌توان بین تعداد جملات هارمونیک و مقادیر گرادیان کل نرمال بیان نمود؟
- یکی دیگر از پارامترهای که در محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال تاثیر دارد، طول پروفیل می‌باشد که طبق بررسی‌های برزکین (۱۹۷۳) و زنگ و همکارانش (۲۰۰۲) حداقل بایستی حدود ۱۰ برابر عمق وجودی اجسام آنومال باشد تا نتایج مناسب ارائه شود. حال پرسش این است که طول بهینه پروفیل چگونه تعیین می‌شود؟

- فاصله نقاط اندازه‌گیری روی هر پروفیل و در یک شبکه چگونه می‌باشد؟ حداقل و حداکثر فاصله‌ای که بتوان جواب مناسب به دست آید، چگونه تعیین می‌شود؟
- مدل‌سازی انجام شده روی این روش براساس ساختارهای تاکدیسی و منابع هیدروکربوری موجود در آن صورت گرفته است در حالی که تله‌های نفتی دیگر وجود دارند که مخازن مناسبی برای نفت و گاز می‌باشند. مقدار گرادیان کل نرمال برای این گونه ساختارها مثل گنبد نمکی بدون مواد هیدروکربوری و یا به همراه آنها چگونه است؟
- روی مقاطع گرادیان کل نرمال دو بعدی داده‌های گرانی برای ساختارهای تاکدیسی حاوی هیدروکربور مقادیر کمینه گرادیان کل نرمال که توسط مقادیر بیشینه آن محدود شده، شاخصی برای تعیین مناطق پر پتانسیل می‌باشد، آیا این وضعیت در مورد سایر ساختارها به ویژه نوع گنبد نمکی نیز صادق است؟
- شرایط و فرمولاسیون سه بعدی برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال در ساختارهای تاکدیسی و سایر ساختارها چگونه است؟
- یکی دیگر از پارامترهای موثر که در هموارسازی و حذف نوفه‌های تولیدی در حین گسترش میدان، توان جمله هموار کننده لانکزوس (μ) است که مقدار آن برای اکتشافات هیدروکربوری عدد ۲ انتخاب می‌شود [برزکین ۱۹۸۸]، آیا عدد دیگری برای آن می‌توان تعیین نمود؟
- آیا می‌توان از مشتق‌های مرتبه‌های بیشتر یا از توان بیشتر از یک برای عملگر گرادیان کل (V) نیز استفاده نمود؟

۱۱-۱- فرضیه‌های تحقیق

به منظور یافتن پاسخی مناسب برای پرسش‌های ذکر شده و نیز بررسی کارایی این روش در انواع تله‌های نفتی فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

- معادله میدان پتانسیل (گرانی) که از معادله لاپلاس پیروی می‌کند، در طول پروفیل (بازه) برداشت داده‌ها دارای دوره تناوب می‌باشد. شرایط مرزی دیرکله برای تابع میدان گرانی جهت محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال برقرار است.
- اختلاف چگالی کافی بین واحدهای سنگ میزبان و منابع هیدروکربوری وجود دارد.
- یک مقدار بهینه برای اعداد هامورنیک سری فوریه وجود دارد که در آن مقدار گرادیان کل نرمال کمینه حاصل می‌شود و مرتبط با محل تجمع منابع هیدروکربوری است.
- روش گرادیان کل نرمال اگر به درستی مورد استفاده قرار گیرد و پارامترهای وابسته به آن کاملاً مورد بررسی قرار گیرند، قادر است که نفتگیرهای مرتبط با ساختارهای غیرتاق‌دیسی را تعیین نماید.
- با انجام مدل‌سازی‌های دو و سه بعدی داده‌های گرادیان کل نرمال گرانی، انتخاب مناسب تعداد جملات بهینه هامورنیک، و شبکه اکتشاف می‌توان قابلیت روش مذکور را در شناسایی تله‌های نفتی تقادیدی و غیرتاق‌دیسی افزایش داد.
- در صورت ارائه فرمول و معادله مناسب روش گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی، قادر به شناسایی عمق نفتگیرهای تقادیدی و غیرتاق‌دیسی بوده و از روی نقشه کنتوری مقادیر گرادیان کل نرمال می‌توان محل قرارگیری توده آنومال را مشخص و محل حفر گمانه‌های اکتشافی را تعیین نمود.

۱-۱۲- اهداف و مراحل انجام تحقیق

با توجه به ضروریات تحقیق، اهداف اصلی انجام رساله را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- ۱- بررسی نقش عوامل موثر در محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی نظیر تعداد جملات هامورنیک، طول پروفیل و فاصله نقاط اندازه‌گیری، توان تابع هموارساز و چگونگی بهینه‌سازی این پارامترها برای شناسایی هر چه بهتر منابع آنومال

۲- بررسی پاسخ روش مورد نظر برای مدل‌های دو بعدی از نفتگیرهای غیرتاق‌دیسی به ویژه نوع

گنبد نمکی

۳- بسط و توسعه روش گرادیان کل نرمال جهت ارائه روشی جدید برای مدل‌سازی سه بعدی

کامل داده‌های گرادیان کل نرمال

۴- بررسی پاسخ روش گرادیان کل نرمال بر روی مدل‌های سه بعدی از تله‌های نفتی سه بعدی با

ساختارهای تاک‌دیسی و گنبد نمکی

برای نیل به اهداف تعیین شده، ابتدا با تهیه و ساخت مدل‌های مصنوعی که تداعی‌گر شرایط

زمین‌شناسی انواع ساختارهای تله‌های نفتی (تاق‌دیسی و غیرتاق‌دیسی) باشد، پاسخ گرانی آن‌ها (با

نوشتن برنامه کامپیوتری لازم) در حالت‌های دو و سه بعدی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از

داده‌های تولید شده، قابلیت‌های روش گرادیان کل نرمال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در همین راستا

متغیرهای موثر در این روش برای شناسایی نفتگیرها مطالعه و مقادیر بهینه آن برای شرایط مختلف

زمین‌شناسی تعیین خواهد شد.

پس از این مرحله بایستی قابلیت‌های روش گرادیان کل نرمال را در مواردی که داده‌های برداشت

شده دارای نوفه باشند، مورد ارزیابی قرار داد. برای این کار با برنامه‌هایی که تهیه خواهد شد، ضمن

تهیه پاسخ مدل‌ها، نوفه‌های مختلف با درصد‌های متفاوت به داده‌ها اضافه خواهد شد تا روش گرادیان

کل نرمال و پارامترهای موثر آن (مانند N ، طول پروفیل، شبکه اکتشاف و ...) در شرایط زمین‌شناسی

مختلف بهتر مورد ارزیابی قرار گیرند. در ادامه کار، پس از انتخاب درست متغیرهای موثر، با نوشتن

برنامه‌های لازم گرادیان کل نرمال برای حالات دو و سه بعدی محاسبه و توانایی آن‌ها با طراحی

مدل‌های گوناگون و شرایط زمین‌شناسی متنوع بررسی می‌شود.

در پایان روش اصلاح شده گرادیان کل دو بعدی و همچنین روش جدید توسعه داده شده جهت

محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال مدل‌های سه بعدی، برای چند مجموعه از داده‌های واقعی با منابع

هیدروکربوری و ذخایر معدنی مورد استفاده قرار خواهد گرفت و نتایج حاصل با دیگر اطلاعات موجود

اکتشافی مقایسه می‌گردند تا توانمندی‌های روش‌های اصلاح شده و جدید توسعه یافته در اکتشاف منابع فوق بیشتر مورد ارزیابی قرار گیرند.

۱-۱۳- ساختار رساله

همانگونه که از عنوان پایان نامه نیز بر می‌آید، هدف اصلی در این تحقیق، استفاده از روش گرادیان کل نرمال برای شناسایی و اکتشاف منابع هیدروکربوری در ساختارهای مختلف به ویژه گنبد‌های نمکی می‌باشد. بنابراین در فصل اول این مجموعه ابتدا به طور مختصر روش گرانی و کاربرد آن و نیز ساختارهای اصلی مخازن نفتی ارائه شده است. سپس با معرفی مختصر روش گرادیان کل نرمال، پیشینه تاریخی، مزایا و محدودیت‌های آن، ضرورت و اهداف انجام این رساله تشریح شده است. با توجه به اینکه روش مذکور برای اکتشاف منابع هیدروکربوری در ایران برای اولین بار استفاده می‌شود و هیچ منبع به زبان فارسی در این مورد وجود ندارد، در ادامه بحث در فصل دوم این روش کاملاً تشریح شده و پارامترهای موثر در آن عنوان می‌شود. در فصل سوم با لحاظ نمودن مدل‌های مختلف، از روش‌های متفاوت جهت تهیه الگوریتم و برنامه‌های کامپیوتری استفاده خواهد شد. بهینه‌سازی پارامترهای موثر در محاسبه NFG با منظور نمودن انواع شکل‌های ساده و پیچیده جهت مدل‌سازی ساختارهای نفتگیر در فصل چهارم انجام شده است. بدین ترتیب که با تهیه الگوریتم‌های مورد نیاز و نوشتن کدهای مناسب هر نوع ساختار در محیط نرم افزار مطلب و اخذ پاسخ هر کدام از آنها و نیز نوشتن کد مربوط به روش گرادیان کل نرمال دوبعدی، پارامترهای مورد نظر بررسی شده است.

ارائه روش جدید محاسبه گرادیان کل نرمال سه بعدی با فرمولاسیون و ویژگی‌های آن به همراه مثال‌هایی از مدل‌های مصنوعی با آوردن الگوریتم‌های محاسبه‌ای و فلوجارت‌های مربوطه در فصل پنجم تشریح شده است. به منظور آزمایش و بررسی‌های کامل‌تر از توانمندی‌های روش جدید معرفی شده جهت محاسبه گرادیان کل نرمال سه بعدی برای شناسایی منابع هیدروکربوری مرتبط با تله‌های

نفته تاقدیسی و گنبد نمکی و همچنین شناسایی منابع معدنی از یک سری داده‌های واقعی گرانی و مغناطیس استفاده شد. چگونگی پردازش و تفسیر آن‌ها به کمک روش ارائه شده به صورت مشروح در فصل ششم آورده شده است. در خاتمه نتایج و پیشنهادات حاصل از مطالعه حاضر در قالب فصل هفتم ارائه گردیده است.

فصل دوم

اصول و مبانی روش گرا دیان کل نر مال
و چگونگی محاسبه آن

۱-۲ مقدمه

روش‌های میدان پتانسیل از جمله روش‌های موثر در پی‌جویی منابع معدنی و هیدروکربوری هستند. برداشت داده‌های گرانی به صورت سیستماتیک و تحت شرایط کنترل شده‌ای انجام می‌شوند و نتایج آن‌ها به صورت مقادیر عددی تحت عنوان داده‌های مشاهده‌ای بیان می‌شوند. برای هر نوع نتیجه‌گیری از این داده‌ها، باید رابطه بین توزیع خواص فیزیکی زمین و پاسخ ژئوفیزیکی قابل مشاهده معلوم گردد. سیستم معادلاتی که این رابطه را بیان نماید، تئوری مستقیم نامیده می‌شود. استنباط خواص فیزیکی سیستم مورد مطالعه از روی داده‌های مشاهده‌ای یک روند معکوس است و ابزار کمی مورد نیاز برای نیل به آن، تئوری معکوس (وارون) می‌باشد.

با توجه به اینکه آثار گرانی ناشی از اجسام آنومال، کوچکتر از آثار ناشی از ساختارهای دربرگیرنده آنها می‌باشند، بنابراین ارزیابی آن‌ها به روش معکوس گرانی‌سنجی مشکل می‌باشد. از این رو در این روش ابتدا بایستی مقدار آنومالی‌های محلی ناشی از منابع آنومال از مقادیر آنومالی مشاهده‌ای تفکیک شوند. این موضوع مشکل بزرگی در تفسیر آنومالی گرانی‌سنجی می‌باشد. هدف اصلی در تفسیر داده‌های گرانی، آشکارسازی منابع آنومال یعنی مشخص نمودن موقعیت افقی مرکز جرمی منابع و عمق قرارگیری آن در شرایط مطلوب می‌باشد. برای اکتشاف منابع زیرزمینی مانند مواد معدنی یا هیدروکربنی، آنومالی‌های گرانی را می‌توان به مولفه‌های دیگر میدان گرانی تبدیل نمود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شناسایی نقاط تکین^{۶۴} منابع آنومال با تبدیل میدان گرانی سبب آشکارسازی نقاط مشخصه اجسام آنومال نظیر گوشه‌ها و مرکز گرانش آن‌ها می‌شود [Zeng et al, 2002].

^{۶۴} . Singular

روش‌های مدل‌سازی معکوس اصولاً مبهم و ناپایدار می‌باشند. این دو عامل سبب می‌شود که این روش‌ها در زمره مسائل ناجور^{۶۵} طبقه‌بندی شوند. ویژگی‌های ابهام و ناپایداری در مسائل معکوس بدون استفاده از داده‌های تکمیلی قابل حل نخواهد بود [Skeels, 1947]. در تئوری پتانسیل برای دستیابی به اطلاعات تکمیلی راه‌های گوناگونی وجود دارد که به دو نوع آن می‌توان اشاره نمود. روش اول براساس هندسه آنومالی فرضی تعریف می‌شود. در این روش با فرض یک جسم با ابعاد و شکل مشخص، سعی در مدل کردن آن با داده‌های میدان پتانسیل می‌شود، لذا ابهام مساله از بین خواهد رفت [Pasteka, 2001].

روش دیگر فرآیند مدل‌سازی معکوس مقید^{۶۶} با اطلاعات تکمیلی و اضافی است که میدان پتانسیل را با استفاده از روش تبدیل (مثل گسترش به سمت بالا) به میدان دیگری انتقال می‌دهد تا به این ترتیب رابطه‌ای بین میدان تبدیل یافته و منابع تولید کننده میدان ایجاد شود. یکی از دلایل ناپایداری و ابهام در جواب مدل‌سازی معکوس، عدم یکتایی می‌باشد که سبب می‌شود منابع مختلف با اشکال، ابعاد و آرایش‌های متفاوت میدان‌های پتانسیل یکسان تولید نمایند [Pasteka, 2000].

به منظور رفع عدم یکتایی در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها بر مبنای تبدیل میدان پتانسیل اولیه به میدان گسترش یافته به طرف پایین یا بالا و مولفه‌های گرادیان می‌باشد، که می‌تواند به طور مستقیم بین میدان مشاهده‌ای و منابع تولید کننده آن (تکین) رابطه‌ای ایجاد نماید. طبقه‌بندی نقاط تکین تعیین شده مرتبط با ساختارهای آنومال، غالباً با روابط خیلی ساده بین این نقاط و شکل هندسی ساختارهای آنومال (مانند مرکز گرانی، گوشه‌های چندضلعی) انجام می‌شود. [Pasteka, 2000; 1996].

با توجه به اینکه در گرانی‌سنجی در غالب اوقات هدف آشکارسازی ذخایر کوچکی است که عمدتاً در عمقی کمتر از ساختمان‌های بزرگ زیرسطحی قرار دارند، پس باید از فیلترهای مشتق و گسترش

^{۶۵}. Ill-posed problem

^{۶۶}. Constrained inverse modeling

به سمت پایین میدان گرانی برای شناسایی آن‌ها استفاده نمود. روش گرادیان کل نرمال (NFG) آنومالی‌های گرانی با استفاده از عمل گسترش به سمت پایین و در نظر گرفتن مشتق داده‌های گرانی سبب کاهش نوفه‌های ناشی از روش گسترش به پایین می‌گردد [Dondurur, 2005].

این روش اولین بار در دهه ۱۹۶۰ توسط برزکین ارائه و در اکتشاف منابع هیدروکربنی استفاده گردید [Berezkin and Buketov, 1965; Berezkin, 1967]. تحقیقات و بررسی‌ها نشان داده که، مقدار گرادیان کل نرمال میدان‌های پتانسیل به شدت به انتخاب تعداد جملات سری فوریه (N) برای محاسبه آن وابسته است و تغییر کوچک در مقدار آن سبب تغییرات بزرگی در مقدار NFG خواهد شد [Berezkin, 1988; Zeng et al, 2002; Tran, 2004; Aghajani and Moradzadeh, 2008].

بنابراین تعیین یک معیار مناسب برای تخمین مقدار بهینه N مهم‌ترین مساله در این روش می‌باشد. در این فصل تلاش خواهد شد تا اصول و مبانی روش NFG همراه با روش‌های محاسبه آن به طور اجمال طوری مورد بحث قرار گیرد تا بتواند به عنوان مبنایی بر توسعه این روش برای حالت سه بعدی^{۶۷} و سایر موضوعات مرتبط با اهداف رساله باشد.

۲-۲ اصول روش

روش گرادیان کل نرمال یکی از موفق‌ترین روش‌های کاربردی برای میدان‌های پتانسیل جهت تعیین نقاط تکین اجسام آنومال می‌باشد، که مشابه روش سیگنال تحلیلی^{۶۸} [Nabighian, 1972, 1974] است. در روش گسترش به طرف پایین مقادیر میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده هنگامی که از مرکز اجسام آنومال به طرف عمق بیشتر انتقال می‌یابد نوفه‌هایی کاذب پدید می‌آید. در حالی که در روش گرادیان کل نرمال داده‌های ژئوفیزیکی به علت استفاده از مولفه‌های مشتق میدان پتانسیل در

^{۶۷} . Three dimensional (3D)

^{۶۸} . Analytical signal

محاسبه NFG به جای خود میدان، این گونه نوفه‌های کاذب حذف شده و منابع آنومالی و عمق آن‌ها به درستی شناسایی می‌شوند.

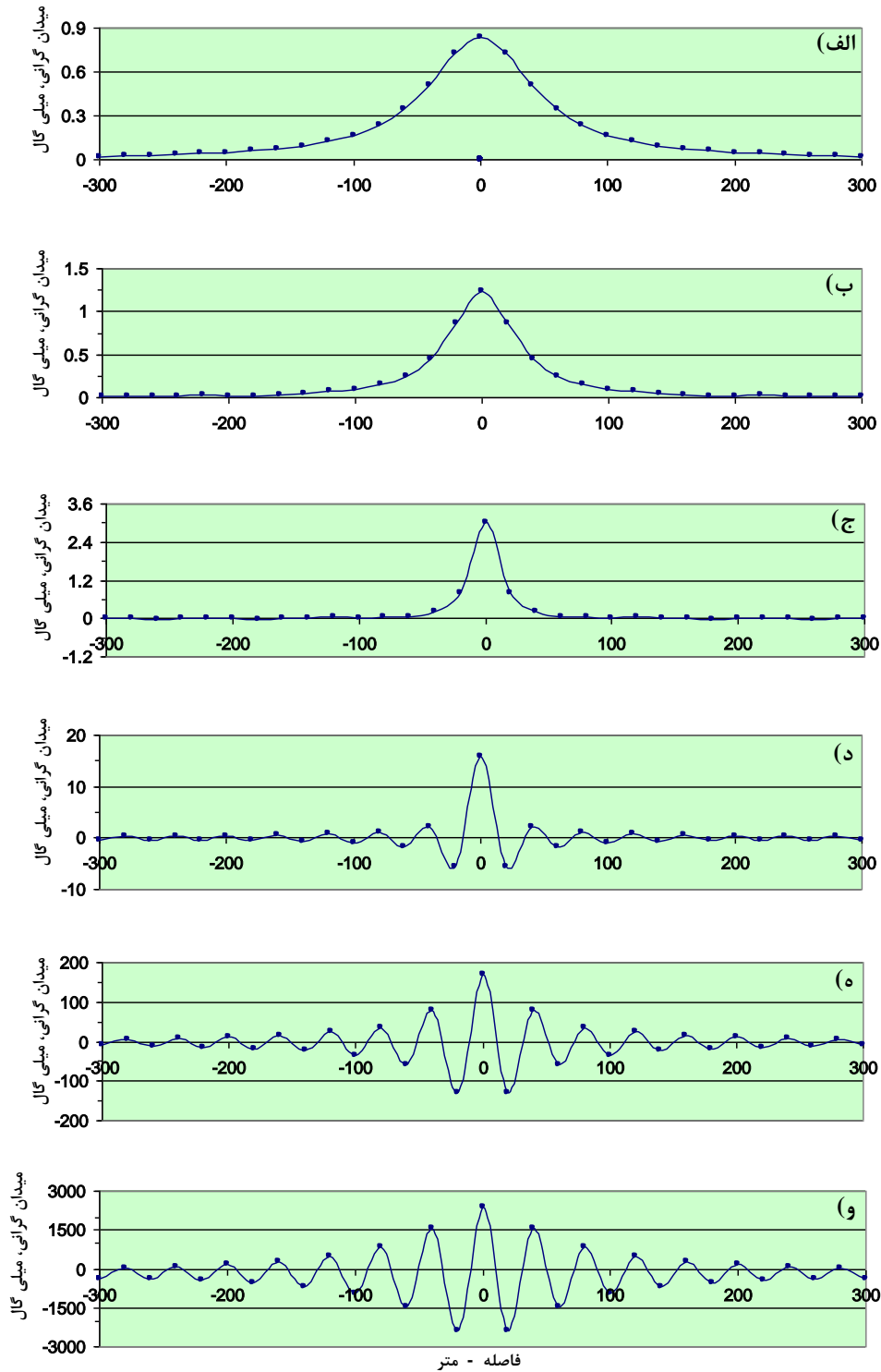
برای روشن شدن موضوع یک مدل استوانه افقی با شعاع ۱۰ متری و اختلاف چگالی ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب که در عمق ۵۰ متری واقع شده در نظر گرفته می‌شود. مقادیر گسترش میدان گرانی به سمت پایین در افق‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ متری و همچنین مقادیر تغییرات مشتق اول در راستای محورهای X و Z میدان گرانی ناشی از این استوانه جهت مقایسه محاسبه و نمودار آن‌ها در شکل‌های (۱-۲ تا ۳-۲) ارائه شده است. مطابق نمودارهای ارائه شده، با افزایش گسترش میدان به اعماق پایین‌تر از عمق قرارگیری استوانه افقی، مقادیری نوفه (اغتشاشات) نیز ظاهر گشته و محل قرارگیری این جسم آنومال با این منحنی‌ها قابل تفکیک و تشخیص نمی‌باشد.

به منظور بیان توانایی روش گرادیان کل نرمال میدان گرانی در عبور از عمق جسم آنومال، مقادیر گرادیان کل و گرادیان کل نرمال میدان گرانی حاصل از استوانه افقی مذکور نیز محاسبه گردید. گرادیان کل میدان گرانی ناشی از یک استوانه افقی دو بعدی با داشتن مقادیر مشتق‌های V_{xz} و V_{zz} با استفاده از معادله (۱-۱۸) قابل محاسبه می‌باشد (شکل ۲-۴). مطابق شکل مذکور، با وجود این که افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقادیر گسترش به پایین گرادیان کل با افزایش عمق دیده می‌شود ولی با این وجود، اغتشاشات و نوفه‌هایی که در شکل‌های (۱-۲ تا ۳-۲) دیده می‌شود، در این حالت از بین رفته‌اند.

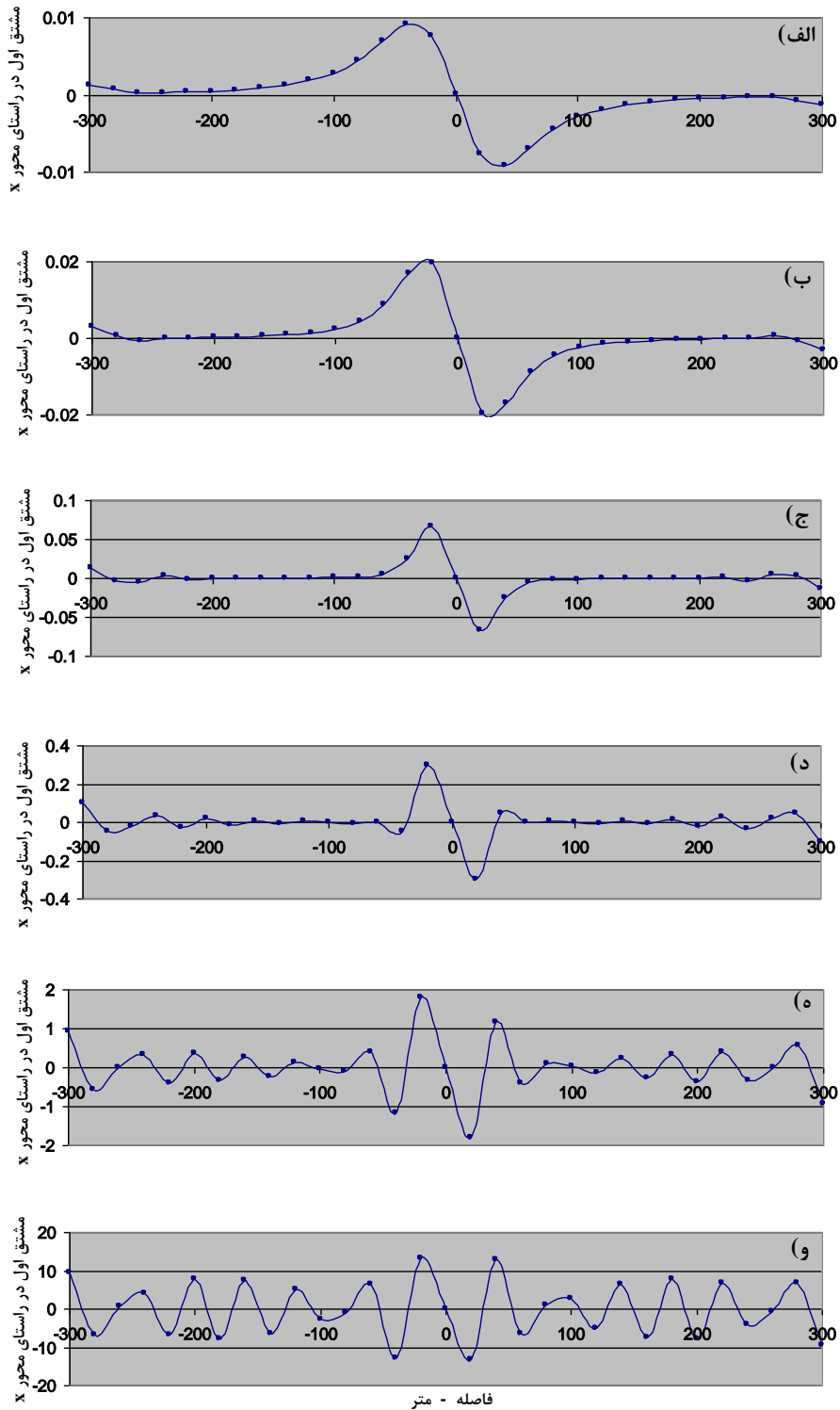
بعد از محاسبه گرادیان کل به وسیله معادله (۱-۱۸) می‌توان مقدار گرادیان کل نرمال را با تقسیم مقدار هر نقطه روی مقطع مورد بررسی به مقدار میانگین مقدار گرادیان کل در آن پروفیل با استفاده از معادله (۱-۱۹) محاسبه نمود.

در شکل (۲-۵-الف) مقادیر گرادیان کل نرمال میدان گرانی ناشی از استوانه افقی در عمق ۵۰ متری از سطح اندازه‌گیری ارائه شده است. همچنین تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال در مقطع X-Z

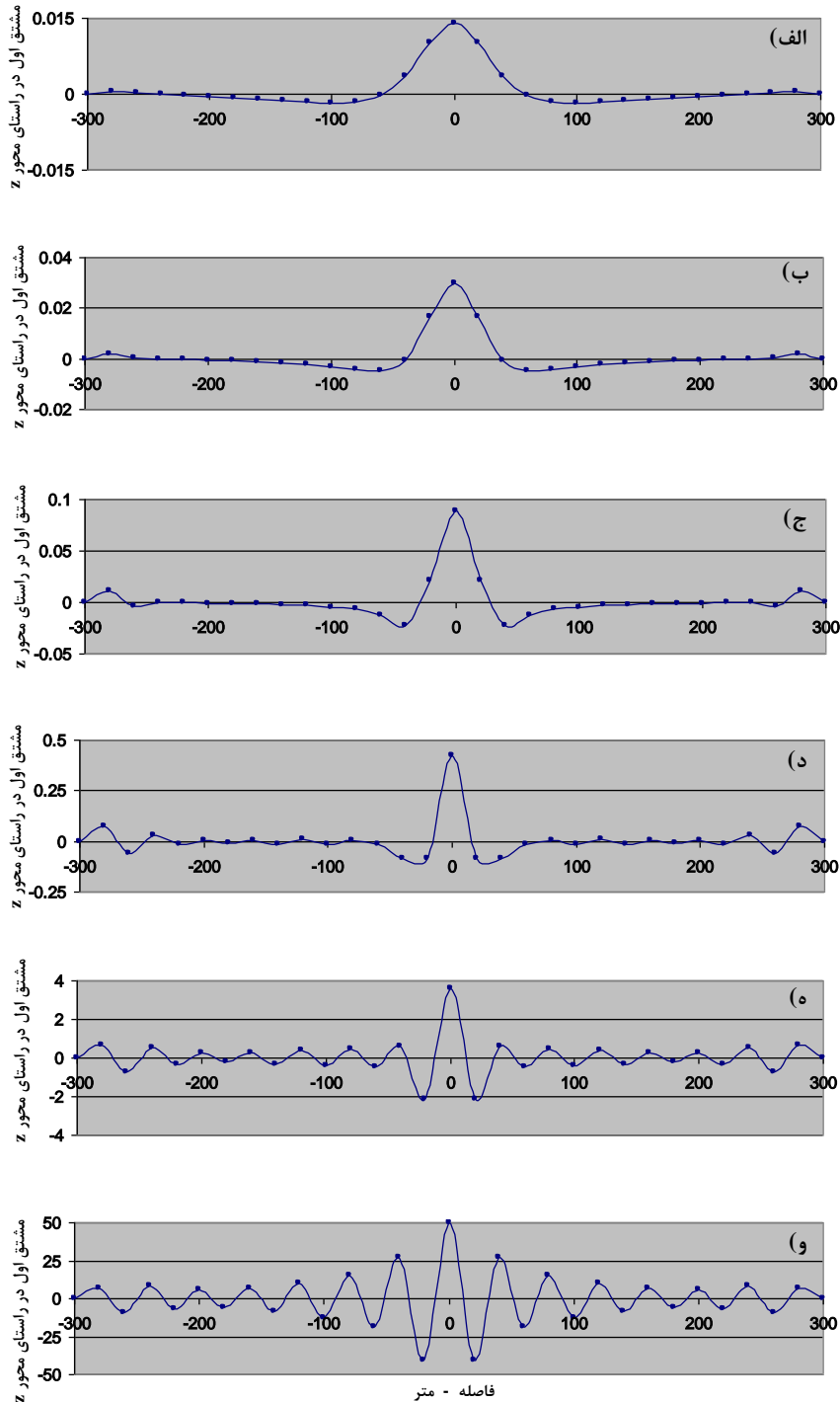
در شکل (۲-۵-ب) ارائه شده است. محل بیشینه مقدار گرادیان کل نرمال به صورت منحنی‌های بسته بیانگر مرکز استوانه می‌باشد.



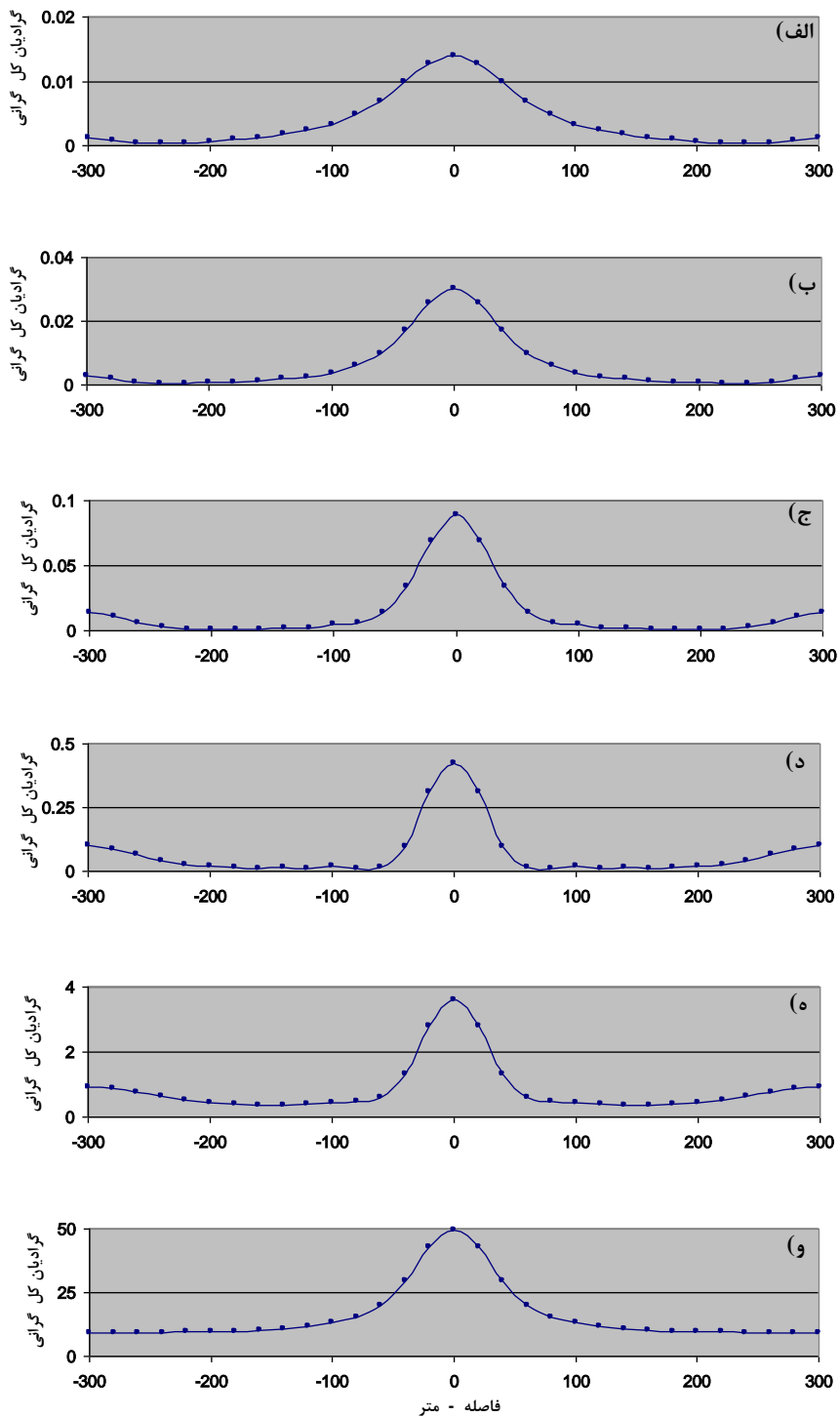
شکل ۱-۲: تغییرات میدان گرانی Δg (در گسترش به سمت پایین) برای یک استوانه افقی مدفون در عمق ۵۰ متری، (الف) اندازه‌گیری در سطح زمین، (ب) افق ۲۰ متری، (ج) افق ۴۰ متری، (د) افق ۶۰ متری، (ه) افق ۸۰ متری و (و) افق ۱۰۰ متری



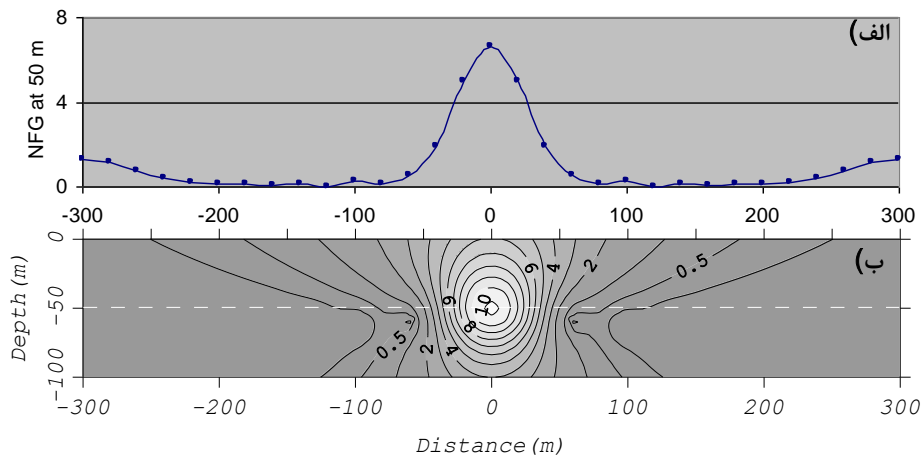
شکل ۲-۲: تغییرات مشتق قائم در راستای محور طولها (V_{xz}) میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی مدفون در عمق ۵۰ متری، الف) اندازه‌گیری در سطح زمین، ب) افق ۲۰ متری، ج) افق ۴۰ متری، د) افق ۶۰ متری، ه) افق ۸۰ متری و و) افق ۱۰۰ متری



شکل ۲-۳: تغییرات مشتق قائم در راستای محور عمق (V_{zz}) میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی مدفون در عمق ۵۰ متری، الف) اندازه‌گیری در سطح زمین، ب) افق ۲۰ متری، ج) افق ۴۰ متری، د) افق ۶۰ متری، ه) افق ۸۰ متری و و) افق ۱۰۰ متری



شکل ۲-۴: گرادیان کل آنومالی گرانی $G(x,z)$ با استفاده از مقادیر مشتق قائم در جهت محورهای طول و عمق (X و Z) برای یک استوانه افقی مدفون در عمق ۵۰ متری، الف) اندازه‌گیری در سطح زمین، ب) افق ۲۰ متری، ج) افق ۴۰ متری، د) افق ۶۰ متری، ه) افق ۸۰ متری و و) افق ۱۰۰ متری



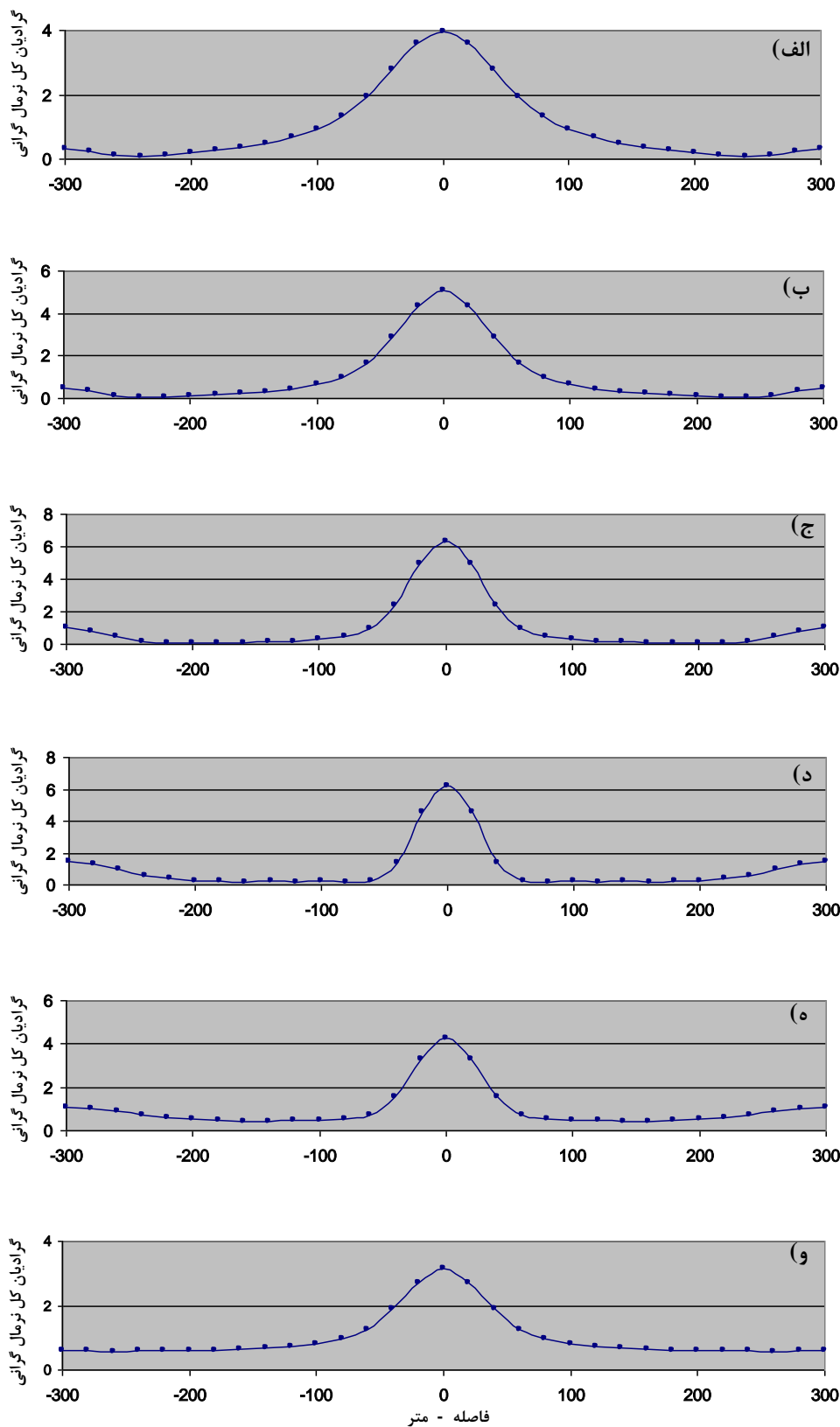
شکل ۲-۵: الف) تغییرات گرادیان کل نرمال میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی در عمق ۵۰ متری، ب) نقشه منحنی‌های هم تراز گرادیان کل نرمال در مقطع x-z

تغییرات گرادیان کل نرمال دو بعدی میدان گرانی حاصل از استوانه افقی مذکور برای افق‌های مختلف در شکل (۲-۶) ارائه شده است. مطابق شکل مورد نظر، به علت استفاده از مشتق‌های میدان پتانسیل در محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال به جای مقدار میدان آنومالی و نیز نرمالایز کردن آن، در عمل گسترش میدان به افق‌های مختلف، نوفه‌های که در نزدیکی منبع آنومالی رخ می‌دهد و در نمودارهای قبلی دیده شده حذف می‌شود. بنابراین امکان گسترش میدان گرادیان کل نرمال در اعماق پایین‌تر از عمق جسم آنومال نیز امکان پذیر است [Aydin, 1997 and 2005; Dondurur, 2005]. از طرفی مقادیر گرادیان کل نرمال تا عمق مورد نظر سیر صعودی داشته و پس از عبور از عمق جسم آنومال، مقادیر سیر نزولی می‌گیرند، به این ترتیب می‌توان عمق استوانه افقی مدفون را تعیین نمود. برای بیان بهتر مساله در ادامه از سری تیلور جهت مشخص نمودن موضوع استفاده می‌گردد

در مباحث ریاضی، سری‌های تیلور از یک تابع حقیقی (یا مختلط) مشخص مانند $f(z)$ که در یک فاصله باز $(a-r, a+r)$ تعریف شده و معمولاً به صورت نامحدود مشتق‌پذیر باشد، به صورت سری‌های

توانی زیر بیان می‌شود [Kreyszing, 2006]:

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \cdot \frac{d^n f(z)}{dz^n} (z - z_0)^n \quad (1-2)$$



شکل ۲-۶: گرا دیان کل نرمال $GN(x,z)$ میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی واقع در عمق ۵۰ متری، (الف) اندازه‌گیری در سطح زمین، (ب) افق ۲۰ متری، (ج) افق ۴۰ متری، (د) افق ۶۰ متری، (ه) افق ۸۰ متری (و) افق ۱۰۰ متری

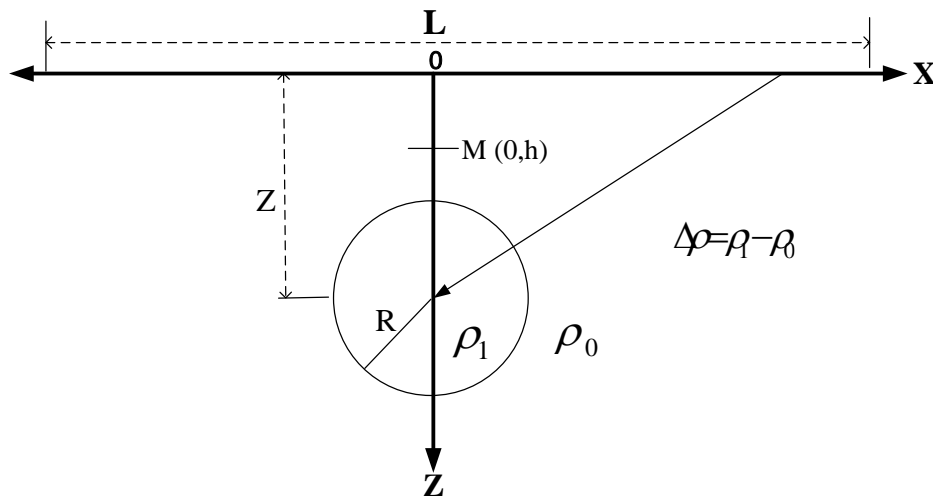
که در آن $n!$ مقدار فاکتوریل n و $f^{(n)}(a)$ به معنی مشتق n ام تابع $f(z)$ در نقطه مشخص a می‌باشد. اگر این سری‌ها برای هر مقدار Z در فاصله $(a-r, a+r)$ همگرا بوده و مجموع آن برابر $f(z)$ باشد، آنگاه تابع $f(z)$ تحلیلی نامیده می‌شود. برای اطمینان از همگرایی سری‌های $f(z)$ ، معمولاً از تخمین برای جمله باقی‌مانده قضیه تیلور استفاده می‌شود. به یک تابع هنگامی تحلیلی گفته می‌شود، اگر و تنها اگر بتوان آن را به صورت یک سری توانی نمایش داد. ضرایب در سری‌های توانی همان ضرابی است که در فرمول سری‌های تیلور داده شده است [Kreyszing, 2006].

برخی از نقاط مشخص در اجسام و توده‌های گرانشی مثل مرکز جرم و گوشه‌های مرتبط با آن (نقاط تکین) در میدان گرانی وجود دارند که جهت بارزسازی موقعیت منبع آن می‌توان از آن‌ها در میدان گرانی استفاده نمود [Berezkin, 1973]. با توجه به این که داده‌های مشاهده‌ای شامل مولفه‌های تحلیلی (سیگنال‌ها) و نوفه‌های تصادفی هستند و همچنین داده‌های گرانی روی پروفیل‌های برداشت به صورت گسسته و در تعدادی محدود نقطه اندازه‌گیری می‌شوند، پس مشکلاتی در تعیین نقاط تکین وجود دارد. از این رو بیان آنومالی‌های گرانی با سری‌های تیلور به صورت سری نامحدود (معادله ۲-۱) برای تعیین نقاط تکین مناسب نمی‌باشد و نقطه تکین مشخصی را نمی‌توان در بازه عمقی مورد نظر تعیین نمود.

برای بیان نقطه تکین و طریقه تعیین آن به روش گرادیان کل نرمال، استوانه افقی مدفون به شعاع R کیلومتری را به عنوان مدل در نظر می‌گیریم (شکل ۲-۷). مقدار گرانی ناشی از آن با استفاده از معادله (۲-۲) محاسبه می‌گردد.

$$\Delta g(x, z) = 2G\lambda \frac{z}{z^2 + x^2} \quad (2-2)$$

که در آن G ؛ ثابت جهانی شتاب جاذبه زمین، $\lambda = \pi \Delta \rho R^2$ ؛ اختلاف چگالی استوانه مدفون با محیط اطراف و z ؛ عمق مرکز استوانه افقی یا فاصله قائم بین نقطه اندازه‌گیری اثر گرانشی استوانه تا مرکز آن می‌باشد.



شکل ۷-۲: یک استوانه افقی مدفون

مقدار آنومالی گرانی $\Delta g(x, z)$ ، در بالای استوانه هنگامی که X و Z کاهش می‌یابند افزایش یافته و در جایی که X و Z مساوی صفر شوند، $\Delta g(0,0)$ ، به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. این موضوع بیانگر این مطلب است که مرکز استوانه افقی یک نقطه تکین می‌باشد. با توجه به معادله (۲-۲) آنومالی گرانی ناشی از این استوانه در راستای محور Z زمانی که $x = 0$ باشد به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta g(0, z) = 2G\lambda \cdot \frac{1}{z} \quad (۳-۲)$$

آنومالی در نقطه $M(0, h)$ در راستای محور عمق را می‌توان با استفاده از سری نامحدود تیلور به صورت زیر نوشت [Berezkin, 1988]:

$$\Delta g(h) = 2G\lambda \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\partial^k \Delta g}{\partial z^k} h^k \quad (۴-۲)$$

با فرض این که $\psi = \frac{h}{z}$ باشد، می‌توان نوشت:

$$\Delta g(\psi) = \frac{2G\lambda}{z} \sum_{k=0}^{\infty} \psi^k \quad (۵-۲)$$

اگر فرض شود: $S = \sum_{k=0}^{\infty} \psi^k$ ، زمانی که $\psi < 1$ باشد، سری همگرای S یک سری هندسی بوده پس مجموع جملات آن به صورت $1/(1-\psi)$ به دست می‌آید. ولی زمانی که ψ به سمت یک میل می‌کند، یعنی نقطه h در محل مرکز توده آنومال (مرکز استوانه) قرارگیرد، مقدار مجموع به سمت بی‌نهایت

میل می‌کند ($S \rightarrow \infty$). بنابراین نقاط تکین میدان گرانی تعیین شده و موقعیت مرکز استوانه مشخص می‌شود. ولی اگر آنومالی‌های گرانی به وسیله یک سری محدود تیلور زیر بیان شود، موقعیت استوانه تفاوت کاملاً مشخصی نسبت به حالت قبل خواهد داشت:

$$\Delta g(\psi) = \frac{2G\lambda}{z} \sum_{k=0}^N \psi^k \quad (6-2)$$

بدیهی است که از معادله (6-2) می‌توان دریافت که اگر $\psi \geq 1$ باشد، سری S محدود خواهد شد. به این ترتیب آنومالی گرانی به سمت پایین گسترش می‌یابد. با استفاده از این معادله می‌توان دریافت زمانی که نقطه اندازه‌گیری در زیر مرکز استوانه ($\psi > 1$) قرار گیرد، سری S به طور یکنواخت صعودی بوده و هیچ پاسخ مناسبی از منبع آنومال ارائه نمی‌دهد. حال اگر مقادیر آنومالی گرانی نرمالایز شوند، یعنی این که مقدار گرانی مشاهده‌ای در یک نقطه به مقدار متوسط آن روی یک پروفیل یا یک صفحه تقسیم شود، سری محدود در معادله را می‌توان برای تعیین نقاط تکین میدان گرانی استفاده نمود. به این ترتیب می‌توان معادله (5-2) را به صورت زیر باز نویسی نمود [Berezkin, 1988; Kreyszig, 2006]:

$$\Delta g(\psi) = \frac{2G\lambda}{z} \sum_{k=0}^{\infty} \psi^k = \frac{2G\lambda}{z} \left[\sum_{k=0}^N \psi^k + \sum_{k=N+1}^{\infty} \psi^k \right] = \Delta g_N(\psi) + r_N(\psi) \quad (7-2)$$

که در آن $\Delta g_N(\psi)$ همان معادله (6-2) و $r_N(\psi)$ مقدار باقی‌مانده سری می‌باشد. با استفاده از تئوری سری‌ها می‌توان ثابت نمود که با انتخاب مناسب N ، وقتی که $\psi < 1$ ، یعنی نقطه مشاهده‌ای بالای مرکز استوانه قرار گیرد، مقدار باقی‌مانده $r_N(\psi)$ کوچک‌تر از مقدار $\Delta g_N(\psi)$ خواهد بود. زمانی که $\psi > 1$ باشد، یعنی نقطه محاسبه آنومالی زیر مرکز ثقل استوانه بوده و در این صورت مقدار باقی‌مانده $r_N(\psi)$ بزرگ‌تر از مقدار $\Delta g_N(\psi)$ خواهد شد. بنابراین، می‌توان یک تابع نرمال به صورت زیر تعریف نمود [Berezkin, 1988]:

$$\Delta g_{nor}(\psi) = \frac{\Delta g_N(\psi) + r_N(\psi)}{r_N(\psi)} = \frac{\Delta g_N(\psi)}{r_N(\psi)} + 1 \quad (8-2)$$

معادله (۸-۲) نشان می‌دهد در شرایطی که نقطه مشاهده‌ای به مرکز جرم جسم نزدیک شود، تابع نرمال شده $\Delta g_{nor}(\psi)$ افزایش می‌یابد. حال در شرایطی که $\psi > 1$ باشد، یعنی نقطه اندازه‌گیری در زیر مرکز جرم جسم قرار گرفته باشد، تابع نرمال $\Delta g_{nor}(\psi)$ به دلیل اینکه مقدار $r_N(\psi)$ از مقدار $\Delta g_N(\psi)$ بزرگ‌تر است، کم می‌شود. در نتیجه تابع نرمال دارای یک مقدار بیشینه در مرکز استوانه ($h = z$) خواهد بود، بدین ترتیب موقعیت مرکز استوانه معلوم می‌گردد.

روش گرادیان کل نرمال دو بعدی آنومالی‌های گرانی در سال ۱۹۶۷ توسط برزکین به صورت معادله (۱۹-۱) و یا به عبارتی دیگر به صورت زیر تعریف شد.

$$G_N(x, z) = \frac{G(x, z)}{G_m(z)} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial z}\right)^2}}{\frac{1}{M} \sum_1^M \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial z}\right)^2}} \quad (9-2)$$

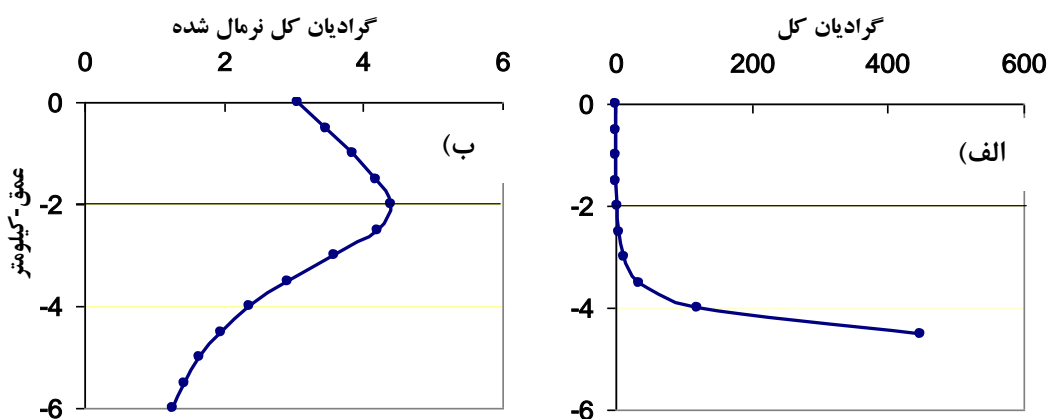
که در آن $\partial \Delta g(x, z) / \partial x$ و $\partial \Delta g(x, z) / \partial z$ به ترتیب مشتق‌های اول افقی و قائم آنومالی گرانی Δg در نقطه (x, z) می‌باشد و M تعداد نقاط مشاهده‌ای روی پروفیل اندازه‌گیری داده‌های گرانی، $G(x, z)$ مقدار گرادیان کل آنومالی گرانی در هر نقطه مشاهده‌ای، $G_m(z)$ متوسط گرادیان کل آنومالی‌های گرانی در افق ثابت z و $G_N(x, z)$ مقدار گرادیان کل نرمال شده در نقاط (x, z) در یک مقطع $x-z$ می‌باشد.

در مدل استوانه‌ای بیان شده در شکل (۷-۲)، محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال، با استفاده از مقادیر مشتق‌های قائم و افقی به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial x} &= 2G\lambda \frac{z^2 - x^2}{(x^2 + z^2)^2} \\ \frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial z} &= -4G\lambda \frac{xz}{(x^2 + z^2)^2} \\ G(x, z) &= 2G\lambda \frac{1}{x^2 + z^2} \end{aligned} \quad (10-2)$$

با فرض این که استوانه در عمق ۲ کیلومتری واقع باشد، مقادیر تغییرات گرادیان کل و گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی ناشی از وجود استوانه در نقطه $x=0$ محاسبه و نمودار تغییرات آنها در برابر عمق در شکل (۸-۲) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۲-۸-الف) مقادیر بیشینه گرادیان کل، $G_{max}(0, z)$ ، با افزایش عمق به آرامی و به تدریج افزایش می‌یابند و مرکز استوانه به عنوان نقطه تکین در آن واضح نمی‌باشد. اما در شکل (۲-۸-ب) گرادیان کل نرمال، $G_N(0, z)$ ، دارای یک مقدار بیشینه در مرکز یا نقطه تکین می‌باشد که موقعیت عمقی مرکز استوانه است. از این ویژگی می‌توان در تخمین تعداد بهینه جملات سری فوریه که نقش اساسی در نشان دادن وضعیت توده آنومال در عمق دارد استفاده نمود که در ادامه شرح داده می‌شود.



شکل ۸-۲: الف) نمایش تغییرات گرادیان کل، ب) گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی ناشی از یک استوانه افقی مدفون در عمق ۲ کیلومتری نسبت به عمق

۳-۲ استانداردسازی آنومالی‌های گرانی مشاهده‌ای

به منظور بارز کردن پایداری و توانایی روش تفسیر و کاهش همزمان انحراف ناشی از منابع موهومی و کاذب، لازم است که داده‌های مشاهده‌ای استاندارد شود. در گرانی سنجی، تابع $\Delta g(x, z)$ روی پروفیلی به طول L به صورت یک سری از مقادیر زیر بیان می‌گردد [Ciancara and Marcak, 1979].

$$\Delta g_0, \Delta g_1, \dots, \Delta g_{M-1} \quad (11-2)$$

که در آن M تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری روی پروفیل و $\frac{L}{M}$ فاصله نقاط مشاهده‌ای می‌باشد.

برای محاسبه سری‌های فوریه یکسری از داده‌های گسسته (معادله ۱۱-۲)، لازم است که مقادیر ابتدایی و انتهایی پروفیل صفر در نظر گرفته شود [Ciancara and Marcak, 1979; Tran, 2004].

$$\Delta g_0 = \Delta g_{M-1} = 0 \quad (12-2)$$

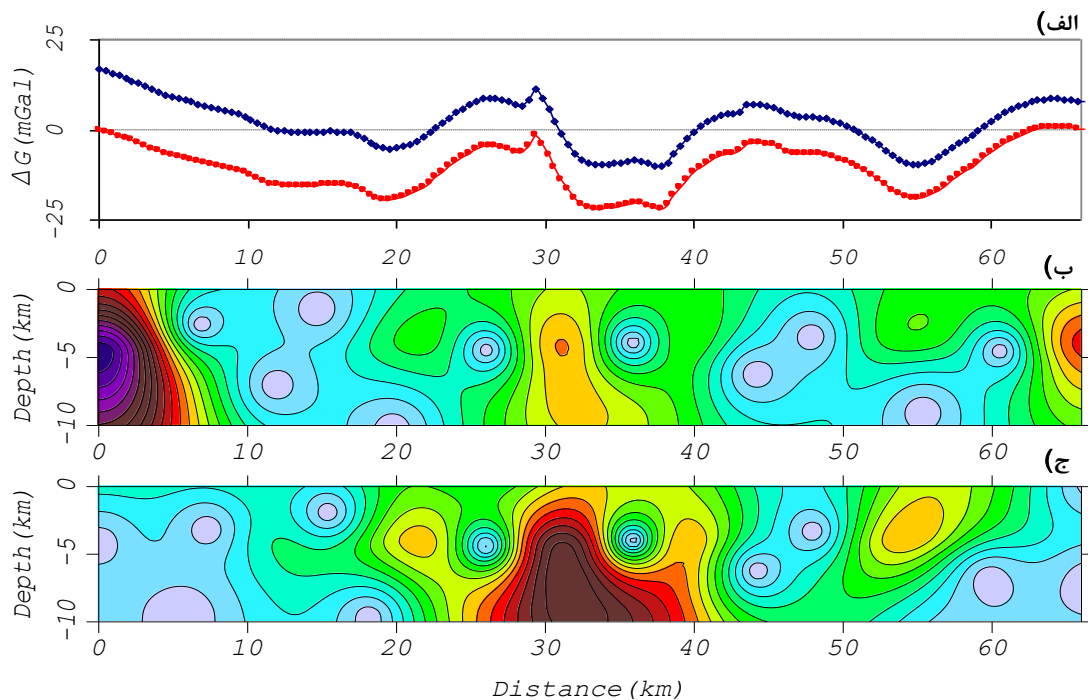
شرط (۱۲-۲) زمانی پدید می‌آید که همه داده‌های موجود در یک پروفیل براساس معادله زیر تبدیل شوند. به این ترتیب مقادیر انتهایی دو طرف پروفیل صفر شده و سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای از آشفتگی‌ها در لبه‌ها یا اثر گیبس^{۶۹} خواهد شد.

$$\Delta g_i = \frac{\Delta g_0 - \Delta g_{M-1}}{M-1} i - \Delta g_0 + \Delta g_i \quad (13-2)$$

به عنوان مثال، داده‌های گرانی واقعی در راستای پروفیلی که به فاصله ۵۰۰ متری اندازه‌گیری شده‌اند بررسی می‌شود. اثر گرانی این داده‌ها در راستای پروفیل مذکور در دو حالت استاندارد شده و بدون استاندارد رسم شده است (شکل ۲-۹-الف). مطابق این شکل قبل از عمل استاندارد کردن مقادیر گرانی در دو انتهای پروفیل مثبت بوده که با استاندارد نمودن، مقادیر حاشیه‌ای پروفیل به صفر تبدیل یافته و به نوعی داده‌های هر نقطه روی پروفیل که بر مبنای مقادیر انتهایی نرمال شده‌اند، بیان شده است. برای روشن شدن بهتر موضوع و نمایش مقادیر انتهایی در نتیجه مقادیر گرادیان کل نرمال روی پروفیل، مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی در هر دو حالت محاسبه و مقاطع آن‌ها رسم گردید (شکل ۲-۹-ب، ج). مقایسه این دو مقطع نشان می‌دهد زمانی که داده‌ها در محدوده پروفیل استاندارد نشده‌اند در ابتدا و انتهای پروفیل دو مقدار بیشینه نمایان شده که سبب تضعیف مقادیر بیشینه موجود در بخش میانی پروفیل گشته است در حالی که در حالت دوم (شکل ج) در مقادیر گرادیان

^{۶۹} . Gibbs's effect

محاسبه شده اثر آشفتگی حذف گردیده و توده مورد انتظار در بخش میانی پروفیل به خوبی آشکار شده است.



شکل ۲-۹: (الف) اثر گرانی در راستای یک پروفیل بدون استاندارد (سرمه ای) و استاندارد شده (قرمز)، (ب) گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی بدون استاندارد نمودن و (ج) با استاندارد نمودن داده های گرانی

۲-۴- روش محاسبه گرادیان کل نرمال

برای فرآیند گسترش به سمت پایین می توان از روش استاندارد مبتنی بر سری فوریه استفاده نمود، که فرآیند گسترش را در حوزه عدد-موج^{۷۰} محقق می نماید [Pasteka, 2000; Kanasewich and Agarwal, 1970]. سری فوریه، بسط یک تابع متناوبی مثل $g(x)$ بر حسب مجموعه محدودی از توابع سینوسی و کسینوسی می باشد. محاسبه و مطالعه سری های فوریه معروف به آنالیز هامورنیک ها به عنوان راهی که یک تابع متناوب دلخواه را به مجموعه ای از جملات ساده تبدیل نماید، طوری که هر یک از آن ها را بتوان به طور جداگانه حل نمود و سپس برای به دست آوردن حل مساله اصلی دوباره آن ها را به هم ترکیب نمود، راه حلی بسیار مفید برای حل توابع پیچیده است.

^{۷۰} . Wave number domain

هر دسته از توابع به فرم مجموعه متعامد کامل، دارای یک رابطه سری‌های فوریه تعمیم یافته مشابه با سری‌های فوریه می‌باشد. با استفاده این روش برای یک سری فوریه تعمیم یافته، سری‌های فوریه معمول حاوی مولفه‌های سینوسی و کسینوسی با لحاظ کردن توابع $g_1(x) = \cos x$ و $g_2(x) = \sin x$ حاصل می‌شوند. زمانی که این توابع در بازه $[-L, L]$ یک مجموعه متعامد کامل را تشکیل دهند، سری فوریه برای تابع $g(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شود [Spiegel, 1974; Arfken, 1985; Kreyszig, 2006]:

$$g(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (14-2)$$

که در آن، $\frac{\pi}{L}$ فرکانس زاویه‌ای پایه و x متغیر مستقل از زمان یا فاصله می‌باشد. فرکانس $\frac{n\pi}{L}$ هارمونیک n ام فرکانس پایه‌ای (اولیه) خوانده می‌شود. بنابراین تابع مذکور با نمایش سری‌های فوریه را آنالیز هارمونیک گویند [Kreyszig, 2006; Telford et al, 1991]. a_n و b_n نیز ضرایب هارمونیک بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$a_0 = \frac{2}{L} \int_0^L g(x) dx$$

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^L g(x) \cos\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx \quad (15-2)$$

$$b_n = \frac{2}{L} \int_0^L g(x) \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx$$

در معادلات اخیر $n = 1, 2, 3, \dots$ تعداد جملات سری فوریه می‌باشد.

سری معادله (14-2) متناظر با $g(x)$ است ولی برای همگرایی سری فوریه بایستی شرایط دیریکله به شرح زیر برقرار باشد [Gerken, 1989; Kreyszig, 2006].

الف: تابع در فاصله $(-L, L)$ تعریف شده و دارای دوره تناوب $2L$ باشد.

ب: مقدار تابع معلوم و موجود باشد.

ج: تابع و مشتق آن به صورت قطعه‌ای پیوسته باشد.

د: تابع دارای تعداد محدودی نقاط کمینه و بیشینه باشد.

در بسیاری از مسائل ژئوفیزیکی به ویژه در روش‌های میدان پتانسیل، نیاز عملی ایجاب می‌کند که سری فوریه را در مورد توابعی که فقط بر فاصله‌ای متناهی تعریف شده‌اند به دست آورد. مثلاً اگر تابع نامتناوبی مانند $g(x)$ در فاصله مشخصی مانند $[0, L]$ تعریف شده باشد و لازم باشد در این فاصله معادل سری فوریه آن نوشته شود. واضح است که این تابع به علت متناوب نبودن دارای بسط فوریه نمی‌باشد. اما می‌توان توابع متناوب زوج و یا فردی را چنان تعریف کرد که سری فوریه آنها در فاصله مذکور بر تابع $g(x)$ منطبق باشد. بنابراین می‌توان از سری‌های سینوسی و کسینوسی در مسائل کاربردی نظیر داده‌های مشاهده‌ای گرانی و مغناطیس بهره برد [Kreyszig, 2006].

آنومالی‌های گرانی $\Delta g(x, z)$ را می‌توان به وسیله معادله لاپلاس تعیین نمود. بنابراین با استفاده از سری‌های سینوسی فوریه در روش گسترش به سمت پایین، می‌توان یک تابع متناوب در فاصله معین $(0 - L)$ را برای یک سطح مشخص Z در فضای دو بعدی به صورت زیر تعریف نمود [Berezkin, 1973; Zeng et al, 2002; Dondurur, 2005; Tran, 2004]:

$$\Delta g(x, z) = \sum_{n=1}^N B_n \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \exp\left(\frac{n\pi}{L} z\right) \quad (16-2)$$

که در آن N تعداد جملات سری فوریه و B_n ضرایب هارمونیک‌های سینوسی می‌باشد که توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردند.

$$B_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L \Delta g(x, 0) \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx \quad (17-2)$$

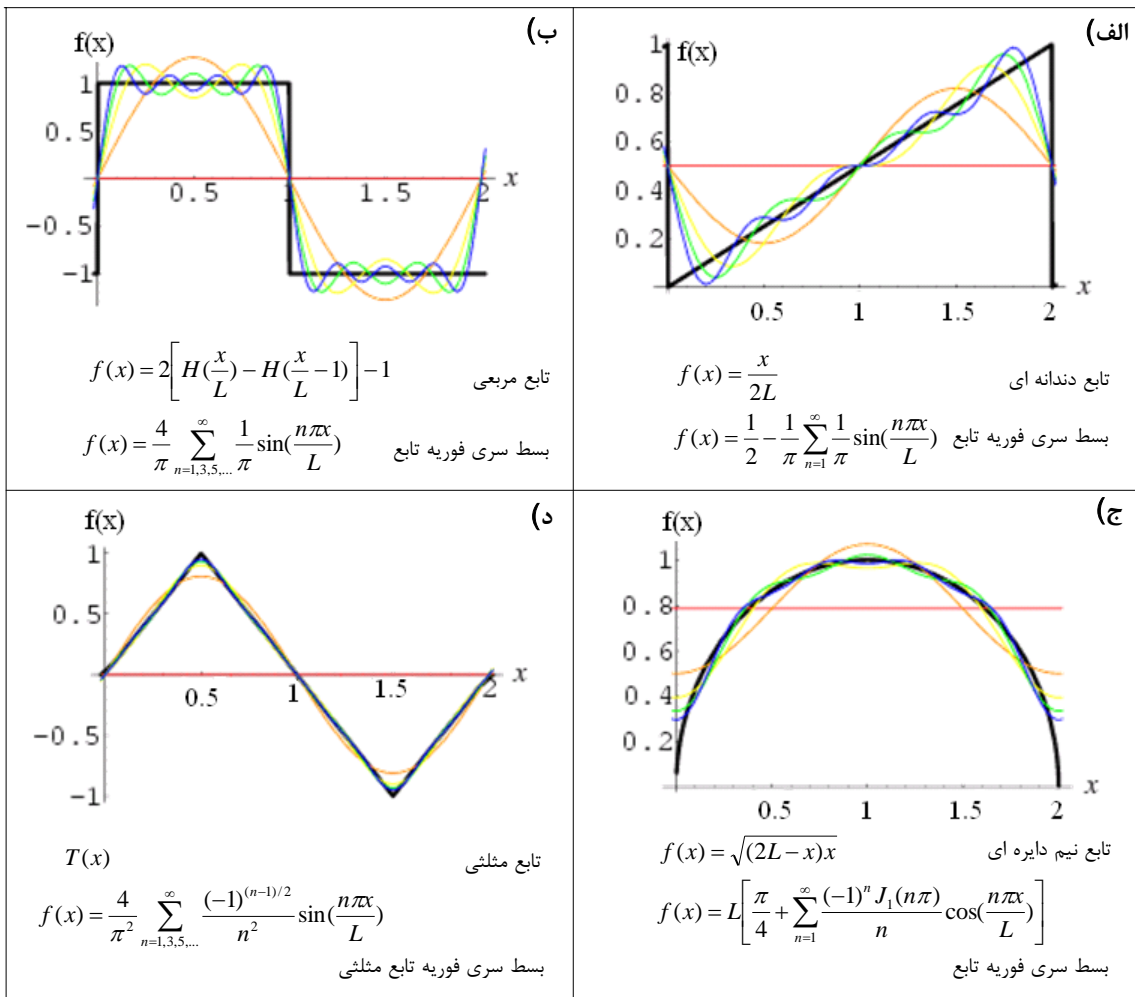
روش‌های عددی مختلفی مثل قاعده دوزنقه^{۷۱}، یک سوم سیمپسون^{۷۲} و روش فیلون [Filon, 1928] وجود دارد که جهت محاسبه ضرایب B_n مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به تاثیر این ضرایب روی مقدار گرادیان کل نرمال، در پیوست (ب) ضمن شرح مختصر روش‌های فوق و بر شمردن

^{۷۱} . Trapeze

^{۷۲} . Simpson

مزایا و معایب آن‌ها، الگوریتم‌ها و کدهای لازم برای محاسبه آن‌ها ارائه می‌شود تا در فصل‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرند.

در تبدیل توابع به سری فوریه معادل آن‌ها، عمل برازش تابع با سری فوریه در نزدیکی ناپیوستگی‌ها ضعیف می‌باشد. در نتیجه این امر نقاط نزدیک ناپیوستگی، یک محدوده پرت و خطاداری نشان می‌دهد که به پدیده گیبس معروف است و در نقاط ابتدا و انتهای تابع واقع می‌شود. پدیده گیبس مقدار عدم برازش^{۷۳} سری فوریه است که در نواحی ناپیوستگی تابع رخ می‌دهد. نمونه‌ای از این پدیده در سری فوریه توابع موج مربعی، مثلثی، دندانه‌ای و نیم دایره‌ای در شکل (۲-۱۰) دیده می‌شود.



^{۷۳} . Overshoot

شکل ۲-۱۰: پدیده گیبس برای برخی توابع الف) دندانهای، ب) مربعی، ج) نیم دایره‌ای، د) مثلثی
[Arfken, 1985; <http://mathworld.wolfram.com>]

این پدیده برخی اوقات به نام اثر لبه نیز خوانده می‌شود و بیانگر این نکته است که سری‌های فوریه (تبدیل فوریه) نمی‌تواند به خوبی توابع پله‌ای را توصیف نماید، آنها همیشه تنها نقطه متوسط یک پله و لبه‌هایی که نوسان کوچک در آن پدید می‌آید را توصیف می‌کند. زمانی که یک موج حاوی ناپیوستگی (مشتق ناپیوسته) به صورت سری فوریه نوشته شود، عمل برازش در نزدیکی ناپیوستگی ضعیف است [Sheriff and Geldart, 1995].

همان طور که قبلاً اشاره شد، در فرآیند محاسبه مقدار آنومالی میدان پتانسیل و نیز گرادیان آن در راستای محورهای X و Z در روش گسترش به سمت پایین، اغتشاشات و نوفه‌هایی در میدان گرانی ظاهر می‌شود. برای حذف یا کاستن این نوفه یا اثر گیبس از یک تابع هموارساز سینوسی استفاده می‌شود که در سری سینوسی توابع مورد نظر ضرب می‌شود [Berezkin, 1967; Hamming, 1986; Acton, 1990]. این جمله هموارساز سینوسی به ضرایب سیگما لانکوزس^{۷۴} معروف می‌باشد و به صورت زیر است:

$$Q = \left\{ \sin\left(\frac{\pi n}{N}\right) / \frac{\pi n}{N} \right\}^{\mu} \quad (18-2)$$

که در آن μ عدد صحیحی است که نمایانگر درجه هموار کنندگی است و میزان انحنای تابع Q را کنترل می‌کند.

اگر چه می‌توان برای μ هر عدد صحیح انتخاب نمود، ولی مقدار آن برای اکتشاف منابع نفتی عدد ۲ در نظر گرفته می‌شود [Berezkin, 1973 and 1988] که مورد استفاده بسیاری از پژوهشگران نیز قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر ۲ یا ۱ برای μ نتایج منطقی‌تری در روش گسترش به سمت پایین ارائه می‌دهد [Aydin, 1997; Karsli, 2001]. دون‌دورور از این روش در تعیین عمق

^{۷۴} . Lanczos

اجسام نازک به کمک آنومالی حاصل روش الکترومغناطیس اسلینگرام دریافت که عدد $\mu=1$ برای عملگر تابع Q مناسب تر است [Dondurur, 2005]. این موضوع در فصل چهارم بیشتر بررسی می شود. بدین ترتیب با ضرب تابع هموار کننده لانکزوس در سری فوریه، تابع $\Delta g(x, z)$ به صورت معادله زیر ارائه می گردد:

$$\Delta g(x, z) = \sum_{n=1}^N B_n \sin\left(\frac{\pi n}{L} x\right) \exp\left(\frac{\pi n}{L} z\right) \left\{ \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{N}\right)}{\frac{\pi n}{N}} \right\}^{\mu} \quad (19-2)$$

مشتق‌های $\frac{\partial \Delta g}{\partial z}$, $\frac{\partial \Delta g}{\partial x}$ معادله (19-2) به صورت زیر به دست می آید [Berezkin, 1967]:

$$\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial x} = \frac{\pi}{L} \sum_{n=1}^N n B_n \cos\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \exp\left(\frac{\pi n}{L} z\right) \left\{ \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{N}\right)}{\frac{\pi n}{N}} \right\}^{\mu} \quad (20-2)$$

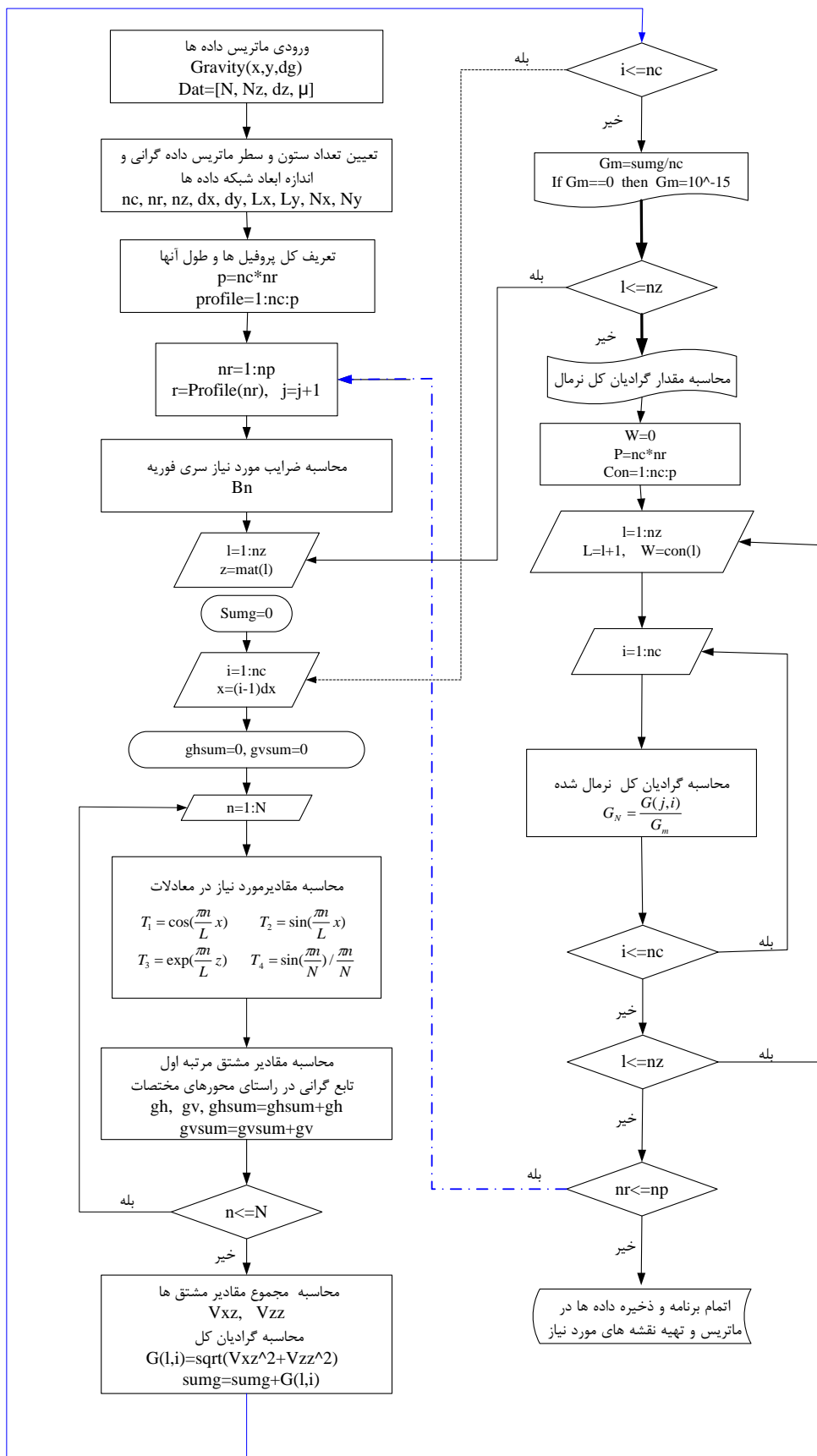
$$\frac{\partial \Delta g(x, z)}{\partial z} = \frac{\pi}{L} \sum_{n=1}^N n B_n \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \exp\left(\frac{\pi n}{L} z\right) \left\{ \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{N}\right)}{\frac{\pi n}{N}} \right\}^{\mu} \quad (21-2)$$

مقادیر گرادیان کل و گرادیان کل نرمال در صفحه $X-Z$ به ترتیب با معادلات (18-1) و (19-1) با لحاظ نمودن مقدار $\nu=1$ محاسبه می شوند که مقدار گرادیان کل نرمال (G_N) یک مقدار بدون بعد است. در شکل (2-11) الگوریتم محاسبه ضرایب هارمونیک، مشتق تابع میدان گرانی در راستای محورهای X و Z ، مقدار گرادیان کل و مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی به صورت فلوجارت ارائه شده است که براساس آن کدهای لازم برای محاسبه گرادیان کل نرمال دو بعدی تهیه شده است.

در این الگوریتم ابتدا داده‌های مورد نیاز ورودی به صورت ماتریس داده‌ها و ماتریس پارامترهای موردنیاز از برنامه خوانده می شود. سپس تعداد سطرها و ستون‌های ماتریس تعیین و طول پروفیل و تعداد نقاط محاسبه‌ای معلوم می شود. مقادیر ضرایب سری فوریه با برنامه‌ای با روش‌های عددی جهت محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال محاسبه می گردد (B_n). بعد از تعیین ضرایب مورد نظر برای محاسبه مقادیر NFG برای هر نقطه روی پروفیل، مقادیر مشتق در راستای قائم (V_{zz}) و افقی (V_{xz}) تابع میدان گرانی محاسبه می شود. در نهایت مقادیر گرادیان کل (G) و گرادیان کل نرمال (G_N) برای

هر نقطه محاسبه می‌گردد. خروجی برنامه به صورت ماتریس‌های مختلف و همچنین مقطع گرادیان کل نرمال می‌باشد.

اکنون که اصول، مبانی و فرآیند محاسبات مربوط به گرادیان کل نرمال دو بعدی آنومالی‌های گرانی ارائه شد برای بررسی توانمندی‌های عملی آن قبل از هر چیز تهیه یکسری مدل‌های ساده و پیچیده با هندسه و خواص معلوم همراه با چگونگی محاسبه پاسخ آنومالی گرانی آن‌ها در شرایط مختلف ضروری است. از این رو در فصل بعدی فرآیند محاسبه پاسخ گرانی مدل‌های مختلف مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۲-۱۱: فلوجارت محاسبه گرادیان کل نرمال دو بعدی

فصل سوم

تهیه الگوریتم های مورد نیاز جهت محاسبه کرانی مدل های دو و سه بعدی

۳-۱- مقدمه

به منظور بررسی توانمندی‌های روش گرادیان کل نرمال در کاربردهای عملی ابتدا باید عملکرد این روش را برای یکسری داده‌های مصنوعی که در واقع پاسخ مدل‌های مختلف دو و سه بعدی با هندسه و خواص فیزیکی مختلف می‌باشند، مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین تهیه الگوریتم‌های متفاوت برای چگونگی محاسبه پاسخ گرانی مدل‌ها لازم است.

با توجه به اینکه ساختارهای زمین شناسی مخازن هیدروکربوری دارای اشکال ساده و پیچیده دو و سه بعدی می‌باشند، لذا برای بررسی بهتر و مناسب در این فصل مدل‌ها به دو بخش دو و سه بعدی تقسیم شده است. در هر یک از این بخش‌ها سعی شده است که اثر گرانی ناشی از اشکال منظم هندسی و نیز شکل‌های نامنظم با تهیه الگوریتم‌ها و کدهای مناسب محاسبه گردد. محاسبه اثر گرانی اجسام آنومال توسط افراد زیادی صورت گرفته است [Talwani et al, 1959; Talwani, 1965; Talwani and Ewing, 1960; Bott, 1963; Plouff, 1976; Okabe, 1979; Cady, 1980; Won and Bevis, 1987; Dobrin and Savit, 1988; Cooper, 1993-2003; Chakravathi and Sundararajan, 2008]. ولی به منظور تهیه ساختارهای مناسب و دلخواه لازم بوده که برنامه‌های کامپیوتری مجزایی برای هر کدام از اشکال تهیه گردد. برنامه‌های موجود انعطاف‌پذیری مورد نیاز را برای تعیین پارامترهای مورد نیاز محاسبه گرادیان کل نرمال در اختیار قرار نمی‌دهد.

در این بخش برخی از مدل‌های دو و سه بعدی ساده هندسی منظم که کاربرد بیشتری دارند، به اختصار شرح داده می‌شود. ولی در مورد مدل‌های نامنظم که می‌تواند به عنوان اشکال خاصی از تله نفتی مطرح باشد براساس فرمول‌های موجود، الگوریتم‌های مناسب تهیه و با نوشتن کدهای مورد نیاز اثر گرانی ساختارهای مختلف محاسبه می‌شود. از این کدها و نیز الگوریتم‌ها در فصل بعدی که مدل-سازي انواع مختلف تله‌های نفتی است، استفاده می‌شود.

۳-۲- مدل‌های گرانی سنجی

برای محاسبه مقدار پتانسیل گرانی، U ، و شتاب گرانی، g ، یک جسم از یک نقطه مشخص P می‌توان نوشت [Blakely, 1995; Telford et al, 1991]:

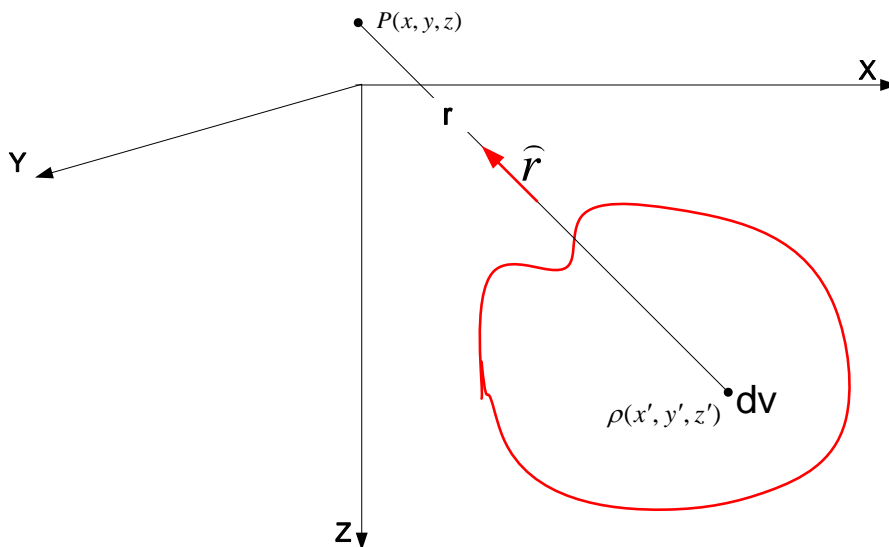
$$U(p) = G \int_R \frac{\rho}{r} dv$$

$$g(p) = \nabla U(p) = -G \int_R \frac{\rho \cdot \hat{r}}{r^2} dv \quad (۱-۳)$$

که در آن ρ چگالی جامد و r فاصله از نقطه P تا یک المان کوچکی از توده جسم به حجم dv ، بردار واحد از یک المان کوچک جسم تا نقطه P بوده که فاصله آن به صورت $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$ محاسبه می‌شود و پارامتر G مقدار ثابت جهانی شتاب جاذبه می‌باشد.

$$G = 6.672 \times 10^{-11} m^3 / KgS^2$$

جهت مثبت محور Z را به طرف پایین و قائم و محورهای X و Y به صورت شکل (۱-۳) در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳-۱: یک جسم سه‌بعدی با چگالی $\rho(x', y', z')$ و شکل دلخواه با نقطه مشاهده‌ای $P(x, y, z)$.

گرانی‌سنگ‌ها مقدار شتاب گرانی را (در جهت افزایش محور Z) اندازه‌گیری می‌کنند. بنابراین در مختصات کارتزین داریم [Blakley, 1995]:

$$g(x, y, z) = \frac{\partial U}{\partial z} = -G \iiint_{z' y' x'} \rho(x', y', z') \frac{(z - z')}{r^3} dx' dy' dz' \quad (2-3)$$

براساس معادله (2-3) خواهیم داشت:

$$g(x, y, z) = \iiint_{z' y' x'} \rho(x', y', z') \psi(x - x', y - y', z - z') dx' dy' dz' \quad (3-3)$$

که در آن

$$\psi(x, y, z) = -G \frac{z}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^3}$$

همان طور که می‌دانیم $\psi(x, y, z)$ تابع گرین نامیده می‌شود. در معادله (3-3) تابع گرین به صورت ساده برای شتاب جاذبه نقطه اندازه‌گیری $P(x, y, z)$ از یک جرم نقطه‌ای واقع در توده آنومال با چگالی $\rho(x', y', z')$ منظور شده است.

روش مستقیم محاسبه $g(x, y, z)$ براساس معادله (2-3) ضروری بوده و به اندازه کافی مفهوم است ولی در عمل خیلی ساده نیست. مساله اصلی در تعیین مقدار تقریبی این انتگرال برای ساختارها و شکل‌های زمین‌شناسی پیچیده می‌باشد و محاسبه آن برای اشکال ساده به آسانی امکان پذیر است. بنابراین جهت محاسبه انتگرال حجمی معادله (2-3) برای ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی نیازمند کد نویسی و کامپیوتر است. به این ترتیب بایستی منابع گرانشی فرضی به N بخش ساده تقسیم شود در نتیجه معادله (2-3) به معادله (4-3) تبدیل می‌شود.

$$g_m = \sum_{n=1}^N \rho_n \psi_{mn} \quad (4-3)$$

که در آن g_m شتاب جاذبه قائم در نقطه مشاهده‌ای m، ρ_n چگالی بخش n ام و ψ_{mn} شتاب گرانشی در نقطه m ناشی از n بخش با چگالی واحد و یکسان می‌باشد.

۳-۳- پاسخ گرانی توده‌های با شکل منظم هندسی

برای تعیین و تشخیص اجسام با اشکال پیچیده با آنومالی‌های گرانی‌سنجی، شناخت اثرات گرانشی اجسام با اشکال ساده هندسی مفید است. در این بخش برای محاسبه اثر گرانشی قائم اجسام با اشکال ساده هندسی دو و سه بعدی نظیر استوانه افقی، تیغه‌های نازک، کره، استوانه قائم، منشور یا مکعب قائم و متوازی السطوح قائم، ابتدا روابط ریاضی موجود مطالعه و براساس آن‌ها الگوریتم‌های لازم جهت تهیه برنامه‌های کامپیوتری در محیط نرم‌افزار Matlab نسخه ۷ تهیه گردید. به منظور معادل سازی ساختارهای زمین‌شناسی با اجسام ساده هندسی در این مدل‌سازی‌ها سعی شده که با تلفیق برخی اجسام ساده هندسی با همدیگر شرایط واقعی‌تری روی مدل‌ها بررسی شود. برای تجزیه و تحلیل ساختارها و تفسیر آنومالی گرانی ناشی از اجسام آنومال، می‌توان چند مدل ساده هندسی را به عنوان اجسام مدفون فرض نمود.

۳-۳-۱- اثر گرانی ناشی از وجود یک استوانه افقی مدفون

مدل استوانه افقی برای توصیف ساختارهای طویل و باریک از جمله نفتگیرهای ناقیدی روی نقشه‌های آنومالی گرانی بوگه مفید می‌باشد (شکل ۳-۲-الف). برای به دست آوردن یک فرمول ساده برای محاسبه آنومالی گرانی بر روی چنین ساختمانی، فرض شده که ساختمان مورد نظر بی‌نهایت طویل است. اگر استوانه را به وسیله یک سری کرات متوالی در کنار یکدیگر فرض نماییم، افزایش شتاب جاذبه گرانی آنها را می‌توان از فرمول کره محاسبه نمود و سپس با انتگرال‌گیری ریاضی آن‌ها، مقدار شتاب جاذبه استوانه با فرمول ذیل به دست می‌آید [Robinsons and Coruh, 1988]:

$$\Delta g = \frac{G \cdot \Delta M \cdot z}{r^2} \quad (۳-۵)$$

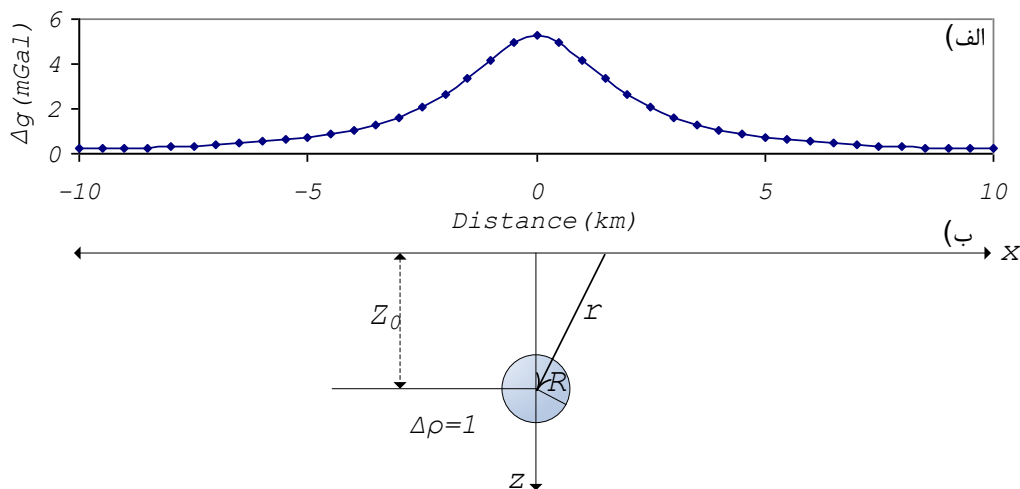
که در آن با توجه به شکل (۳-۲-ب)؛ Z عمق استوانه و r فاصله نقطه اندازه‌گیری تا محور استوانه است، Δm جرم استوانه و $r^2 = x^2 + z^2$ می‌باشد. به عبارت دیگر استوانه با مشخصات فوق به طول بی‌نهایت اثر گرانی آن روی نقاط اندازه‌گیری به صورت معادله (۳-۶) قابل محاسبه است:

$$\Delta g = 2\pi GR^2 \Delta\rho \frac{z}{r^2} \quad (6-3)$$

اما برای به دست آوردن آنومالی گرانی Δg بر حسب میلی گال وقتی که اختلاف چگالی $\Delta\rho$ بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب و شعاع استوانه، عمق و r بر حسب کیلومتر باشند از معادله (۷-۳) استفاده می شود [Robinsons and Coruh, 1988].

$$\Delta g = 41.9214R^2 \Delta\rho \frac{z}{r^2} \quad (7-3)$$

با لحاظ نمودن مقدار شعاع 0.5 کیلومتری، $Z=2$ کیلومتری و $\Delta\rho=1$ گرم بر سانتی متر مکعب، اثر گرانی چنین استوانه‌ای به صورت شکل (۳-۲-الف) خواهد شد.



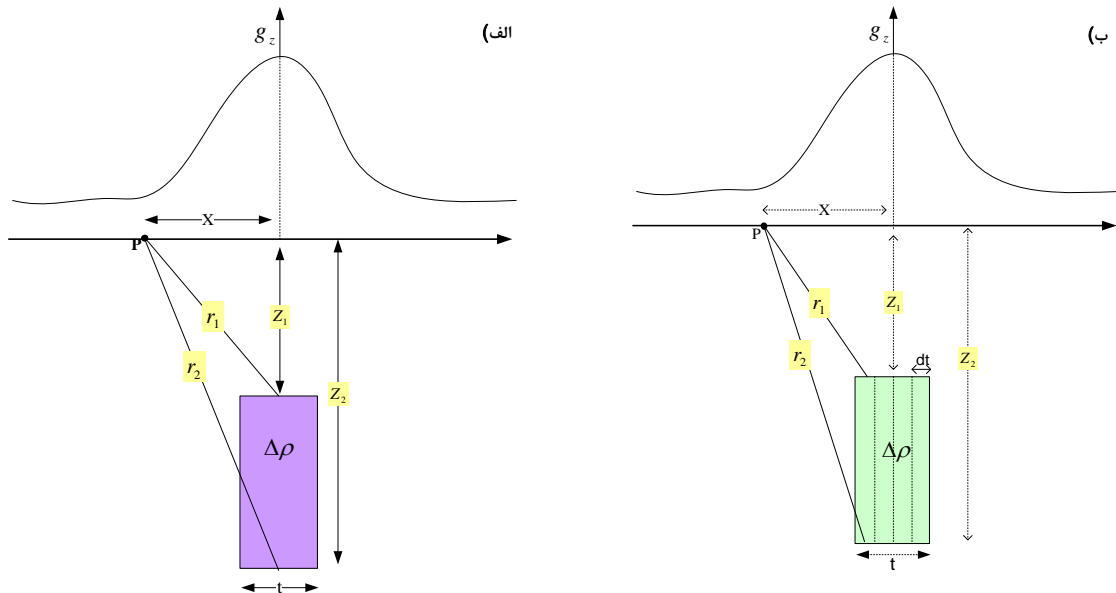
شکل ۳-۲: الف) اثر گرانی قائم محاسبه شده در طول پروفیل عمود بر محور استوانه افقی و ب) یک استوانه افقی مدفون با طول بی‌نهایت که عمود بر پروفیل محاسبه قرار دارد

۳-۲-۳ محاسبه مقدار اثر گرانی اجسام دو بعدی هندسی ساده به روش تیغه‌های قائم نازک

در این روش جهت تخمین اثر گرانی اجسام منظم دوبعدی مانند یک دایک، یک مقطع قائم از آن انتخاب می‌گردد. این مقطع قائم را می‌توان به صورت یک مستطیل یا تیغه قائم (شکل ۳-۳-الف) نشان داد. برای محاسبه اثر گرانی این تیغه نازک از یک نقطه دلخواه بر روی یک پروفیل از معادله (۸-۳) می‌توان استفاده نمود [Dobrin and Savit, 1988].

$$\Delta g_z = 2G\Delta\rho t \ln(r_2 / r_1) \quad (۸-۳)$$

که در آن t ضخامت تیغه انتخابی و r_1 ، r_2 فاصله نقطه اندازه‌گیری (P) نسبت به سطح بالایی و سطح زیرین تیغه مورد نظر می‌باشد.



شکل ۳-۳: الف) محاسبه اثر گرانی یک تیغه مستطیلی قائم در مقطع دو بعدی [Dobrin and Savit, 1988] و ب) محاسبه اثر گرانی جسم با تقسیم به اجزای نازک

برای محاسبه دقیق‌تر مقدار اثر گرانی ناشی از یک جسم آنومال مشابه یک دایک یا یک استوانه افقی به این روش، ابتدا جسم را به اجزای نازک قائم با عرض یکسان (dt) تقسیم کرده و سپس براساس معادله (۸-۳) مقدار اثر گرانی هر کدام از این اجزاها محاسبه و با جمع آنها (معادله ۹-۳) مقدار اثر گرانی جسم در نقطه مشاهده‌ای به دست می‌آید (شکل ۳-۳-ب). بدیهی است که هر چقدر مقدار عرض تیغه‌ها یا اجزاها کمتر باشد دقت محاسبات بیشتر خواهد شد هر چند مدت زمان محاسبه افزایش می‌یابد.

$$\Delta g_z = 2G \sum_{i=1}^n \Delta\rho_i t_i \ln(r_{2i} / r_{1i}) \quad (۹-۳)$$

که در آن n تعداد تیغه‌های سازنده جسم آنومال است.

۳-۳-۳ اثر گرانی ناشی از وجود یک کره مدفون

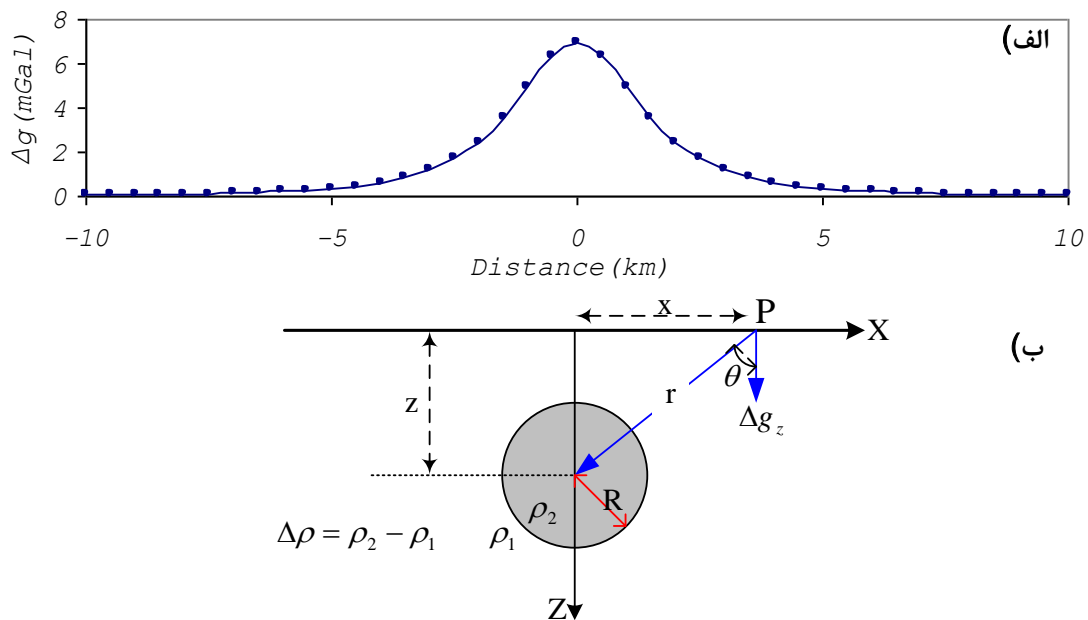
فرمول محاسبه اثر گرانی قائم، Δg_z ، یک کره از یک نقطه فرضی P (شکل ۳-۴-ب) به صورت زیر

است [Telford et al, 1991]:

$$\Delta g_z = \frac{4\pi G \Delta \rho \cdot R^3}{3} \times \frac{z}{r^3} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن؛ $r = \sqrt{x^2 + z^2}$ در صفحه X-Z، Δg_z ؛ اثر گرانشی قائم کره، $\Delta \rho$ ؛ اختلاف چگالی بین کره مدفون و مواد اطراف آن، G ؛ ثابت جاذبه زمین، R ؛ شعاع کره فرضی، x ؛ فاصله افقی نقطه اندازه گیری از مرکز کره و z ؛ عمق مرکز کره

تغییرات اثر گرانی قائم ناشی از چنین کره فرضی با منظور نمودن اختلاف چگالی یک گرم بر سانتی متر مکعب ($\Delta \rho = 1 \text{ gr/cm}^3$)، شعاع ۱/۰ کیلومتری متری و عمق ۲/۰ کیلومتری به کمک کد تهیه شده محاسبه و نمودار تغییرات آن در شکل (۳-۴-الف) ارائه شده است.



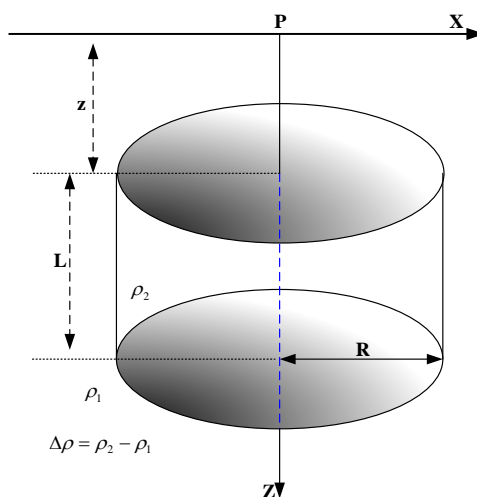
شکل ۳-۴: الف) نمودار تغییرات گرانی قائم یک کره از یک نقطه دلخواه P و ب) یک کره فرضی مدفون

۳-۳-۴ اثر گرانی ناشی از وجود یک استوانه قائم

مدل سودمند دیگر برای معرفی برخی ساختمان‌های زمین، استوانه قائم است که برای مدل‌سازی و محاسبه مقدار شتاب جاذبه ساختارهای زمین‌شناسی نظیر گنبد نمکی نوع نفوذی، پایپ‌های کیمبرلاییتی و گنبد‌های آتشفشانی استفاده می‌شود. اثر گرانی قائم نقطه دلخواه P روی محور استوانه قائم در شکل (۳-۵) آورده شده است که از فرمول زیر محاسبه گردد [Telford et al, 1981]:

$$\Delta g_z = 2\pi G \Delta \rho (L + \sqrt{z^2 + R^2} - \sqrt{(z+L)^2 + R^2}) \quad (3-11)$$

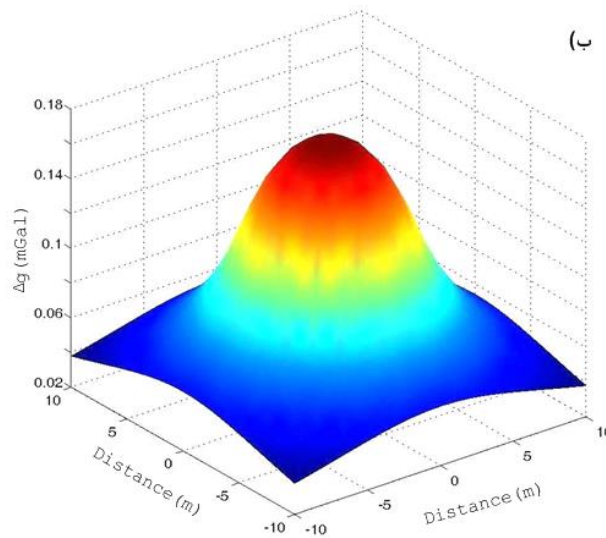
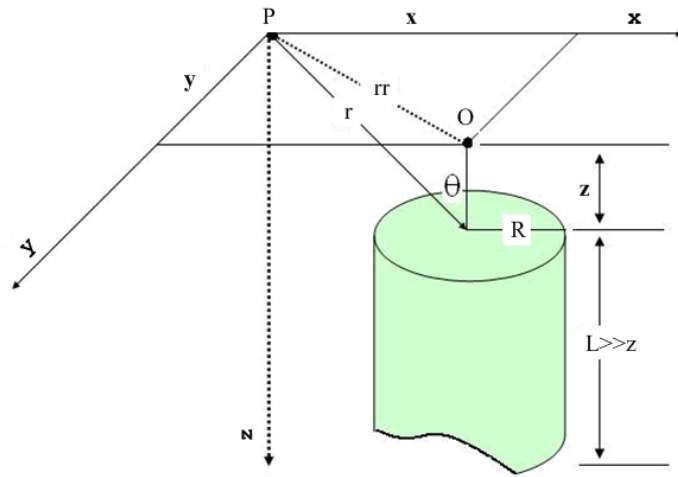
که در آن؛ R شعاع استوانه، z عمق سطح بالایی استوانه قائم و L ارتفاع استوانه قائم، همه واحدها بر حسب متر می باشد.



شکل ۳-۵: اثر گرانی قائم یک استوانه قائم از روی نقطه‌ای واقع بر روی محور آن

برای اینگونه مدل‌ها حالاتی دیگری را می‌توان در نظر گرفت که بتوان اثر گرانی استوانه را روی نقاط خارج از محور آن اندازه‌گیری نمود [Damiata and Lee, 2002a, b]، که این موضوع براساس فرمول تالوانی [Talwani and Ewing, 1960] نیز قابل بررسی است.

زمانی که طول استوانه به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از عمق سطح بالایی استوانه ($L \gg z$) باشد (شکل ۳-۶-الف)، معادله (۳-۱۲) را می‌توان برای محاسبه اثر گرانی برای یک نقطه ایستگاهی خارج محوری با استفاده از روش‌های مشخص حل مساله لاپلاس استفاده کرد.



شکل ۳-۶: الف) اثر گرانی قائم یک استوانه قائم ضخیم در یک نقطه دلخواه مانند P و ب) گرانی قائم محاسبه شده براساس کد تهیه شده از یک استوانه قائم ضخیم $L \gg z$

چون Δg_z در معادله لاپلاس صدق می‌کند، Δg_z را می‌توان برای $r > z > R$ در یک سری از چند

جمله‌ای‌های لژاندر به شکل زیر بکار برد [Arfken, 1985].

$$\Delta g_z(r, \theta) = K \sum_{n=0}^{\infty} b_n r^{-(n+1)} P_n(\cos \theta) \quad (12-3)$$

که در آن $K = 2\pi G \Delta \rho$ ، b_n ضرایب لژاندر و $P_n(\cos \theta)$ چند جمله‌های لژاندر می‌باشد.

$$\tan \theta = \frac{x}{z} \quad \text{و} \quad r^2 = x^2 + z^2 \quad \text{هستند.}$$

روی محور استوانه یعنی $\theta = 0$ و $r = z$ سری‌های به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta g_z = 2\pi G \Delta \rho \left(\frac{b_0 P_0}{z} + \frac{b_1 P_1}{z^2} + \frac{b_2 P_2}{z^3} + \dots \right) = 2\pi G \Delta \rho \left(\frac{b_0}{z} + \frac{b_1}{z^2} + \frac{b_2}{z^3} + \dots \right) \quad (13-3)$$

که در آن همه مقادیر چند جمله‌ای‌های لژاندر برای $\theta = 0$ برابر یک می‌باشند. بسط این معادله

برحسب $\frac{R}{z}$ برابر معادله سری دو جمله‌ای (معادله ۳-۱۴) خواهد شد.

$$\Delta g_z = 2\pi G \Delta \rho \left(z \sqrt{1 + \frac{R^2}{z^2}} - z \right) = 2\pi G \Delta \rho \left\{ \frac{R^2}{2z} - \frac{R^4}{8z^3} + \frac{R^6}{16z^5} - \frac{5R^8}{128z^7} + \frac{7R^{10}}{256z^9} + \dots \right\} \quad (14-3)$$

محاسبه ضرایب این دو سری (معادلات ۳-۱۳ و ۳-۱۴) نشان می‌دهد که $b_n = 0$ ، اگر n فرد باشد و

$$\dots \text{ و } b_8 = \frac{7R^{10}}{256} \text{ و } b_6 = \frac{-5R^8}{128}, b_4 = \frac{R^6}{16}, b_2 = \frac{-R^4}{8}, b_0 = \frac{R^2}{2}$$

بسط $\Delta g_z(r, \theta)$ برای یک نقطه مانند P در خارج از محور استوانه به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta g_z(r, \theta) = 2\pi G \Delta \rho R \left[\frac{1}{2} \frac{R}{r} - \frac{1}{8} \left(\frac{R}{r} \right)^3 P_2(\cos \theta) + \frac{1}{16} \left(\frac{R}{r} \right)^5 P_4(\cos \theta) - \frac{5}{128} \left(\frac{R}{r} \right)^7 P_6(\cos \theta) + \frac{7}{256} \left(\frac{R}{r} \right)^9 P_8(\cos \theta) - \dots \right] \quad (15-3)$$

در نتیجه با جای گذاری مقدار $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ در معادله (۳-۱۵)، مقدار اثر گرانی استوانه قائم در هر

نقطه خارج از محور آن نیز به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\Delta g_z(r, \theta) = \pi G \Delta \rho R^2 \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + z^2}} - \frac{1}{4} \frac{R^2}{(\sqrt{x^2 + z^2})^3} P_2(\cos \theta) + \frac{1}{8} \frac{R^4}{(\sqrt{x^2 + z^2})^5} P_4(\cos \theta) - \frac{5}{64} \frac{R^6}{(\sqrt{x^2 + z^2})^7} P_6(\cos \theta) + \frac{7}{128} \frac{R^8}{(\sqrt{x^2 + z^2})^9} P_8(\cos \theta) - \dots \right] \quad (16-3)$$

شکل (۳-۶-ب) مقدار Δg_z یک استوانه ضخیم قائم را از یک نقطه مثل P به کمک برنامه‌های تهیه

شده براساس مقادیر $R=5$ ، $z=1$ و $\Delta \rho=1$ نشان می‌دهد.

۳-۴- آنومالی‌های گرانی ناشی از مدل‌های پیچیده با اشکال نامنظم

زمانی که توده موجود در زمین از یک شکل نامنظم پیروی کند برای محاسبه میزان آنومالی گرانی آن مجبور به استفاده از مدل‌های ساده هستیم، ولی در این راستا همواره انطباق مدل‌های ساده امکان‌پذیر نبوده و باید از برنامه‌های مشخصی استفاده نمود. دو گونه مدل برای تحلیل این نوع اشکال وجود دارد. برای هر دو مدل فرمول‌های آنومالی گرانی پیچیده بوده و باید با کامپیوتر حل شود. ولی به دلیل ضرورت، از آن‌ها در سطح گسترده‌ای برای آنالیز طرح‌های گرانی بوجه استفاده می‌شود. در ادامه مدل‌های پیچیده را به دو بخش دو بعدی و سه بعدی تقسیم کرده و الگوریتم محاسبه مقدار گرانی آنها براساس روش‌های مختلف بیان می‌شود. سپس با نوشتن برنامه‌های کامپیوتری و با تعیین پارامترهای مشخص برای هر مدل، مقدار اثر گرانی آنها محاسبه می‌شود.

۳-۴-۱- محاسبه اجسام دو بعدی به روش تالوانی

ساختارهای زمین‌شناسی اغلب دارای طول بیشتر از عرض دارند. مناطق شکستگی‌ها، گسل‌ها، دایک‌ها، مناطق ریفتی و تاقدیس‌های افقی مثال‌هایی از این نوع می‌باشند که اغلب در یک جهت افقی خاص واقع شده‌اند. اگر آنومالی گرانی به اندازه کافی خطی باشد می‌توان منابع گرانشی را در جهت موازی با امتداد کشیدگی بعد طویل آنومالی در نظر گرفت. به طوری که در راستای محور y که موازی با امتداد آنومالی بوده اثر گرانی ثابت بوده و فقط در دو بعد X و Z تغییرات چگالی دیده می‌شود. به این دسته از توده‌ها، اجسام دو بعدی می‌گویند. چگالی این اجسام به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\rho(x, y, z) = \rho(x, z) \quad (3-17)$$

به نظر پیترز^{۷۵} (۱۹۴۹)، یک جسم دو بعدی جسمی است که روی نقشه آنومالی شکل بسته‌ای ایجاد نماید به طوری که بزرگترین بعد آن حداقل سه برابر کوچکترین بعد آن باشد [Peters, 1949].

^{۷۵} . Peters

همچنین گرانت و وست^{۷۶} (۱۹۶۵) در تشریح آنومالی‌های منابع لایه‌ای شکل^{۷۷} پیشنهاد کردند که

طول یک نوار مدفون باید حداقل ۲۰ برابر بزرگتر از عرض آن باشد [Grant and West, 1965].

یک استوانه افقی مثال ساده‌ای از مدل دو بعدی است. بنابراین مقدار آنومالی گرانی آن به وسیله

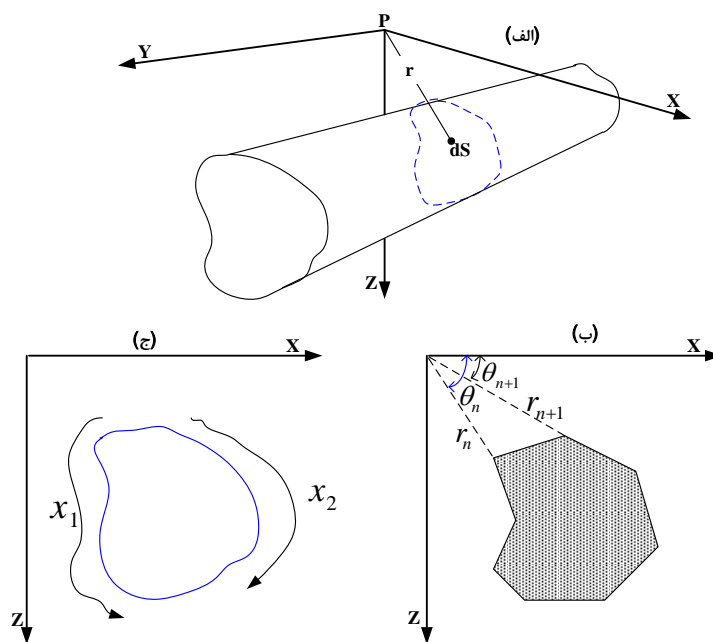
معادله $g_p = \sum_{n=1}^N \rho_n \psi_{pn}$ تخمین زده می‌شود که در این حالت ψ_{pn} مقدار گرانی در نقطه اندازه‌گیری

p در اثر وجود n استوانه با چگالی واحد می‌باشد.

راه مفیدتر برای تقریب ویژگی‌های پدیده‌های زمین‌شناسی جایگزینی یک چند ضلعی ساده به

جای شکل دو بعدی و مقطع عرضی آن‌ها می‌باشد (شکل ۷-۳). به این ترتیب، روش مناسب‌تری برای

سازگاری با الگوریتم‌های کامپیوتری فراهم می‌شود.



شکل ۷-۳: تقریب یک جسم دو بعدی به وسیله یک n ضلعی [Talwani et al, 1959]

^{۷۶}. Grant & West

^{۷۷}. Ribbon

در این روش که توسط تالوانی و همکارانش (۱۹۵۹) ارائه شده، می‌توان معادلات محاسبه شتاب گرانشی اجسام دو بعدی با چگالی حجمی $\rho(x, z)$ را به صورت زیر تعریف نمود [Talwani et al, 1959].

$$U = 2G \int_s \rho(s) \cdot \log \frac{1}{r} ds \quad (۱۸-۳)$$

که در آن انتگرال‌گیری در یک سطح S انجام شده و r فاصله المان مورد نظر تا مرکز مختصات می‌باشد.

$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (z-z')^2}$$

حال برای ساده‌سازی بیشتر و راحت‌تر نقطه مشاهده‌ای به مبدا مختصات انتقال یافته و مقدار چگالی در راستای محور y ثابت فرض می‌شود. بنابراین مقدار شتاب قائم گرانی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$g(p) = \frac{\partial U}{\partial z} = 2G\rho \iint \frac{z' dx' dz'}{x'^2 + z'^2} \quad (۱۹-۳)$$

و انتگرال بالا پس از حذف متغیر x به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$g = 2G\rho \int [\tan^{-1}(\frac{x'_2}{z'}) - \tan^{-1}(\frac{x'_1}{z'})] dz' \quad (۲۰-۳)$$

که در آن x'_1 و x'_2 دو تابع از z' می‌باشند که در شکل (۷-۳) ارائه شده است و بیانگر دو راه مجزا حول بخشی از محیط سطح مقطع می‌باشد. این دو راه جزئی می‌باشد که وقتی که با هم منظور شوند دارای مقدار یکسان و علامت متفاوت هستند. انتگرال‌گیری هر کدام از این اجزای انتگرال جداگانه در جهت عقربه‌های ساعت حول محیط مقطع به صورت زیر است.

$$g = 2G\rho \oint \tan^{-1}(\frac{x'}{z'}) dz' \quad (۲۱-۳)$$

حال اگر محیط منحنی گونه و صاف سطح مقطع (شکل ۷-۳-ب) با یک چند ضلعی دلخواه (n) جایگزین گردد (شکل ۷-۳-ج)، بنابراین معادله (۲۱-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$g = 2G\rho \sum_{n=1}^N \int_{z_n}^{z_{n+1}} \tan^{-1} \left(\frac{x'}{z'} \right) dz' \quad (22-3)$$

که در آن Z_{n+1}, Z_n مختصات Z در نقاط انتهایی یک ضلع Π ام می باشد قبل از محاسبه لازم است

که مقدرا x' را بر حسب z' بوسیله معادله یک خط راست بیان نماییم: $x' = \alpha_n z' + \beta_n$ که در آن:

$$\alpha_n = \frac{x_{n+1} - x_n}{z_{n+1} - z_n} \quad \beta_n = x_n - \alpha_n z_n \quad (23-3)$$

با جای گذاری معادله (23-3) در معادله (22-3) خواهیم داشت [Talwani et al, 1959]:

$$g = 2G\rho \sum_{n=1}^N \int_{z_n}^{z_{n+1}} \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_n z' + \beta_n}{z'} \right) dz' =$$

$$2G\rho \sum_{n=1}^N \left\{ \left[\frac{\pi}{2} (z_{n+1} - z_n) + z_n \cdot \tan^{-1} \left(\frac{z_n}{x_n} \right) - z_{n+1} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{z_{n+1}}{x_{n+1}} \right) \right] + \right.$$

$$\left. \frac{\beta_n}{1 + \alpha_n^2} \left[\log \frac{\sqrt{x_{n+1}^2 + z_{n+1}^2}}{\sqrt{x_n^2 + z_n^2}} - \alpha_n \cdot \left(\tan^{-1} \left(\frac{z_{n+1}}{x_{n+1}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{z_n}{x_n} \right) \right) \right] \right\} \quad (24-3)$$

اگر چند ضلعی مورد بررسی بسته باشد، مجموع جملات گروه اول صفر می شود، بنابراین معادله

(24-3) به معادله (25-3) ساده می شود:

$$g = 2G\rho \sum_{n=1}^N \frac{\beta_n}{1 + \alpha_n^2} \left[\log \frac{r_{n+1}}{r_n} - \alpha_n \cdot (\theta_{n+1} - \theta_n) \right] \quad (25-3)$$

در شکل (3-7-ج) پارامترهای r_n و θ_n معادله (25-3) تعریف شده اند. بنابراین مقدار شتاب

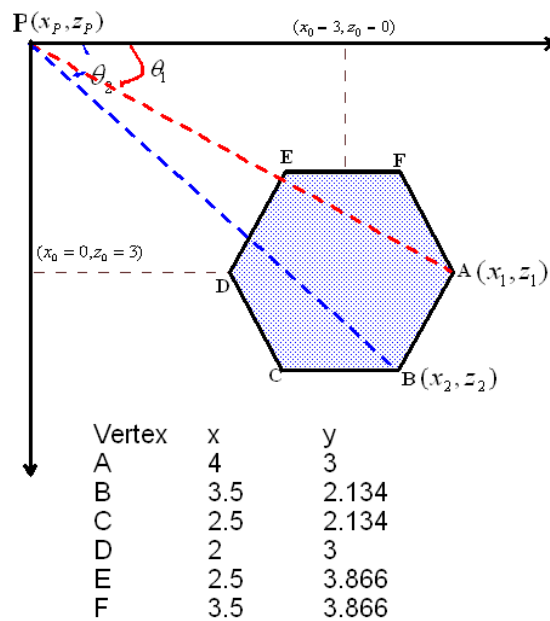
گرانشی یک جسم دو بعدی به موقعیت n گوشه یک n ضلعی مقطع عرضی آن بستگی دارد. اگر

تصور شود n خط که از نقطه مشاهده ای به هر یک از گوشه های n ضلعی رسم شده است، مقدار

شتاب گرانش به طول این خطها و زاویه های که با خط افق می سازند، بستگی دارد (شکل 3-7).

3-4-2- محاسبه گرانی اجسام دو بعدی به روش ون و بویس

در روش ون و بويس^{۷۸} جهت تخمین اجسام نامنظم دوبعدی، یک مقطع قائم از جسم دو بعدی انتخاب می‌گردد. این مقطع قائم به طور تقریب یک چند ضلعی می‌باشد (شکل ۳-۸). برای برآورد مؤلفه‌های قائم و افقی شتاب جاذبه یک نقطه از چند ضلعی انتخابی، روش‌های محاسباتی به کار گرفته می‌شود. این محاسبات هیچ محدودیتی را در ابعاد و شکل این اجسام به وجود نمی‌آورد [Won and Bevis, 1987].



شکل ۳-۸: تقریب چند ضلعی برای مقطع یک جسم دو بعدی [Won and Bevis, 1987]

هابرت^{۷۹} (۱۹۴۸) مقدار شتاب جاذبه ناشی از یک توده دو بعدی را به صورت یک انتگرال خطی حول محیطش تعریف می‌کند. بنابراین مقدار شتاب جاذبه این چند ضلعی در نقطه P را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

$$g = 2G\rho \oint z d\theta \quad (۲۶-۳)$$

که در این معادله؛ G ثابت جهانی گرانی، ρ چگالی می‌باشد.

حال انتگرال $\oint z d\theta$ در محیط بسته چند ضلعی بسط داده می‌شود. برای محاسبه

اثر گرانی حاصله، ابتدا باید این انتگرال را برای یک ضلع از این چند ضلعی محاسبه کرد.

^{۷۸}. Won and Bevis, 1987

^{۷۹}. Hubbert, 1948

بدین ترتیب مقدار گرانی ضلع AB (که مطابق شکل (۳-۸) با محور x ها در نقطه P، زاویه θ_i را می‌سازد) براساس فرمول محاسبه می‌شود. بنابراین مؤلفه قائم‌انومالی گرانی به صورت زیر تعریف می‌شود [Won and Bevis, 1987]:

$$\Delta g_z = 2G\rho \sum_{i=1}^n Z_i \quad (27-3)$$

که در آن پارامتر Z_i انتگرال خطی در طول i امین ضلع چند ضلعی می‌باشد. حل این انتگرال خطی برای چند ضلعی به صورت زیر خواهد شد [Won and Bevis, 1987]:

$$Z = A \left[(\theta_i - \theta_{i+1}) + B \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} \right] \quad (28-3)$$

که در آن:

$$B = \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} \quad \text{و} \quad A = \frac{(x_{i+1} - x_i)(x_i z_{i+1} - x_{i+1} z_i)}{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (29-3)$$

$$\text{و} \quad r_{i+1}^2 = x_{i+1}^2 + z_{i+1}^2 \quad \text{و} \quad r_i^2 = x_i^2 + z_i^2$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{z_i}{x_i} \right) \quad i = 1, 2, \dots$$

بنابراین، مقدار Δg_z با جایگزینی معادله (۲۸-۳) در معادله (۲۷-۳) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta g_z = 2G\rho \sum_{i=1}^n \frac{x_i z_{i+1} - z_i x_{i+1}}{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \left[(x_{i+1} - x_i)(\theta_i - \theta_{i+1}) + (z_{i+1} - z_i) \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} \right] \quad (30-3)$$

بسیاری از آنومالی‌های گرانی به دست آمده از پدیده‌های زمین‌شناسی و نفتگیرها مانند گنبدی‌های نمکی و برخی از تاقدیس‌ها سه بعدی می‌باشند. بنابراین برای بیان و تفسیر این گونه آنومالی‌ها مدل-سازی سه بعدی ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی یکی از اهداف رساله معرفی و استفاده از گرادیان کل نرمال سه بعدی می‌باشد. بنابراین در ادامه بحث روش محاسبه اثر گرانی برای اجسام سه بعدی، براساس برانبارش^{۸۰} لایه‌های نازک [Talwani and Ewing, 1960] ارائه می‌گردد. روش‌های دیگری

^{۸۰}. Stacking

نظیر تبدیل اجسام سه بعدی به منشورهای چند گوشه [Plouff, 1976] نیز وجود دارد که از تشریح آنها خودداری می‌شود.

۳-۴-۳- محاسبه مقدار اثر گرانی اجسام سه بعدی به روش برانبارش لایه‌های نازک

به منظور بیان روش برانبارش لایه‌های نازک، ابتدا روش محاسبه دستی اثر گرانی ناشی از یک چند ضلعی در یک نقطه مشخص با ذکر مثال ساده عددی [Talwani and Ewing, 1960] شرح داده می‌شود. بدیهی است که انتگرال‌گیری روی محور X را به آسانی می‌توان به طور گرافیکی به جای روش‌های عددی محاسبه کرد. ولی از روش‌های کامپیوتری و محاسبه‌ای مثل روش دوزنقه می‌توان انتگرال خطی حول مرز یک چند ضلعی را محاسبه نمود و بدین ترتیب محاسبه آنومالی کل برای اجسام سه بعدی با هندسه نامنظم قابل انجام می‌باشد.

اما انجام روش دستی محاسبه مقدار شتاب جاذبه هر لایه از یک جسم نامشخص (آنومالی برای هر لایه به ضخامت واحد) خیلی سخت می‌باشد و وقتی که اضلاع چند ضلعی زیاد گردد تا به حدّ یک منحنی تبدیل شود، به کلی غیرممکن خواهد شد. به روش مرسوم مقدار اثر گرانی قائم (V) یک چند ضلعی مطابق شکل (۳-۹) را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [Talwani and Ewing, 1960].

$$V_i = G \cdot \rho \left[T - \sum_{i=1}^n Q_i R_i U_i \right], \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{نظیر مورد چندضلعی} \quad (۳-۳۱)$$

که در آن مقدار ρ و G به ترتیب بیان کننده چگالی و ثابت جهانی شتاب جاذبه می‌باشد و پارامترهای T, Q, R و U وابسته به هندسه چندضلعی بوده که در ادامه تشریح می‌گردد.

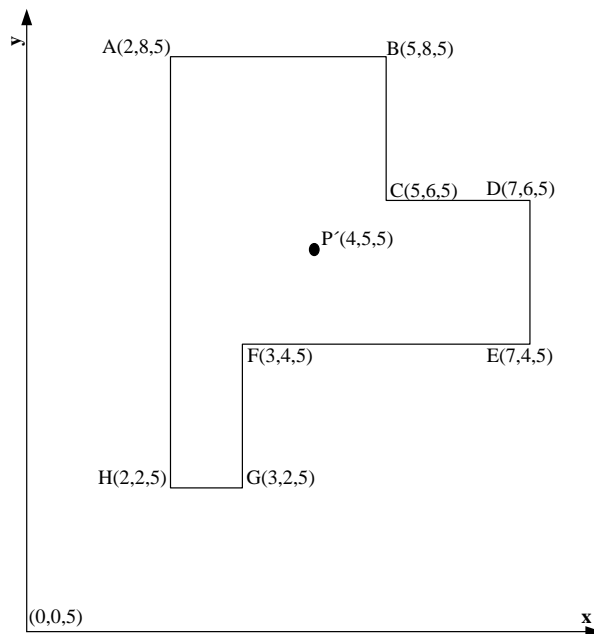
اگر تصویر نقطه مشاهده‌ای یا اندازه‌گیری روی صفحه چند ضلعی و در محدوده داخلی آن قرار گیرد، مقدار پارامتر T در معادله (۳-۳۱) برابر 2π می‌گردد. زمانی که تصویر نقطه اندازه‌گیری شتاب گرانی

در خارج از محدوده چند ضلعی قرار گیرد، مقدار آن صفر خواهد شد ($T=0$). همچنین هنگامی که تصویر نقطه اندازه‌گیری روی مرز چند ضلعی قرار گیرد، مقدار آن معادل زاویه‌ای است که توسط دو ضلع مجاور آن گوشه چند ضلعی به دست می‌آید. این مجموع روی کلیه رئوس چند ضلعی محاسبه می‌گردد. پارامتر U در هر راس از معادله (۳۲-۳) محاسبه می‌گردد.

$$U = \sin^{-1}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}} \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) + \sin^{-1}\left(\frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}} \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (32-3)$$

اگر حاصل ضرب سه متغیر مثبت یا صفر باشد ($xyz \geq 0$)، مقدار عددی متغیر R برابر یک منظور

می‌شود و در صورتی که $xyz < 0$ باشد، مقدار $R = -1$ می‌گردد [Talwani and Ewing, 1960].



شکل ۳-۹: چند ضلعی مورد استفاده در محاسبه مقدار گرانی آن به روش دستی [Talwani and Ewing, 1960].

حروف X ، Y و Z مختصات نقاط رئوس چند ضلعی نسبت به نقطه اندازه‌گیری آنومالی گرانی می‌باشد. مطابق شکل (۳-۹) برای تعیین مقدار Q بدین ترتیب عمل می‌شود. برای محاسبه هر راس اگر در جهت عقربه‌های ساعت مقدار X یک گوشه چند ضلعی با مقدار X نقطه گوشه بعدی آن برابر باشد (مثل $B-C$ ، $D-E$ ، $F-G$ و $H-A$) مقدار $Q=1$ منظور می‌شود. در صورتی که در یک گوشه مقدار Y آن با مقدار Y گوشه بعدی برابر باشد (نقاط رئوس $A-B$ ، $C-D$ ، $E-F$ و یا $G-H$) در این صورت مقدار $Q=-1$ منظور می‌شود [Talwani and Ewing, 1960].

اگر Z بر حسب کیلومتر، ρ بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب و مقدار $G=6/672$ منظور شود مقدار گرانی به صورت میلی گال به دست می آید. اگر مختصات نقطه محاسبه ای در سطح اندازه گیری $P(4,5,0)$ در نظر گرفته شود و بخواهیم مقدار اثر گرانی چند ضلعی تشکیل شده مطابق شکل (۳-۹) را در افق ۵ متری محاسبه نمائیم، تصویر نقطه محاسبه ای P در افق مورد نظر به صورت $P'(5,5,4)$ تعریف می شود. اختلاف فاصله نقطه محاسبه ای و تک تک مختصات رئوس چند ضلعی به صورت جدول (۳-۱) به دست می آید. به عنوان نمونه اختلاف نقطه محاسبه ای نسبت به راس A چند ضلعی به صورت زیر است:

$$X=X_A-X_P=2-4=-2 \quad \text{و} \quad Y=Y_A-Y_P=8-5=+3 \quad \text{و} \quad Z=Z_A-Z_P=5-0=+5$$

بدین ترتیب چون حاصل ضرب مقادیر مختصات جدید برابر $30-$ است، پس طبق تعریف مقدار R برابر $1-$ خواهد شد ($xyz=-30$ پس $R=-1$). همچنین به علت اینکه مقدار Y راس A برابر مقدار Y راس B در راستای محاسبه می باشد، پس $Q=-1$ خواهد شد.

مقدار U را می توان به آسانی با معادله (۳-۳۲) و یا با یکسری از منحنی ها و آباک های استاندارد برای هر ضلع چند ضلعی محاسبه کرد [Talwani and Ewing, 1960; Talwani, 1973]. پس از محاسبه مقدار $U=1/379$ ، حاصل ضرب سه پارامتر اخیر برای ضلع AB چندضلعی برابر $QRU=+1/379$ خواهد شد. این عمل برای کلیه اضلاع چند ضلعی انجام شده و سپس با استفاده از معادله (۳-۳۱) مقدار اثر گرانی ناشی از چند ضلعی با هندسه نامشخص واقع در افق ۵ متری به دست می آید.

جدول ۳-۱: مختصات رئوس چندضلعی در عمق مورد نظر و اختلاف مقدار رئوس نسبت به نقطه محاسبه ای $P(4,5,0)$

مختصات رئوس نسبت به نقطه محاسبه ای			مختصات اصلی رئوس			رئوس چندضلعی
x	y	z	x_p	y_p	z_p	
-۲	۳	۵	۲	۸	۵	A
۱	۳	۵	۵	۸	۵	B
۱	۱	۵	۵	۶	۵	C
۳	۱	۵	۷	۶	۵	D

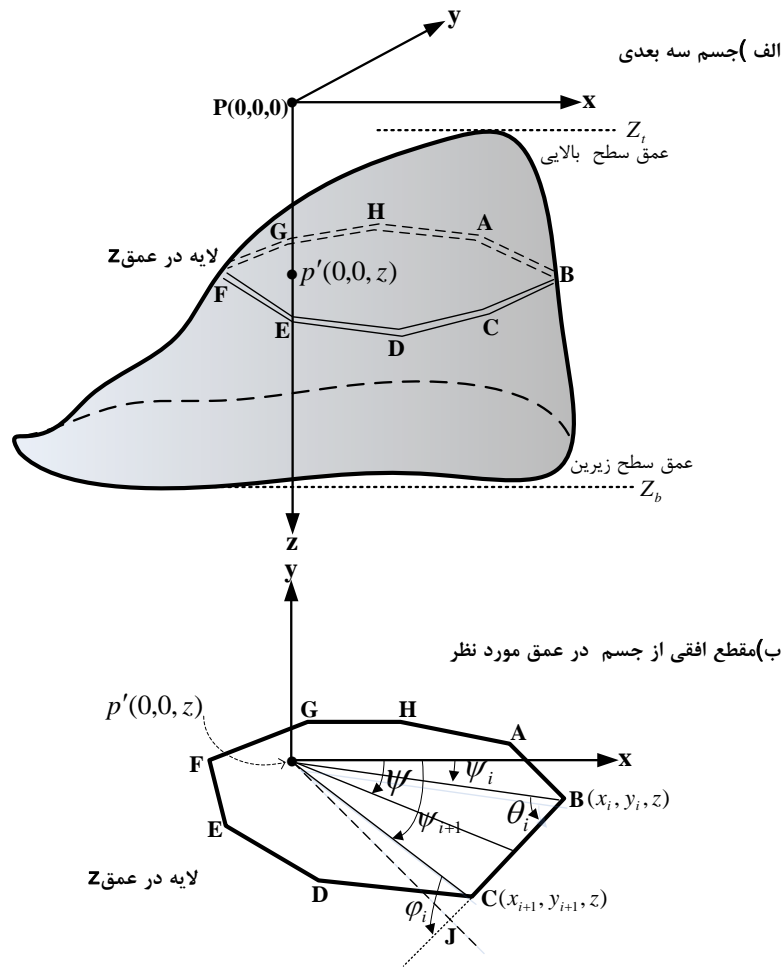
۳	-۱	۵	۷	۴	۵	E
-۱	-۱	۵	۳	۴	۵	F
-۱	-۳	۵	۳	۲	۵	G
-۲	-۳	۵	۲	۲	۵	H

حال اگر تعداد گوشه‌های چندضلعی (لایه‌ای از یک شکل سه بعدی) زیاد شود به طوری که به یک منحنی تبدیل شود، و یا اینکه تعداد لایه‌های تشکیل دهنده جسم زیاد شود، بدیهی است که دقت محاسبه اثر گرانی هر لایه و در نهایت محاسبه اثر گرانی ناشی از جسم بیشتر می‌شود. در این حالت محاسبه دستی امکان پذیر نبوده و لازم است که محاسبات بوسیله یک برنامه کامپیوتری انجام شود. در این راستا از روش تالوانی جهت محاسبه مقدار اثر گرانی اجسام سه بعدی که همان برانبارش لایه-های نازک از یک جسم به صورت چندضلعی یا منحنی‌های بسته برای هر افق مشخص است استفاده می‌شود. در ادامه بحث، این روش و الگوریتم محاسبه آن توضیح داده می‌شود که مبنای کار برنامه کامپیوتری تهیه شده برای محاسبه اثر گرانی اجسام سه بعدی بوده است.

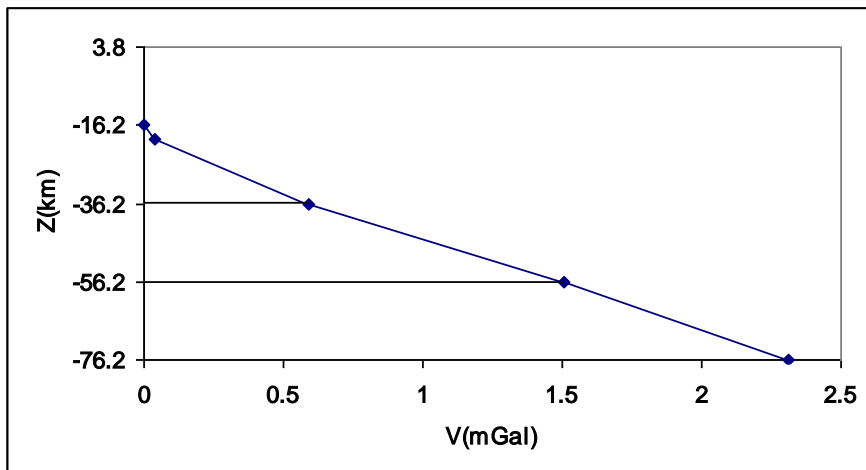
همان طوری که اشاره شد، در این روش ابتدا اجسام سه بعدی به تعدادی لایه نازک افقی که مبین یک افق از جسم می‌باشد (همانند منحنی‌های میزان در یک نقشه توپوگرافی) تقسیم می‌شود. فاصله این لایه‌ها بسته به شرایط جسم می‌تواند مساوی یا متغیر باشد. برای محاسبات اثر گرانی، هر یک از این لایه‌ها به وسیله یک لایه چند ضلعی نامنظم افقی جایگزین می‌شود (شکل ۳-۱۰-الف). واضح است که با افزایش تعداد رئوس این چند ضلعی‌ها، تصویر افقی هر لایه به یک منحنی هم مقدار نزدیک می‌گردد (شکل ۳-۱۰-ب).

اثر آنومالی گرانی ناشی از هر یک لایه‌ها را می‌توان به طور تحلیلی در یک نقطه دلخواه خارجی محاسبه و به صورت تابعی از مقدار عددی عمق لایه ترسیم نمود. در نهایت با درونیابی می‌توان یک منحنی پیوسته‌ای روی نمودار تغییرات اثر گرانی لایه‌ها نسبت به تراز عمق لایه‌ها برآزش نمود. سطح کل زیر این منحنی مقدار آنومالی گرانی ناشی از کل جسم را ارائه می‌دهد و مقدار آن از طریق گرافیکی و یا به روش انتگرال‌گیری عددی مثل روش ذوزنقه، سیمپسون و یا سایر روش‌ها قابل

محاسبه است. به عنوان مثال اگر مقادیر اثر گرانی یک جسم سه بعدی را در پنج لایه مجزا در یک نقطه دلخواه در مرکز آن (P) (شکل ۳-۹) به صورت جدول مندرج در (شکل ۳-۱۱) باشد. با محاسبه سطح زیر منحنی تغییرات اثر گرانی هر لایه نسبت به عمق آن به روش ذوزنقه، به راحتی مقدار گرانی کل جسم روی نقطه اندازه گیری به دست می آید.



شکل ۳-۱۰: الف) نمایی از جسم سه بعدی با یک لایه چند ضلعی از آن در عمق Z و ب) المانهای هندسی موثر در محاسبه مقدار آنومالی گرانی ناشی از یک چند ضلعی برای یک جسم سه بعدی واقع در عمق Z [Talwani and Ewing, 1960]



V (mGal)	Z (km)
0	-15/9
0/395	-19/7
0/592	-36/5
1/509	-56/1
2/310.5	-76/2

$$\text{mGal}64/6V(\text{total})=$$

شکل ۳-۱۱: نمودار مقدار اثر گرانی یک جسم سه بعدی با برآیند اثر پنج لایه مجزا نسبت به تغییر عمق و

محاسبه مقدار آن به روش دوزنقه [Talwani and Ewing, 1960]

در شکل (۳-۱۰) نقطه اندازه‌گیری P به صورت نقطه مبنا در یک مختصات کارتزین

چپ‌گرد با مقدار Z مثبت به سمت پایین برای محاسبه مقدار گرانی آنومالی ناشی از جسم

سه بعدی انتخاب شده است. یک لایه نازک از جسم در عمق Z زیر نقطه اندازه‌گیری توسط

یک چند ضلعی نامنظم ABCD... با ضخامت نازک dz جایگزین شده است. اگر مقدار اثر

گرانی ناشی از وجود این چند ضلعی در نقطه اندازه‌گیری P به اندازه Δg میلی‌گال باشد

پس خواهیم داشت [Talwani and Ewing, 1960]:

$$\Delta g = V \cdot dz \quad (3-33)$$

که در آن V مقدار آنومالی ناشی از چند ضلعی مذکور با ضخامت واحد می‌باشد.

مقدار V به وسیله یک انتگرال سطحی قابل بیان می‌باشد به طوری که سطح چند ضلعی را کاملاً

در بر می‌گیرد. این مقدار را می‌توان توسط دو انتگرال بسته مطابق معادله (۳-۳۴) روی مرز چند

ضلعی ABCD... نیز محاسبه نمود [Talwani and Ewing, 1960; Talwani, 1973]، بنابراین

خواهیم داشت:

$$V = G\rho \left[\oint d\psi - \oint \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} d\psi \right] \quad (3-34)$$

که در آن G مقدار ثابت جهانی شتاب جاذبه، ρ چگالی حجمی لایه مورد نظر، z، ψ و r پارامترهای

مورد نیاز برای تعریف مرز چند ضلعی مطابق شکل (۳-۱۰-ب) در مختصات استوانه‌ای می‌باشند.

حال اگر نقطه P' تصویر نقطه اندازه‌گیری روی صفحه چند ضلعی در عمق مورد نظر باشد، پس $PP'=z$ و بردار شعاعی در صفحه چند ضلعی و ψ زاویه‌ای است که این بردار با محور X در صفحه می‌سازد (مقدار ψ در جهت عقربه‌های ساعت نسبت به سمت مثبت محور X مثبت خواهد بود). اگر مقدار دو انتگرال (معادله ۳-۳۴) روی ضلع BC بررسی شود، حاصل انتگرال اول در جهت عقربه‌های ساعت برابر اختلاف دو زاویه ψ_i و ψ_{i+1} که پاره خط‌های P'B و P'C به ترتیب با محور مثبت X می‌سازند ($\Delta\psi_i = \psi_{i+1} - \psi_i$)، خواهد شد. برای محاسبه انتگرال دوم ابتدا پاره خط P'J به صورت عمود از نقطه P' به ضلع BC رسم می‌شود. اگر مطابق شکل (۳-۱۰-ب) $P'J=p_i$ و θ_i و φ_i زوایای اضلاع P'B و P'C باشند که با BC می‌سازند پس [Talwani and Ewing, 1960; Talwani, 1965; Talwani, 1973]:

$$r = \frac{p_i}{\sin(\psi_i - \psi_{i+1} + \psi)} \quad (35-3)$$

با تعیین مقادیر p_i ، ψ_i و ψ_{i+1} که همه ثابت هستند و جای‌گذاری معادله (۳-۳۵) در انتگرال دوم (معادله ۳-۳۴)، مقدار انتگرال به آسانی برای ضلع BC به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود [Talwani and Ewing, 1960; Talwani, 1973]:

$$\oint \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} d\psi = \sin^{-1}\left(\frac{z \cdot \cos\theta_i}{\sqrt{p_i^2 + z^2}}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{z \cdot \cos\varphi_i}{\sqrt{p_i^2 + z^2}}\right) \quad (36-3)$$

بنابراین مقدار V برای ضلع BC خواهد شد:

$$V_{BC} = G\rho[\psi_{i+1} - \psi_i - \sin^{-1}\left(\frac{z \cdot \cos\theta_i}{\sqrt{p_i^2 + z^2}}\right) + \sin^{-1}\left(\frac{z \cdot \cos\varphi_i}{\sqrt{p_i^2 + z^2}}\right)] \quad (37-3)$$

معادله (۳-۳۷) مقدار آنومالی گرانی ناشی از لایه مثلثی P'BC را در ضخامت واحد برای نقطه P بیان می‌کند [Ramsey, 1940]. بنابراین مقدار آنومالی گرانی برای کل n ضلعی ABCD... به صورت معادله زیر محاسبه خواهد شد:

$$V = G \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ \psi_{i+1} - \psi_i - \sin^{-1}\left(\frac{z \cdot \cos\theta_i}{\sqrt{p_i^2 + z^2}}\right) + \sin^{-1}\left(\frac{z \cdot \cos\varphi_i}{\sqrt{p_i^2 + z^2}}\right) \right\} \quad (38-3)$$

با توجه به این که همه پارامترهای $\psi_i, \psi_{i+1}, \rho_i, \cos\theta_i$ و $\cos\varphi_i$ بر حسب مختصات نقاط B و C [یعنی به ترتیب (x_i, y_i) و (x_{i+1}, y_{i+1})] بیان می‌شوند، بنابراین مقدار V را می‌توان بر حسب مختصات رئوس چندضلعی ABCD... ارائه نمود. وقتی که نقطه اندازه‌گیری (یا تصویر آن روی افق مربوط به چند ضلعی) درون چند ضلعی قرار گیرد خواهیم داشت [Talwani, 1973]:

$$\sum_{i=1}^n \{\psi_{i+1} - \psi_i\} = 2\pi \quad (3-39)$$

اما اگر نقطه P' در خارج از محدوده چند ضلعی قرار گیرد مجموع فوق صفر می‌گردد. در حالت خاص وقتی که نقطه P' بر روی خط مرزی چند ضلعی قرار گیرد، مقدار مجموع فوق برابر زاویه بین اضلاع مجاور یا بخش‌های مجاور نقطه است که در این نقطه به هم وصل می‌شوند.

مقدار اثر گرانی ناشی از یک جسم سه بعدی (شکل ۳-۱۰-الف) به جرم M را می‌توان از انتگرال-گیری بین دو حد بالایی و پایینی جسم (Z_b, Z_t) برای کل جسم محاسبه نمود.

$$\Delta g_{total} = \int_{Z_b}^{Z_t} V \cdot dz \quad (3-40)$$

که در آن مقادیر V از معادله (۳-۳۸) محاسبه می‌شوند. بدیهی است که این انتگرال برای حالاتی که تعداد جملات زیاد می‌شود فقط به روش گرافیکی یا عددی قابل حل خواهد بود.

۳-۴-۱- ارائه الگوریتم محاسبه مقدار گرانی یک جسم سه بعدی به روش تالوانی

با استفاده از معادلات ارائه شده، با تهیه یک الگوریتم و کد نویسی می‌توان اثر گرانی ناشی از یک لایه و به تبع آن کل یک جسم سه بعدی را به روش عددی محاسبه نمود. داده‌های ورودی برنامه مقادیر عمق سطح بالای (Z_t) و پایینی (Z_b) جسم آنومال، عمق تراز هر لایه (چند ضلعی) و مقادیر مختصات رئوس چند ضلعی‌های تشکیل دهنده جسم آنومال سه بعدی می‌باشند. خروجی این برنامه مقدار آنومالی گرانی در نقاط محاسبه‌ای دلخواه است که به صورت یک فایل داده‌ای یا به صورت نمودار دو بعدی در یک پروفیل و یا سه بعدی ارائه می‌شود.

برای محاسبه اثر گرانی هر لایه یا چند ضلعی نازک در نقطه محاسبه‌ای روی پروفیل، ابتدا اختلاف مختصات رئوس چند ضلعی نسبت به نقطه محاسبه‌ای همانند جدول (۳-۱) بر حسب مقادیر مختصات دو راس متوالی چند ضلعی یعنی، $B(x_i, y_i, z)$ و $C(x_{i+1}, y_{i+1}, z)$ محاسبه شده و سپس با استفاده از معادله زیر مقدار آن برای هر لایه به دست می‌آید [Talwani and Ewing, 1960; Talwani, 1965].

$$V = G \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ W \cdot \cos^{-1}(c_i) - \sin^{-1} \left(\frac{z \cdot q_i S}{\sqrt{p_i^2 + z^2}} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{z \cdot f_i S}{\sqrt{p_i^2 + z^2}} \right) \right\} \quad (۳-۴۱)$$

که در آن پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند [Talwani and Ewing, 1960; Talwani, 1973].

$$\begin{aligned} c_i &= \frac{x_i \cdot x_{i+1} + y_i \cdot y_{i+1}}{r_i \cdot r_{i+1}} \\ p_i &= \frac{\Delta y_i \cdot x_i + \Delta x_i \cdot y_i}{r_{i,i+1}} \\ q_i &= \frac{\Delta x_i \cdot x_i + \Delta y_i \cdot y_i}{r_i \cdot r_{i,i+1}} \\ f_i &= \frac{\Delta x_i \cdot x_{i+1} + \Delta y_i \cdot y_{i+1}}{r_{i+1} \cdot r_{i,i+1}} \\ m_i &= \frac{y_i \cdot x_{i+1} - x_i \cdot y_{i+1}}{r_i \cdot r_{i+1}} \\ r_{i,i+1} &= \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \\ \Delta x_i &= x_i - x_{i+1} \quad \Delta y_i = y_i - y_{i+1} \\ r_i &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad r_{i+1} = \sqrt{x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2} \end{aligned} \quad (۳-۴۲)$$

است. S = منفی باشد، مقدار p_i ۱ است و اگر مقدار S مثبت باشد، مقدار p_i = +۱ اگر مقدار W = منفی باشد، مقدار m_i ۱ است و اگر مقدار W مثبت باشد، مقدار m_i = +۱ اگر مقدار

برای محاسبه مقدار اثر گرانی ناشی از کل جسم سه بعدی، مقادیر محاسبه شده اثر گرانی هر لایه یا چند ضلعی (V) براساس معادله (۳-۴۱) با استفاده از معادله (۳-۴۰) جمع می‌شود. در حالتی که V برای تعداد لایه‌های زیاد محاسبه شود، برای تعیین مقدار اثر کل گرانی جسم، نمودار تغییرات مقادیر V نسبت به Z (عمق هر یک از لایه‌ها) رسم و از نقاط موجود یک منحنی برآزش می‌شود.

مساحت زیر منحنی با محور Z ، همان مقدار انتگرال است که به راحتی با روش‌های عددی نظیر قاعده ذوزنقه قابل محاسبه است.

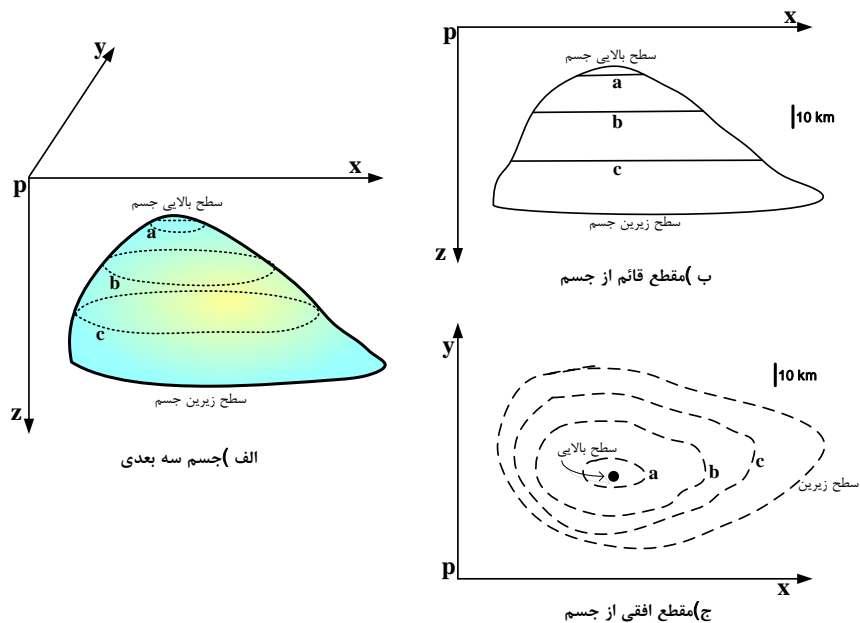
روش دیگر معمول برای انجام محاسبات عددی حل این انتگرال (معادله ۳-۴۰)، برازش یک هذلولی مناسب بر روی مجموعه‌ای از نقاط سه تایی متوالی محاسبه‌ای می‌باشد که از رسم مقدار اثر گرانی، $V(Z)$ ، هر لایه به ازای تغییرات عمق، Z ، آن به دست می‌آید.

به روش ریاضی به راحتی سطح زیر منحنی هذلولی قابل محاسبه است. البته این روش همان قاعده سیمپسون خواهد بود، اگر لایه‌های تشکیل دهنده جسم با فاصله‌های عمقی یکسان انتخاب شوند، یعنی ΔZ برای همه یکسان باشد. با فرض این که V_a ، V_b و V_c مقادیر اثر گرانی متناسب با لایه‌هایی باشند که در عمق‌های Z_a ، Z_b و Z_c از جسم آنومال به دست آمده‌اند (شکل ۳-۱۲). مقدار اثر گرانی ناشی از جسمی که بین دو سطح افقی به عمق‌های Z_a و Z_c واقع شده از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\int_{Z_a}^{Z_c} V \cdot dz = \frac{1}{6} \left[V_a \frac{Z_a - Z_c}{Z_a - Z_b} (3Z_b - Z_c - 2Z_a) + V_b \frac{(Z_a - Z_c)^3}{(Z_b - Z_c)(Z_b - Z_a)} + V_c \frac{Z_a - Z_c}{Z_c - Z_b} (3Z_b - Z_a - 2Z_c) \right] \quad (۳-۴۳)$$

در صورتی که لایه‌ها با فاصله یکسان در نظر گرفته شوند مقدار $\Delta Z = Z_a - Z_b = Z_b - Z_c$ خواهد شد. در این حالت براساس روش قاعده سیمپسون خواهیم داشت:

$$\Delta g_{total} = \int_{Z_a}^{Z_c} V \cdot dz = \frac{\Delta Z}{3} [V_a + 4V_b + V_c] \quad (۳-۴۴)$$



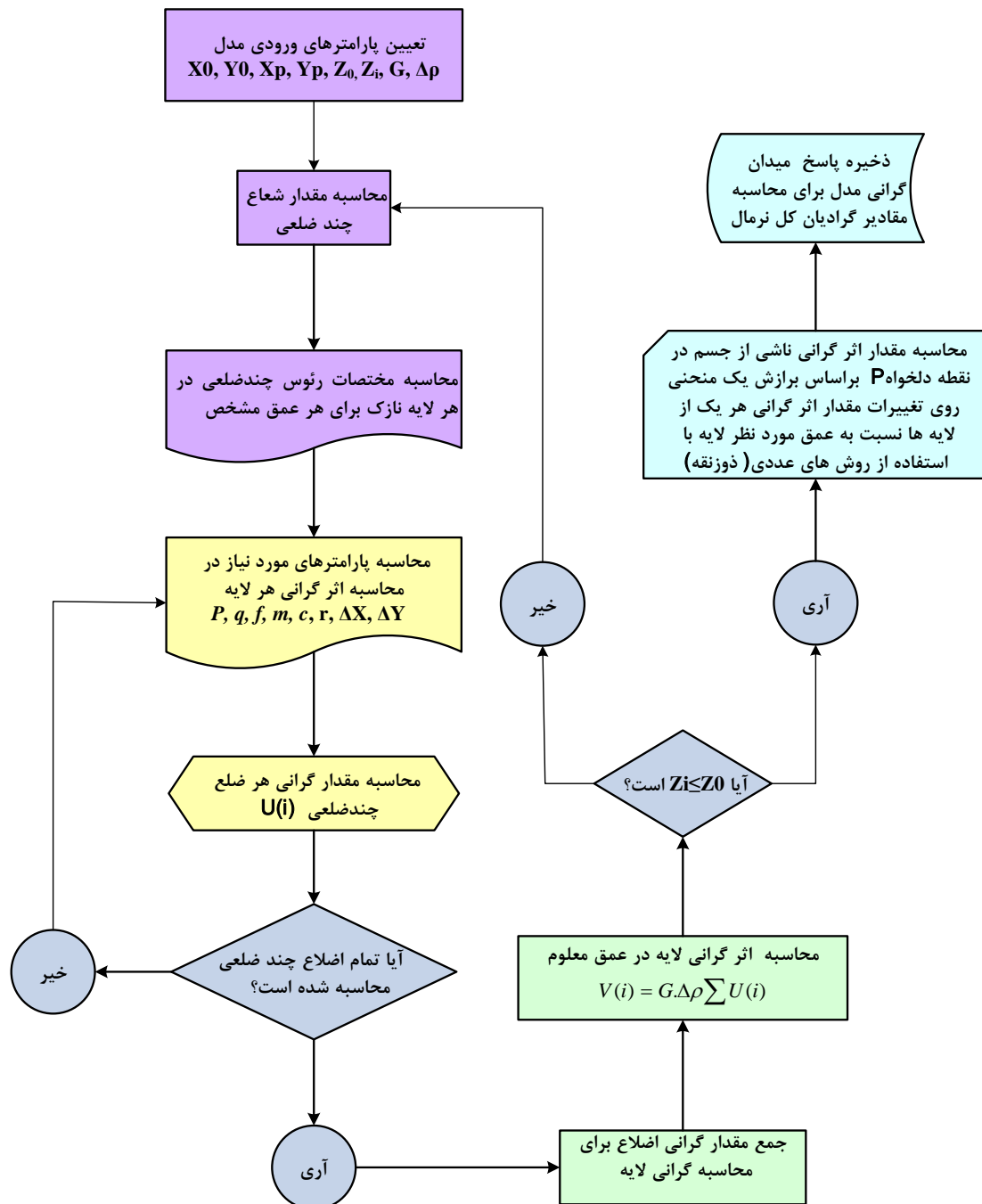
شکل ۳-۱۲: محاسبه اثر گرانی یک جسم سه بعدی با تبدیل جسم سه بعدی به صورت برانبارش لایه‌های منحنی با فواصل ارتفاعی یکسان یا متفاوت به روش تالوانی [Talwani and Ewing, 1960]

براساس موارد گفته شده، الگوریتم محاسبه گرانی توده‌های سه بعدی به روش تالوانی تهیه و فلوجارت آن در شکل (۳-۱۳) ارائه شده است. براساس این فلوجارت برنامه‌های لازم در محیط Matlab برای محاسبه اثر گرانی اجسام سه بعدی جهت مدل‌های مورد نیاز کد نویسی گردید.

در این فلوجارت ابتدا نقاط ابتدایی و انتهایی پروفیل به همراه پارامترهای عمق، اختلاف چگالی و مقدار ثابت شتاب جاذبه جهانی و مبدا مختصات تعریف می‌گردد. سپس در هر مرحله با تعیین عمق لایه مورد نظر به صورت چند ضلعی و مختصات رئوس چندضلعی مقادیر پارامترهای r و c ، m ، f ، p ، q محاسبه می‌شوند. براساس فرمول‌های ارائه شده مقدار اثر گرانی هر ضلع محاسبه و بعد از آن اثر گرانی هر لایه برای نقطه محاسبه‌ای (V) به دست می‌آید.

این عمل تا رسیدن شمارش گر عمق (dz) به سطح زیرین جسم آنومال ادامه می‌یابد. در انتها با محاسبه سطح زیر منحنی تغییرات V نسبت به عمق Z مقدار اثر گرانی جسم آنومال در نقطه مورد نظر محاسبه می‌شود. در ادامه نقطه محاسبه‌ای روی پروفیل تغییر و عمل محاسبه اثر گرانی برای تمام نقاط محاسبه‌ای تکرار می‌گردد.

در این فصل روش‌های محاسبه اثر گرانی اجسام دو و سه بعدی مورد بحث قرار گرفت. به منظور مدل سازی مختلف از تله‌های هیدروکربوری در ادامه بحث در فصل چهارم مدل‌های دو بعدی تله نفتی بررسی می‌شود و پس از آن مقادیر گرادیان کل نرمال دو بعدی برای انواع مدل‌ها، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین برخی از عوامل اصلی موثر در محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال بررسی می‌شود.



شکل ۳-۱۳: فلوجارت روند محاسبه اثر گرانی یک جسم سه بعدی با استفاده از روش برانبارش لایه‌های نازک

فصل چهارم

بررسی ویژگی‌های کردیان گل‌نمال دو بعدی
و بهینه‌سازی بعضی از پارامترهای موثر آن

۴-۱- مقدمه

همان طوری که در فصل اول اشاره گردید، به علت کوچک بودن آنومالی گرانی محلی حاصل از وجود منابع هیدروکربوری در یک منطقه، آشکارسازی آن از آنومالی‌های اندازه‌گیری به آسانی امکان پذیر نیست. روش گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی یک روش تبدیل میدان گرانی به مولفه‌های قائم و افقی آن است که بدین ترتیب قادر به شناسایی ساختارهای مرتبط با منابع هیدروکربوری می‌باشد. در این روش علاوه بر تفسیر کیفی و کمی منابع آنومال، تفکیک ساختارهای تاقدیسی حاوی هیدروکربور از ساختارهای تاقدیسی بدون هیدروکربور امکان پذیر می‌باشد.

همان طوری که پیشتر اشاره شد، بر مبنای تئوری پتانسیل نمی‌توان یک میدان پتانسیل را به اعماقی بیشتر از موقعیت منبع آنومال گسترش داد. بنابراین لازم است کلیه نوفه‌هایی که از نادیده گرفتن این قاعده در عمل گسترش به طرف پایین میدان پتانسیل یا مولفه‌های آن بوجود می‌آید، حذف و یا از شدت آن‌ها کاسته شود [Pasteka, 2000]. همان طوری که قبلاً اشاره شد، حذف این گونه نوفه‌ها در گذر از عمق قرارگیری منبع آنومال مورد نظر از ویژگی‌های اصلی عملگر گرادیان کل نرمال می‌باشد. در تعیین مقادیر گرادیان کل نرمال پارامترهایی زیادی موثر می‌باشند که از مهمترین آن‌ها تعداد بهینه جملات هارمونیک^{۸۱} برای محاسبه ضرایب سری فوریه تابع معادل گرانی است.

اثر اجسام آنومال و نیز پدیده‌های تولید کننده آنومالی‌های محلی به صورت مقادیر گرادیان کل نرمال بیشینه و یا کمینه روی نقشه مقاطع دو بعدی ظاهر می‌گردند. همچنین این مقادیر به شدت

^{۸۱} . Optimum Number of Harmonics

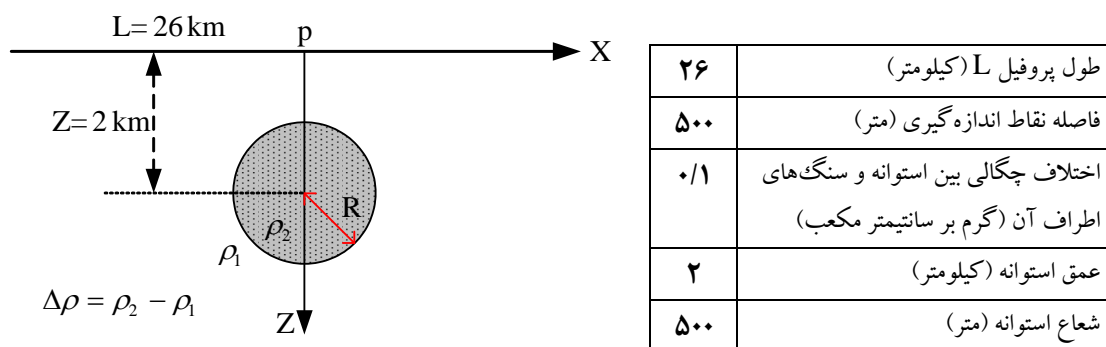
وابسته به تعداد هارمونیک مورد استفاده در تعیین ضرایب سری فوریه می‌باشد. پس این پرسش مطرح می‌شود که تعداد بهینه انتخابی جملات سری فوریه چقدر است؟ چگونه می‌توان آن را تعیین نمود؟ رابطه بین تعداد هارمونیک‌ها و مقدار گرادیان کل نرمال چگونه است؟ آیا ارتباطی بین مقدار گرادیان کل نرمال با شکل، وضعیت و اختلاف چگالی ساختارها وجود دارد؟ اختلاف چگالی چه تاثیری روی مقدار بهینه تعداد جملات هارمونیک دارد؟ تاثیر میزان طول پروفیل اندازه‌گیری داده‌های گرانی روی مقادیر گرادیان کل نرمال چگونه است و طول بهینه چه طولی است؟ آیا فاصله بین نقاط اندازه‌گیری روی هر پروفیل و یا در یک شبکه در مقدار گرادیان کل نرمال موثر است؟ هندسه و شکل ظاهری اجسام آنومال روی نتایج گرادیان کل نرمال چه تاثیری دارد؟ مقدار بهینه توان جمله هموار کننده لانکزوس (μ) چند است؟

چه شاخصی را برای تعیین مناطق پر پتانسیل یا تفکیک ساختارهای حاوی هیدروکربور از ساختارهای بدون آن می‌توان برای تله‌های نفتی نوع گنبد نمکی مطرح نمود؟ تغییرات مقادیر گرادیان کل نرمال برای این گونه ساختارها بدون مواد هیدروکربوری و یا به همراه آنها چگونه است؟ با توجه به موارد مطرح شده، در این فصل نقش عوامل موثر در محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی مانند تعداد جملات هارمونیک، طول پروفیل و فاصله بین نقاط اندازه‌گیری روی پروفیل یا در یک شبکه، توان تابع هموارساز و چگونگی بهینه‌سازی این پارامترها برای شناسایی هر چه بهتر منابع آنومال بررسی می‌شود. علاوه بر آن پاسخ روش گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی روی مدل‌های دو بعدی نفتگیرهای تاق‌دیسی و غیرتاق‌دیسی نوع گنبد نمکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای پاسخ به پرسش‌های مطرح شده و نیل به اهداف مورد نظر، بسته به نیاز و یا سادگی محاسبات از آنومالی‌های گرانی مدل‌های مختلف تداعی کننده ساختارهای زمین‌شناسی یا مخازن هیدروکربوری (که روش محاسبه آن‌ها در فصل سوم بیان شد)، جهت محاسبه‌ی مقدار گرادیان کل نرمال و بررسی خواص آن‌ها استفاده می‌شود.

۴-۲ رابطه گرادیان کل نرمال (NFG) با تعداد هارمونیک (N)

به منظور فهم بیشتر رابطه بین مقدار گرادیان کل نرمال و تغییرات آن با تعداد هارمونیک‌ها برای محاسبه‌ی ضرایب سری فوریه، مدل استوانه‌ی افقی با شعاع ۰/۵ کیلومتر، اختلاف چگالی ۰/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و عمق مرکزی ۲ کیلومتری از سطح اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴-۱). با توجه به این که استوانه افقی یک مدل مناسب برای ساختارهای تاقدیسی شکل متقارن بوده و به لحاظ شکل هندسی ساده و محاسبه اثر گرانی آن به آسانی امکان پذیر است، بیشتر از این مدل در بررسی پارامترها استفاده شده است.



شکل ۴-۱: مدل استوانه افقی با پارامترهای مورد نیاز

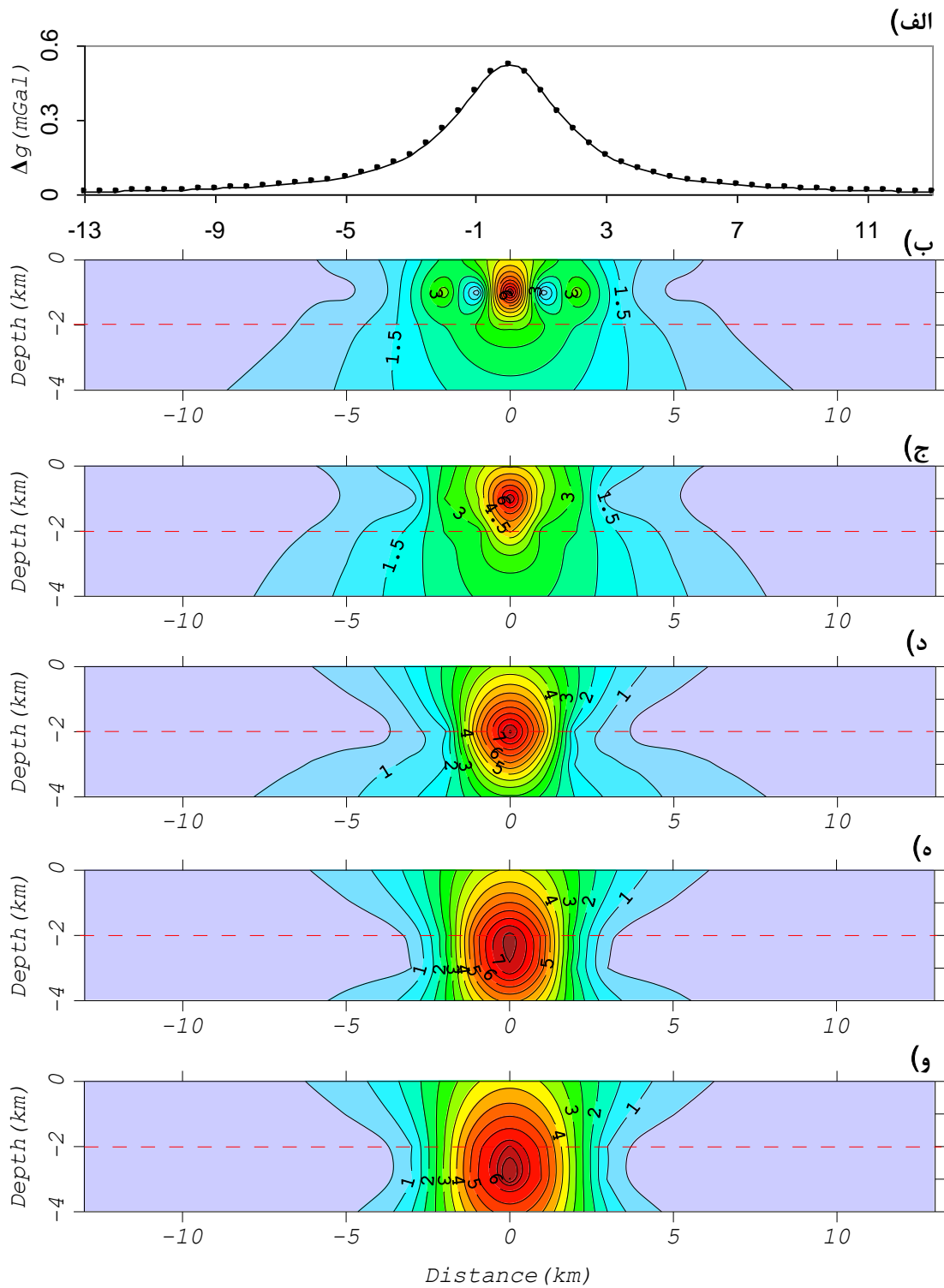
پاسخ گرانی این مدل روی پروفیلی به طول پروفیل ۲۶ کیلومتر با فاصله نقاط اندازه‌گیری ۵۰۰ متری به وسیله برنامه تهیه شده در محیط نرم‌افزار Matlab محاسبه گردید. سپس با الگوریتم (شکل ۲-۱۰) و برنامه نوشته شده NFG2D، مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی ناشی از این استوانه بر روی یک پروفیل با تعداد هارمونیک مختلف ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۴، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ محاسبه گردید. در ادامه مقاطع دو بعدی آن‌ها تهیه و تعدادی از آن‌ها به عنوان نمونه رسم شد (شکل ۴-۲).

برای تهیه مقاطع گرادیان کل نرمال (شکل ۴-۲)، ابتدا مقادیر گرانی حاصل از استوانه افقی به عنوان یک فایل ورودی داده ای به صورت یک ماتریس سه ستونی که بیان کننده تغییرات طول

پروفیل، مشخص کننده محل عرضی پروفیل و تغییرات مقدار گرانی ناشی از جسم در راستای پروفیل می‌باشد، توسط برنامه NFG2D خوانده می‌شود. از پارامترهایی که بایستی در این برنامه مطرح شوند، تعداد جملات بهینه، توان تابع هموارساز و فاصله تغییرات در راستای عمق و مقدار گسترش عمقی مورد نیاز می‌باشد. علاوه بر این در این برنامه ابتدا با محاسباتی که در شروع آن انجام می‌شود طول پروفیل، تعداد نقاط پیشنهادی و یا فاصله بین نقاط اندازه‌گیری مشخص شده و محاسبات بر اساس این داده‌ها انجام می‌شود.

در محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال مندرج در شکل (۲-۴) مقدار توان تابع هموارساز لانکزوس $\mu=2$ ، تغییرات عمق در راستای محور Z ($\Delta Z = 500$)، ۵۰۰ متر منظور شده و تا عمق ۴ کیلومتری با تغییر تعداد جملات سری فوریه محاسبات انجام شده است. تعداد جملات هارمونیک از مقادیر کمتر شروع و محاسبات براساس تغییر آن صورت گرفت. مطابق شکل (۲-۴)، مقادیر گرادیان کل نرمال به صورت مقادیر بیشینه و منحنی‌های بسته در محل قرارگیری استوانه دیده می‌شود. موقعیت عمقی و مقادیر بیشینه منحنی‌های بسته با تغییر تعداد جملات سری فوریه تغییر و کم یا زیاد می‌شود. زمانی که مقدار N برابر مقادیر ۲۵ و ۳۰ است مقادیر بیشینه NFG به ترتیب برابر $6/5043$ و $7/7041$ می‌باشند و منحنی بیشینه بسته NFG زیر مرکز استوانه قرار گرفته و با افزایش تعداد هارمونیک (N) به سمت مرکز آنومالی حرکت می‌کند (شکل ۲-۴-۵، و).

وقتی که مقدار N برابر ۳۴ است، بیشینه مقدار NFG هماهنگی خوبی با مرکز قرارگیری استوانه دارد و مقدار آن $8/8421$ است (شکل ۲-۴-۵). زمانی که تعداد جملات را ۴۰ و ۴۵ در نظر گرفته شود، مقدار بیشینه منحنی بسته تغییر کرده و به ترتیب به مقادیر $7/4947$ و $8/8809$ می‌رسد و محل این بیشینه بالاتر از عمق مرکزی استوانه قرار می‌گیرند (شکل ۲-۴-ج-ب). این مثال نشان می‌دهد که مقدار بهینه عدد N یا سری هارمونیک برابر ۳۴ می‌باشد.



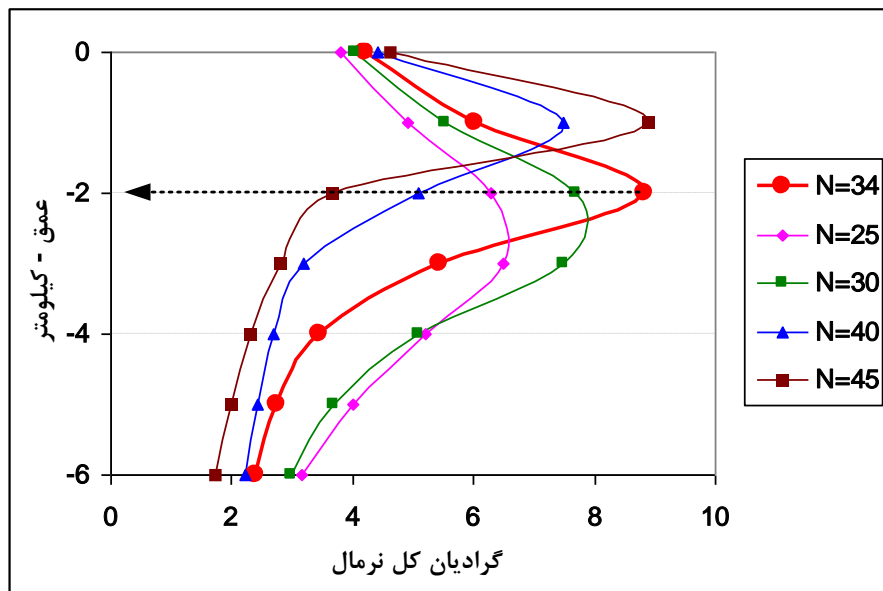
شکل ۴-۲: الف) آنومالی گرانی ناشی از یک استوانه افقی مدفون در عمق ۲ کیلومتری (شکل ۴-۱) و مقادیر گرادیان کل شمال آنومالی گرانی ناشی از آن به ازای تعداد هارمونیک‌های (ب) ۴۵، (ج) ۴۰، (د) ۳۴، (ه) ۳۰، (و) ۲۵

همان طوری که اشاره گردید برای یافتن عددی برای تعداد هارمونیک برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال به روش سعی و خطا از تعداد زیادی N استفاده گردید تا بتوان عددی را یافت که براساس آن موقعیت و عمق قرارگیری استوانه افقی روی مقاطع NFG با مقادیر بیشینه هماهنگ باشد. از طرفی بررسی‌ها نشان می‌دهد که پژوهشگران [Zeng et al, 2002; Tran, 2004; Aydin, 2007] برای تعیین مقدار بهینه N جهت تفسیر داده‌های واقعی، از داده‌های حفاری و یا اطلاعات لرزه‌نگاری میدان نفتی استفاده نموده‌اند. به عبارت دیگر چاه‌های اکتشافی که دارای عمق مشخص بوده و به مخازن هیدروکربوری برخورد کرده باشند به عنوان یک نمونه مشخص از مخزن انتخاب می‌شود. سپس مقدار N ایی که سبب شود تا موقعیت منحنی‌های بسته مقادیر گرادیان کل نرمال منطبق با موقعیت مخزن هیدروکربوری گردد به عنوان تعداد جملات هارمونیک بهینه انتخاب می‌شود. ولی با توجه به این که از روش گرانی سنجی در مراحل اولیه اکتشاف منابع هیدروکربوری استفاده می‌شود، و در این مرحله غالباً داده‌های تکمیلی وجود ندارد بنابراین لازم است که به طریقی دیگر مقدار بهینه تعداد جملات سری فوریه تعیین شود.

۳-۴- تخمین مقدار بهینه تعداد جملات هارمونیک

بدیهی است که مقدار گرادیان کل نرمال به شدت به تعداد جملات سری فوریه وابسته است و تغییر کوچک در مقدار آن سبب تغییرات بزرگی در مقدار NFG خواهد شد [Berezkin and Buketov, 1965; Zeng et al, 2002, Aghajani and Moradzadeh, 2008; Aghajani et al, 2009d]. بنابراین تعیین یک معیار مناسب برای تخمین مقدار بهینه تعداد جملات سری هارمونیک مهم‌ترین مساله در این روش می‌باشد. مطابق شکل (۲-۴) مقدار گرادیان کل نرمال در مرکز یک مدل استوانه افقی مقدار بیشینه را دارد، بنابراین می‌توان با محاسبه مقادیر آن براساس تغییرات تعداد جملات سری فوریه، مقدار بهینه آن را انتخاب نمود. به این منظور با تعداد جملات فوریه ۲۵، ۳۰، ۳۴، ۴۰، و ۴۵ مقادیر

گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی حاصل از این جسم به ازای عمق‌های مختلف محاسبه گردید و سپس نمودار تغییرات آن‌ها رسم شد (شکل ۴-۳). مطابق این شکل به وضوح دیده می‌شود که مقدار گرادیان کل نرمال و موقعیت بیشینه آن به شدت وابسته به N می‌باشد.



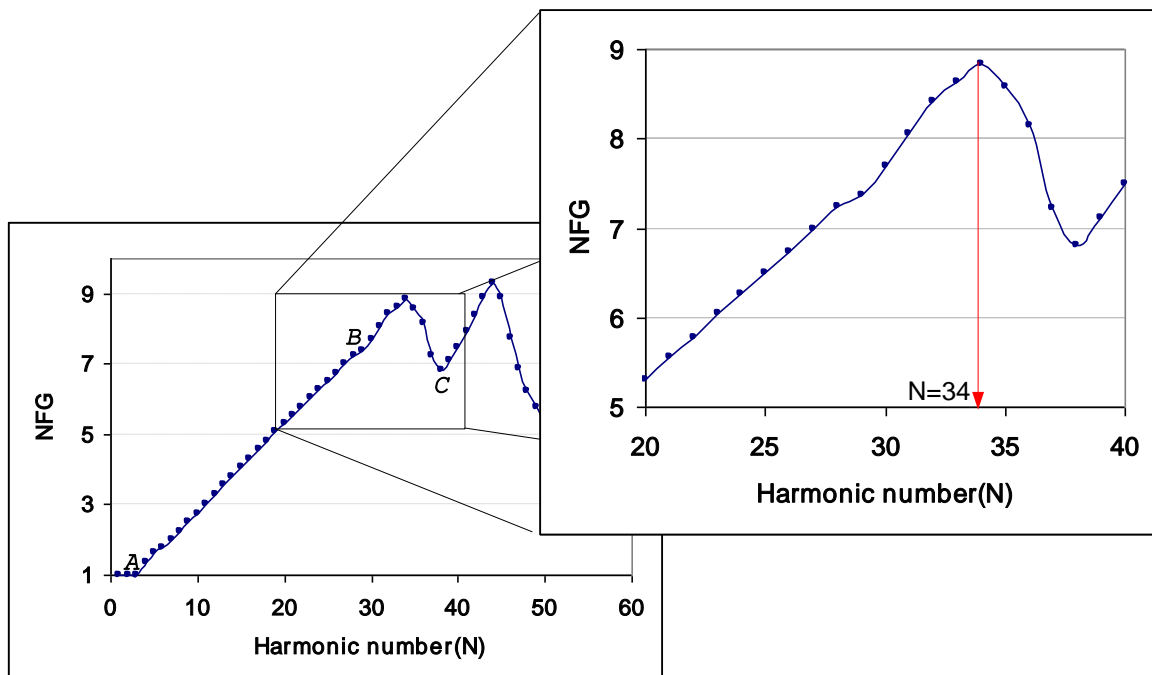
شکل ۴-۳: مقدار گرادیان کل نرمال به ازای تعداد جملات متفاوت سری فوریه در عمق‌های مختلف، نمودار مربوط به عدد بهینه به رنگ قرمز و با نشانه بزرگتر دیده می‌شود [آقاجانی و همکاران، ۱۳۸۹]

همان طوری که در شکل (۴-۲) قابل مشاهده است، زمانی که تعداد جملات سری فوریه عدد ۳۴ است بهترین و دقیق‌ترین تخمین از موقعیت عمق وجود دارد که مرکز توده آنومال را نشان می‌دهد. بنابراین عدد بهینه برای تعداد جملات هارمونیک عدد ۳۴ می‌باشد ولی تعیین این عدد زمانی امکان پذیر است که عمق توده آنومال مورد بررسی، از قبل معلوم باشد. از این رو این روش برای تفسیر داده‌های واقعی بدون اطلاعات کمکی بنا به دلایل زیر عملاً غیر ممکن است،

- استفاده از داده‌های گرانی برای اکتشاف زمانی است که داده‌های تکمیلی منطقه کم است.
- این معیار تنها براساس یک توده جسم آنومال پایه‌گذاری شده است، در حالی که در عمل ممکن است چندین توده آنومال در یک منطقه وجود داشته باشد.
- این معیار برای یک جسم آنومال منظم و همگن تهیه شده است آیا می‌توان چنین رابطه‌ای را برای یک جسم آنومال شبیه یک تاق‌دیس حاوی یا فاقد مواد هیدروکربوری نیز تعریف نمود؟

همچنان که پیشتر گفته شد، زمانی که داده‌های تکمیلی وجود نداشته باشد تعیین تعداد جملات بهینه (N) بسیار ضروری است. در اینجا براساس مبانی روش گرادیان کل نرمال (معادلات ۲-۷ و ۲-۸) روشی جدید برای حل این مشکل ارائه می‌شود. برای این کار مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال به ازای مقادیر مختلف از جملات هارمونیک سری فوریه محاسبه و نمودار تغییرات آن‌ها رسم می‌گردد. مطابق شکل (۴-۴) تغییرات نمودار مذکور به لحاظ شیب و مقادیر بیشینه و کمینه محدوده‌هایی را روی نمودار به نمایش می‌گذارد. محدوده اولی نمودار تقریباً با شیب یکسان و به صورت خطی (AB) تغییر می‌کند. محدوده دومی از انتهای محدوده خطی تا اولین کمینه نسبی (BC) را در بر می‌گیرد و به همین ترتیب ادامه می‌یابد.

براساس بررسی‌های انجام شده روی مدل ساخته شده، تعداد جملات ۳۴ اولین بیشینه نسبی را روی منحنی مورد نظر نشان می‌دهد. پس مقادیر عددی کم‌تر از ۳۴ برای N ، اعماق پایین‌تر از عمق قرارگیری جسم آنومال را نشان می‌دهد و مقدار باقی‌مانده $I_N(\psi)$ در معادله (۲-۷) بزرگ‌تر از مقدار اصلی $\Delta g_N(\psi)$ خواهد شد.



شکل ۴-۴: نمودار تغییرات گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک سری فوریه

مطابق شکل‌های (۳-۴) و (۴-۴) می‌توان عنوان نمود که تعداد جملات متناظر با اولین بهینه نسبی موجود در محدوده دوم نمودار تغییرات گرادیان کل نرمال با تعداد جملات سری فوریه، عدد بهینه‌ای برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال می‌باشد. همان طوری که در جدول (۱-۴) دیده می‌شود با منظور نمودن عدد ۳۴ مقدار عمق تخمینی برابر عمق جسم آنومال مورد نظر (استوانه افقی) خواهد شد. بر این اساس می‌توان گفت که تعداد بهینه هارمونیک‌ها عددی است مساوی یا کوچک‌تر از عددی که اولین بهینه نسبی را پس از محدوده خطی نمودار تولید می‌نماید. به این ترتیب با منظور نمودن عدد ۳۴ به عنوان تعداد جملات هارمونیک بهینه، مقادیر گرادیان کل نرمال برای مدل استوانه افقی محاسبه می‌شود (شکل ۴-۲-۵). علاوه بر مدل مذکور، این روش روی مدل‌های مختلف آزمایش و صحت موارد فوق تایید شد.

جدول ۱-۴: مقادیر تغییرات گرادیان کل نرمال به ازای تعداد جملات هارمونیک در طول محور Z

تعداد جملات هارمونیک (N)	۲۵	۳۰	۳۴	۴۰	۴۵
مقدار گرادیان کل نرمال بیشینه در هر N	۶/۵۰۴۳	۷/۷۰۴۱	۸/۸۴۲۱	۷/۴۹۴۷	۸/۸۸۰۹
عمق تخمینی (کیلومتر)	۲/۸	۲/۲	۲/۰	۱/۲	۱/۰
درصد خطای تخمین	۴۰	۱۰	۰	۴۰	۵۰

۴-۴- رابطه NFG با طول پروفیل گرانی

برزکین در سال‌های ۱۹۷۸ و ۱۹۸۸ خاطر نشان کرد که طول پروفیل گرانی باید ۱۰ برابر عمق نقطه تکین باشد تا نتایج منطقی حاصل آید [Berezkin, 1978, 1988]، به عبارتی دیگر مقدار NFG به شدت به طول پروفیل گرانی بستگی دارد. محاسبات مدل نشان می‌دهد زمانی که طول پروفیل کوتاه باشد، محل و موقعیت مقدار بیشینه گرادیان کل نرمال در مقطع NFG بالا می‌آید و مولفه‌های فرکانس بالا (نوفه) افزایش می‌یابد. لذا مقدار بهینه N کوچکتر می‌شود و بیشترین مقدار NFG دارای عمق کمتری می‌گردد. علاوه بر برزکین، زنگ و همکارانش [Zeng et al, 2002] این موضوع را روی مدل تاقدیس برزکین بررسی نموده و با توجه به نوع تعیین تعداد جملات هارمونیک عدد ۱۰ برابر را

برای کارهای صحرایی خود مد نظر قرار داده‌اند. از این نتیجه تران [Tran, 2004] در موضوع تحقیقاتی خویش در شناسایی منابع هیدروکربنی در دریای جنوب شرقی ویتنام استفاده کرده است. وجود یک مقدار کمینه گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی محصور بین دو مقدار بیشینه در یک مقطع عمقی از پروفیل مورد نظر به عنوان مشخصه‌ای برای کشف ذخایر احتمالی تاقدیسی حاوی نفت و گاز در بررسی‌های زیادی تایید شده است [Berezkin, 1973; Zeng et al, 2002; Tran, 2004; Aydin, 2007; Aghajani et al 2009b, c]. مساله اصلی در این روش، انتخاب موقعیت، امتداد و طول پروفیل مورد نیاز در ناحیه مطالعاتی است. انتخاب موقعیت و امتداد پروفیل با بررسی نقشه آنومالی گرانی بوگه و آنومالی باقی‌مانده و همچنین نقشه گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی در یک افق خاص قابل انجام است. علاوه بر این، وجود گمانه‌های اکتشافی که موقعیت جغرافیایی و عمق دسترسی به مواد هیدروکربوری در آن‌ها مشخص است یکی از معیارهای انتخاب پروفیل در مناطقی با طرح توسعه میدانی می‌باشد. به منظور بررسی رابطه مقدار گرادیان کل نرمال با طول پروفیل گرانی، از معادله زیر برای محاسبه مقدار گرادیان کل حاصل از یک استوانه افقی (معادله ۲-۱۰) استفاده می‌شود.

$$G(x, z) = 2G\lambda \frac{1}{x^2 + z^2} \quad (1-4)$$

به این ترتیب براساس معادله (۱-۱۹) مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی ناشی از استوانه افقی برای نقاط مختلف روی پروفیل به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$G_N(x_i, z_k) = \frac{2G\lambda \frac{1}{x^2 + z^2}}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 2G\lambda \frac{1}{x_i^2 + z^2}} \quad (2-4)$$

با حل معادله فوق و محاسبه انتگرالی آن معادله زیر حاصل می‌شود:

$$G_N(x, z) = \frac{z \cdot L}{(x^2 + z^2) \tan^{-1}\left(\frac{L}{z}\right)} \quad (3-4)$$

که در آن L طول پروفیل اندازه‌گیری می‌باشد.

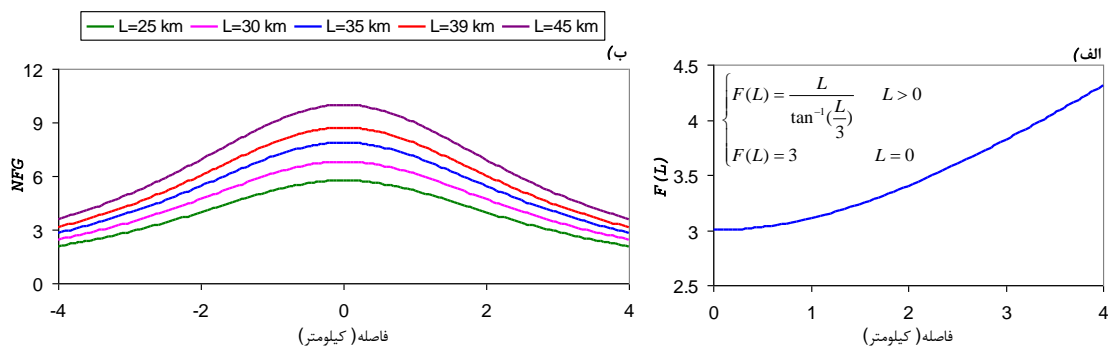
برای جسمی که در عمق z_0 واقع شده است، تابع $F(L)$ را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\begin{cases} F(L) = \frac{L}{\tan^{-1}\left(\frac{L}{z}\right)} & L > 0, \\ F(L) = z_0 & L = 0, \end{cases} \quad (4-4)$$

در این صورت گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی ناشی از یک استوانه افقی روی نقاط محاسبه‌ای پروفیل به صورت زیر بیان نمود.

$$G_N(x, z) = \frac{z}{(x^2 + z^2)} F(L) \quad (5-4)$$

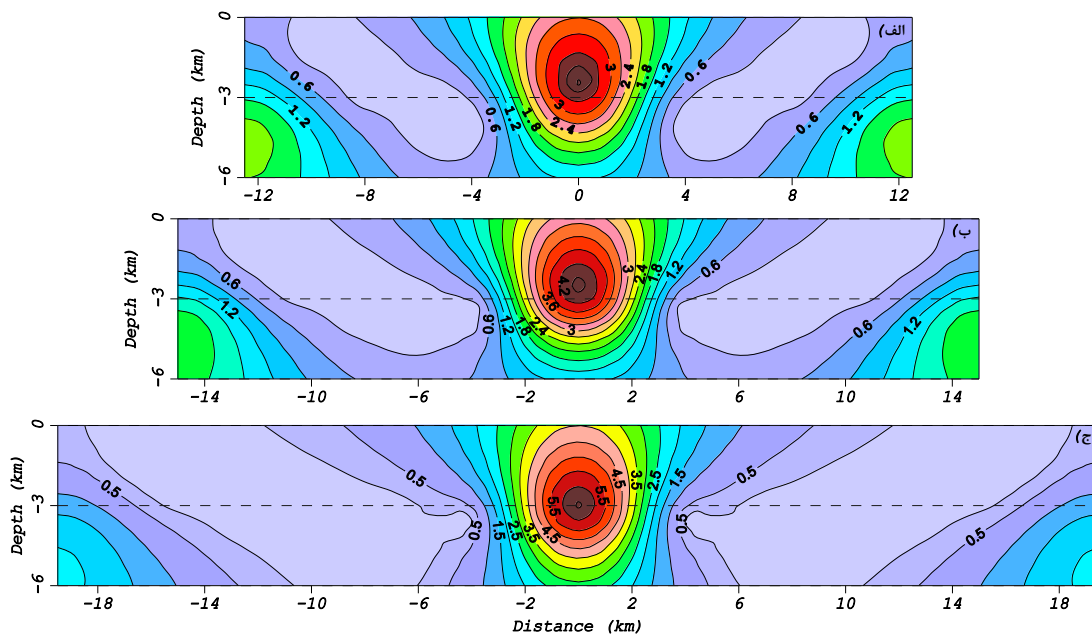
که در آن $F(L)$ به ازای مقدار ثابتی برای Z تابعی یکنواخت صعودی بوده و با افزایش مقدار L افزایش می‌یابد. به عبارتی هرچه اندازه طول پروفیل زیاد شود، مقدار $G_N(x, Z)$ نیز افزایش می‌یابد. هرچه مقدار L کوچک‌تر شود به همان میزان نیز مقدار $G_N(x, Z)$ نیز کاسته می‌شود. در شکل (4-5-الف) تغییرات مقدار تابع $F(L)$ نسبت به تغییرات L زمانی که $Z=3$ است، ارائه شده است. همچنین نمودار تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی ناشی از استوانه افقی نسبت به تغییرات طول پروفیل در شکل (4-5-ب) دیده می‌شود.



شکل 4-5: الف) تغییرات تابع $F(L)$ نسبت به L وقتی که $Z=3$ کیلومتر است و ب) مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی ناشی از استوانه افقی نسبت به تغییرات طول پروفیل

مطابق شکل (4-5-ب) مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی با تغییر طول پروفیل اندازه‌گیری داده‌های گرانی تغییر کرده و با افزایش آن زیاد می‌گردد. بنابراین رابطه بین طول پروفیل و مقدار NFG یک رابطه مستقیم بوده و هرچه اندازه طول بیشتر شود، مقدار NFG نیز زیادتر می‌شود. یعنی

زمانی که طول پروفیل ۲۵ کیلومتر تعریف می‌شود، مقدار بیشینه گرادیان کل نرمال که محدوده بسته آن مشخص کننده موقعیت استوانه افقی (عمق ۳ کیلومتری) روی نقشه NFG است، حدود ۶ می‌شود. در حالی که اگر اندازه طول پروفیل ۴۵ کیلومتر منظور شود، مقدار بیشینه NFG حدود ۱۰ خواهد شد. مقایسه شکل‌های (۴-۵-الف، ب) نشان می‌دهد که نمودار به صورت یکنواخت صعودی می‌باشد. پس در اینجا این پرسش مطرح می‌شود که چه طولی بهینه است که اگر روی آن مقادیر داده‌های گرانی اندازه‌گیری شود مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال محاسبه شده داده‌های گرانی روی نقشه محل و موقعیت مناسب جسم آنومال را بیان نماید؟ بررسی‌ها نشان می‌دهد [Berezkin, 1973; Tarn, 2004; Zeng et al, 2002]، که اندازه طول پروفیل اندازه‌گیری بایستی ۱۰ برابر مقدار عمق مورد انتظار جسم آنومال باشد، تا بتواند جواب مناسب ارائه دهد. برای بررسی موضوع طول پروفیل برابر ۳۰ کیلومتر ($L=3 \times 10 = 30$) منظور گردید. بر این اساس مقدار گرانی ناشی از استوانه مدفون در عمق ۳ کیلومتری محاسبه و سپس مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی به دست آمد (شکل ۴-۶-ب).

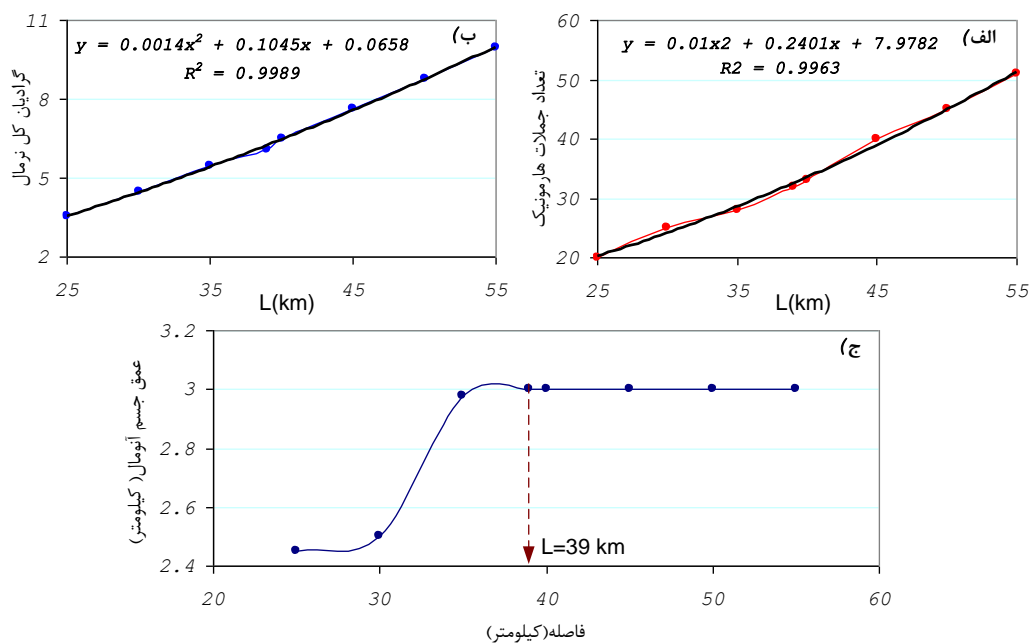


شکل ۴-۶: مقاطع گرادیان کل نرمال به ازای، الف) طول پروفیل ۲۵ کیلومتر، $N=20$ ، ب) طول پروفیل ۳۰ کیلومتر، $N=25$ و ج) طول پروفیل ۳۹ کیلومتر، $N=32$ ، خط رسم شده در عمق ۳ کیلومتری نشان‌گر عمق استوانه می‌باشد.

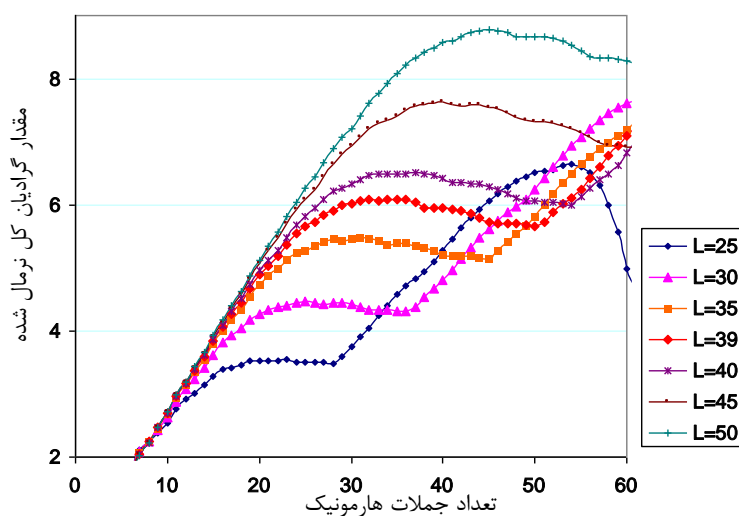
مطابق شکل (۴-۶-الف)، طول پروفیل اندازه‌گیری با فرض ثابت نگه‌داشتن سایر مقادیر، به ۲۵ کیلومتر کاهش داده شد. در این حالت محدوده بیشینه منحنی‌های بسته بالاتر از حالت (۴-۶-ب) قرار گرفته که بیان‌کننده این مطلب است که با کاهش طول پروفیل مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال کم و موقعیت این بیشینه بر روی نقشه مقطع به سمت عمق‌های کمتر حرکت کرده است. زمانی که طول پروفیل به ۳۹ کیلومتر یعنی ۱۳ برابر عمق مورد نظر (شکل ۴-۶-ج) تغییر داده شد، محدوده مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال درست در محل مدل دیده می‌شود. مطابق شکل‌های (۴-۶-الف، ب) وقتی طول پروفیل کم شود، هر چند موقعیت افقی مقادیر بیشینه روی مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال نشان‌دهنده وجود یک جسم آنومال است ولی عمق قرارگیری بیشینه نشان‌دهنده عمق واقعی جسم آنومال نبوده و مقدار کمتری از آن را نشان می‌دهد [Aghajani et al, 2009b].

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، تاثیر تعداد جملات سری هارمونیک روی مقادیر گرادیان کل نرمال نسبت به تغییرات طول پروفیل متفاوت است. به عبارت دیگر هر چه تعداد جملات هارمونیک افزایش یابد مقدار گرادیان کل نرمال بیشتر می‌شود ولی موقعیت منحنی‌های بسته بیشینه به سطح نزدیک شده و در نتیجه تخمین درست عمق جسم آنومال امکان‌پذیر نیست. در شکل (۴-۷) نمودار تغییرات تعداد جملات هارمونیک، مقادیر گرادیان کل نرمال و تغییرات عمق جسم آنومال نسبت به تغییرات طول پروفیل اندازه‌گیری ارائه شده است.

مطابق شکل‌های (۴-۷-الف، ب) و (۴-۸) هر چه اندازه طول پروفیل بیشتر شده مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال و تعداد جملات هارمونیک به صورت یک تابع صعودی افزایش یافته است. تنها تفاوت در مقدار شیب افزایش مقادیر است که تعداد جملات هارمونیک با شیب بیشتری افزایش می‌یابد. شکل (۴-۷-ج) نشان می‌دهد که با تغییر طول پروفیل عمق تخمینی جسم آنومال روی مقطع گرادیان کل نرمال افزایش یافته تا جایی که پس از آن مقادیر عمق تخمینی ثابت می‌ماند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طول بهینه پروفیل بایستی حدود ۱۳ برابر عمق جسم مورد انتظار باشد.



شکل ۴-۷: الف) نمودار تعداد هارمونیک‌ها نسبت به تغییر طول پروفیل، ب) تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال نسبت به تغییر طول پروفیل، ج) تغییرات عمق تخمینی نسبت به تغییر طول پروفیل



شکل ۴-۸: تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد هارمونیک‌ها برای اندازه‌های مختلف طول پروفیل

برای بالا بردن صحت و سطح اعتماد این نتیجه، این موضوع یعنی طول بهینه پروفیل روی تمامی مدل‌های مصنوعی نظیر تاقدیس و گنبد نمکی با و بدون وجود هیدروکربور نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد که نتایج آن در ادامه ارائه می‌شود.

۴-۵- تاثیر توان تابع هموارساز (μ) روی مقدار N و گرادیان کل نرمال

همان طوری که در فصل دوم اشاره گردید، در فرآیند محاسبه مقدار آنومالی گرانی و نیز گرادیان آن در راستای محورهای X و Z در روش گسترش به سمت پایین، اغتشاشاتی در میدان گرانی ظاهر می‌شود. برای حذف یا کاستن این پدیده از تابع هموارساز سینوسی [Berezkin, 1967] زیر استفاده می‌شود. این جمله هموارساز سینوسی به ضرایب سیگما لانکزوس معروف می‌باشد.

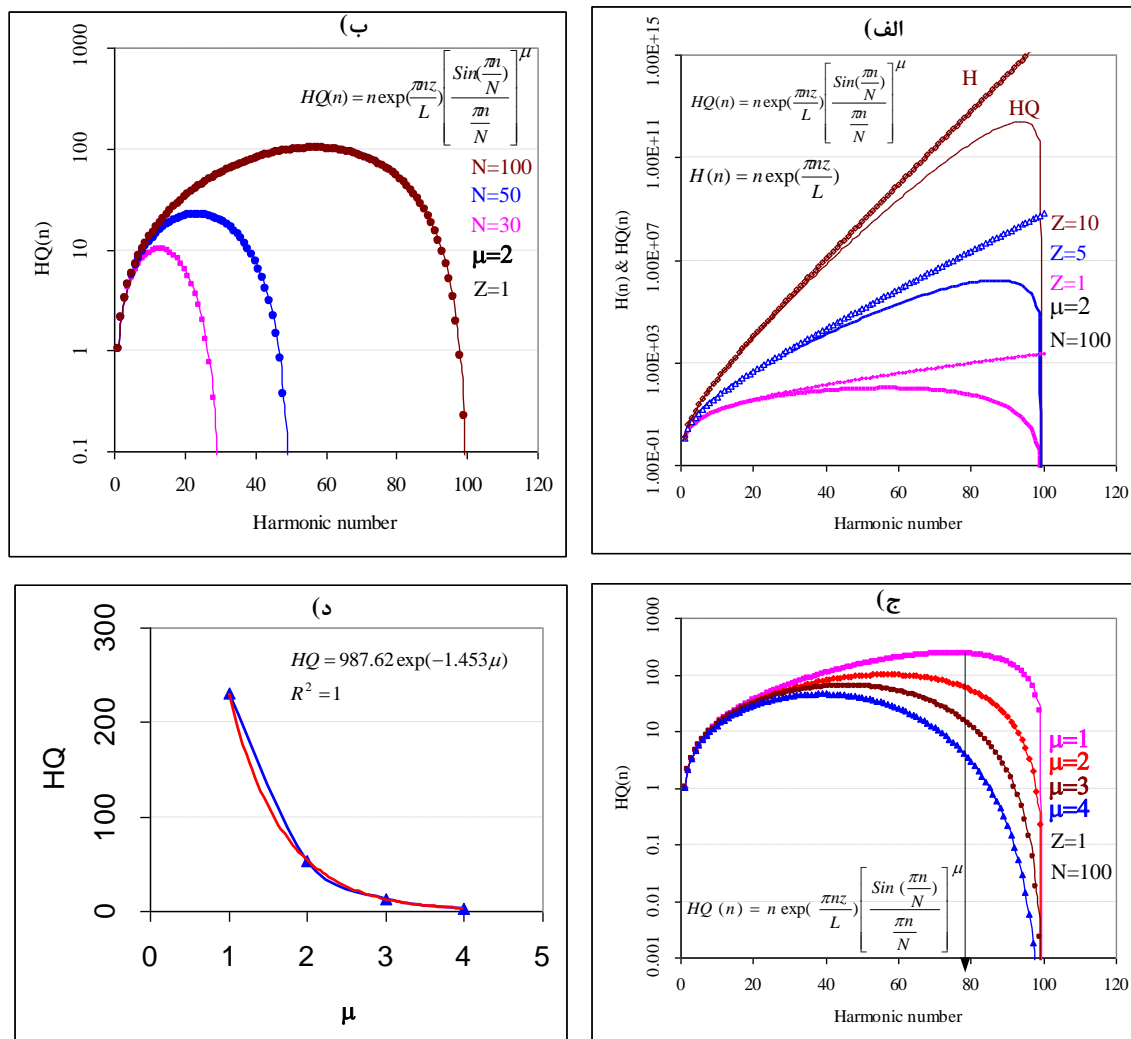
$$Q = \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi n}{N}\right)}{\frac{\pi n}{N}} \right]^{\mu} \quad (۴-۶)$$

برای محاسبه Q نیاز به انتخاب توان (μ) می‌باشد که بیان کننده درجه هموارسازی است و نیز میزان انحناى تابع Q را کنترل می‌کند. اگر چه می‌توان برای μ هر عدد صحیح انتخاب نمود ولی بررسی‌ها نشان داده که مقادیر ۲ یا ۱ برای μ [Aydin, 1997; Karsli, 2001] نتایج منطقی‌تری را ارائه می‌دهد.

برای بررسی مقدار عددی بهینه توان تابع هموارساز ابتدا ویژگی این تابع در محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال اشاره می‌شود. عملگر گرادیان کل نرمال، یک فیلتر نوسانی (H) است و ویژگی‌های فرکانس آن به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$HQ(n) = H \times Q, \quad H = n \exp\left(\frac{\pi n z}{L}\right) \quad (۷-۴)$$

$HQ(n)$ به صورت ویژگی فرکانس خطی تابع گرادیان کل نرمال معروف است [Berezkin, 1988]. به منظور بررسی ویژگی تابع فیلتر نوسانی، مقادیر تابع در دو حالت جداگانه با و بدون حضور ضریب سینوسی لانکزوس برای عمق‌های $Z=1$ ، $Z=5$ و $Z=10$ کیومتر، $N=100$ ($n=1-100$) و $\mu=2$ محاسبه گردید. نتایج حاصل از این محاسبات به صورت منحنی تغییرات توابع HQ و H در شکل (۴-۹-الف) ارائه شده است.



شکل ۴-۹: الف) تغییرات فیلتر نوسانی (H) نسبت به تغییر تعداد هارمونیک‌ها با لحاظ نمودن تابع لانکزوس (Q) و بدون استفاده از آن و $\mu=2$ ، ب) تغییرات تابع HQ نسبت به تغییر تعداد هارمونیک‌ها و با $\mu=2$ و $Z=1$ ، ج) تغییرات تابع HQ نسبت به تغییرات تعداد هارمونیک‌ها برای حالات مختلف μ ، د) تغییرات تابع HQ نسبت به تغییرات μ

همچنان که از شکل پیداست بدون تاثیر ضریب Q، منحنی تابع $H(n)$ به صورت مداوم با افزایش مقادیر n و Z افزایش یافته و بیانگر این است که اثر تابع $H(n)$ برای مقادیر بزرگ n و Z زیاد می‌شود و باعث ناپایداری در فرآیند روش گسترش به پایین می‌گردد. ولی زمانی که از ضریب مورد نظر (Q) استفاده می‌شود، سبب حذف حالت یکنواخت صعودی تابع شده و سبب ایجاد انحنا در منحنی می‌شود و این حالت برای عمق‌های کم بیشتر است.

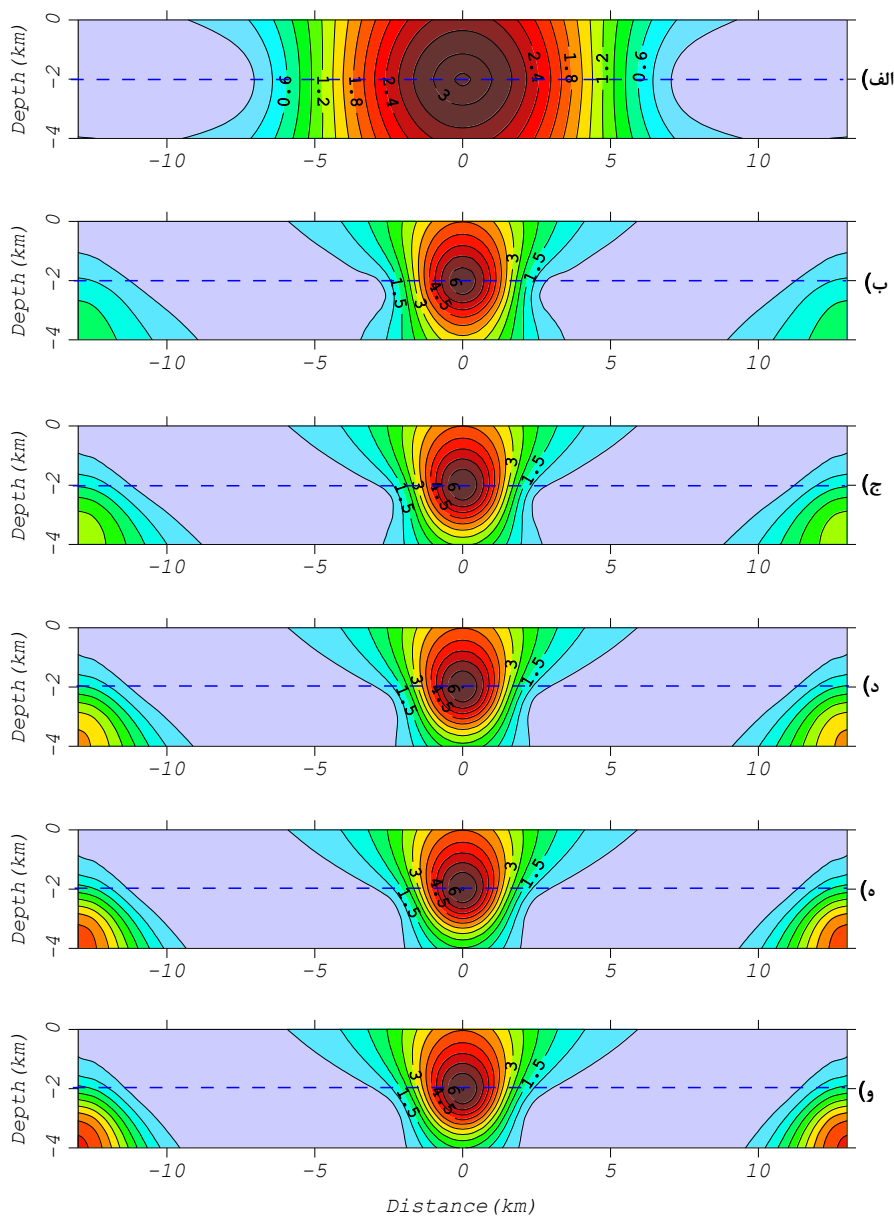
شکل‌های (۴-۹-ب و ج) تغییرات تابع فیلتر را برای حالاتی که تعداد جملات هارمونیک و مقادیر توان تابع هموارساز متغیر است نشان می‌دهند. مطابق شکل (۴-۹-ب) با افزایش تعداد جملات هارمونیک تابع HQ در مقدار بیشینه بیشتری به انحنای خودش می‌رسد که در نهایت تاثیر آن روی مقدار تابع گرادیان کل نرمال براساس مقدار N انتخابی است. در شکل‌های (۴-۹-ج ، د) تغییرات تابع فیلتر، $HQ(n)$ ، نسبت به توان تابع لانکزوس (μ) ارائه شده است.

مطابق با این شکل‌ها، تغییر در مقدار μ سبب تغییراتی در تابع لانکزوس، $Q(n)$ ، و نهایتاً در مقدار تابع $HQ(n)$ ایجاد می‌کند بنابراین این پرسش مطرح است که کدامیک از مقادیر آن نتیجه بهتری ارائه می‌دهد؟ برای پاسخ به این پرسش، تاثیر مقدار توان تابع مورد نظر را روی مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی حاصل از یک مدل استوانه افقی که در عمق ۲ کیلومتری قرار گرفته است، مورد بررسی قرار می‌دهیم.

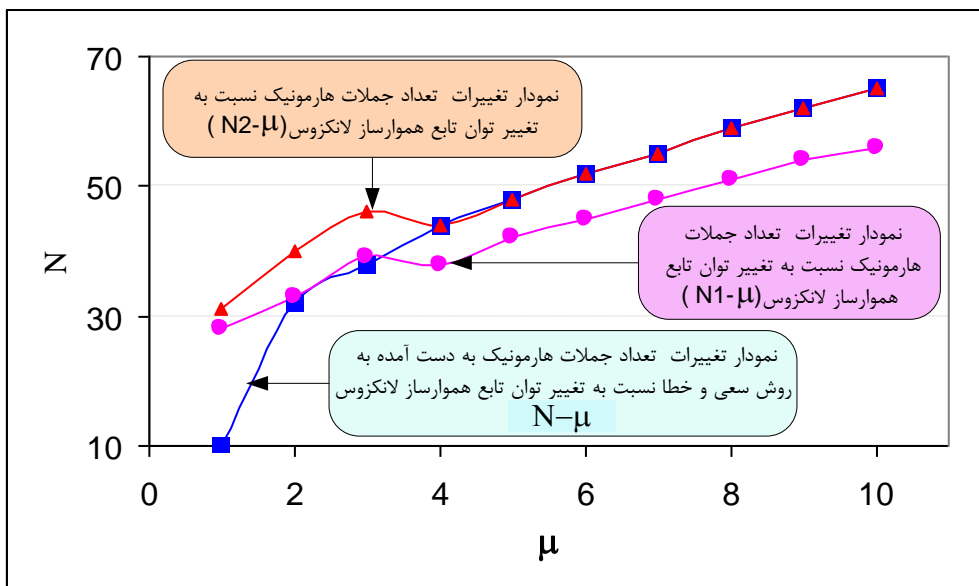
برای این کار ابتدا به روش معمول (روش سعی و خطا) تعداد جملات بهینه مورد استفاده برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال با تغییر مقدار μ تعیین می‌شود. به عبارت دیگر برای تعیین موقعیت دقیق جسم آنومال با تغییر مقدار μ در هر مرحله، مقادیر NFG براساس تعداد هارمونیک‌های متفاوت محاسبه شده تا بهترین انطباق بین نتیجه حاصل و موقعیت واقعی جسم حاصل شود، آنگاه N بهینه به دست می‌آید. به این ترتیب با منظور نمودن مقادیر ۱ تا ۶ برای پارامتر μ و تعیین تعداد هارمونیک‌هایی که براساس آن‌ها محل منحنی‌های بیشینه با موقعیت جسم آنومال (استوانه افقی) انطباق داشت انتخاب گردید. شکل (۴-۱۰) مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی مربوط به این مدل را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۴-۱۰) مقادیر N در هر یک از آن‌ها طوری انتخاب شده که در همه مقاطع محل بیشینه NFG موقعیت استوانه را نشان می‌دهد. در شکل (۴-۱۱) مقادیر عددی N بهینه‌ای که برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال هر یک از مقاطع شکل (۴-۱۰) استفاده شده، به رنگ آبی و با نشانه مربعی دیده می‌شود. به جزء مورد اول یعنی $N=10$ سایر موارد تقریباً در راستای یک خط می‌باشند.

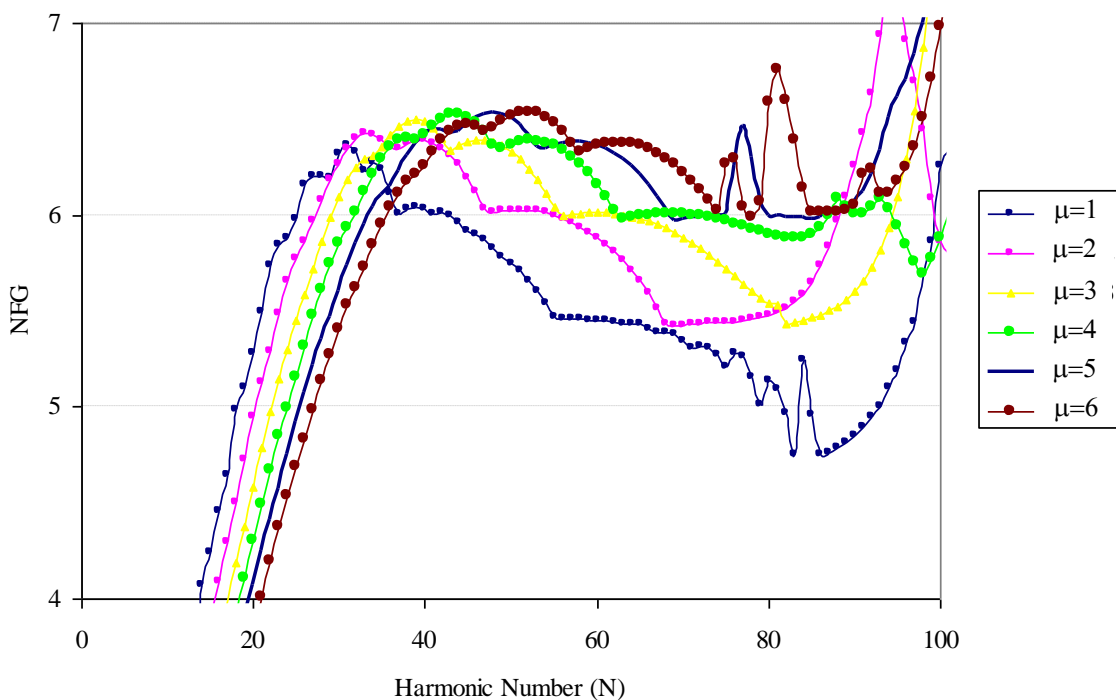
بنابراین می‌توان گفت که تغییرات N نسبت به پارامتر μ (به ازای $\mu \geq 2$) به صورت خطی صعودی است. اما همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، برای اکتشاف و شناسایی منابع آنومال چون عمق قرارگیری مشخص نیست بنابراین نمی‌توان به صورت سعی و خطا مقادیر N را تعیین نمود. بدین منظور براساس روش ارائه شده نمودار تغییرات NFG نسبت به تعداد جملات هارمونیک رسم گردید و بر مبنای مقادیر بیشینه نسبی اولیه تعداد جملات هارمونیک بهینه تعیین گردید (شکل ۴-۱۲).



شکل ۴-۱۰: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی از یک مدل استوانه افقی مدفون در عمق ۲ کیلومتری با مقدار توان تابع هموارساز متفاوت (الف) $(\mu=1, N=10)$ (ب) $(\mu=2, N=32)$ (ج) $(\mu=3, N=38)$ (د) $(\mu=4, N=44)$ (ه) $(\mu=5, N=48)$ (و) $(\mu=6, N=52)$



شکل ۴-۱۱: نمودار تغییرات تعداد جملات هارمونیک (N) نسبت به توان تابع هموارساز (μ) در دو روش سعی و خطا و روش بیشینه نسبی



شکل ۴-۱۲: نمودار تغییرات مقادیر گرادیان کل نرمال (NFG) نسبت به تعداد جملات هارمونیک (N) در روش بیشینه نسبی با منظور نمودن مقادیر مختلف برای توان تابع هموارساز

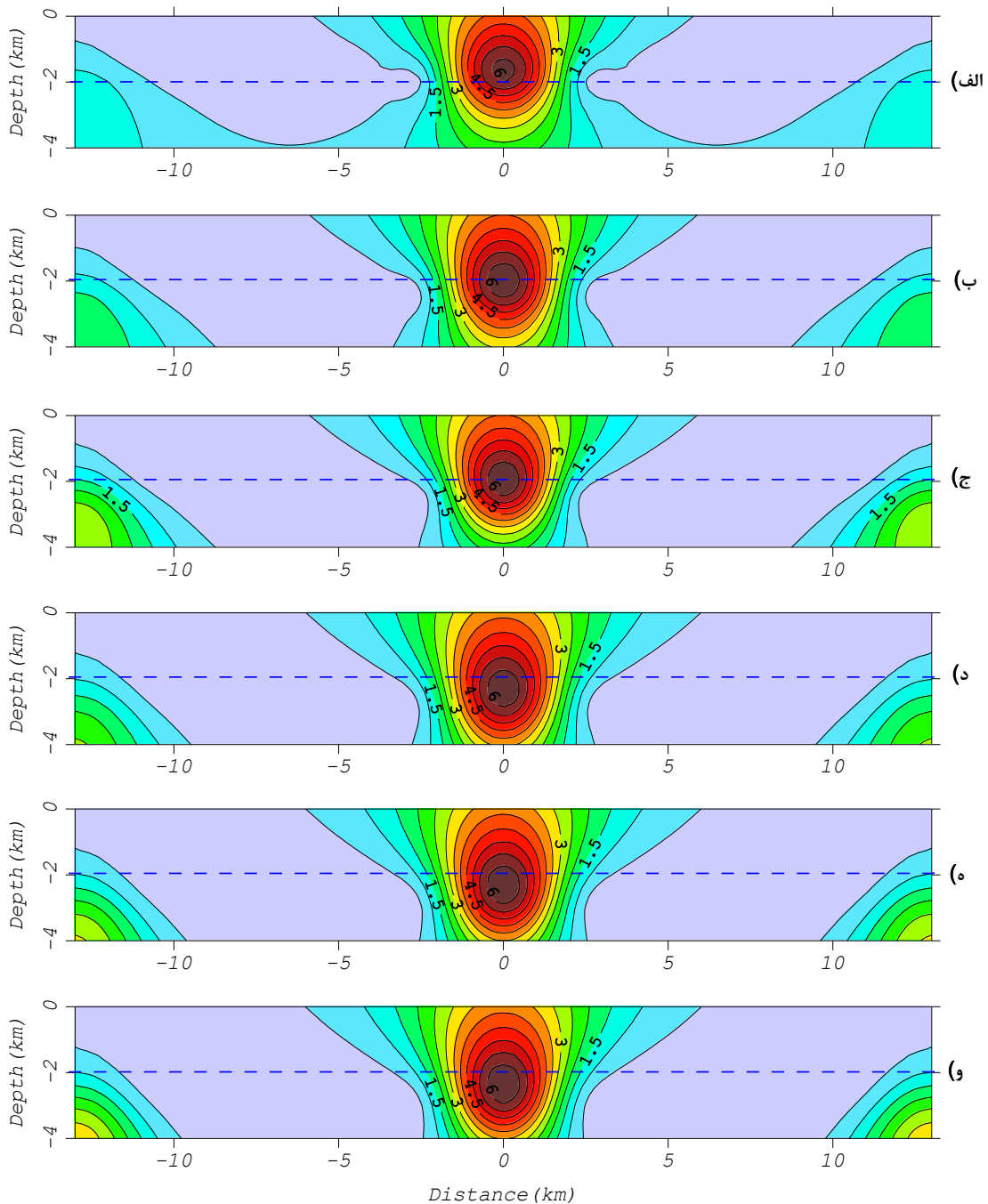
مطابق شکل (۴-۱۲)، با افزایش مقدار توان تابع هموارساز، مقادیر اولین بیشینه نسبی NFG به ازای N بیشتر دیده می‌شود. با توجه به این شکل تعداد هارمونیک‌های بهینه مربوط به دو بیشینه

نسبی متوالی تحت عنوان N_1 و N_2 تعیین گردید که نمودار تغییرات آنها نسبت به پارامتر μ به ترتیب با رنگ‌های صورتی (با نشانه دایره) و قرمز (با نشانه مثلث) در شکل (۴-۱۱) رسم شده‌اند. با مقایسه این دو نمودار (منحنی قرمز و صورتی) با نمودار قبلی (آبی) که براساس روش سعی و خطا تعیین شده، ملاحظه می‌شود که به ازای $\mu \geq 4$ ، دو نمودار روش سعی و خطا و دومین بیشینه نسبی برهم منطبق می‌شوند (شکل ۴-۱۱). اما در بخش‌های پایین‌تر یعنی مقادیر ۲ و $\mu=3$ نمودار بیشینه اول با نمودار حاصل از سعی و خطا انطباق دارند. با توجه به تعداد جملات هارمونیک (N) به دست آمده از روش بیشینه نسبی، گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی محاسبه و مقاطع آنها رسم گردید (شکل ۴-۱۳).

مطابق شکل (۴-۱۱) می‌توان گفت دو مقدار ۲ و ۳ برای پارامتر μ بایستی مناسب باشند و با مشاهده مقاطع رسم شده، زمانی که مقدار ۲ یا ۳ برای توان جمله هموارساز منظور شود، محل NFG بیشینه مطابقت بیشتری با موقعیت جسم آنومال دارد (شکل ۴-۱۳-ب و ج). بنابراین مقدار بهینه برای پارامتر μ از ۲ تا ۳ تغییر می‌کند. لذا در کلیه محاسبات مربوط به گرادیان کل نرمال داده‌های مصنوعی و واقعی در این رساله عدد ۲ برای توان تابع هموارساز لانکزوس منظور شده است.

۴-۶- تاثیر مقدار اختلاف چگالی جسم آنومال روی گرادیان کل نرمال و N

روش گرانی سنجی که برای اکتشاف برخی کانی‌های معدنی و نیز اکتشاف منابع هیدروکربوری استفاده می‌شود، براساس اختلاف چگالی (دانسیته) جسم آنومال نسبت به سنگ‌های اطراف آن طراحی شده است. بنابراین در اینجا این پرسش مطرح می‌شود که صرف نظر از علامت تغییر چگالی کاهشی یا افزایشی ناشی از توده‌های زیر سطحی، آیا مقدار بزرگی اختلاف چگالی بین توده آنومال و سنگ‌های میزبان نیز روی تعداد جملات مورد استفاده سری فوریه و به تبع آن روی مقدار گرادیان کل نرمال تاثیر دارد یا خیر؟

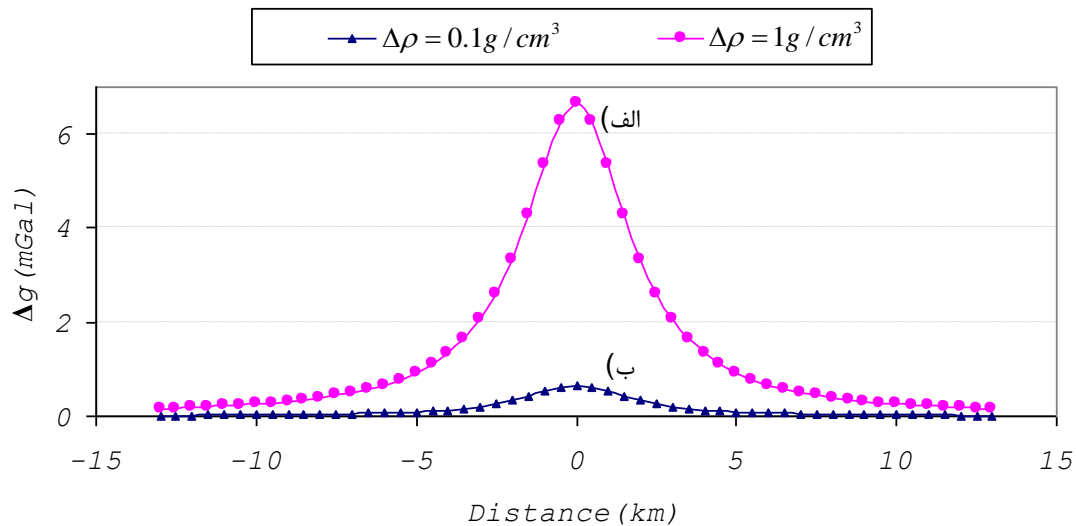


شکل ۴-۱۳: گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی از یک مدل استوانه افقی مدفون در عمق ۲ کیلومتری با مقدار توان تابع هموارساز متفاوت الف) ($N=28, \mu=1$) ب) ($N=33, \mu=2$) ج) ($N=39, \mu=3$) د) ($N=38, \mu=4$) ه) ($N=42, \mu=5$) و) ($N=45, \mu=6$) به روش بیشینه نسبی

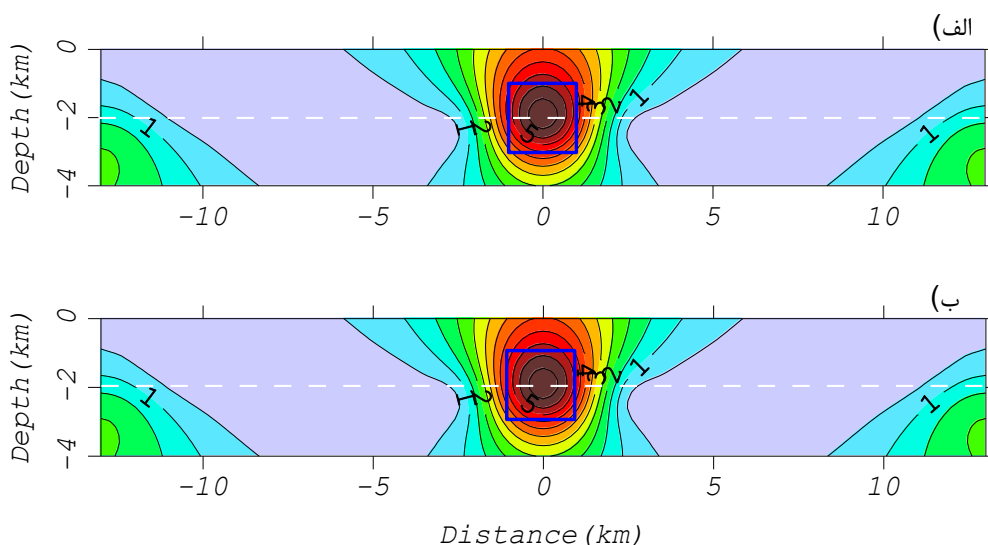
برای پاسخ به این پرسش جسمی آنومال دو بعدی شکل با سطح مقطع مربعی که تداعی کننده کانال‌ها یا ساختارهای قدیمی مدفون و ... باشد، بررسی می‌شود. مرکز هندسی و ثقل این جسم در عمق ۲ کیلومتری و اثر گرانی آن روی یک پروفیل به طور ۲۶ کیلومتر و به فواصل ۵۰۰ متری

محاسبه شده است. ابعاد این مربع 1×1 کیلومتر بوده و اختلاف چگالی آن در دو حالت 0.1 و 1 گرم بر سانتی متر مکعب منظور شده است. به عبارتی دیگر اثر گرانی یک توده آنومال با دو مقدار چگالی متفاوت محاسبه شد و نمودار آن در شکل (۴-۱۴) ارائه شده است. مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی ناشی از این توده با تعیین تعداد جملات هارمونیک بهینه ($N=33$) محاسبه و مقاطع گرادیان کل نرمال رسم گردید (شکل ۴-۱۵).

مطابق شکل (۴-۱۵) منحنی‌های بیشینه مربوط به مقادیر NFG به خوبی محل قرارگیری جسم آنومال را نشان می‌دهد و مقدار بزرگی چگالی هیچ گونه تاثیری در تعداد جملات هارمونیک و مقدار گرادیان کل نرمال ندارد. بنابراین می‌توان گفت که اگر بتوان اثر گرانی ناچیز ناشی از اختلاف چگالی خیلی کم یک جسم آنومال نسبت به محیط اطرافش را اندازه گرفت در آن صورت، اثر جسم مورد نظر روی مقاطع گرادیان کل نرمال به آسانی قابل آشکارسازی است.



شکل ۴-۱۴: آنومالی گرانی ناشی از یک جسم دو بعدی با سطح مقطع مربعی در عمق ۲ کیلومتری و سطح مقطع یک کیلومتر مربع، الف) $\Delta\rho=1/0$ و ب) $\Delta\rho=0/1$ گرم بر سانتی متر مکعب



شکل ۴-۱۵: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی ناشی از یک جسم دو بعدی با سطح مقطع مربعی در عمق ۲ کیلومتری و سطح مقطع یک کیلومتر مربع، الف) $\Delta\rho=1/0$ و ب) $\Delta\rho=0/1$ گرم بر سانتی متر مکعب و تعداد جملات هارمونیک $N=33$

۴-۷- تاثیر فواصل نقاط اندازه گیری روی مقدار N و گرادیان کل نرمال

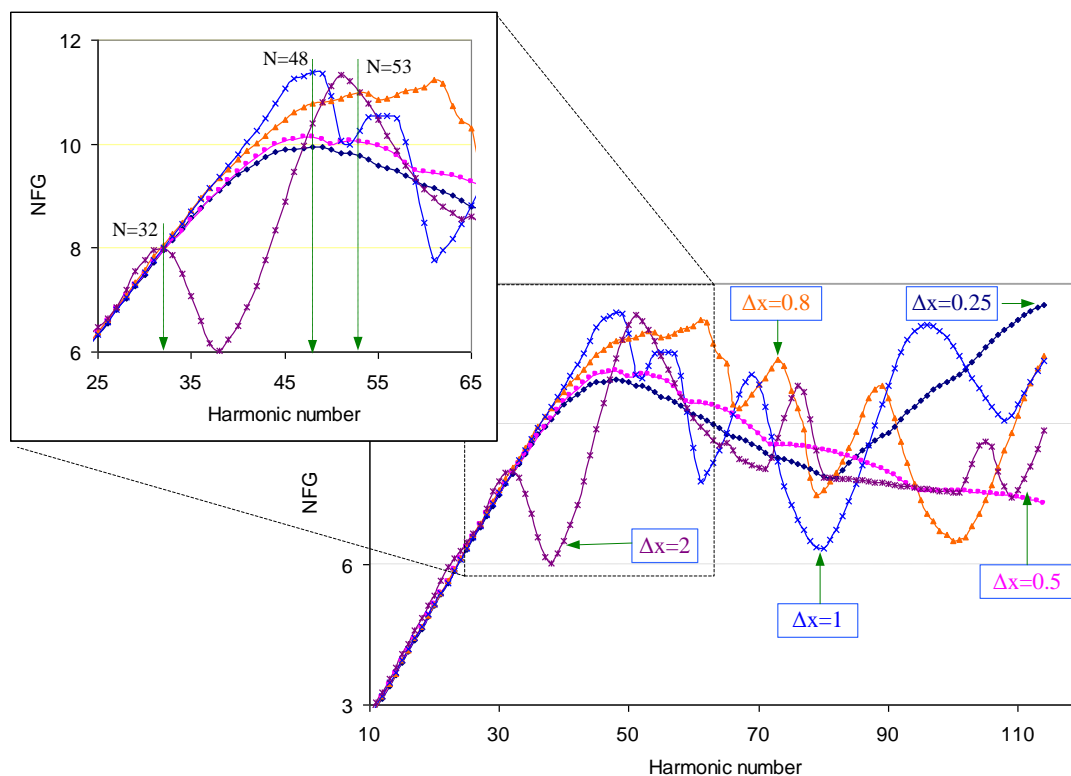
تعیین ابعاد بهینه شبکه اکتشاف یا تعیین فاصله بین نقاط اندازه گیری روی هر پروفیل نقشه مهم در طراحی شبکه اکتشافی گرانی سنجی ایفا می کند. به منظور بررسی اثر فاصله نقاط روی تعداد جملات هارمونیک و به تبع آن روی مقدار گرادیان کل نرمال، یک مدل کروی مدفون در عمق سه کیلومتری در نظر گرفته شد. اثر گرانی این مدل کروی با لحاظ نمودن معادله زیر به وسیله یک کد ساده و بر روی پروفیلی به طول ۴۰ کیلومتر و فاصله نقاط ۲۵۰ متر، ۵۰۰ متر، ۸۰۰ متر، یک کیلومتر و دو کیلومتر به طور جداگانه محاسبه گردید.

$$\Delta g = 2\pi G\rho R^2 \frac{z}{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4-8)$$

در حل مساله شعاع کره $R=500$ متر، $\Delta\rho$ اختلاف چگالی کره با محیط اطراف برابر با $0/52$ گرم بر سانتی متر مکعب لحاظ شد.

سپس به منظور تهیه مقاطع گرادیان کل نرمال روی پروفیل مورد نظر، مقادیر گرادیان کل نرمال برای تعداد زیادی N محاسبه گردید و نمودار تغییرات NFG نسبت به N برای هر یک از مقادیر فاصله

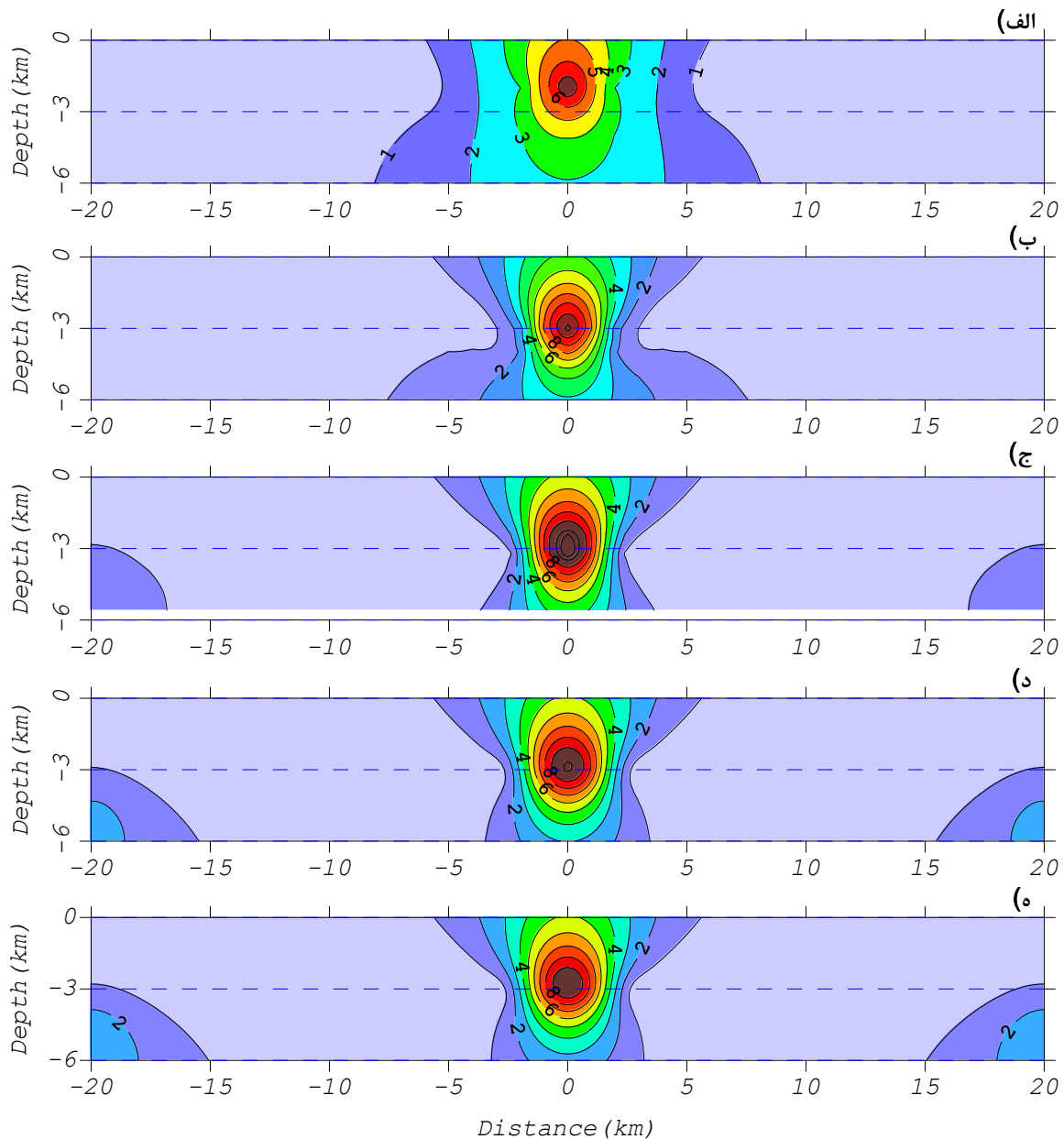
نقاط اندازه‌گیری (Δx) رسم گردید (شکل ۴-۱۶). مطابق شکل مقادیر عددی دو بیشینه متوالی جهت مقایسه نتایج برای تعداد جملات هارمونیک بهینه برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال انتخاب گردید.



شکل ۴-۱۶: نمودار تغییرات گرادیان کل نرمال (NFG) نسبت به تعداد جملات هارمونیک (N) برای یک کره مدفون در عمق ۳ کیلومتری به ازای فواصل مختلف نقاط اندازه‌گیری (Δx) داده‌های گرانی روی پروفیل

حال به منظور بررسی این که کدامیک از مقادیر برای فاصله بین نقاط اندازه‌گیری مناسب است، مقادیر گرادیان کل نرمال را برای کلیه حالات ذکر شده محاسبه و سپس مقاطع آن‌ها رسم گردید (شکل ۴-۱۷). با مقایسه نتایج به دست آمده، بر خلاف مورد انتظار می‌توان گفت که فاصله بین نقاط اندازه‌گیری نبایستی خیلی کم باشد زیرا در این صورت بسته به اندازه ابعاد جسم آنومال نتیجه حاصل مناسب نخواهد بود (شکل ۴-۱۷-الف). از طرفی دیگر فاصله بین نقاط اندازه‌گیری را برای کاهش هزینه نباید بیش از مقدار مجاز نیز در نظر گرفت زیرا در این حالت نیز جواب به دست آمده مناسب نمی‌باشد (شکل ۴-۱۷-ه).

با ملاحظه شکل (۴-۱۷-ب، ج، د) می‌توان گفت که فاصله بین نقاط اندازه‌گیری بایستی حدوداً مساوی نصف و یا حداکثر مساوی عرض جسم مدفون در راستای پروفیل باشد تا جواب مناسب حاصل آید. بنابراین به این شیوه حتی توده‌های مدفون خیلی کوچک و نازک را می‌توان آشکار کرد، در صورتی که بتوان مقدار اثر گرانی آن را اندازه‌گیری نمود.



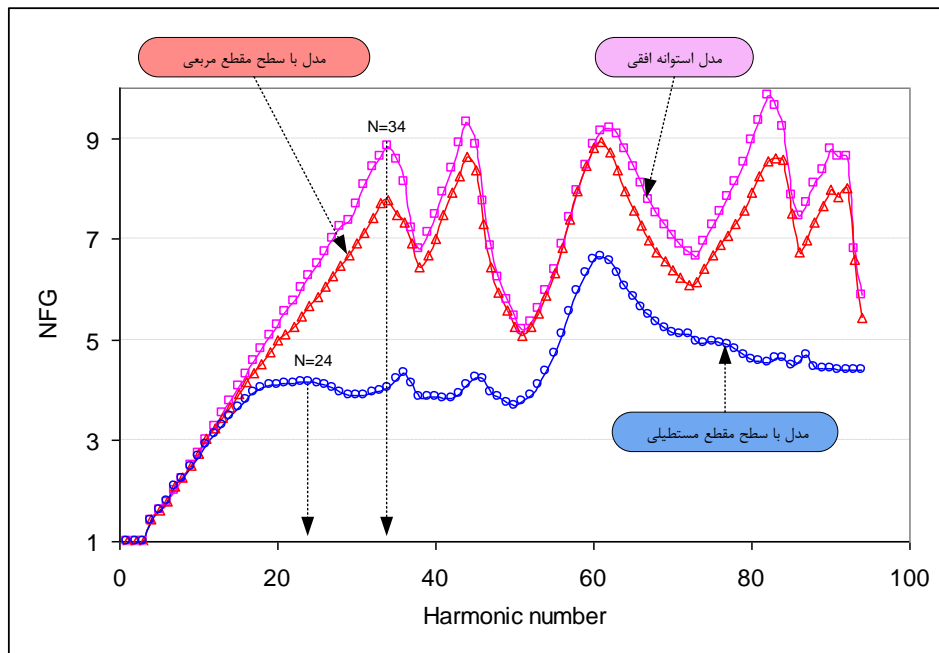
شکل ۴-۱۷: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی از یک مدل کروی مدفون در عمق سه کیلومتری با فاصله بین نقاط اندازه‌گیری متفاوت روی پروفیل الف) ($N=48, \Delta x=0.25$ ب) ($N=48, \Delta x=0.15$ ج) ($N=53, \Delta x=0.18$ د) ($N=48, \Delta x=1$ ه) $\Delta x=2$ کیلومتر، $N=32$

۴-۸- تاثیر شکل جسم آنومال روی مقدار N و گرادیان کل نرمال

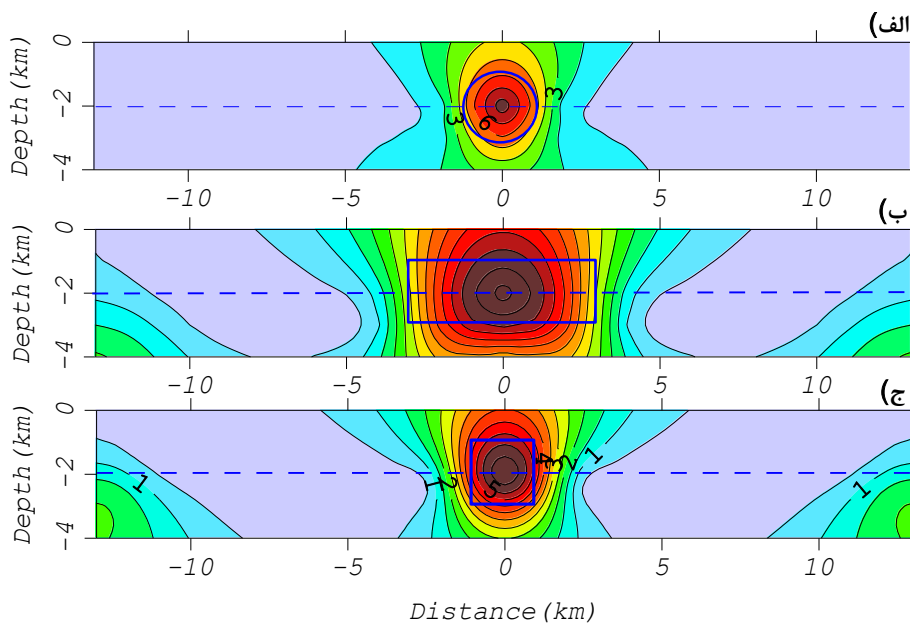
به منظور بررسی تاثیر شکل یک جسم آنومال روی تعداد جملات هارمونیک و گرادیان کل نرمال، سه مدل دو بعدی با سطح مقطع دایره‌ای (استوانه افقی)، مربعی و مستطیلی انتخاب گردید. برای مقایسه بهتر، عمق مرکزی یا مرکز ثقل برای همه مدل‌ها ۲ کیلومتر فرض شد. گسترش عرضی و عمقی مدل‌های با سطح مقطع مربعی و استوانه افقی یکسان در نظر گرفته شد ولی گسترش طولی مدل مستطیلی سه برابر گسترش عمقی آن انتخاب گردید. اثر گرانی این سه مدل به طور جداگانه روی پروفیلی به طول ۲۶ کیلومتر با استفاده از برنامه کامپیوتری تهیه شده محاسبه گردید. در این محاسبه فاصله نقاط محاسبه‌ای برای مدل‌های استوانه‌ای، مربعی و مستطیلی به ترتیب ۵۰۰، ۵۰۰ متر و یک کیلومتر منظور شد. شرایط ذکر شده در این بخش برای مدل‌های تاقدیسی و گنبد نمکی که در بخش‌های بعدی بحث می‌شود نیز صادق است.

به منظور تعیین تعداد هارمونیک بهینه، مقادیر گرادیان کل نرمال برای تعداد زیادی از هارمونیک-ها محاسبه گردید و سپس نمودار تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نسبت به تعداد جملات هارمونیک متناظر آن‌ها رسم شد (شکل ۴-۱۸). مطابق شکل، نمودار تغییرات NFG دو مدل استوانه افقی و مربعی شکل روند مشابهی داشته و فقط به لحاظ مقدار گرادیان کل نرمال مدل استوانه افقی عمدتاً مقادیر بالاتری دارد.

تعداد جملات هارمونیک بهینه سری فوریه برای محاسبه گرادیان کل نرمال در دو مدل با سطح مقطع دایره‌ای و مربعی عدد ۳۴ است. این بدان معنی است که تغییرات مقادیر NFG بر حسب N برای مدل‌هایی که دارای عمق مرکزی و ابعاد یکسان (در سطح مقطع) باشند روند مشابهی دارند (شکل ۴-۱۹-الف، ج). به عبارت دیگر با تعداد جملات بهینه یکسان می‌توان وضعیت قرارگیری و عمق صحیح این اجسام را در مقطع دو بعدی NFG به دست آورد. زمانی که سطح مقطع مدل دارای گسترش عرضی بیشتر است، مقادیر گرادیان کل نرمال و تعداد جملات بهینه کاملاً با دو حالت قبل متفاوت است و مقادیر کمتری ($N=24$) را نشان می‌دهد (شکل‌های ۴-۱۸ و ۴-۱۹-ب).



شکل ۴-۱۸: نمودار تغییرات مقادیر گرادیان کل نرمال بیشینه نسبت به تعداد جملات هارمونیک برای سه مدل دو بعدی با سطح مقطع دایره ای (مدل استوانه افقی)، مربعی و مستطیلی



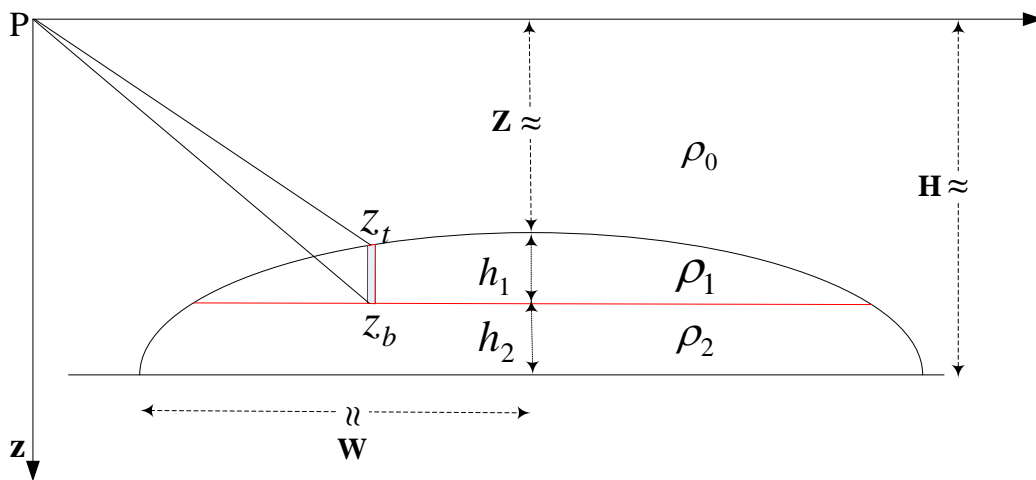
شکل ۴-۱۹: مقاطع گرادیان کل نرمال برای سه مدل الف) استوانه افقی $N=34$ ،

ب) مدل با سطح مقطع مستطیلی $N=24$ ، ج) با سطح مقطع مربعی $N=34$

حال که با ویژگی‌ها و عوامل موثر روی مقادیر گرادیان کل نرمال آشنا شدیم، در ادامه با لحاظ نمودن این موارد به بررسی ویژگی‌های مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی ناشی از تله‌های نفتی تاقدیسی و گنبد نمکی پرداخته می‌شود.

۹-۴ - مدل تاقدیس

به منظور بررسی ویژگی‌های گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی ناشی از مخازن هیدروکربوری، ابتدا لازم است که اثر گرانی مربوط به آن‌ها محاسبه گردد. با توجه به اشکال پیچیده مخازن، محاسبه مقادیر اثر گرانی آنها مشکل می‌باشد. بنابراین برای مدل‌سازی ساختارهای تاقدیسی دو بعدی حاوی مواد هیدروکربوری و یا فاقد آن، بخشی از یک نیم دایره یا نیم بیضی (شکل ۴-۲۰) در نظر گرفته می‌شود. با منظور نمودن وضعیت واقعی مخازن، پارامترهای مورد استفاده در شکل مذکور در جدول (۴-۲) ارائه شده است. در این مدل‌سازی طول پروفیل اندازه‌گیری اثر گرانی ناشی از تاقدیس ۳۰ کیلومتر و فاصله نقاط اندازه‌گیری ۵۰۰ متر لحاظ شده است.



شکل ۴-۲۰: مدل‌سازی یک تاقدیس بدون اشباع از هیدروکربور و اشباع از هیدروکربور

جدول ۴-۲: پارامترهای مورد استفاده در مدل تاقدیسی

مشخصات تاقدیس	تاقدیس فاقد هیدروکربور	تاقدیس حاوی هیدروکربور
نصف عرض کف تاقدیس W	۲ کیلومتر	۲ کیلومتر
عمق کف تاقدیس H	۲ کیلومتر	۲ کیلومتر
ضخامت بخش بالایی تاقدیس h ₁	۱۰۰ متر	۱۰۰ متر
ضخامت بخش بالایی تاقدیس h ₂	۱۰۰ متر	۱۰۰ متر
اختلاف چگالی Δρ ₁ = ρ ₁ - ρ ₀	۰/۱ gr/cm ³	-۰/۱ gr/cm ³
اختلاف چگالی Δρ ₂ = ρ ₂ - ρ ₀	۰/۱ gr/cm ³	۰/۱ gr/cm ³

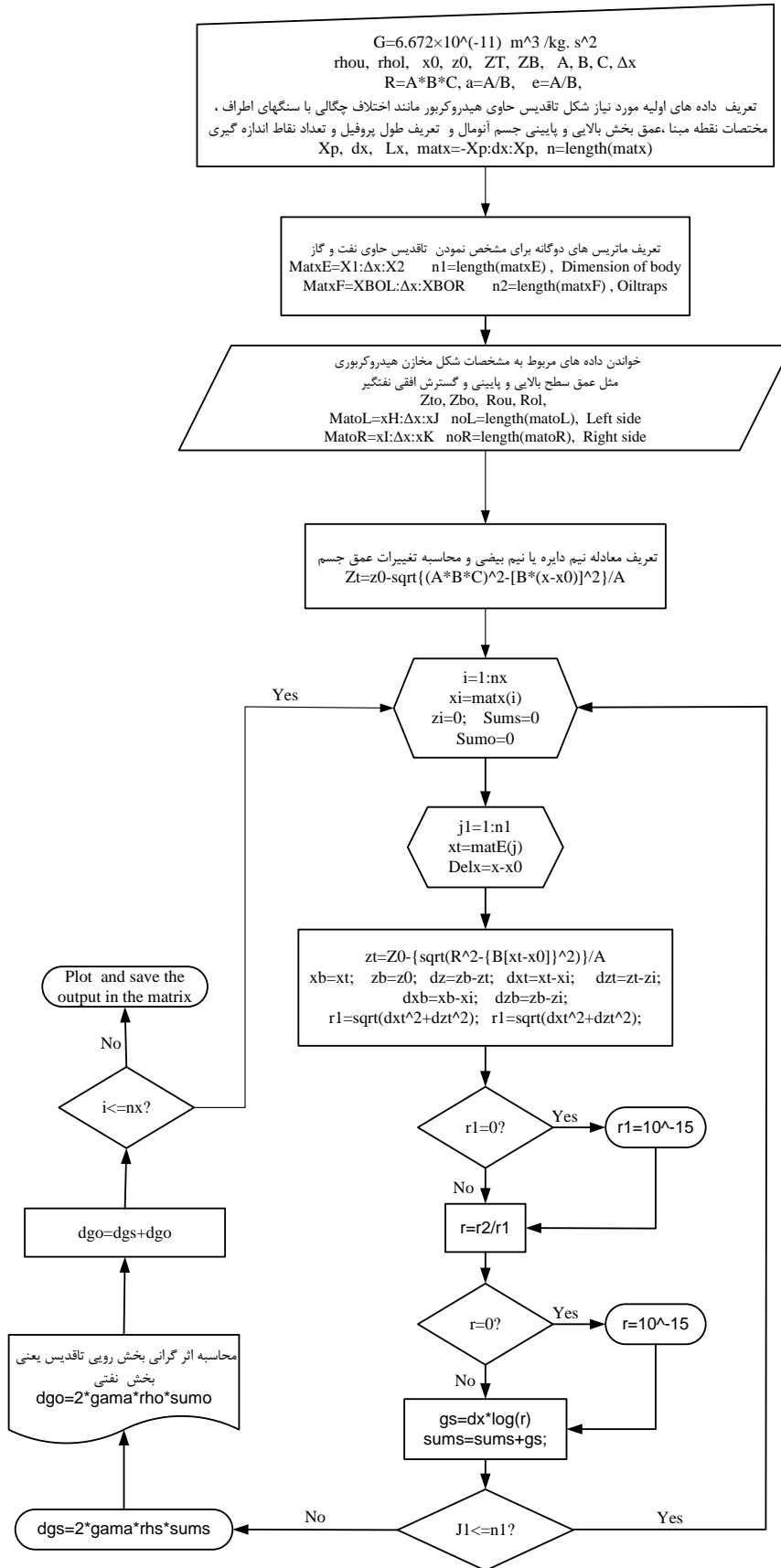
۴-۹-۱- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی یک تله تاقدیسی فاقد هیدروکربور

مطابق شکل (۴-۲۰) با برابر قرار دادن اختلاف چگالی دو بخش بالایی و پایینی تاقدیس $(\Delta\rho_2=\Delta\rho_1)$ ، حالتی بررسی می‌شود که تاقدیس فاقد مواد هیدروکربوری باشد. برای محاسبه اثر گرانی ناشی از این تاقدیس، مقادیر پارامترهای لازم از ستون دوم جدول (۴-۲) انتخاب شدند. با تهیه الگوریتم (شکل ۴-۲۱) و برنامه کامپیوتری مورد نیاز براساس روش تیغه‌های نازک قائم که در فصل سوم شرح آن گذشت، اثر گرانی تاقدیس محاسبه گردید (شکل ۴-۲۲-الف).

مقدار گرادیان کل نرمال آن با در نظر گرفتن مقادیر ۲۵، ۳۰، ۳۶، ۴۰ و ۴۵ برای تعداد جملات هارمونیک (N)، محاسبه شد (شکل ۴-۲۲-ب تا و). مطابق این شکل، موقعیت و محل تاقدیس در مقطع گرادیان کل نرمال به وسیله یک مقدار بیشینه آن مشخص شده است، که با تغییر مقدار N، موقعیت عمقی آن تغییر می‌نماید. بنابراین با افزایش تعداد جملات مورد استفاده در محاسبه گرادیان کل نرمال این موقعیت به سطح نزدیک می‌شود. تا زمانی که مقدار N از ۳۰ بیشتر نشده است منحنی‌های بسته بیشینه پایین‌تر از عمق ۲ کیلومتری یعنی کف تاقدیس قرار دارند. زمانی که تعداد جملات سری فوریه ۳۶ منظور شود، مقدار بیشینه NFG مرز زیرین تاقدیس را نشان می‌دهد (شکل ۴-۲۲-د).

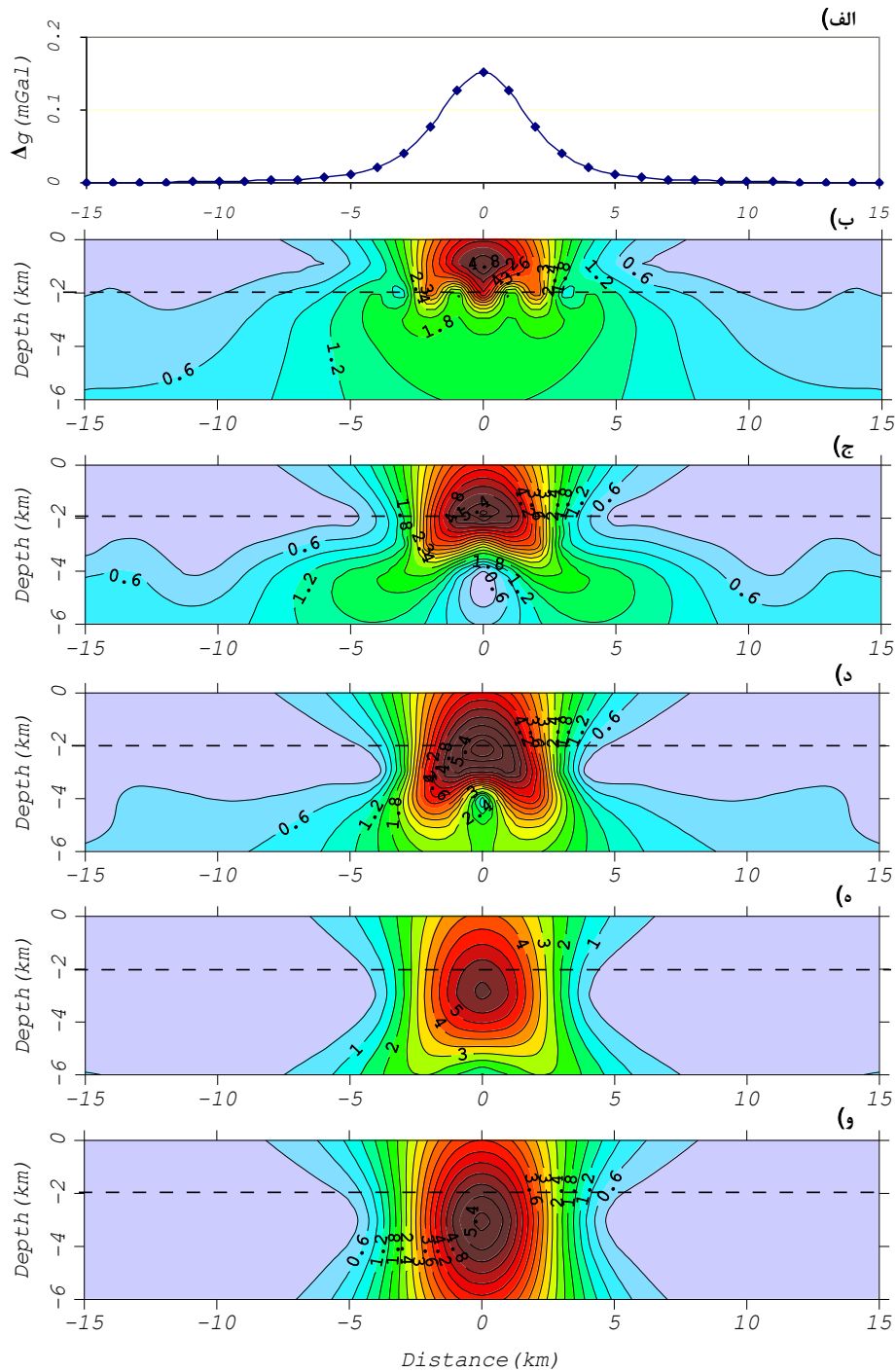
وقتی که تعداد جملات سری هارمونیک بیشتر از ۳۰ گردد، موقعیت منحنی‌های بیشینه به طرف عمق کم حرکت نموده و به تدریج مقدار کمینه حذف شده و همچنین نوساناتی با فرکانس بالا در اطراف محل قرارگیری تاقدیس در مقطع NFG ظاهر شده و عمق تاقدیس کمتر از ۲ کیلومتر دیده می‌شود. بنابراین تعداد جملات بهینه برای محاسبه مقدار NFG در مدل با پارامترهای مذکور، دومین بیشینه نسبی یعنی عدد ۳۶ در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴-۲۳).

همان گونه که قبلاً توضیح داده شد برای تعیین تعداد بهینه جملات هارمونیک برای محاسبه مقادیر NFG، مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال به ازای تعداد زیادی از جملات سری فوریه به دست آمده و نمودار تغییرات NFG نسبت به مقادیر N رسم گردید.

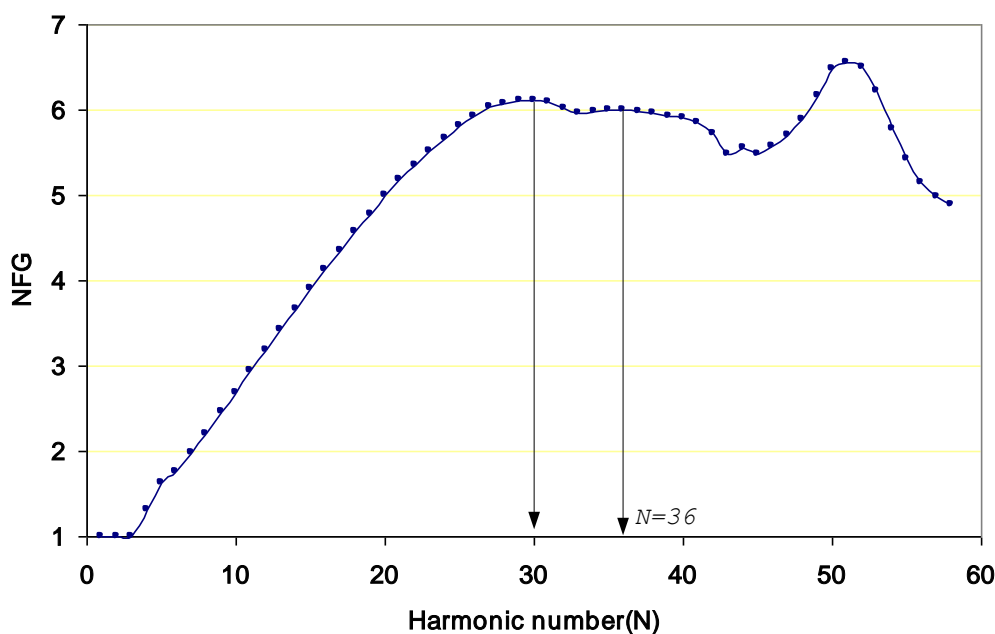


شکل ۴-۲۱: فلوچارت محاسبه اثر گرانی مدل تاقدیس دو بعدی حاوی یا فاقد مواد هیدروکربور

مطابق شکل (۴-۲۳) اولین مقدار بیشینه مقادیر گرادیان کل نرمال در $N=30$ دیده شده است. قبل از عدد ۳۰، تغییرات نمودار تقریباً خطی بوده و بیانگر عمق‌های بیشتر می‌باشد. بنابراین برای مدل تاقدیسی می‌توان گفت که مقدار عدد بهینه برای تعداد جملات هارمونیک دومین بیشینه یعنی عدد ۳۶ می‌باشد.



شکل ۴-۲۲: الف) آنومالی گرانی یک تاقدیس دو بعدی فاقد مواد هیدروکربور (شکل ۴-۲۰) و مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی با تعداد جملات هارمونیک مختلف ب) ($N=45$ ، ج) ($N=40$ ، د) ($N=36$ ، ه) ($N=30$ ، و) ($N=25$).

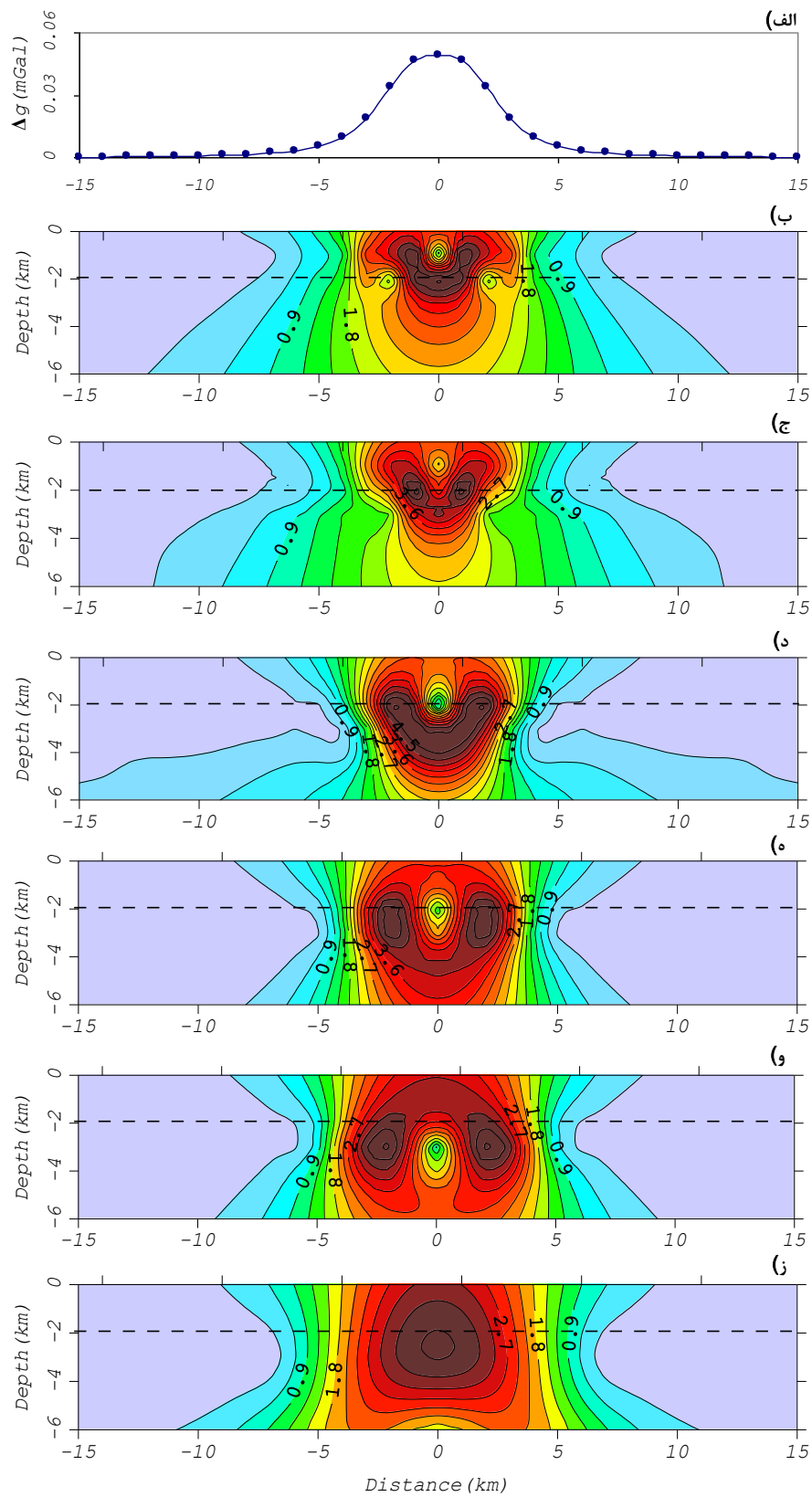


شکل ۴-۲۳: تغییرات گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی (شکل ۴-۲۲) نسبت به تعداد هارمونیک

۴-۹-۲- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی تله تاقدیسی حاوی مواد هیدروکربوری

با فرض متفاوت بودن مقادیر اختلاف چگالی در دو بخش بالایی و زیرین تاقدیس ($\Delta\rho_2 \neq \Delta\rho_1$) نسبت به اطراف، مقدار NFG آنومالی‌های گرانی از یک تاقدیس با چگالی ناهمگن قابل محاسبه می‌باشد. پارامترهای مربوط به این گونه تاقدیس در ستون سوم جدول (۴-۲) تعریف شده‌اند. مقدار آنومالی‌های گرانی ناشی از این تاقدیس نیز با استفاده از برنامه تهیه شده در حالت قبل محاسبه شده و مقاطع گرادیان کل نرمال آن با تعداد هارمونیک‌های (N) ۱۸، ۲۵، ۳۰، ۳۶، ۴۰ و ۴۵ به دست آمد (شکل ۴-۲۴).

مطابق شکل (۴-۲۴)، ملاحظه می‌شود که وضعیت منحنی‌های بیشینه و تغییرات مقادیر NFG نسبت به تغییر N کاملاً متفاوت با حالتی است که هیچگونه هیدروکربوری در بخش بالایی تاقدیس وجود ندارد و به اصطلاح تاقدیس همگن می‌باشد. به این ترتیب زمانی که تعداد جملات هامورنیک کمتر از ۲۰ ($N=18$) منظور می‌شود، منحنی‌های بسته مقادیر گرادیان کل نرمال با یک بیشینه در عمقی کمتر از ۲ کیلومتری در مقطع NFG دیده می‌شود.



شکل ۴-۲۴: الف) آنومالی گرانی یک تاقدیس دو بعدی اشباع از مواد هیدروکربور و مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی با تعداد جملات هارمونیک مختلف (ب) $N=45$ ، (ج) $N=40$ ، (د) $N=34$ ، (ه) $N=30$ ، (و) $N=25$ ، (ز) $N=18$

ولی با افزایش تعداد جملات هارمونیک محدوده کمینه‌ای در بین دو محدوده بیشینه ظاهر می‌شود و با افزایش N موقعیت آن‌ها تغییر می‌یابد. زمانی که مقدار N برابر ۳۴ می‌شود، مقادیر کمینه محدود بین دو بیشینه گرادیان کل نرمال انطباق مناسبی با محل قرارگیری تاقدیس دارد که به نوعی تاییدی بر بررسی‌های قبلی در این زمینه می‌باشد [Berezkin, 1973; Zeng et al, 2002; Aydin, 2007]. به این ترتیب عدد بهینه برای محاسبات گرادیان کل نرمال عدد ۳۴ منظور می‌شود (شکل ۴-۲۴). مطابق شکل، وضعیت منحنی‌های بسته بیشینه و کمینه روی مقاطع NFG برای حالتی که تاقدیس به عنوان یک تله هیدروکربوری مطرح می‌شود قابل توجه می‌باشد. به عبارتی دیگر این حالت ویژگی اصلی و بارز مقاطع گرادیان کل نرمال برای تفکیک و شناسایی تاقدیس‌های حاوی منابع هیدروکربوری نسبت به گروه‌های بدون هیدروکربور می‌باشد.

۴-۹-۳- بررسی دو تاقدیس با و بدون حضور هیدروکربور روی یک مقطع NFG

همان گونه که اشاره شد، تفاوت مقادیر NFG بین یک تاقدیس اشباع از نفت و گاز و یک تاقدیس بدون مواد هیدروکربوری به صورت مقدار کمینه از NFG است که توسط مقادیر بیشینه‌ای از آن احاطه شده است (شکل‌های ۴-۲۲ و ۴-۲۴). بنابراین یک یا تعدادی محدوده کمینه روی یک مقطع عرضی، راهنمای خوبی برای بررسی وضعیت یک نفتگیر می‌باشد.

علاوه بر این، به منظور بررسی بیشتر موضوع و مقایسه بهتر دو تاقدیس خشک یا حاوی نفت و گاز، مدلی تهیه گردید (شکل ۴-۲۵-ب) که در آن دو تاقدیس در کنار هم و در امتداد یک پروفیل واقع باشند. مشخصات این مدل در جدول (۴-۳) ارائه شده است [Aghajani et al, 2009c].

مطابق (شکل ۴-۲۵-الف) اثر گرانی محاسبه شده ناشی از این تاقدیس‌ها به لحاظ شکل ظاهری تا حدودی مشابه هم می‌باشند، بنابراین بیان اینکه در کدام یک از دو تاقدیس می‌تواند نفت یا گاز باشد با این نمودار امکان پذیر نیست. برای تعیین تعداد جملات هارمونیک مورد نیاز برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال، نمودار تغییرات NFG نسبت به N رسم گردید (شکل ۴-۲۶) و به ازای N های اعداد

مختلف ۲۵، ۲۹، ۳۵ و ۴۵ مقادیر گرادیان کل نرمال محاسبه و مقاطع دو بعدی NFG از این پروفیل برای چهار حالت مذکور رسم گردید (شکل ۴-۲۵).

جدول ۴-۳: پارامترهای مورد استفاده در مدل تاقدیسی (شکل ۴-۲۵-ب)

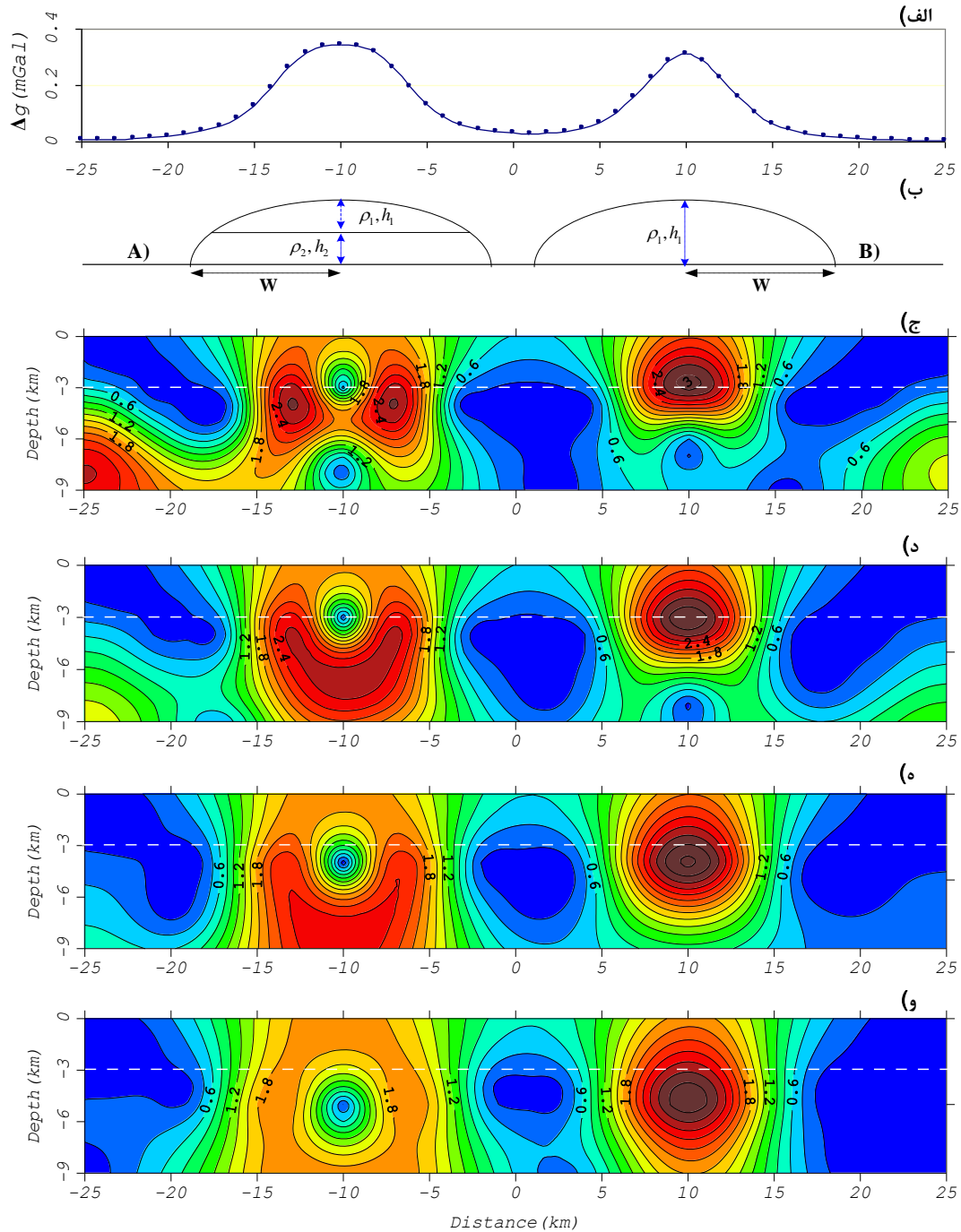
مشخصات تاقدیس	تاقدیس فاقد هیدروکربور	تاقدیس حاوی هیدروکربور
نصف عرض کف تاقدیس W	۳ کیلومتر	۳ کیلومتر
عمق کف تاقدیس H	۳ کیلومتر	۳ کیلومتر
ضخامت بخش بالایی h ₁	۲۰۰ متر	۲۰۰ متر
ضخامت بخش بالایی h ₂	۲۰۰ متر	۲۰۰ متر
اختلاف چگالی $\Delta\rho_1 = \rho_1 - \rho_0$	۰/۱ gr/cm ³	-۰/۱ gr/cm ³
اختلاف چگالی $\Delta\rho_2 = \rho_2 - \rho_0$	۰/۱ gr/cm ³	۰/۱ gr/cm ³

مطابق شکل (۴-۲۶) مقادیر عددی ۲۹ و ۳۵ به ترتیب اولین و دومین بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال می‌باشند. همان طوری که دیده می‌شود با افزایش تعداد جملات هارمونیک، موقعیت افقی تاقدیس هیدروکربوری توسط منحنی‌های کمینه محصور بین بیشینه‌ها به وضوح مشخص است. در حالی که برای تاقدیس غیر هیدروکربوری چنین حالتی وجود ندارد. زمانی که تعداد جملات عدد ۳۵ انتخاب شود موقعیت عمقی تاقدیس‌ها عمق سه کیلومتری را نشان می‌دهد. به این ترتیب می‌توان مشخصات افقی و عمقی تاقدیس‌ها را مشخص نمود.

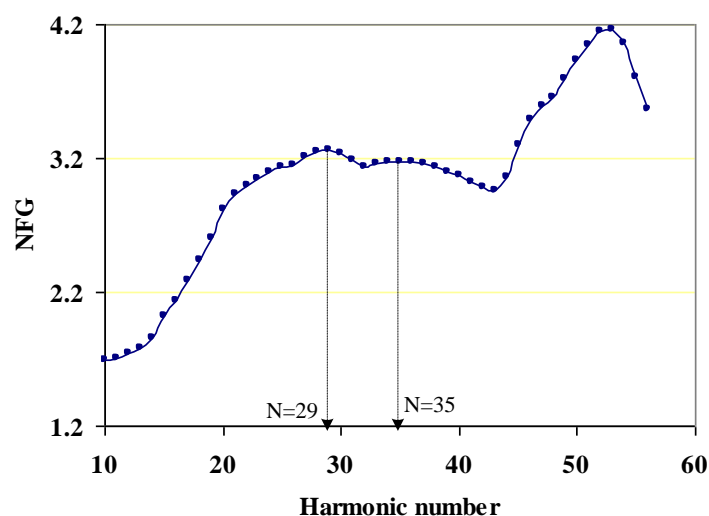
مطابق شکل (۴-۲۵)، یک نفتگیر تاقدیسی که بخش بالایی آن از مواد هیدروکربور اشباع شده باشد، در یک مقطع قائم گرادیان کل نرمال به وسیله یک کمینه که توسط دو بیشینه محدود شده شناخته می‌شود. این در حالی است که یک نفتگیر تاقدیسی بدون مواد هیدروکربوری فقط با یک مقدار بیشینه از مقادیر NFG داده‌های گرانی در یک مقطع دو بعدی دیده می‌شود، که مرکز منحنی بسته مقادیر بیشینه موقعیت افقی و عمقی تاقدیس را نشان می‌دهد.

در اینجا این سوال مطرح است که آیا این ویژگی، یعنی مقدار کمینه محصور بین دو بیشینه روی یک مقطع عرضی گرادیان کل نرمال، برای کلیه مخازن هیدروکربوری با ساختارهای متفاوت یکسان است؟ آیا می‌توان از این ویژگی برای نفت‌گیرهای نوع گنبد نمکی یا گسلی نیز استفاده نمود. برای پاسخ به این پرسش و تعیین یک ویژگی برای مقاطع گرادیان کل نرمال حاصل از آنومالی‌های گرانی

ناشی از مخازن هیدروکربوری نوع گنبد نمکی، در ادامه مدل با ساختار غیرتاق‌دیس‌سی مانند گنبد نمکی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۲۵: الف) اثر گرانی ناشی از دو تقادیس با مواد هیدروکربور (A) و بدون هیدروکربور (B) روی یک پروفیل، ب) ساختار مدل و مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی با مقادیر جملات هارمونیک متفاوت ج) $N=40$ ، د) $N=35$ ، ه) $N=29$ ، و) $N=25$



شکل ۴-۲۶: تغییرات گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی نسبت به تعداد هارمونیک

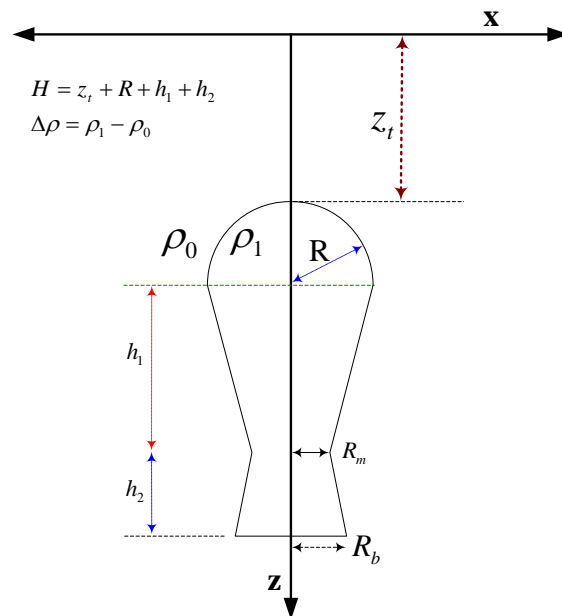
۴-۱۰-۱ مدل گنبد نمکی

با توجه به اشکال پیچیده مخازن نوع گنبد نمکی و مشکل بودن محاسبه اثر گرانی آن‌ها، یک مدل گنبد نمکی ساده انتخاب گردید. در تعیین نوع و شکل گنبد نمکی، سعی گردید از انواع واقعی آن‌ها الهام گرفته و مدل‌هایی طراحی شوند که ضمن تداعی ساختارهای واقعی، محاسبه اثر گرانی آن راحت‌تر باشد. ابتدا گنبد نمکی که هیچ‌گونه اثری از منابع هیدروکربوری در اطراف آن وجود نداشته باشد، مورد بررسی و سپس گنبد نمکی حاوی تله‌های هیدروکربوری مد نظر قرار می‌گیرد. برای این کار شکل گنبد نمکی به صورت تلفیقی از چند ساختار جداگانه ترکیبی بوده و اثر گرانی آن به وسیله برنامه نوشته شده در محیط نرم افزار Matlab محاسبه شده است.

۴-۱۰-۱-۱ محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی ناشی از یک گنبد نمکی

شکل (۴-۲۷) نمایی از مقطع یک گنبد نمکی دو بعدی را نشان می‌دهد که تلفیقی از یک نیم دایره، دوزنقه معکوس و دوزنقه کوچک‌تر می‌باشد. این گنبد براساس مدل‌های واقعی گنبد‌های نمکی طراحی شده است [Nettleton, 1948; Jenkins et al, 1983; Hughes, 1999; Jallouli et al, 2005]

به طوری که گسترش طولی آن ۱۰ برابر گسترش عرضی آن است. پارامترهای مورد نیاز برای تعریف شکل مذکور و محاسبه اثر گرانی آن روی نقاط محاسبه‌ای در جدول (۴-۴) ارائه شده است. با استفاده از اطلاعات مندرج در جدول (۴-۴) اثر گرانی ناشی از وجود یک گنبد نمکی دو بعدی مشابه شکل به راحتی قابل محاسبه است. آنومالی‌های گرانی ناشی از این مدل با استفاده از الگوریتم تهیه شده بر مبنای روش تیغه‌های نازک (شکل ۴-۲۸) و تهیه برنامه کامپیوتری آن، محاسبه گردید.

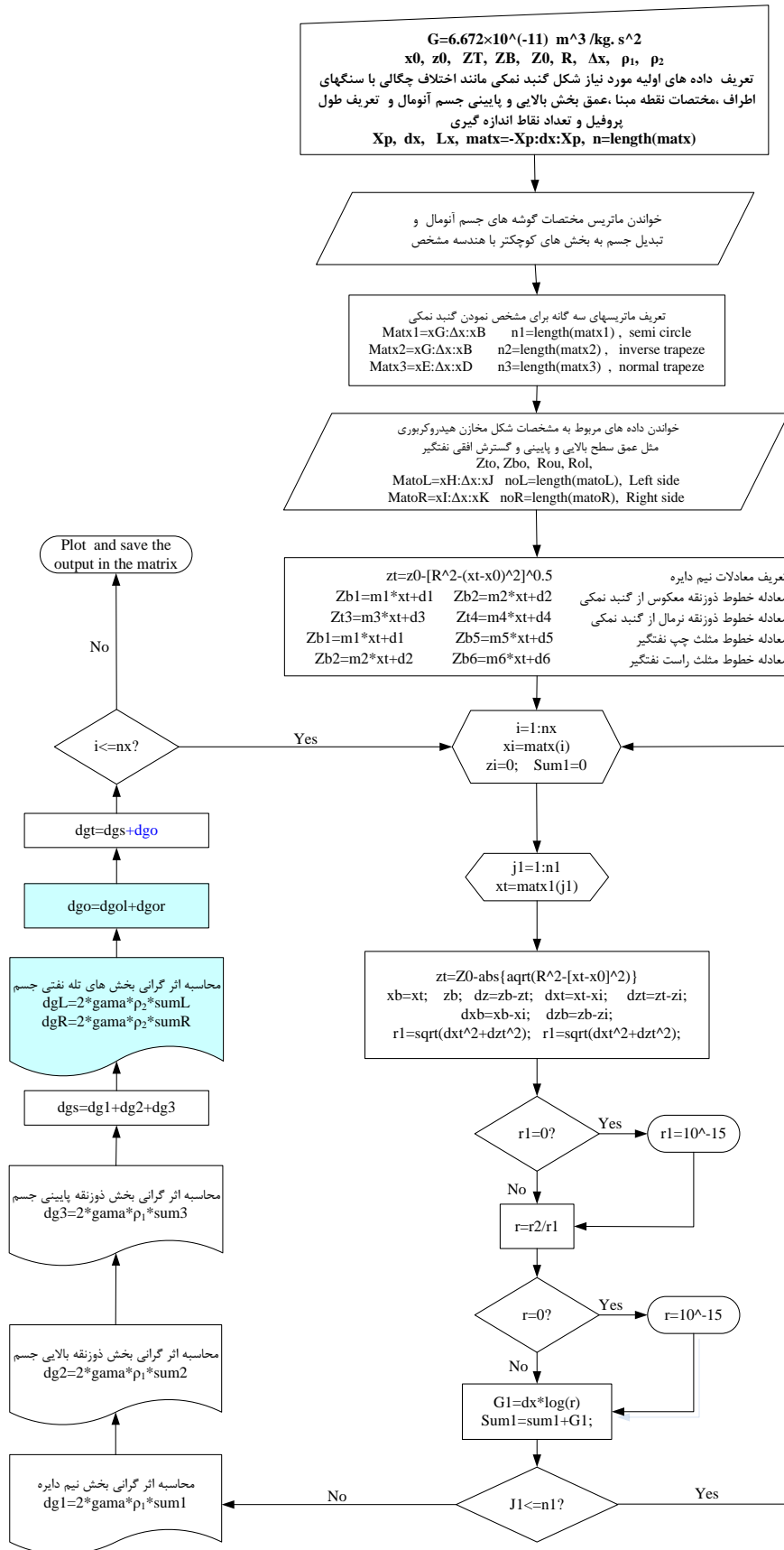


شکل ۴-۲۷: مدل سازی یک گنبد نمکی دو بعدی

جدول ۴-۴: پارامترهای مورد استفاده در مدل گنبد نمکی دو بعدی

مشخصات	گنبد نمکی
شعاع گنبد R	۰/۵ کیلومتر
عمق کف گنبد H	۳ کیلومتر
عمق بالای گنبد z_t	۱ کیلومتر
ارتفاع دوزنقه بالایی h_1	۱ کیلومتر
ارتفاع دوزنقه پایینی h_2	۰/۵ کیلومتر
اختلاف چگالی گنبد نسبت به اطراف $\Delta\rho$	۰/۰۸ - گرم بر سانتی‌متر مکعب

در شکل (۴-۲۸) ابتدا کلیه مشخصات و داده‌های مورد نیاز برای تعریف شکل گنبد نمکی، فاصله نقاط اندازه‌گیری، طول پروفیل و ماتریس مربوطه خوانده می‌شود.



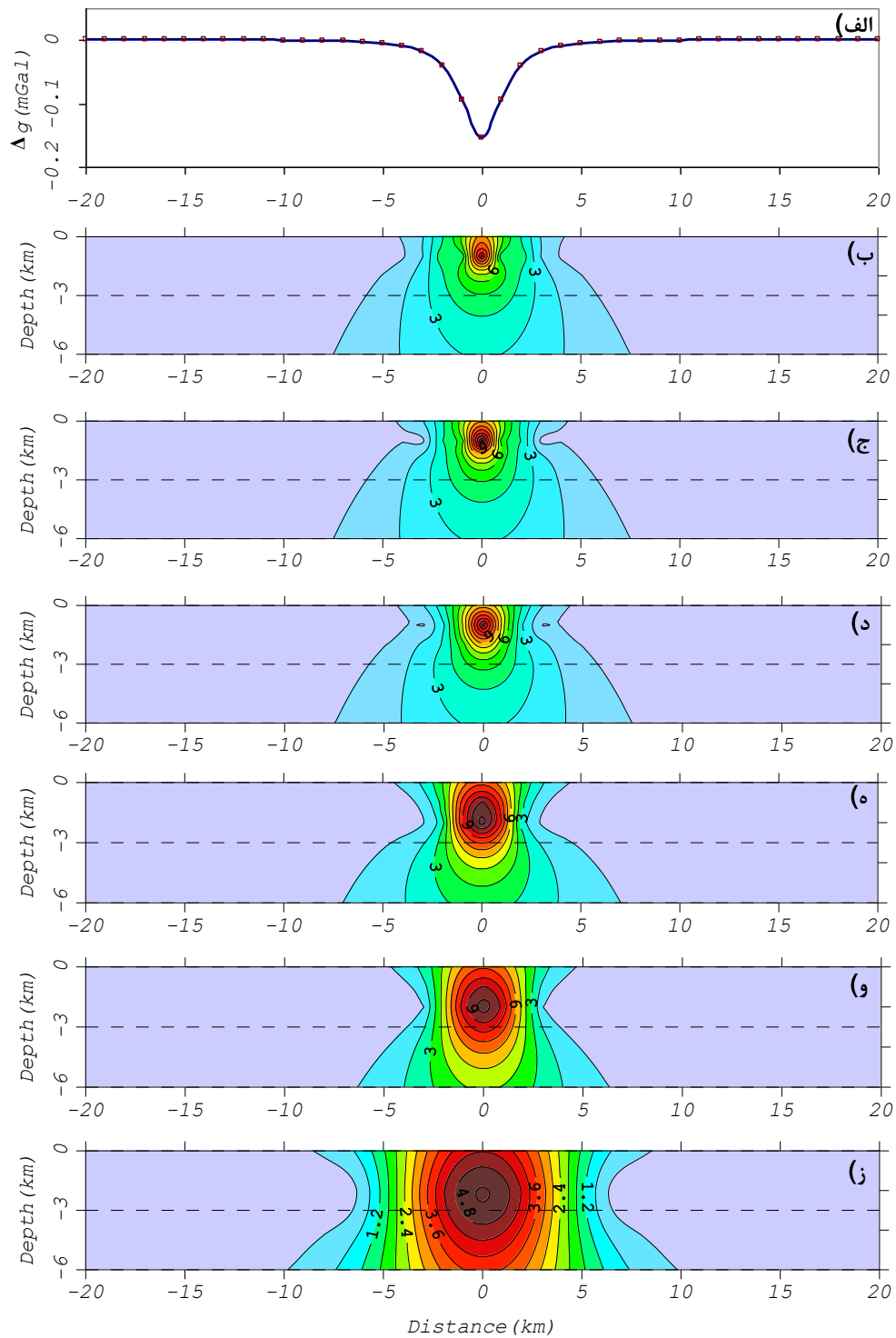
شکل ۴-۲۸: فلوجارت محاسبه اثر گرانی یک گنبد نمکی دو بعدی ساده و همچنین دارای تله حاوی مواد هیدروکربوری در اطراف آن (بخش رنگی آن)

سپس معادلات مربوط به اجرای تشکیل دهنده مدل محاسبه می شود. پس از این که مدل کاملاً تعریف گردید اولین حلقه محاسبه اثر گرانی مدل شروع شده و براساس معادلات مربوط به روش تیغه-های نازک قائم محاسبات برای خود گنبد و بخش‌های نفتی آن انجام می‌شود. خروجی برنامه به صورت ماتریس‌های جداگانه مقادیر مربوط به اثر گرانی و اثر بخش تله‌نفتی را ذخیره نموده و نمودار تغییرات گرانی در راستای پروفیل مربوطه رسم می‌شود.

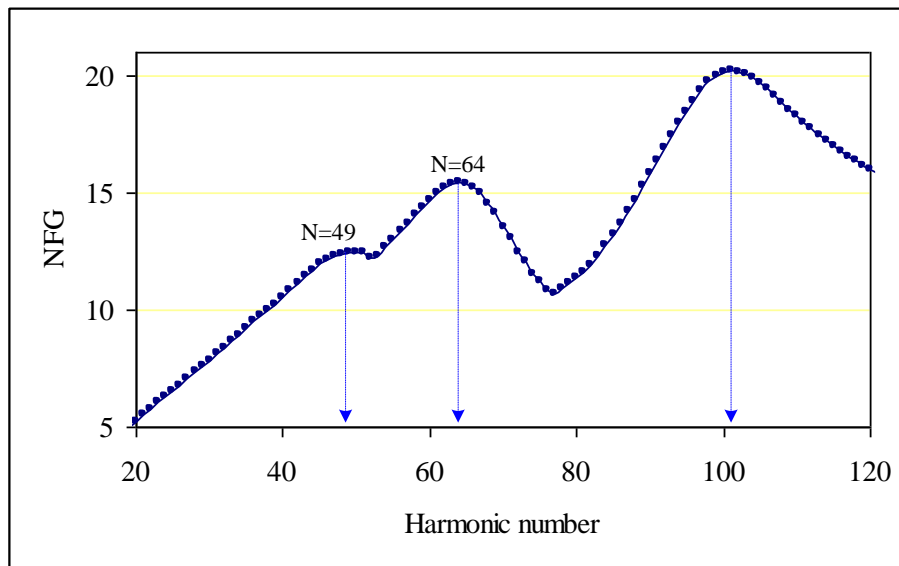
پس از تعیین اثر گرانی این مدل روی پروفیلی به طول ۴۰ کیلومتر و به فاصله نقاط محاسبه‌ای ۵۰۰ متر (شکل ۴-۲۹-الف)، مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی با در نظر گرفتن مقادیر متفاوتی برای N ، محاسبه شد. مطابق شکل (۴-۲۹)، مقدار گرادیان کل نرمال به ازای هیچ عددی از N ، عمق ۳ کیلومتری یعنی کف گنبد نمکی را نشان نمی‌دهد و عمقی که مرکز گنبد نمکی است را نشان می‌دهد. البته این موضوع به دلیل کوچک لحاظ نمودن دوزنقه زیرین نسبت به دو بخش بالایی گنبد نمکی می‌باشد.

به منظور تعیین N بهینه برای محاسبه گرادیان کل نرمال جهت این مدل، نمودار تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تغییرات N رسم گردید (شکل ۴-۳۰). براساس این شکل اگر مقدار $N=49$ اولین بیشینه نسبی انتخاب شود، منحنی‌های مقادیر بیشینه NFG روی مرکز گنبد نمکی قرار می‌گیرد و اثری از مقادیر کمینه روی مقطع دیده نمی‌شود (شکل ۴-۲۹-ه). وقتی که تعداد جملات سری فوریه بیشتر از ۴۹ در نظر گرفته می‌شود، محدوده بیشینه که بیانگر موقعیت مرکزی گنبد است به سمت عمق‌های کمتر جابجا می‌شود.

زمانی که مقدار آن عدد ۶۴ یعنی بیشینه نسبی دوم منظور شود (شکل ۴-۲۹-ج)، در این حالت عمق سطح بالایی گنبد مشخص می‌شود. با افزایش از این مقدار، نوساناتی با فرکانس بالا در محل گنبد نمکی ظاهر شده و عمق محدوده بیشینه به سطح نزدیک می‌شود. بنابراین برای یک مدل با پارامترهای مذکور، مقدار بهینه جملات هارمونیک سری فوریه برای محاسبه گرادیان کل نرمال به ترتیب اعداد ۴۹ و ۶۴ می‌باشند که به ترتیب عمق مرکزی گنبد و سطح بالایی آن را نشان می‌دهند.



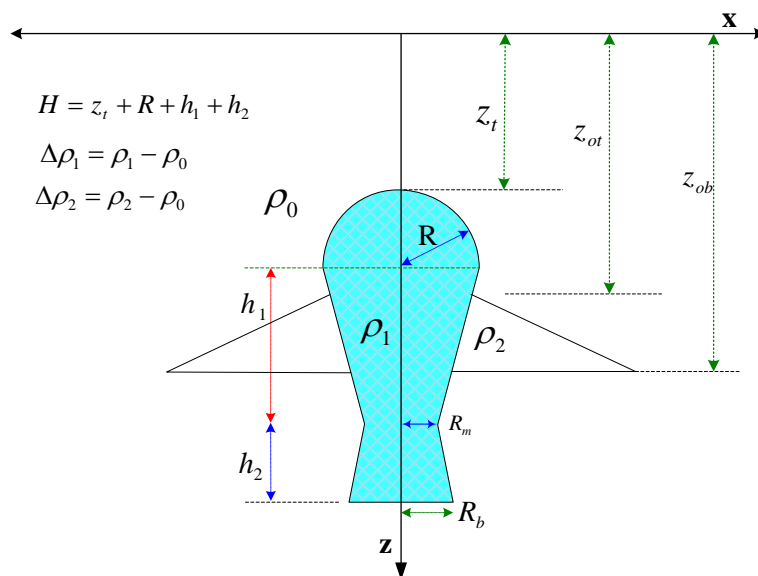
شکل ۴-۲۹: الف) اثر گرانی یک گنبد نمکی بدون تله حاوی هیدروکربور (شکل ۴-۲۷)، و مقاطع گرادیان کل نرمال این مدل با تعداد هارمونیک‌های متفاوت، ب) $N=70$ ، ج) $N=64$ ، د) $N=60$ ، و ه) $N=49$ ، و) $N=40$ ، ز) $N=20$



شکل ۴-۳۰: تغییرات گرادیان کل نرمال بیشینه آنومالی گرانی یک گنبد نمکی نسبت به تعداد هارمونیک‌ها

۴-۱۰-۲- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی یک گنبد نمکی حاوی نفت

براساس مدل‌های واقعی دو بخش در طرفین گنبد نمکی به عنوان محل‌های تمرکز مواد هیدروکربنی منظور گردید. بدین ترتیب در حاشیه ذورزنقه معکوس، دو محدوده مثلثی در طرفین گنبد با چگالی متفاوت نسبت به سنگ‌های دربرگیرنده به عنوان محل تجمع مواد هیدروکربوری در نظر گرفته شد (شکل ۴-۳۱).



شکل ۴-۳۱: مدل دو بعدی یک گنبد نمکی به همراه تله هیدروکربنی در اطراف آن

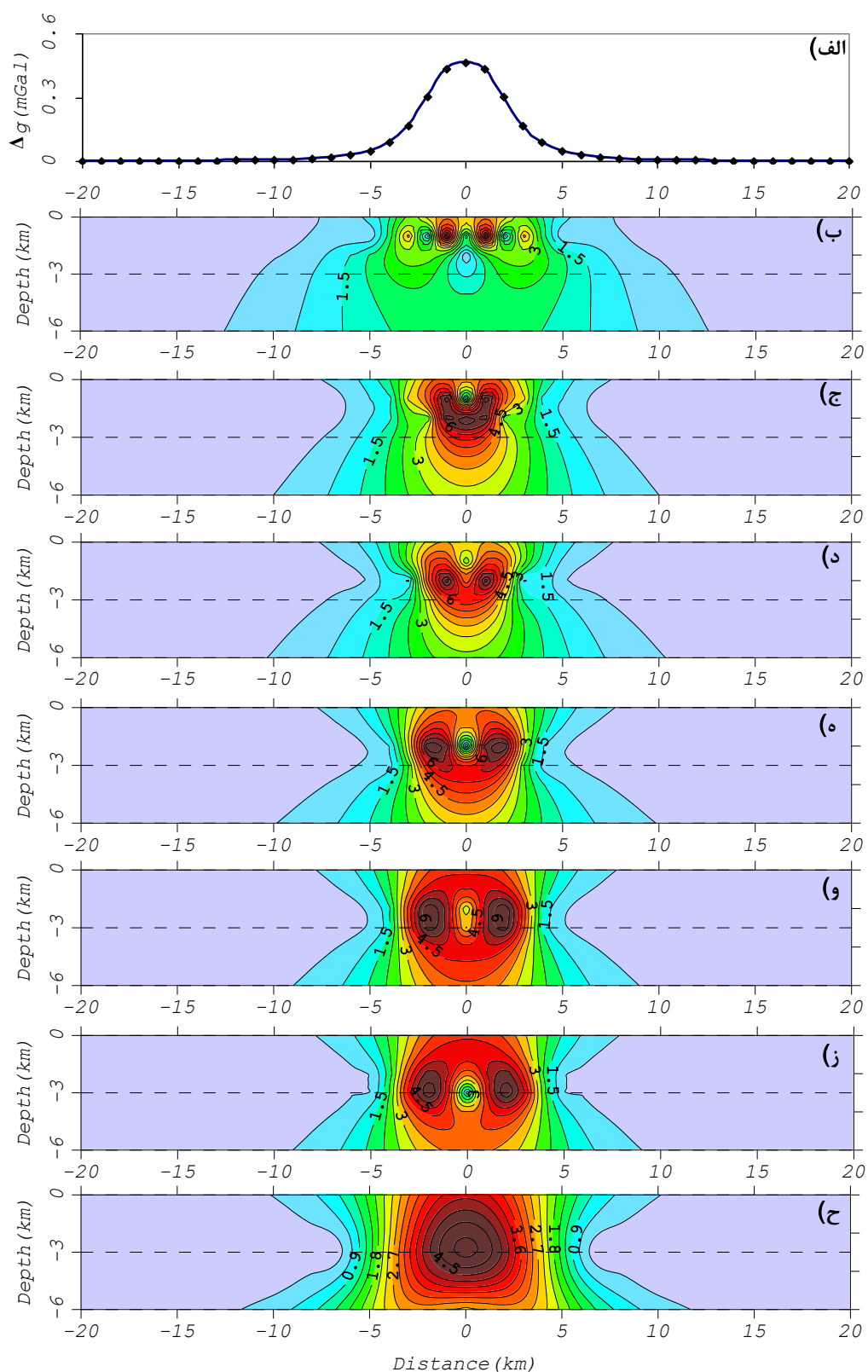
پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه اثر گرانی این مدل همانند شعاع نیم دایره، عمق سطح رویی و زیرین گنبد، عمق سطح زیرین و رویی نفتگیر و میزان گسترش هر بخش در جدول (۴-۵) تعریف شده است. با تغییر و اضافه نمودن بخش‌های مربوط به نفتگیر، الگوریتم ارائه شده در شکل (۴-۲۸) برای تله نفتی نوع گنبد نمکی فراهم گردید و برنامه مربوط به آن نیز برای محاسبه اثر گرانی چنین مدلی نوشته شد.

براساس الگوریتم، برای هر نقطه اندازه‌گیری از پروفیل، ابتدا به طور جداگانه اثر گرانی گنبد نمکی با اجزای مختلف آن یعنی یک نیم دایره در بالا و دو ذوزنقه در بخش زیرین، و بخش نفتگیر که از دو مثلث تشکیل شده در طرفین گنبد، محاسبه گردید. سپس با جمع این دو بخش مقدار اثر گرانی ناشی از وجود گنبد نمکی و نفتگیر به دست آمد (شکل ۴-۳۲-الف). مقادیر گرادیان کل نرمال داده-های گرانی حاصل از این مدل، با تعداد هارمونیک‌های مختلف محاسبه شد که مقاطع دو بعدی آن‌ها در شکل (۴-۳۲) ارائه شده است.

جدول ۴-۵: پارامترهای مورد استفاده در مدل تله نفتی گنبد نمکی نشان داده شده در شکل (۴-۳۱)

مشخصات	گنبد نمکی نفتدار
شعاع گنبد R	۰/۵ کیلومتر
عمق بالای گنبد Z_t	۱ کیلومتر
عمق زیرین (کف) گنبد H	۳ کیلومتر
عمق بخش بالایی نفت Z_{ot}	۱/۶ کیلومتر
عمق بخش زیرین نفت Z_{ob}	۲ کیلومتر
اختلاف چگالی $\Delta\rho_1$	-۰/۰۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب
اختلاف چگالی $\Delta\rho_2$	+۰/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب

مطابق شکل (۴-۳۲) می‌توان گفت که تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال و شکل ظاهری آن روی مقطع به شدت وابسته به N می‌باشد. در مقایسه این شکل با شکل (۴-۲۹)، تغییراتی که در اثر وجود تله نفتی روی مقاطع گرادیان کل نرمال پدید آمده است به وضوح دیده می‌شود که مقادیر کمینه‌ای از NFG توسط مقادیر بیشینه‌ای محدود شده‌اند. این ویژگی برای تله‌های نفتی تاکدیسی مشخصه‌ای برای تفکیک مخازن هیدروکربوری تاکدیسی از تاکدیس‌های بدون هیدروکربور بوده است. بنابراین می‌توان گفت که چنین حالتی نیز برای نفتگیرهای گنبد نمکی وجود دارد.

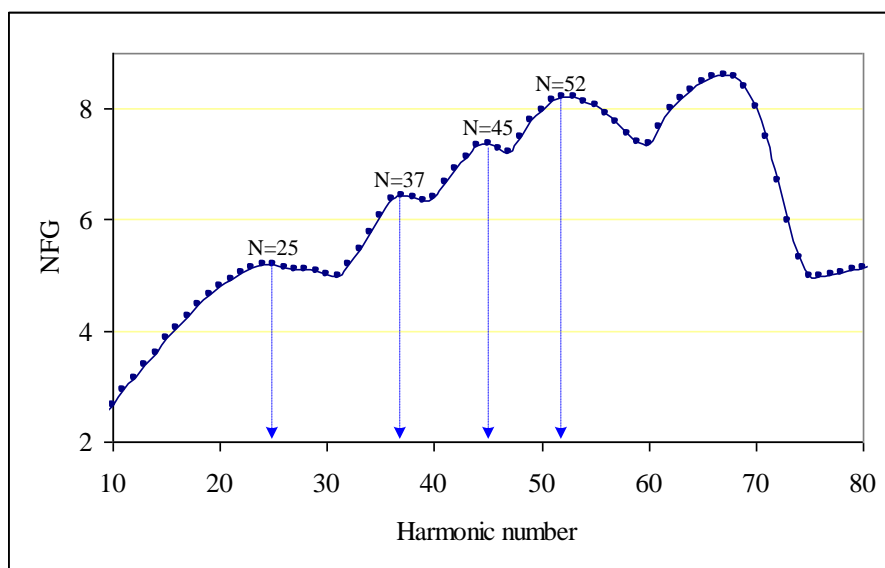


شکل ۴-۳۲: الف) اثر گرانی یک گنبد نمکی حاوی هیدروکربور، و مقاطع گرادیان کل نرمال این مدل با تعداد هارمونیک‌های متفاوت، ب) $N=70$ ، ج) $N=60$ ، د) $N=52$ ، ه) $N=45$ ، و) $N=40$ ، ز) $N=37$ ، ح) $N=25$

برای رسم این مقاطع، تعداد جملات هارمونیک مورد نیاز از روی نمودار گرادیان کل نرمال بیشینه نسبت به تعداد هارمونیک (شکل ۴-۳۳) استفاده گردید. همان طوری که از شکل (۴-۳۲) پیداست با تغییر مقدار عددی N ، شکل منحنی‌های کمینه و بیشینه روی مقاطع تغییر نموده و بیانگر مشخصات ساختار می‌باشند. زمانی که عدد ۲۵ برای تعداد جملات هارمونیک جهت محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال انتخاب شود، مقادیر بیشینه آن به صورت منحنی‌های بسته حدوداً عمق زیرین (کف) گنبد نمکی را نشان می‌دهد و اثری از مقادیر کمینه در شکل دیده نمی‌شود (شکل ۴-۳۲ ح).

با افزایش مقدار N به تدریج مقادیر کمینه بین بیشینه‌ها ظاهر شده و این حالت تا مقدار حدود $N=70$ نیز ادامه دارد، ولی شکل و ظاهر کمینه‌ها و بیشینه‌ها و موقعیت عمقی آن‌ها تغییر می‌کند.

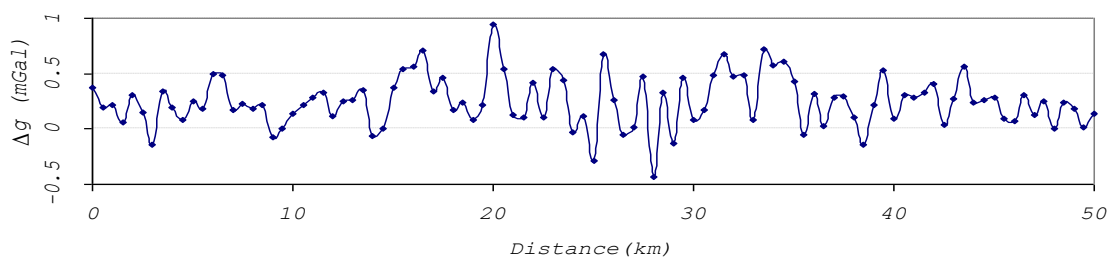
به عبارت دیگر زمانی که مقدار N برابر ۳۷ (دومین بیشینه نسبی) باشد، مقدار کمینه گرادیان کل نرمال ظاهر شده در بین دو بیشینه عمق زیرین گنبد نمکی را نشان می‌دهد (شکل ۴-۳۲ ز). این تغییر حالت با افزایش N ادامه یافته تا اینکه مقدار آن به عدد ۴۵ (شکل ۴-۳۲ ه، سومین بیشینه) برسد. در این حالت مقادیر کمینه بیانگر عمق زیرین تله نفتی است. با افزایش مقدار N به عدد ۵۲ (شکل ۴-۳۲ د) مقدار کمینه بخش بالایی گنبد نمکی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۳: نمودار تغییرات مقادیر گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد هارمونیک‌ها برای مدل گنبد نمکی با تله هیدروکربوری (مدل شکل ۴-۳۱).

۴-۱۰-۳- بررسی و مقایسه ویژگی‌های گرادیان کل نرمال مدل‌های مختلف گنبد نمکی

به منظور بررسی و ارزیابی بیشتر ویژگی گرادیان کل نرمال دو بعدی روی مدل‌های مختلف گنبدهای نمکی، با لحاظ نمودن اشکال و مدل‌های واقعی گنبدهای نمکی [Nettleton, 1948, 57; Jenkins et al, 1983; Reynolds, 1997; Hughes, 1999; Tiab and Donaldson, 2004;] از مدل‌های جدیدی استفاده گردید. در این مدل‌ها سعی گردید که شرایط متفاوتی برای گنبدهای نمکی در نظر گرفته شود. در این راستا برای محاسبه اثر گرانی هر یک از مدل‌ها، از نرم افزار Grav2DC [Cooper, 1993-2003] استفاده گردید. هر چند برای هر یک از مدل‌هایی که تاکنون اشاره شد، کد محاسباتی آن تهیه شده است ولی برای بررسی توانمندی و کارایی بیشتر روش گرادیان کل نرمال در شناسایی و تفکیک ساختارهای فاقد و حاوی هیدروکربوری از نرم‌افزار مزبور استفاده گردید. همچنین در ادامه به منظور بررسی اثر نوفه‌ها روی نتایج حاصل از روش گرادیان کل نرمال، به صورت تصادفی نوفه‌هایی به داده‌های گرانی کلیه مدل‌ها اضافه گردید (شکل ۴-۳۴).



شکل ۴-۳۴: نمودار تغییرات نوفه اضافه شده به داده‌های گرانی در راستای پروفیل اندازه‌گیری

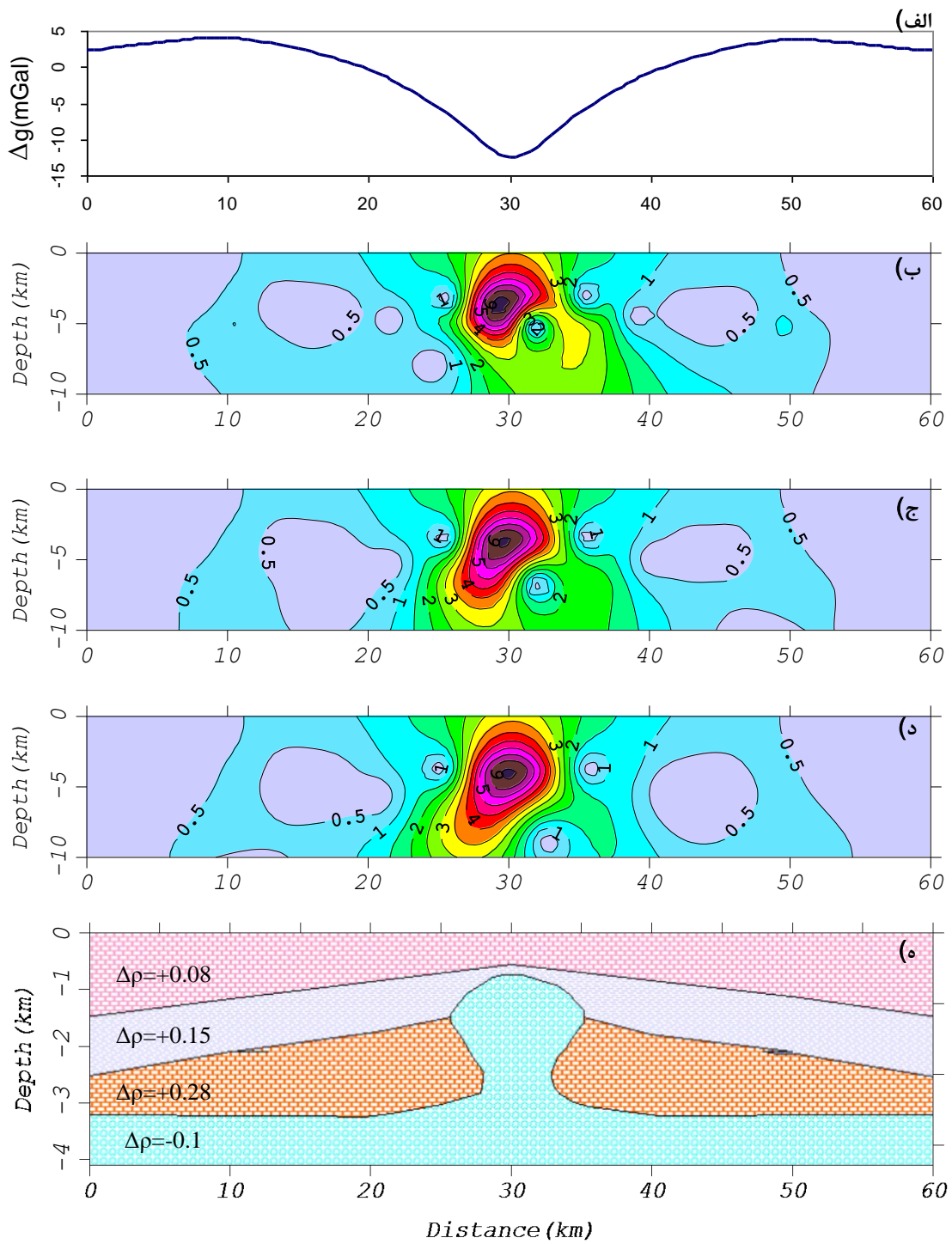
سپس اثر گرانی هر پروفیل در یک فایل ذخیره و به عنوان فایل ورودی برنامه کامپیوتری NFG2D استفاده شد. با منظور نمودن عدد ۲ توان تابع هموارساز ($\mu=2$)، طول پروفیل و دیگر پارامترهای موردنیاز با در نظر گرفتن تعداد هارمونیک‌های مختلف، مقادیر گرادیان کل نرمال بیشینه برای هر مدل محاسبه شده است. در ادامه برای رسم مقاطع NFG، تعداد جملات هارمونیک مورد نیاز از روی نمودار گرادیان کل نرمال بیشینه نسبت به تعداد هارمونیک استفاده گردید.

۴-۱۰-۳-۱- مدل گنبد نمکی

در شکل (۴-۳۵-ه) یک گنبد نمکی فاقد تله نفتی ارائه شده است که با استفاده از نرم‌افزار Grav2DC تهیه شده است. اثر گرانی این مدل روی پروفیلی به طور ۶۰ کیلومتر محاسبه گردید (شکل ۴-۳۵-الف). مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی بر اساس تعداد هارمونیک‌های ۳۶، ۴۰، و ۴۵ محاسبه شده است.

همان طور که از شکل (۴-۳۵) ملاحظه می‌شود، زمانی که تعداد جملات $N=36$ منظور شود، یک محدوده منحنی‌های بسته بیشینه در موقعیت افقی گنبد نمکی ظاهر می‌شود که عمقی حدود چهار کیلومتر را نشان می‌دهد. موقعیت افقی با تغییر و افزایش تعداد جملات هارمونیک واضح‌تر شده و علاوه بر آن موقعیت عمقی توده نیز تغییر می‌نماید. وقتی $N=40$ باشد موقعیت گنبد نمکی به وسیله یک محدوده بیشینه بدون هیچ گونه محدوده کمینه در بین بیشینه شناخته می‌شود. این موضوع بیانگر عدم وجود تله نفتی در اطراف گنبد نمکی می‌باشد. با افزایش مقدار N محدوده منحنی‌های بسته بیشینه ادامه داشته و به جزء کمینه‌های حاشیه‌ای بیشینه، کمینه دیگری دیده نمی‌شود و از طرفی تنها یک بیشینه تکرار می‌شود. در شکل (۴-۳۵-ب) موقعیت بیشینه مقادیر NFG برای تعداد جملات ۴۵ محاسبه شده است که عمقی حدود ۳ کیلومتری یعنی محل اختلاف چگالی بین گنبد و سازندهای اطراف را نشان می‌دهد.

بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود در صورتی که گنبد نمکی فاقد تله‌های نفتی در اطرافش باشد حتی اگر اثرات نوفه هم در اندازه‌گیری‌ها در نظر گرفته شود به این روش می‌توان گنبد نمکی فاقد تله‌نفتی را تشخیص داد. به عبارت دیگر موقعیت افقی یا وجود گنبد نمکی توسط منحنی‌های بیشینه شناسایی می‌شود. با توجه به این که تنها یک بیشینه ظاهر شده و کمینه‌ای در موقعیت گنبد دیده نمی‌شود و براساس نتایج مدل‌های قبلی، می‌توان گفت گنبد نمکی حاوی منابع هیدروکربوری نیست. در ادامه بحث وضعیت یک گنبد نمکی که حاوی تله مواد هیدروکربوری مایع و گازی (نفت و گاز) باشد بررسی می‌گردد.



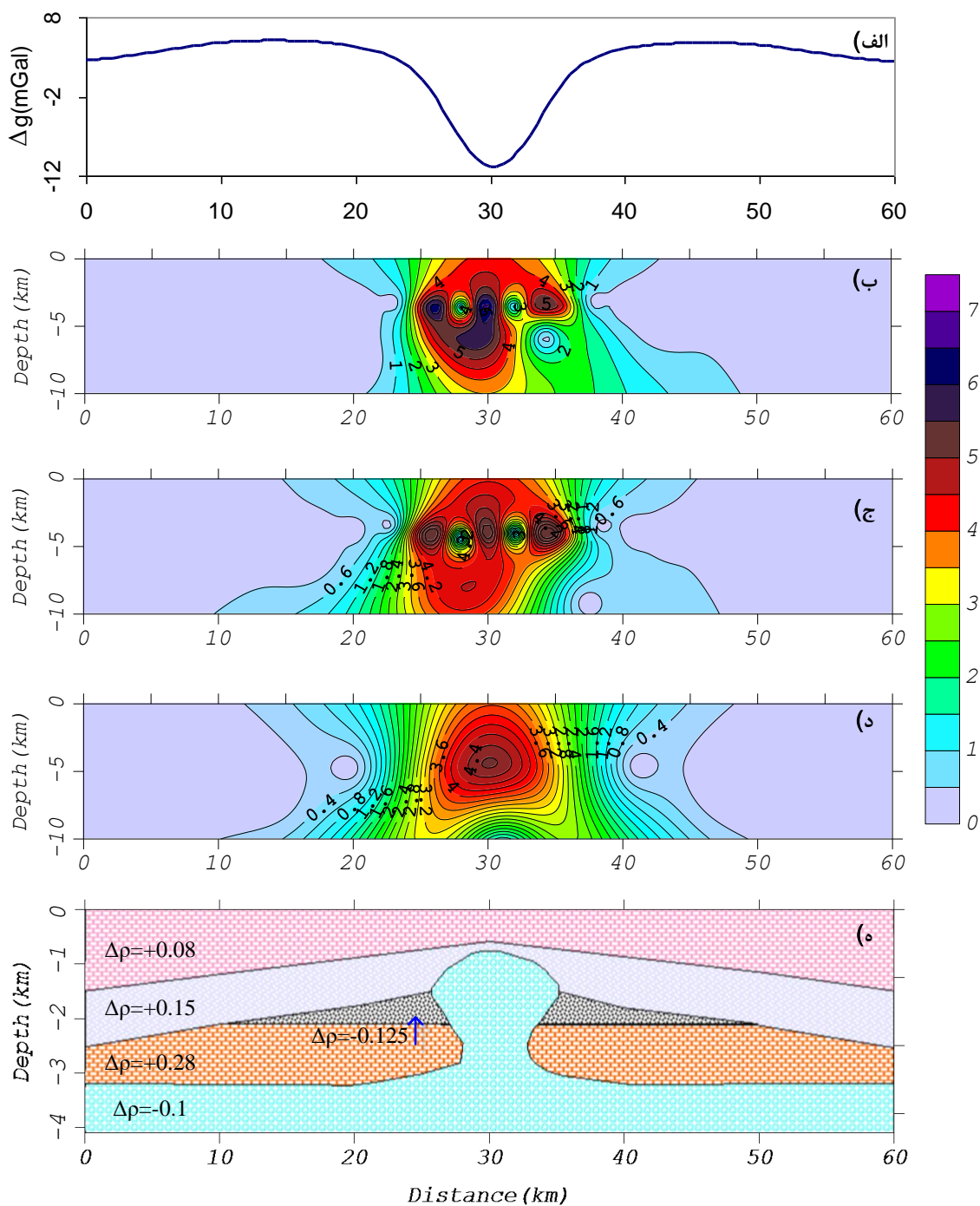
شکل ۴-۳۵: مدل گنبد نمکی فاقد تله نفتی، الف) اثر گرانی ناشی از مدل در حضور نوفه‌های تصادفی، مقاطع گرادیان کل نرمال براساس تعداد جملات هارمونیک (ب) $N=45$ ، (ج) $N=40$ ، (د) $N=36$ ، ه) مدل گنبد نمکی

۴-۱۰-۳-۲- مدل گنبد نمکی با تله حاوی نفت

در شکل (۴-۳۶-۵) یک گنبد نمکی حاوی تله نفتی ارائه شده است. در این مدل در اثر بالا آمدن گنبد نمکی، شرایط نفتگیری در دو طرف گنبد برای لایه رویی آن فراهم شده است. همان طور که ذکر شد، برای محاسبه اثر گرانی مدل روی پروفیلی به طور ۶۰ کیلومتر از نرم افزار Grav2DC استفاده گردید. در شکل (۴-۳۶) اثر گرانی این مدل با نوفه‌های تصادفی ده درصدی به همراه مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی برای تعداد جملات هارمونیک مختلف ارائه شده است. مقادیر گرادیان کل نرمال بر اساس تعداد هارمونیک‌های ۲۵، ۴۲، و ۶۵ محاسبه شده است.

همان طور که از شکل (۴-۳۶) ملاحظه می‌شود، زمانی که تعداد جملات $N=25$ منظور شود، یک بیشینه گسترده در موقعیت افقی گنبد نمکی ظاهر می‌شود که مرکز آن عمقی حدود چهار کیلومتر را نشان می‌دهد. موقعیت افقی محدوده بیشینه با تغییر و افزایش تعداد جملات واضح‌تر شده و علاوه بر آن موقعیت عمقی توده نیز تغییر می‌نماید. وقتی $N=42$ باشد دو محدوده بیشینه به طور واضح مقدار کمینه‌ای را محصور نموده و این شرایط بیان کننده وجود یک ناپیوستگی چگالی در محدوده مورد نظر می‌باشد که پیشتر با مدل‌های ساده گنبد نمکی نیز بررسی گردید. با افزایش مقدار N محدوده کمینه محصور بین بیشینه‌ها کاملاً واضح و اثر آن تا زمانی که مقادیر آن از ۵۵ نیز بیشتر شود، نیز قابل ملاحظه می‌باشد.

بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود در صورتی که گنبد نمکی دارای تله‌های نفتی در اطراف باشد این ناپیوستگی گرانی روی مقاطع NFG به صورت منحنی‌های کمینه بسته محصور بین بیشینه‌ها ظاهر می‌شود. برای بررسی وضعیت یک تله نفتی که حاوی مواد هیدروکربوری مایع و گازی (نفت و گاز) باشد مدل دیگری تهیه گردید، که در بخش بعدی به آن پرداخته می‌شود.



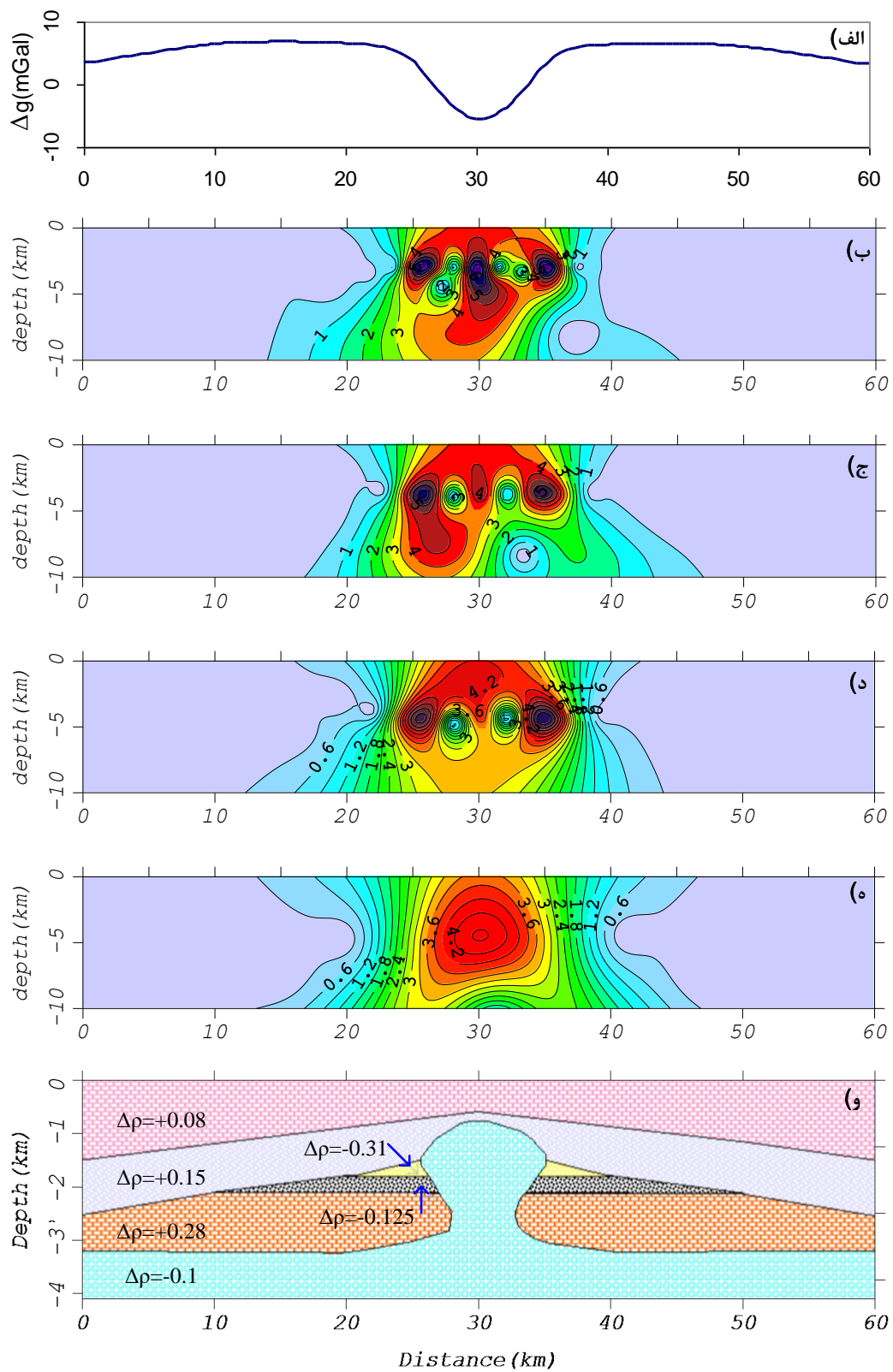
شکل ۴-۳۶: گنبد نمکی دارای تله نفتی، اثر گرانی مدل با حضور نوفه‌های تصادفی، مقاطع گرادیان کل نرمال براساس تعداد جملات هارمونیک (ب) $N=65$ بیان‌گر موقعیت عمقی تله نفتی، (ج) $N=42$ ، (د) $N=25$ مشخص‌کننده عمق گنبد نمکی

۴-۱۰-۳-۳-مدل گنبد نمکی با تله نفت و گاز

در شکل (۴-۳۷) گنبد نمکی حاوی هیدروکربور ارائه شده، به طوری که شرایط نفتگیری در دو طرف گنبد برای لایه رویی آن جهت مخزن نفت و گاز فراهم شده است. اثر گرانی این مدل به همراه مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی برای تعداد جملات هارمونیک مختلف ارائه شده است. برای تعیین تعداد جملات بهینه هارمونیک جهت محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال، تغییرات NFG بیشینه نسبت به تغییر N محاسبه و نمودار آن رسم گردید. بر این اساس مقادیر گرادیان کل نرمال با لحاظ نمودن هارمونیک‌های مختلف مانند ۲۵، ۴۲، ۵۰ و ۶۵ محاسبه گردید.

مطابق شکل (۴-۳۷) می‌توان گفت که تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال و شکل ظاهری آن با وجود دو بخش نفت و گاز در تله نفتی اثر متفاوتی روی مقاطع آن پدید آورده است به طوری که با افزایش مقادیر N تعداد دو محدوده کمینه در بین بیشینه‌ها محصور شده است. همان‌طور که پیشتر در بخش مدل‌های ساده گنبد نمکی ذکر شد، کمینه محصور بین دو بیشینه به عنوان مشخصه‌ای برای تفکیک مخازن هیدروکربوری گنبد نمکی حاوی هیدروکربور از نوع بدون هیدروکربور بوده است. چون در این حالت یک بخش با چگالی متفاوت نسبت به گنبد نمکی وجود داشته، یک محدوده کمینه محصور بین دو بیشینه بوده است.

در این مدل دو بخش نفتی و گازی سبب ایجاد دو منطقه با اختلاف چگالی متفاوت شده که این اثر در شکل (۴-۳۷-ب، دو محدوده کمینه) به خوبی دیده می‌شود. به طوری که دو محدوده کمینه توسط سه محدوده بیشینه قرار گرفته‌اند. بنابراین می‌توان گفت که چنین حالتی برای نفتگیرهای گنبد نمکی که دارای دو بخش نفت و گاز هستند یک علامت مشخصه‌ای برای تشخیص گنبد نمکی با تله هیدروکربوری می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در صورت وجود دو بخش نفت و گاز بایستی مقادیر منحنی‌های گرادیان کل نرمال متفاوت نسبت به حالت حضور نفت تنها باشد. براساس شکل (۴-۳۷) زمانی که $N=25$ است منحنی‌های بیشینه در موقعیت افقی و عمقی گنبد نمکی به صورت بسته دیده می‌شوند.

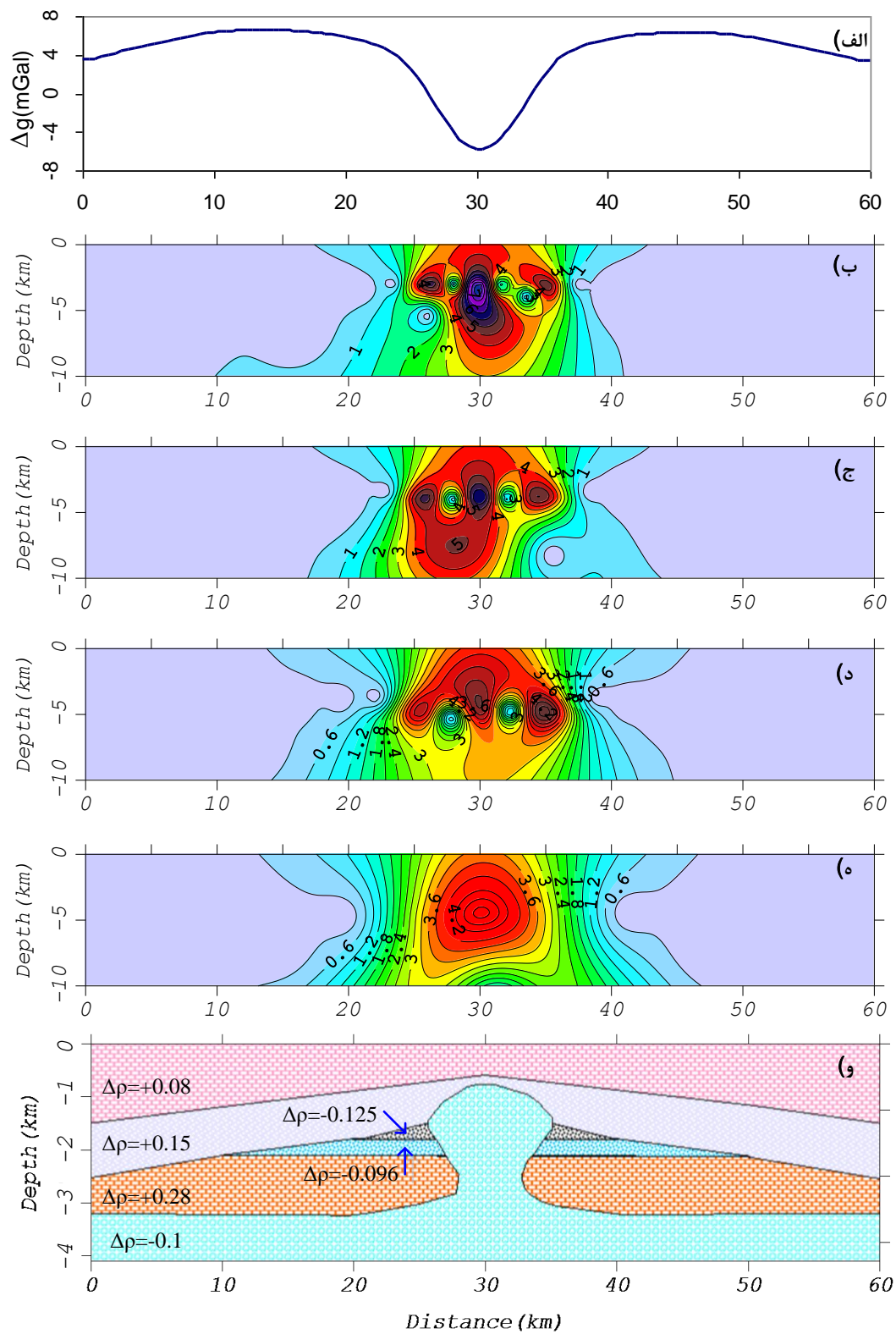


شکل ۴-۳۷: گنبد نمکی دارای تله نفت و گاز، الف) اثر گرانی مدل با نوفه تصادفی، مقاطع گرادیان کل شمال براساس تعداد جملات هارمونیک ب) $N=65$ ، ج) $N=50$ ، د) $N=42$ ، ه) $N=25$

با افزایش تعداد جملات هارمونیک برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال، دو محدوده کمینه محصور بین سه بیشینه پدید می‌آید که نشان دهنده تغییر ویژگی و شرایط نفتگیر می‌باشد. زمانی که عدد ۴۲ برای تعداد جملات هارمونیک انتخاب شود، دو محدوده کمینه محصور بین بیشینه‌ها در موقعیت گنبد نمکی در عمق حدود ۴ کیلومتری ظاهر می‌گردد که بیان‌گر وجود مواد هیدروکربوری در سازند است. با افزایش تعداد جملات محدوده‌های بیشینه و کمینه کاملاً واضح دیده می‌شود. هنگامی که عدد ۶۵ انتخاب می‌شود در هر محدوده کمینه محصور بین بیشینه‌ها دو کمینه دو قلوبی بسته ظاهر می‌شود که نشان از دو بخشی بودن نفتگیر دارد (شکل ۴-۳۷-ب) که عمق حدود ۲ تا ۲/۵ کیلومتری را برای نفتگیر نشان می‌دهد.

۴-۱۰-۳-۴- مدل گنبد نمکی به همراه مخزن نفت و آب

با توجه به اینکه بیشتر بخش زیرین تله‌های نفتی از آب تشکیل شده است، بنابراین در مدل دیگری این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل دو طرف کناره‌های گنبد نمکی توسط آب و نفت پر شده است و اثر گرانی ناشی از این گنبد و سنگ‌های اطراف آن با استفاده از نرم افزار Grav2DC محاسبه شد و مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی نیز با استفاده از برنامه NFG2D محاسبه و مقاطع آن‌ها رسم شد (شکل ۴-۳۸)، که به ظاهر مشابه با شکل (۴-۳۷) می‌باشد. همان گونه که از شکل (۴-۳۸) ملاحظه می‌شود زمانی که تعداد جملات هارمونیک برای محاسبه NFG عدد ۶۵ منظور شود، منحنی‌های بسته مقادیر بیشینه و کمینه همانند مدل قبل به صورت متناوب دیده می‌شود (شکل ۴-۳۸-ب). به عبارت دیگر می‌توان گفت که در صورت وجود اختلاف چگالی در اطراف یا کناره‌های گنبد نمکی به صورت مخزن نفتی شرایط وجود کمینه‌ها و بیشینه‌ها به هم شبیه بوده و تکرار موارد کمینه و بیشینه نشان از حضور چند لایه یا چند محیط با چگالی متفاوت می‌باشد و به این ترتیب می‌توان گفت که اگر دو لایه نفت و گاز یا نفت و آب باشد به لحاظ وجود کمینه و بیشینه مشخصه‌ای یکسان خواهند داشت.



شکل ۴-۳۸: گنبد نمکی دارای تله نفت و آب، اثر گرانی مدل با نوفه تصادفی، مقاطع گرادیان کل نرمال براساس تعداد جملات هارمونیک (ب) $N=65$ ، (ج) $N=50$ ، (د) $N=42$ ، (ه) $N=25$

براساس نتایج به دست آمده از مدل‌های دو بعدی مختلفی که تهیه گردید به طور خلاصه می‌توان گفت که به روش گرادیان کل نرمال دو بعدی ساختارهای مختلف و اجسام آنومال قابل شناسایی و تا حد زیادی عمق آن‌ها قابل تخمین می‌باشد. همچنین براساس بررسی‌های انجام شده، طول بهینه پروفیل بایستی ۱۳ برابر عمق توده‌های آنومال مورد انتظار باشد تا نتایج مناسب‌تری حاصل شود.

نتایج به دست آمده نشان داد که این روش قادر به تفکیک ساختار حاوی هیدروکربور از ساختار فاقد آن می‌باشد و این موضوع در مورد تاقدیس‌ها و گنبد‌های نمکی با مدل‌های مختلف ارائه شده تایید شده است. توان تابع هموار کننده در معادلات محاسبه مشتق‌های میدان گرانی ۲ و ۳ تعیین گردید و همچنین مشخص شد که اختلاف چگالی کم یا زیاد برای یک جسم با ساختار و موقعیت یکسان تاثیری در مقدار گرادیان و موقعیت منحنی‌های بیشینه یا کمینه روی مقاطع NFG ندارد.

بهر حال بیشتر ساختارهای زمین شناسی حالت سه بعدی دارند و از این رو روش‌های تفسیر و تحلیل سه بعدی نتایج مناسب‌تری ارائه می‌نماید. از طرفی روی روش گرادیان کل نرمال سه بعدی با لحاظ نمودن سری فوریه دو بعدی هیچگونه فعالیتی صورت نگرفته است. بنابراین برای ارائه روشی جدید و به دلیل اهمیت زیاد آن در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل سه بعدی، در فصل بعدی، روش گرادیان کل نرمال سه بعدی با لحاظ نمودن سری فوریه دوتایی ارائه و با مدل‌های مختلف سه بعدی روی این روش بحث می‌شود.

فصل پنجم

بسط، توسعه و ارائه روش جدیدی برای
گردان کل نرمال سه بعدی داده های کرانی

۵-۱- مقدمه

از آنجایی که بیشتر تله‌های نفتی دارای ساختارهای سه بعدی می‌باشند، از این رو استفاده از نتایج مدل سازی دو بعدی داده‌های گرادیان کل نرمال و نمایش آن به صورت مقاطع قائم نمی‌تواند آن چنان که لازم است برای اکتشاف این گونه ساختارها مفید و موثر باشد و همچنین تعیین محل‌های مناسب برای حفاری نیز با مشکل مواجه است. حتی طرح و بکارگیری گرادیان کل نرمال به صورت دو بعدی و استفاده از نتایج آن در تفسیر داده‌های اکتشافی گرانی و مغناطیس در این موارد ممکن است به نتایج نامطلوب و گمراه کننده‌ای منجر شود.

نقشه‌های گرادیان کل نرمال سه بعدی بر روی یک مقطع افقی با عمق مشخص، شاخصی برای تعیین موقعیت اختلاف چگالی‌ها می‌باشد. همچنین مقادیر گرادیان کل نرمال دو بعدی کمینه محصور بین بیشینه‌ها مشخصه‌ای برای تعیین ساختارهای حاوی هیدروکربور است. بنابراین با تهیه نقشه گرادیان کل نرمال در یک صفحه افقی می‌توان محل پروفیل‌های عرضی را انتخاب نمود که از مقادیر کمینه‌ها گذشته و موقعیت ساختارها را نمایان سازند. بدین ترتیب تعیین محل حفر چاه‌های اکتشافی و استخراجی به آسانی امکان پذیر می‌باشد. از این رو بهتر است برای ساختارهای سه بعدی از روش سه بعدی گرادیان کل نرمال برای تفسیر داده‌ها استفاده شود. علاوه بر این نتایج حاصل از مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی در یک افق خاص در یک میدان هیدروکربوری می‌تواند منجر به شناسایی مخازن هیدروکربوری دیگری شود که از اکتشاف دور مانده است.

بدین منظور زنگ و همکاران (۲۰۰۲) اولین بار ایده بکارگیری روش گرادیان کل نرمال سه بعدی را روی مدل تله نفتی تاقدیسی شکل (مدل تاقدیس برزکین) مطرح و بکار بردند. در این روش ایشان نتایج به دست آمده روی مدل سازی را روی داده‌های واقعی از میدان نفتی شینگلی بکار برده و مناطقی را برای حفاری اکتشافی مطرح نمودند که منجر به کشف مخازن نفتی جدید شد.

زنگ و همکاران (۲۰۰۲) برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی از روش تبدیل فوریه یک بعدی استفاده نمودند. آن‌ها برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی معادله زیر را پیشنهاد و استفاده نمودند [Zeng et al, 2002].

$$G_N(x, y, z) = \frac{G(x, y, z)}{G_m(z)} = \frac{\sqrt{V_{xz}^2(x, y, z) + V_{yz}^2(x, y, z) + V_{zz}^2(x, y, z)}}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{V_{xz}^2(x, y, z) + V_{yz}^2(x, y, z) + V_{zz}^2(x, y, z)}} \quad (1-5)$$

که در آن M تعداد نقاط اندازه‌گیری در محدوده اندازه‌گیری داده‌ها است و $V_{yz}(x,y,z)$ ، $V_{xz}(x,y,z)$ و $V_{zz}(x,y,z)$ به ترتیب مشتق‌های اول مقدار آنومالی گرانی (Δg یا V_z) در راستای x ، y و z می‌باشد. $G(x,y,z)$ گرادیان کل آنومالی‌های گرانی در نقطه (x,y,z) و $G_m(z)$ مقدار متوسط گرادیان کل در افق z می‌باشد. با استفاده از معادله (۱-۵) می‌توان توزیع افقی مقدار گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی را در تعدادی از افق محاسبه نمود و در نتیجه یک نمای سه بعدی از مقدار گرادیان کل نرمال به دست آورد.

برای شناخت بیشتر روش ارائه شده توسط زنگ و همکارانش، فلوجارت محاسباتی این روش تهیه گردید (پیوست ج-۱). ایشان برای تعیین مقدار تابع گرانی در افق‌های مختلف از تبدیل فوریه استفاده نموده و سپس مقدار تابع تبدیل یافته را در ضرب گسترش به سمت پایین تاثیر داده و مقدار تابع گرانی را در افق مورد نظر محاسبه کرده است و در ادامه برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی از معادله (۱-۵) استفاده نموده است. بدین ترتیب آن‌ها صرفاً از یک عدد هارمونیک برای تعیین مقادیر گرادیان کل استفاده نموده است.

تران نیز از معادله (۱-۵) جهت محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال برای اکتشاف منابع نفتی دریای جنوب شرقی ویتنام استفاده نمود [Tran, 2004]. وی با استفاده از استاندارد سازی داده‌ها براساس سری فوریه، مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی را پروفیل به پروفیل محاسبه و برای هر افقی استفاده نموده است. این به این معنی است که وی نیز فقط از سری فوریه یک بعدی استفاده نموده است.

یعنی همواره مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌ها در راستای یک محور محاسبه و سپس آن مقادیر طبق معادله (۱-۵) جمع شده تا مقدار متوسط و در نهایت مقدار گرادیان کل نرمال در یک نقطه مشخص در یک صفحه به دست آید. با بررسی برنامه کامپیوتری ارائه شده توسط ایشان، الگوریتم محاسباتی برنامه ایشان نیز برای بررسی روابط محاسباتی تهیه گردید (پیوست ج-۲).

با بررسی الگوریتم محاسباتی تهیه شده برای روش‌های ارائه شده توسط زنگ و همکاران (۲۰۰۲) و تران (۲۰۰۴) و معادله (۱-۵) می‌توان عنوان نمود که روش‌های مذکور نوعی از روش سه بعدی یا مناسب‌تر اینکه روش‌های شبه سه بعدی برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال می‌باشند. دلیل اصلی این است که آن‌ها برای بیان محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال در افق‌های مختلف عمقی فقط از سری فوریه یک بعدی استفاده نمودند. به بیانی دیگر در این محاسبات سری فوریه فقط در راستای یک محور (x یا y) تاثیر داده شده و تابع گرانی به صورت سری فوریه یک بعدی در یک بسط سری سینوسی در راستای محور مورد نظر محاسبه شده است. ولی حقیقت امر این است که در حالت سه بعدی تغییرات گرادیان کل نرمال میدان گرانی بایستی در هر افق خاص (z) با تغییرات مقادیر گرانی در صفحه $x-y$ محاسبه گردد.

با توجه به این که تله‌های نفتی در یک میدان دارای ساختارهای متفاوت هستند و همچنین روند یا گسترش آن‌ها در یک راستا نسبت به راستای دیگر می‌تواند مختلف باشد و یا اینکه امکان طراحی شبکه مربعی برای اندازه‌گیری داده‌ها همواره وجود ندارد، لذا استفاده از روش گرادیان کل نرمال سه بعدی که در محاسبات بتواند سری‌های فوریه را در دو بعد استفاده نماید، ضروری می‌باشد. در این صورت این پرسش مطرح است که فرمول‌بندی محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی در ساختارهای سه بعدی چگونه است؟ در این فصل به بررسی این موضوع و حل مساله سه بعدی گرادیان کل نرمال با در نظر گرفتن سری‌های فوریه دو بعدی پرداخته می‌شود و در این راستا از بسط هارمونیک میدان پتانسیل (گرانی) استفاده می‌شود.

۵-۲- بسط هارمونیک میدان گرانی

میدان گرانی زمین مطابق رابطه زیر بر مبنای مشتق اول میدان پتانسیل زمین در راستای قائم

تعریف می‌شود:

$$\Delta g = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad (۲-۵)$$

که در آن، U میدان پتانسیل و Δg میدان گرانی زمین در نقطه اندازه‌گیری می‌باشد. از آنجایی که میدان گرانی در معادله لاپلاس صدق می‌کند [Bhattacharyya, 1965; Shaw and Agarwal, 1997].

پس می‌توان فرم زیر را نوشت:

$$\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial z^2} = 0 \quad \nabla^2(\Delta g) = 0, \quad (۳-۵)$$

که در آن $\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial x^2}$ ، $\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial y^2}$ و $\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial z^2}$ به ترتیب مشتق دوم میدان گرانی در راستای محورهای x ، y و z می‌باشند.

بدین ترتیب می‌توان به وسیله روش‌های تئوری پتانسیل Δg را بیان نمود. اگر مختصات کارتیزین به صورتی در نظر گرفته شود که مقدار مثبت محور z به طرف پایین باشد، آنگاه با استفاده از روش تفکیک متغیرها برای حل معادلات دیفرانسیلی جزئی، میدان گرانی Δg را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [Bhattacharyya, 1965; Spiegel, 1974; Telford et al, 1991]:

$$\Delta g(x, y, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_m \cos \frac{2m\pi x}{L_x} + B_m \sin \frac{2m\pi x}{L_x} \right) \times \left(C_n \cos \frac{2n\pi y}{L_y} + D_n \sin \frac{2n\pi y}{L_y} \right) \exp \left(-2\pi z \sqrt{\frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2}} \right) \quad (۴-۵)$$

که در آن تابع نمایی، تغییر تابع را براساس تغییرات گسترش به سمت پایین بیان می‌کند. پارامترهای L_x و L_y طول موج‌های پایه‌ای در جهت محورهای x و y بوده و A_m ، B_m ، C_m و D_m ضرایب بسط سری فوریه می‌باشند که روش‌های زیادی (در فصل دوم بیان شد) برای محاسبه مقادیر این ضرایب وجود دارد.

اگر فرض شود که مقادیر آنومالی گرانی روی یک صفحه X-y، به موازات محورهای X و Y و به فواصل یکسان Δx و Δy بر روی M_x و N_y تعداد نقطه اندازه‌گیری شده باشد. این فواصل برای بیان کم‌ترین مقدار طول موج در راستای دو محور X و Y که برای بیان داده‌ها به وسیله یک بسط دوگانه سری فوریه از آن‌ها استفاده می‌شود، بکار می‌روند. کم‌ترین مقدار طول موج در راستای محورهای X و Y به ترتیب دو برابر مقادیر یکسان Δx و Δy می‌باشد. بیشترین تعداد جملات هارمونیک نیز در راستای دو امتداد مذکور به ترتیب M و N هستند [Bhattacharyya, 1965]. طول موج‌های پایه‌ای در دو جهت به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$L_x = M_x \Delta x \quad \text{و} \quad L_y = N_y \Delta y$$

بنابراین اگر مقادیر پارامترهای موجود برای یک سطح معلوم باشد، معادله (۴-۵) را می‌توان به وسیله بسط سری‌های فوریه دوگانه محاسبه نمود. برای تعیین ضرایب فوریه این معادله از روش‌های عددی مختلف نظیر روش تسوبوی^{۸۲} استفاده می‌شود. در اینجا برای محاسبه مقادیر ضرایب چهارگانه معادله (۴-۵)، روش تسوبوی که باتاکاریا^{۸۳} (۱۹۶۵) برای تفسیر آنومالی‌های مغناطیسی از آن بهره برد، استفاده می‌شود [Bhattacharyya, 1965]. برای این کار ابتدا فرض می‌شود که فقط پروفیل‌های موازی محور طول‌ها مد نظر قرار گیرد و برای بیان مقادیر ضرایب در طول هر پروفیل با سری فوریه برای (r+1) پروفیل داریم:

$$\Delta g(x, y_r, 0) = \sum_{m=0}^M C_{mr} \cos\left(\frac{2n\pi}{L_y} x\right) + D_{mr} \sin\left(\frac{2n\pi}{L_y} x\right) \quad (۵-۵)$$

$$x = i\Delta x, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

$$C_{mr} = K \sum_{l=0}^{M_x-1} \Delta g(i\Delta x, y_r, 0) \cos\left(2\pi m \frac{i\Delta x}{L_x}\right)$$

$$D_{mr} = K \sum_{l=0}^{M_x-1} \Delta g(i\Delta x, y_r, 0) \sin\left(2\pi m \frac{i\Delta x}{L_x}\right)$$

که در آن می‌توان گفت:

^{۸۲} . Tsuboi

^{۸۳} . Bhattacharyya, 1965

$$K = \frac{2}{M_x}, \quad m \neq M, \quad m \neq 0 \quad \text{برای هر } M_x \text{ زوج}$$

$$K = \frac{1}{M_x}, \quad m = M, \quad m = 0 \quad \text{برای هر } M_x \text{ زوج}$$

اکنون برای یک مقدار ثابت m ، N تعداد از مقادیر C_{mr} و D_{mr} وجود دارد، که می‌توان مجموعه مقادیر C_{mr} را به صورت زیر بیان نمود:

$$C_{m0}, C_{m1}, C_{m2}, \dots, C_{m(N-1)}$$

حال تابع $f_m(y)$ را برای بیان مقادیر C_m به صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$f_m(y) = \sum_{n=0}^N (A_{mn} \cos(2\pi n \frac{y}{L_y}) + B_{mn} \sin(2\pi n \frac{y}{L_y})) \quad (6-5)$$

که در آن $y = j\Delta y$ است.

$$A_{mn} = K \sum_{p=0}^{N_y-1} f_m(y) \cos(2\pi n \frac{j\Delta y}{L_y}) \quad j=0,1,2,\dots$$

$$B_{mn} = K \sum_{p=0}^{N_y-1} f_m(y) \sin(2\pi n \frac{j\Delta y}{L_y}) \quad , j=0,1,2,\dots$$

$$K = \frac{2}{N_y}, \quad n \neq N, \quad n \neq 0 \quad \text{برای هر } N_y \text{ زوج}$$

$$K = \frac{1}{N_y}, \quad n = N, \quad n = 0 \quad \text{برای هر } N_y \text{ زوج}$$

از معادله (6-5) می‌توان نوشت:

$$C_{mr} = \sum_{n=0}^N (A_{mn} \cos(2\pi n \frac{r\Delta y}{L_y}) + B_{mn} \sin(2\pi n \frac{r\Delta y}{L_y})) \quad (7-5)$$

به طور مشابه نیز می‌توان مقادیر D_{mr} را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$D_{mr} = \sum_{n=0}^N (E_{mn} \cos(2\pi n \frac{r\Delta y}{L_y}) + F_{mn} \sin(2\pi n \frac{r\Delta y}{L_y})) \quad (8-5)$$

حال با جای‌گذاری معادلات (7-5) و (8-5) در معادله (5-5) یک روش تحلیلی کاملی از مقادیر

میدان گرانی در یک صفحه افقی برحسب بسط دوگانه سری فوریه به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta g(x, y, 0) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \left(A_{mn} \cos\left(\frac{2\pi m}{L_x} x\right) \cos\left(\frac{2\pi n}{L_y} y\right) + B_{mn} \cos\left(\frac{2\pi m}{L_x} x\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{L_y} y\right) + E_{mn} \sin\left(\frac{2\pi m}{L_x} x\right) \cos\left(\frac{2\pi n}{L_y} y\right) + F_{mn} \sin\left(\frac{2\pi m}{L_x} x\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{L_y} y\right) \right) \quad (9-5)$$

که در آن ضرایب A_{mn} ، B_{mn} ، E_{mn} و F_{mn} ضرایب فوریه دوگانه گفته می‌شود و به روش‌های عددی مختلفی نظیر تسوبوی و فیلون قابل محاسبه می‌باشد. معادله (۹-۵) یک سطح فوریه را تعریف می‌کند که می‌توان برای دسته‌ای از داده‌های دو بعدی مثل مقادیر مشاهده‌ای گرانی در یک ناحیه برازش کرد. با یافتن چهار دسته از ضرایب با استفاده از جمع دوگانه می‌توان مقادیر تابع را مشخص کرد [Telford et al, 1991; Spiegel, 1974; Bhattacharyya, 1965].

۵-۳- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی با سری فوریه دو بعدی

در مواقعی بهتر و لازم است که در یک سطح یا در سه بعد تغییرات میدان گرانی زمین بررسی شود. در این حالت می‌توان تابع $\Delta g(x, y)$ که نسبت به دو متغیر در سطح (x, y) متناوب می‌باشد را به صورت سری فوریه دوگانه نوشت. در حقیقت سری‌ها در معادله (۹-۵) محدود بوده و تعداد جملات آن یا تعداد هارمونیک‌ها M و N می‌باشد. به دلیل اینکه سری‌های سینوسی زودتر از سری‌های کسینوسی در انتهای فاصله یا پروفیل، جایی که تابع $\Delta g(x, y, 0)$ مساوی صفر است به همگرایی می‌رسند، بنابراین تابع $\Delta g(x, y, 0)$ را می‌توان به صورت یک تابع سری سینوسی نوشت [Kreyszig, 2006]:

$$\Delta g(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{L_x} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{L_y} y\right) \quad (10-5)$$

برای انجام عمل گسترش به سمت پایین میدان گرانی متغیر Z به صورت یک تابع نمایی ظاهر می‌گردد. بنابراین با منظور نمودن شرایط مرزی (مقادیر صفر در حاشیه‌ها)، عبارت مربوط به متغیر عمق به صورت $\exp(\sqrt{K_m^2 + K_n^2} z)$ تعریف می‌شود و در طرف دوم معادله (۱۰-۵) ضرب می‌شود، که

در آن پارامترها به صورت $K_m = \frac{\pi m}{L_x}$ و $K_n = \frac{\pi n}{L_y}$ تعریف می‌شوند. در نتیجه تابع گرانی در فضای

سه بعدی به صورت زیر خواهد شد:

$$\Delta g(x, y, z) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F_{mn} \sin(K_m x) \sin(K_n y) \exp(\sqrt{K_m^2 + K_n^2} z) \quad (11-5)$$

که در آن M و N به ترتیب تعداد جملات سری فوریه در راستای محورهای x و y می‌باشد و ضرایب نیز براساس معادله زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_{mn} = \frac{4}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \Delta g(x, y, 0) \sin(K_m x) \sin(K_n y) dx dy \quad (12-5)$$

برای محاسبه ضرایب معادله بالا روش‌های مختلفی تعریف شده است، ولی در اینجا برای نوشتن

برنامه کامپیوتری از معادلات زیر استفاده شده است.

$$F_{mi} = \frac{2}{L_x} \sum_{i=1}^{N_x} \Delta g(x, y, 0) \sin(K_m x_i) \quad (13-5)$$

$$F_{mn} = \frac{2}{L_y} \sum_{j=1}^{N_y} F_{mi} \sin(K_n y_j) \quad (14-5)$$

مشتق‌های تابع گرانی (معادله ۱۱-۵) در راستای محورهای سه گانه مختصات $\partial \Delta g / \partial x$ ، $\partial \Delta g / \partial y$ و

$\partial \Delta g / \partial z$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \Delta g}{\partial x} = \frac{\pi}{L_x} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [m \cdot F_{mn} \cdot \cos(K_m x) \cdot \sin(K_n y)] \exp(\sqrt{K_m^2 + K_n^2} z) \quad (15-5)$$

$$\frac{\partial \Delta g}{\partial y} = \frac{\pi}{L_y} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [n \cdot F_{mn} \cdot \sin(K_m x) \cdot \cos(K_n y)] \exp(\sqrt{K_m^2 + K_n^2} z) \quad (16-5)$$

$$\frac{\partial \Delta g}{\partial z} = \frac{\pi}{L_x L_y} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [\sqrt{m^2 L_y^2 + n^2 L_x^2} \cdot F_{mn} \cdot \sin(K_m x) \cdot \sin(K_n y)] \exp(\sqrt{K_m^2 + K_n^2} z) \quad (17-5)$$

همان طور که قبلاً در مورد گرادیان کل نرمال دو بعدی بیان شد، به هنگام محاسبه مقدار آنومالی

میدان پتانسیل و نیز گرادیان آن در راستای صفحه افقی و عمق در روش گسترش به سمت پایین،

اغتشاشات و نوفه‌هایی در میدان گرانی ظاهر می‌شود. برای حذف این موارد روی ناحیه مورد مطالعه،

تابع هموارکننده‌ای سینوسی (لانکزوس) به نام Q به صورت زیر تعریف می‌شود. بسط تابع سینوسی دوگانه در تابع مذکور که اثر پایدار کننده روی عملگر NFG دارد، ضرب می‌شود.

$$Q_m = \left[\frac{\sin(K_m)}{K_m} \right]^\mu \quad (18-5)$$

$$Q_n = \left[\frac{\sin(K_n)}{K_n} \right]^\mu \quad (19-5)$$

که در آن μ عدد صحیحی است که نمایانگر درجه هموارکنندگی است و میزان انحنای تابع Q را کنترل می‌کند که براساس بررسی‌های قبلی و همچنین مطالب ذکر شده در فصل چهارم، عدد مناسب $\mu=2$ می‌باشد.

بدین ترتیب تابع $\Delta g(x,y,z)$ به صورت معادله (20-5) ارائه می‌گردد:

$$\Delta g(x, y, z) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F_{mn} \sin(K_m x) \sin(K_n y) \exp(\sqrt{K_m^2 + K_n^2} z) Q_m Q_n \quad (20-5)$$

محاسبه گرادیان کل سه بعدی، $G(x_i, y_j, z_k)$ ، با تعیین مشتق قائم تابع $\Delta g(x, y, z)$ در جهت محورهای طول (X)، عرض (Y) و عمق (Z) به صورت فرمول زیر انجام می‌شود،

$$G(x_i, y_j, z_k) = \sqrt{\left(\frac{\partial g(x_i, y_j, z_k)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g(x_i, y_j, z_k)}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial g(x_i, y_j, z_k)}{\partial z} \right)^2} \quad (21-5)$$

که در آن، $\partial \Delta g(x,y,z)/\partial x$ ، $\partial \Delta g(x,y,z)/\partial y$ و $\partial \Delta g(x,y,z)/\partial z$ مشتق‌های میدان گرانی در راستای محورهای طول (X)، عرض (Y) و عمق (Z) می‌باشند.

برای محاسبه مقدار گرادیان کل نیاز به مشتق تابع میدان گرانی می‌باشد که با مد نظر قرار دادن

تابع تصحیح اثر گیبس (Q) معادلات (15-5) تا (17-5) را به صورت زیر در سه بعد می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial \Delta g}{\partial x} = \frac{\pi}{L_x} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [m F_{mn} \cos(K_m x) \sin(K_n y)] \exp(\sqrt{K_m^2 + K_n^2} z) Q_m Q_n \quad (22-5)$$

$$\frac{\partial \Delta g}{\partial y} = \frac{\pi}{L_y} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [n F_{mn} \sin(K_m x) \cos(K_n y)] \exp(\sqrt{K_m^2 + K_n^2} z) Q_m Q_n \quad (23-5)$$

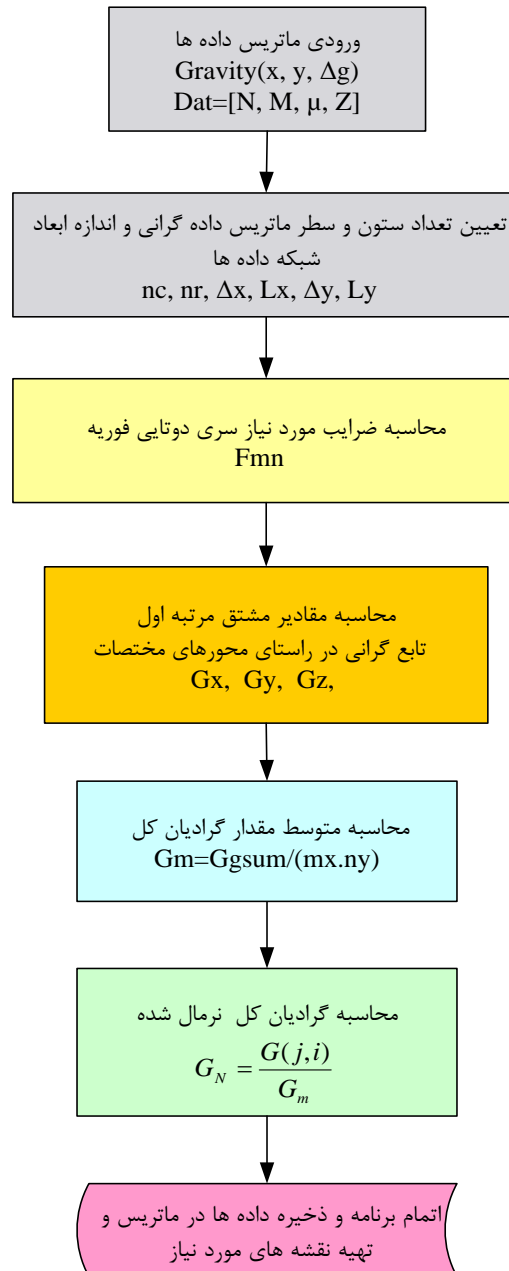
$$\frac{\partial \Delta g}{\partial z} = \frac{\pi}{L_x L_y} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[\sqrt{m^2 L_y^2 + n^2 L_x^2} F_{mn} \sin(K_m x) \sin(K_n y) \right] \times \exp(\sqrt{K_m^2 + K_n^2} z) Q_m Q_n \quad (24-5)$$

بدین ترتیب مقدار گرادیان کل نرمال گرانی سه بعدی به صورت زیر تعریف می‌شود:

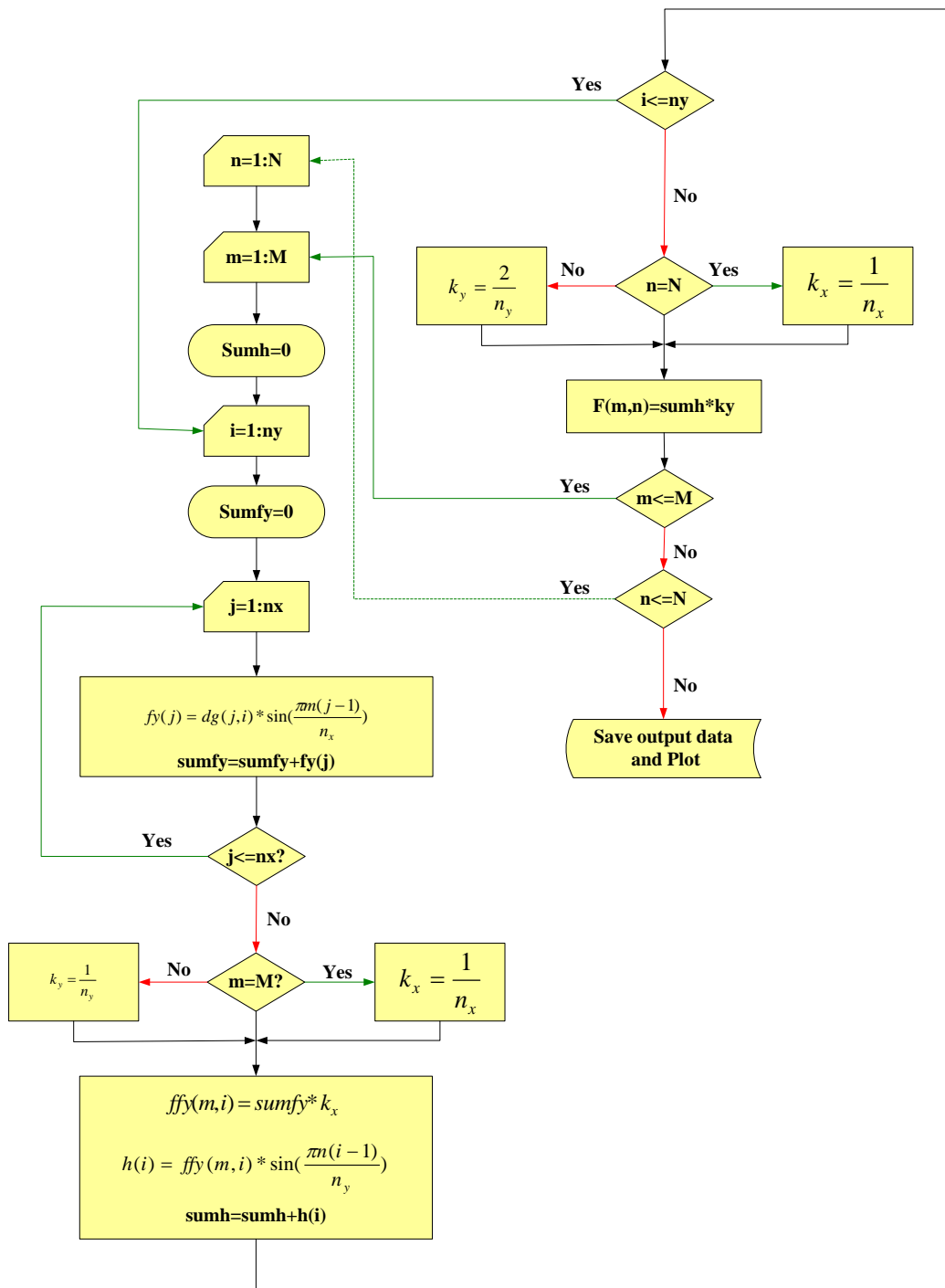
$$G_N(x_i, y_j, z_k) = \frac{G(x_i, y_j, z_k)}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q G(x_i, y_j, z_k)} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n_z \Rightarrow z_k = k \cdot dz \quad (25-5)$$

که در آن $M=p \times q$ تعداد نقاط اندازه‌گیری داده‌های گرانی روی صفحه $(x-y)$ ، $G(x_i, y_j, z_k)$ مقدار گرادیان کل در فضای سه بعدی و $G_N(x_i, y_j, z_k)$ مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی می‌باشد.

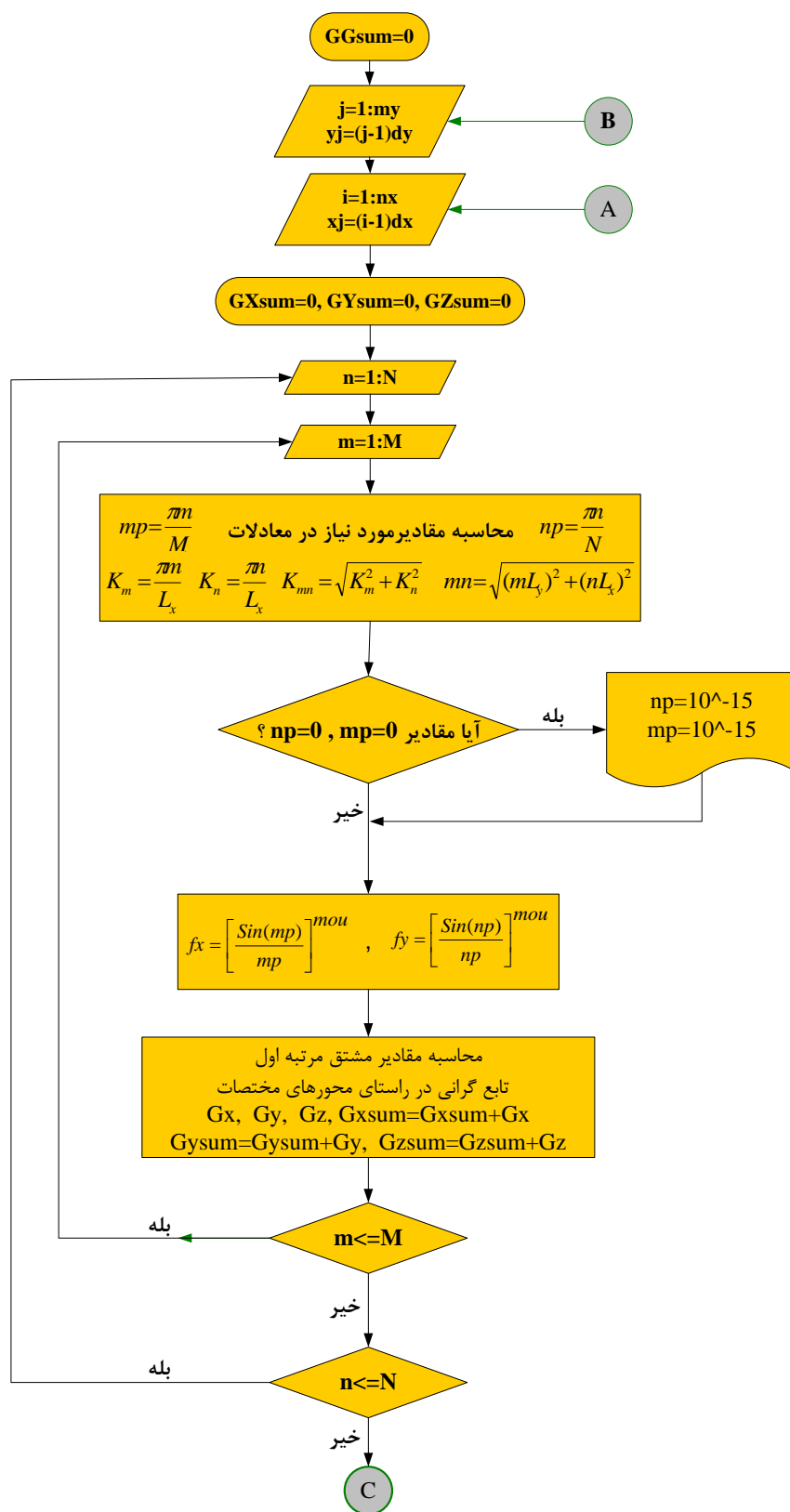
برای محاسبه گرادیان کل نرمال سه بعدی با استفاده از سری فوریه دوگانه، ابتدا الگوریتم ارائه شده در شکل‌های (۱-۵) و (۲-۵) تهیه و سپس براساس آن کدهای لازم تهیه گردید (کد NFG3D). در الگوریتم مورد نظر ابتدا دو ماتریس خوانده می‌شود که یکی فایل داده‌ای مورد نیاز گرانی در یک شبکه منظم است و دیگری مقادیر مورد نیاز برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال نظیر تعداد هارمونیک در دو جهت x و y ، مقدار توان تابع هموارساز لانکروس و عمق افق مورد نظر می‌باشد. سپس براساس ماتریس داده‌ها مقادیر سطرها و ستون‌ها و همچنین ابعاد شبکه اندازه‌گیری داده‌ها تعیین و مقادیر ضرایب سری فوریه محاسبه می‌شود. در مراحل بعدی مقادیر مشتق‌های مرتبه اول جهت محاسبه مقدار گرادیان کل در هر نقطه از شبکه داده‌ها محاسبه شده و در نهایت مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی هر یک از نقاط در افق مورد نظر محاسبه می‌شود. خروجی برنامه بسته به نیاز می‌تواند به صورت یک نقشه کنتوری و همچنین ماتریس داده‌ها باشد.



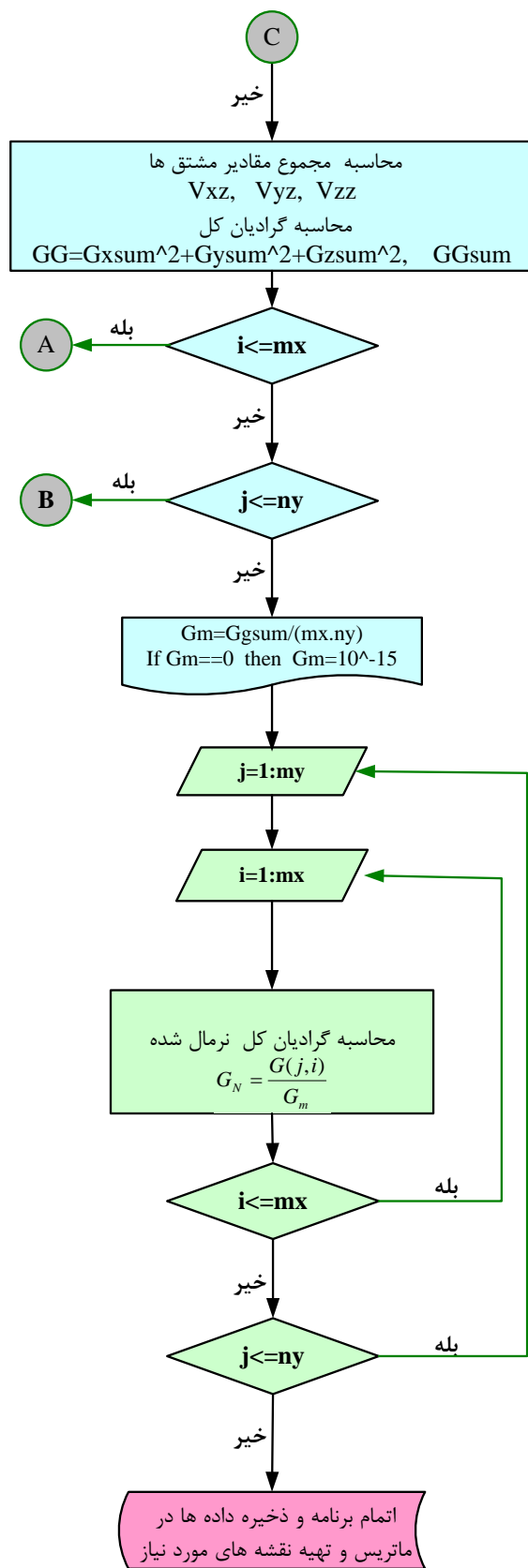
شکل ۵-۱: فلوچارت اصلی محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی با سری فوریه دو بعدی



شکل ۵-۲-الف: فلوجارت محاسبه ضرایب سری فوریه دو بعدی (دوگانه)



شکل ۵-۲-ب: فلوجارت محاسبه مقادیر مشتق های سه گانه در سه جهت



شکل ۵-۲-ج: فلوچارت محاسبه مقدار گرادیان کل و گرادیان کل نرمال سه بعدی

۵-۴- مدل سازی ساختارهای سه بعدی

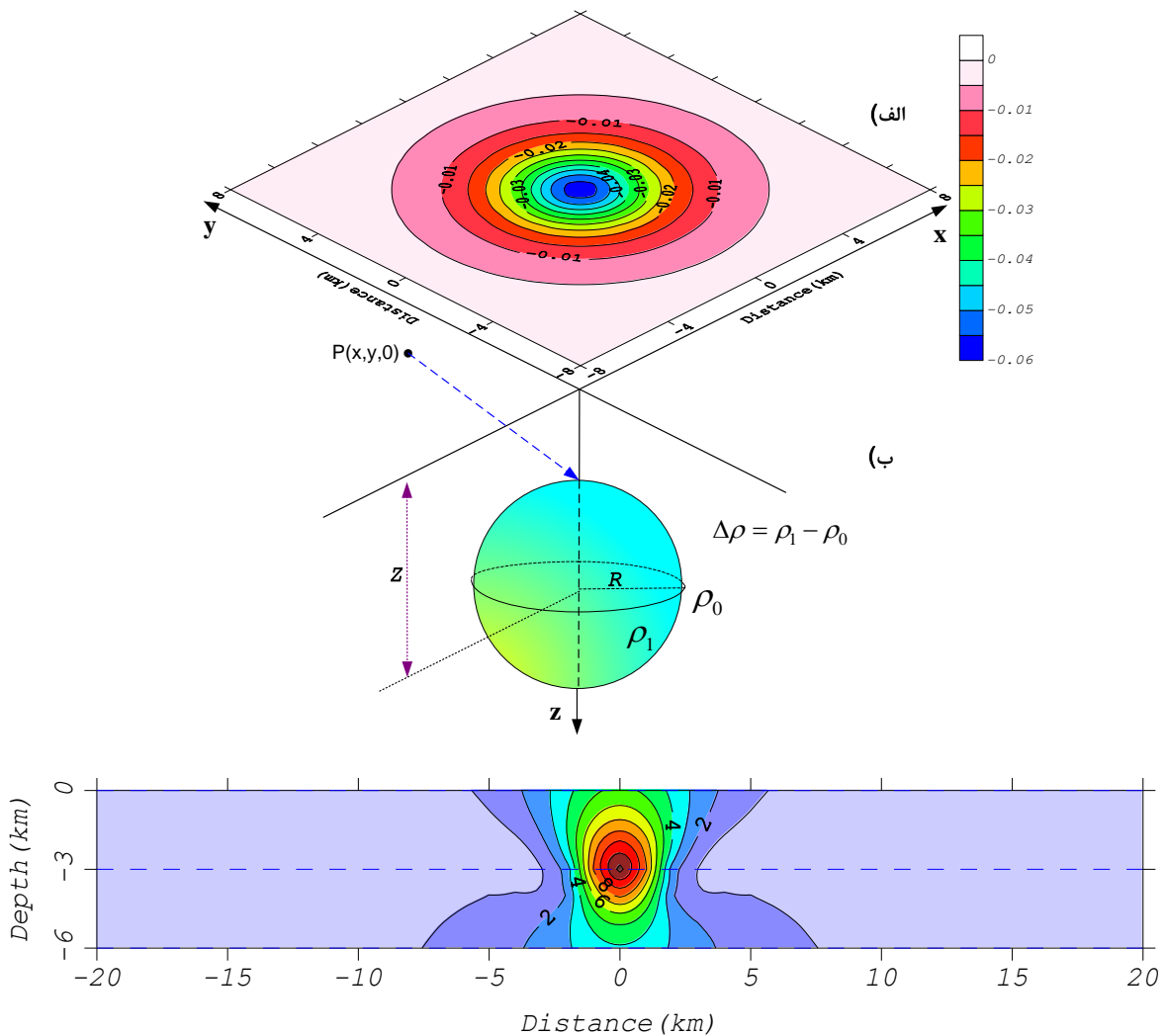
همان طوری که می‌دانیم بیشتر ساختمان‌های زمین‌شناسی موجود در طبیعت دارای ساختار سه بعدی هستند بنابراین بررسی این ساختارها به صورت سه بعدی نتایج معتبرتری ارائه می‌نماید. به این منظور تعدادی مدل سه بعدی تداعی‌کننده ساختارهای سه بعدی زمین‌شناسی از جمله گنبد نمکی تهیه گردید و از روش گرادیان کل نرمال سه بعدی معرفی شده برای تفسیر و آشکارسازی آنومالی گرانی ناشی از آن‌ها استفاده شد. در این راستا ابتدا از مدل‌های ساده هندسی سه بعدی نظیر کره و استوانه قائم استفاده شد و در ادامه مدل‌های پیچیده تله نفتی مانند تاقدیس و گنبد نمکی بررسی گردید.

۵-۴-۱- مدل کره

بسیاری از پژوهشگران [Nettelton, 1976; Mohan et al, 1986; Shaw and Agarwal, 1990; Salem et al, 2003] برای مطالعه و مدل‌سازی گنبدهای نمکی، بیشتر از یک مدل کره استفاده نموده‌اند. به این ترتیب ابتدا ساده‌ترین مدل مصنوعی که به نوعی متناسب با ساختار گنبد نمکی است به عنوان اولین مدل سه بعدی لحاظ گردید. شکل (۵-۳-ب) یک کره مدفون در عمق ۳ کیلومتری را نشان می‌دهد که در آن Z عمق مرکزی کره، R شعاع کره، L_x و L_y ابعاد محدوده محاسبه داده‌های گرانی و $\Delta\rho$ اختلاف چگالی کره نسبت به سنگ‌های اطراف آن است. اثر گرانی ناشی از کره مدفون با مقادیر مندرج در جدول (۵-۱) بر روی نقاط به فاصله مشخص از پروفیل و بر روی یک شبکه منظم به کمک معادله (۴-۸) محاسبه و در شکل (۵-۳-الف) نشان داده شده است.

با داشتن مقدار اثر گرانی این کره روی یک شبکه منظم به ابعاد 40×40 کیلومتر (البته در شکل برای نمایش بهتر کم شده است)، مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی روی پروفیل گذرنده از مرکز آنومالی شکل (۵-۳-الف) به روش گرادیان کل نرمال دو بعدی و همچنین روی کلیه نقاط اندازه‌گیری روی شبکه به روش سه بعدی آن محاسبه می‌شود. شکل (۵-۳-ج) مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی

گرانی روی پروفیل گذرنده از مرکز آنومالی با لحاظ نمودن تعداد جملات هارمونیک $N=48$ نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود منحنی‌های بسته بیشینه محل و موقعیت جسم آنومال را در عمق $Z=3$ کیلومتری نشان می‌دهد.



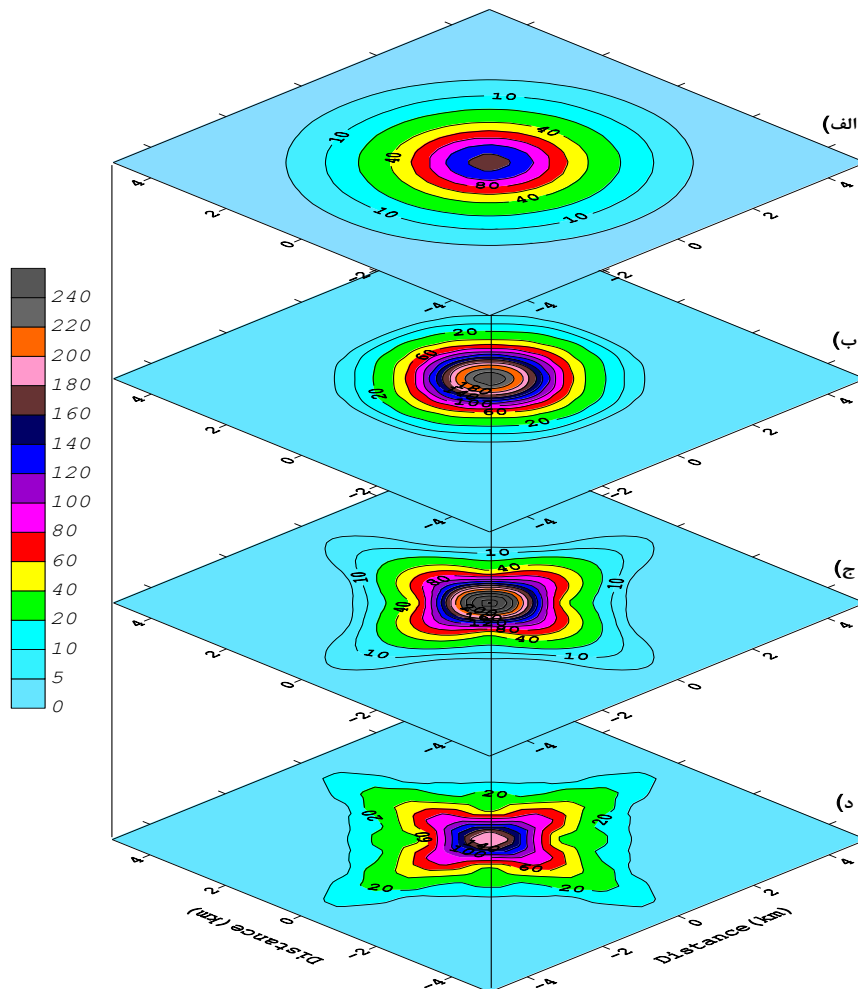
شکل ۳-۵: الف) اثر گرانی کره مدفون در عمق ۳ کیلومتری، ب) مدل کره مدفون در عمق ۳ کیلومتری و ج) مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی روی پروفیل گذرنده از مرکز آنومالی ($y=0$) با $N=48$

جدول ۱-۵: مقادیر عددی پارامترهای مدل کره مدفون

R(m)	Z(km)	$\Delta\rho(\text{gr/cm}^3)$	$L_y(\text{km})$	$L_x(\text{km})$
۵۰۰	۳	-۰/۱۵	۴۰	۴۰

با توجه به این که با تعداد جملات هارمونیک $N=48$ بهترین انطباق بین عمق واقعی مدل و موقعیت منحنی‌های بیشینه گرادیان کل نرمال روی پروفیل دیده می‌شود. بنابراین این تعداد هارمونیک‌ها به عنوان تعداد جملات بهینه منظور می‌شود. با توجه به نوع مدل و عمق سطوح بالایی و

پایینی مدل، مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی در عمق‌های مختلف از ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری به فواصل عمقی ۵۰۰ متری با لحاظ نمودن تعداد هارمونیک ۴۸ در جهت محورهای X و Y محاسبه گردید که نتایج برخی از آنها در شکل (۴-۵) ارائه شده است.



شکل ۴-۵: مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی در عمق‌های مختلف برای مدل کره مدفون شکل (۳-۵)، الف) افق ۲ کیلومتری ب) افق ۳ کیلومتری، ج) افق ۴ کیلومتری و د) افق ۵ کیلومتری (برای مشاهده واضح‌تر ابعاد شبکه کوتاه‌تر رسم شده است)

مطابق شکل (۴-۵) با افزایش عمق محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال در افق‌های پایین‌تر، موقعیت منحنی‌های بسته نشانگر جسم آنومال نیز تغییر محسوسی نشان می‌دهد. به طوری که با گذر از عمق مرکزی کره ($Z=3$) اغتشاشاتی روی منحنی‌ها ظاهر می‌شود که نشان دهنده خارج شدن از موقعیت جسم آنومال است. بنابراین به این ترتیب می‌توان عمق کره مدفون را تخمین زد. هر چند با افزایش

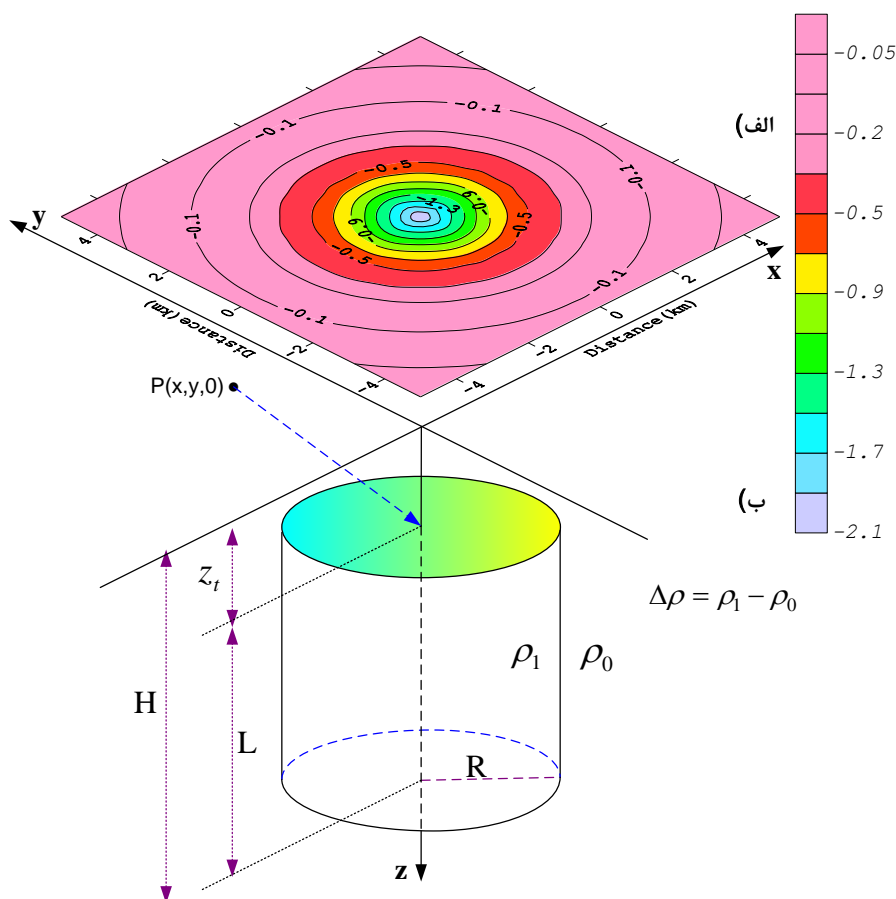
عمق گسترش میزان اغتشاشات افزایش می‌یابد ولی موقعیت منحنی‌های بیشینه NFG بر روی هر افق که بیانگر وجود جسم آنومال است، به خوبی قابل مشاهده است. لذا می‌توان برای تعیین محل حفر چاه‌های اکتشافی بر روی داده‌های واقعی بر این اساس اقدام نمود. به عبارت دیگر، با این روش می‌توان بهترین و مناسب‌ترین نقاط را جهت عملیات حفاری برای دسترسی به اجسام آنومال انتخاب نمود.

۵-۴-۲- مدل استوانه قائم

مدل سودمند دیگر برای معرفی برخی ساختارهای زمین‌شناسی استوانه قائم است که برای مدل‌سازی و محاسبه اثر گرانی ساختارهای زمین‌شناسی نظیر پایپ‌های کیمبرلیتی، گنبد‌های آذرین نفوذی، گنبد نمکی نوع نفوذی [Jenkins et al, 1983]، استفاده می‌شود. در این بخش وضعیت و ویژگی‌های گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی ناشی از یک گنبد نمکی نفوذی شبیه به گنبد نمکی جزیره آوری^{۸۴} [Bates et al, 1959] با یک استوانه قائم مدل شده است. اثر گرانی این مدل با در نظر گرفتن پارامترهای مورد نیاز (جدول ۵-۲) با استفاده از الگوریتم و برنامه تهیه شده، در یک شبکه منظم محاسبه گردید که در شکل (۵-۵) ارائه شده است.

با داشتن اثر گرانی این مدل در محدوده‌ای به ابعاد 40×40 کیلومتر، مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی روی پروفیل گذرنده از مرکز آنومالی و همچنین روی کلیه نقاط اندازه‌گیری روی شبکه محاسبه می‌شود. شکل (۵-۶) مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی روی پروفیل گذرنده از مرکز آنومالی (الف) با تعداد جملات هارمونیک متفاوت را نشان می‌دهد. در این حالت منحنی‌های بسته بیشینه محل و موقعیت جسم آنومال را در عمق‌های متفاوت مانند سطح زیرین، عمق میانی و سطح بالایی را بسته به انتخاب تعداد جملات هارمونیک مختلف نشان می‌دهد.

^{۸۴} . Avery



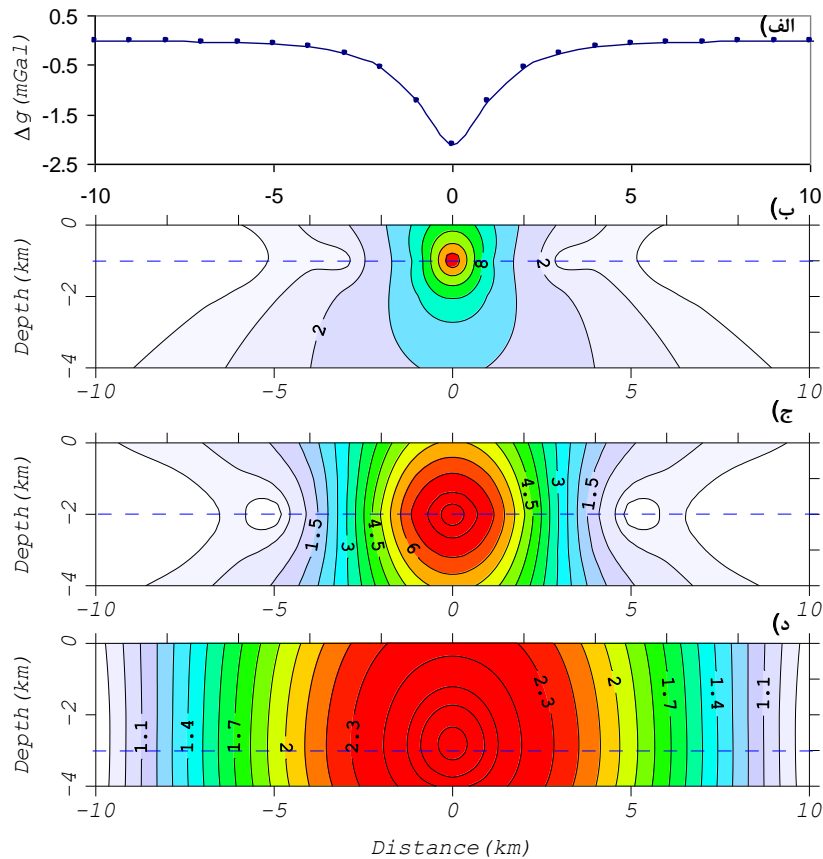
شکل ۵-۵: الف) اثر گرانی مدل استوانه قائم، ب) مدل استوانه قائم مدفون در عمق یک کیلومتری

جدول ۵-۲: پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی استوانه قائم

مشخصات استوانه	مقادیر عددی
شعاع استوانه R	۰/۵ کیلومتر
عمق سطح بالای استوانه Z_t	۱ کیلومتر
عمق سطح زیرین استوانه H	۳ کیلومتر
اختلاف چگالی نسبت به اطراف $\Delta\rho$	۰/۱- گرم بر سانتی متر مکعب
طول و عرض شبکه داده ها	۴۰×۴۰ (کیلومتر)

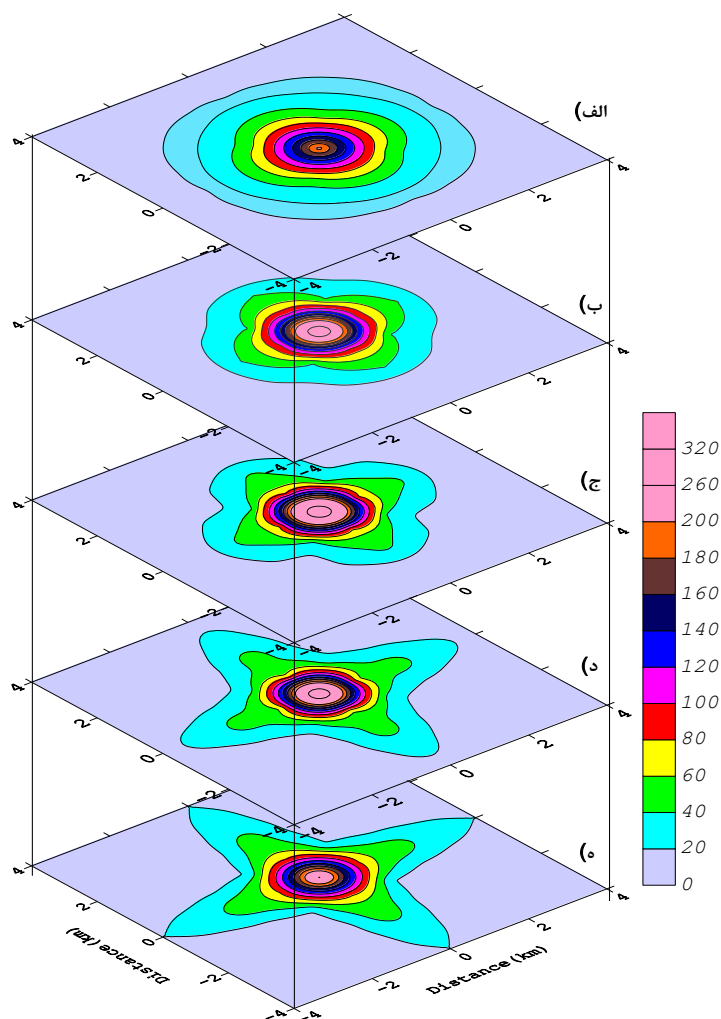
به این ترتیب زمانی که تعداد جملات هارمونیک ($N=9$) است، محل و موقعیت بیشینه منحنی‌های گرادیان کل نرمال عمق کف استوانه را نشان می‌دهد. و با افزایش تعداد جملات موقعیت عمق مرکزی استوانه ($N=28$) و عمق سطحی بالایی ($N=63$) را نشان می‌دهد. در مدل استوانه‌ای یا یک تله نفتی گنبدی شکل با حالت استوانه‌ای مشخص نمودن عمق سطح بالایی آن مهم می‌باشد. بنابراین با منظور نمودن عدد ($N=63$) به عنوان تعداد جملات هارمونیک بهینه برای نشان دادن سطح بالایی مدل،

مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی این مدل در عمق‌های مختلف محاسبه گردید و نتایج آن در شکل (۷-۵) ارائه شده است.



شکل ۷-۵: الف) اثر گرانی استوانه قائم مدفون در عمق یک کیلومتری بر روی پروفیل گذرنده از مرکز آنومالی مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی استوانه روی پروفیل گذرنده از مرکز استوانه ب) $N=63$ ، ج) $N=28$ ، د) $N=9$

مطابق شکل (۷-۵) با افزایش عمق محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال در افق‌های پایین‌تر، موقعیت منحنی‌های بسته نشانگر جسم آنومال نیز تغییر محسوسی نشان می‌دهد. به طوری که با گذر از عمق سطح بالایی مدل ($Z=1$ km) اغتشاشاتی روی منحنی‌ها ظاهر می‌شود که نشان دهنده خارج شدن از موقعیت جسم آنومال است (شکل‌های ۷-۵ ج، د). بنابراین به این ترتیب می‌توان عمق استوانه مدفون را تخمین زد. هر چند با افزایش عمق گسترش میزان اغتشاشات افزایش می‌یابد ولی موقعیت افقی مرکز مدل به خوبی در هر افق قابل مشاهده است.



شکل ۵-۷: مقادیر گرادیان کل شمال سه بعدی آنومالی گرانی مدل استوانه قائم مدفون در عمق ۱ کیلومتری (شکل ۵-۵) الف) عمق ۵۰۰، ب) عمق ۸۰۰، ج) عمق ۱۰۰۰، د) عمق ۱۵۰۰، ه) عمق ۲۰۰۰ متری

۵-۴-۳- مدل تاقدیس سه بعدی

چنانچه پیشتر نیز ذکر گردید، محاسبه اثر گرانی ساختارها و تله‌های نفتی و مخازن هیدروکربوری با توجه به شرایط پیچیده آن کاری مشکل است. به این دلیل برای مدل‌سازی ساختارهای تاقدیسی حاوی هیدروکربور یا فاقد آن از یک عرقچین کروی استفاده می‌شود. با لحاظ نمودن شرایط واقعی مخازن به لحاظ عمق، گسترش و اختلاف چگالی پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه اثر گرانی تعیین گردید. در این مدل‌سازی ابعاد شبکه اندازه‌گیری با توجه به عمق جسم آنومال، 26×26 کیلومتر مربعی طراحی گردید و اثر گرانی ناشی از توده آنومال به فواصل ۵۰۰ متر روی شبکه مربعی محاسبه

شد. برای محاسبه اثر گرانی این مدل در دو حالت فاقد تله‌نفتی و همراه با تله‌های حاوی مواد هیدروکربوری از فلوچارت و برنامه نوشته شده [Anticline3D] استفاده گردید.

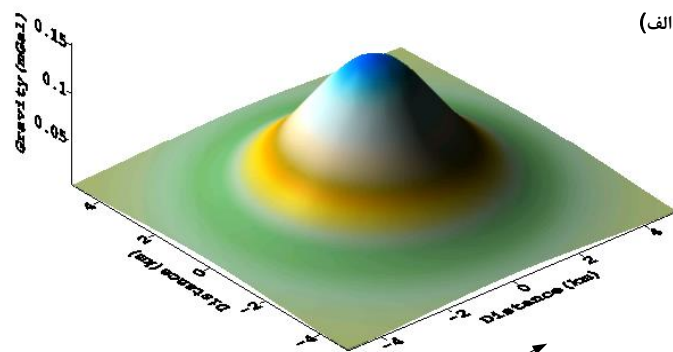
۵-۳-۱- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی ناشی از یک تاقدیس فاقد هیدروکربور

مطابق شکل (۵-۸-ب) با داشتن مقادیر اختلاف چگالی تاقدیس و محیط اطراف آن ($\Delta\rho$) و سایر پارامترهای مورد نیاز (جدول ۵-۳) اثر گرانی ناشی از تاقدیس فاقد مواد هیدروکربوری روی یک شبکه منظم محاسبه گردید.

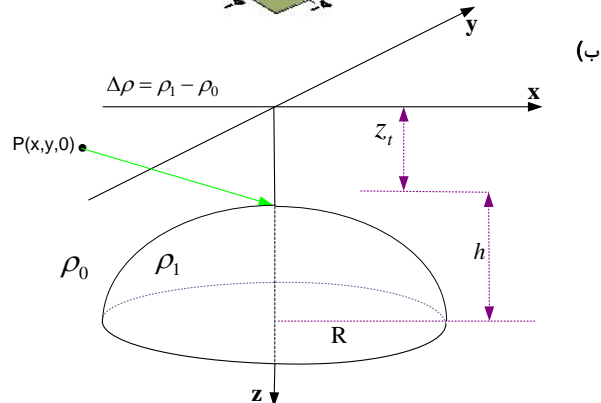
جدول ۵-۳: پارامترهای مورد استفاده در مدل تاقدیس سه بعدی فاقد هیدروکربور

مشخصات تاقدیس	تاقدیس فاقد مواد هیدروکربوری
عرض کف تاقدیس D (نصف عرض کف تاقدیس R)	۲ کیلومتر
عمق کف تاقدیس $H=Z_1+h$	۲ کیلومتر
ارتفاع تاقدیس از کف h	۲۰۰ متر
اختلاف چگالی تاقدیس با محیط اطراف آن $\Delta\rho_1$	۰/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب

برای محاسبه اثر گرانی (شکل ۵-۸-الف) از الگوریتم و برنامه کامپیوتری تهیه شده به روش برانبارش لایه‌های افقی استفاده گردید. سپس برای تعیین تعداد جملات بهینه هارمونیک، مقدار گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی حاصل از مدل روی پروفیل گذرنده از مرکز آنومالی با تعداد زیادی از جملات هارمونیک محاسبه گردید. با رسم نمودار تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات، عدد $N=31$ به عنوان مقدار بهینه تعداد هارمونیک‌ها انتخاب شد. با در نظر گرفتن مقدار $N=31$ برای تعداد جملات سری فوریه دو بعدی، مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی بر روی تمام نقاط محاسبه‌ای شبکه تعیین گردید و نقشه مقادیر NFG3D برای عمق‌های مختلف رسم گردید (شکل ۵-۹).



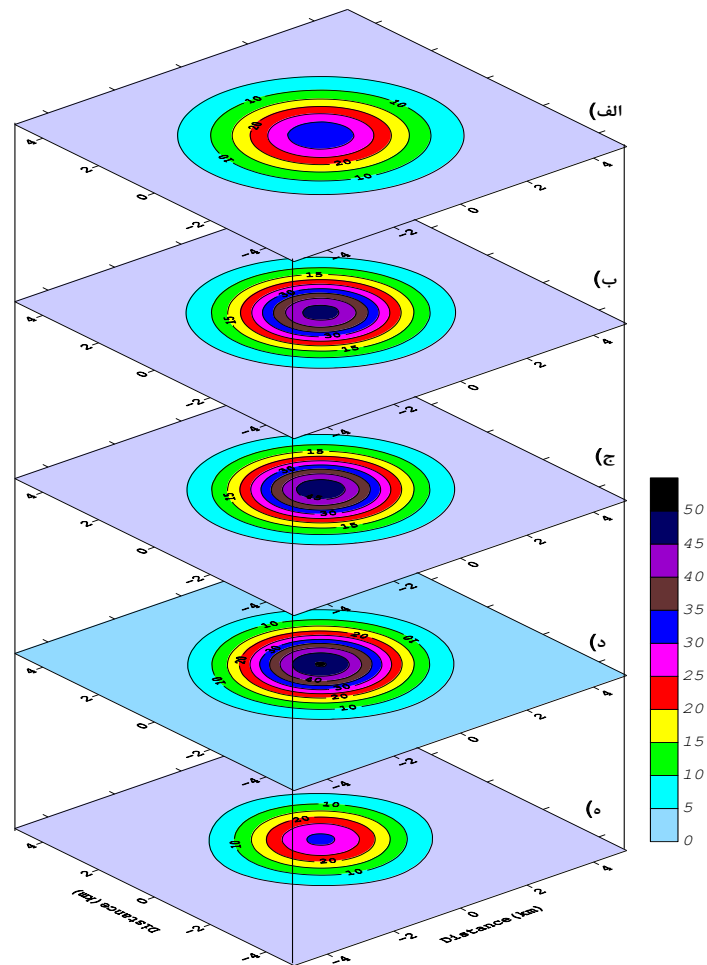
(الف)



(ب)

شکل ۵-۸: الف) اثر گرانی سه بعدی ناشی از یک تاقدیس سه بعدی فاقد هیدروکربور، ب) مدل سه بعدی یک تاقدیس فاقد هیدروکربور، p نقطه محاسبه‌ای روی سطح اندازه‌گیری می‌باشد.

مطابق شکل (۵-۹)، موقعیت تاقدیس در مقاطع افقی گرادیان کل نرمال سه بعدی در عمق‌های مختلف به وسیله یک مقدار بیشینه آن مشخص شده است. با منظور نمودن تعداد جملات هارمونیک دو بعدی این وضعیت به صورت منحنی‌های بسته دایره‌ای شکل (بستگی به توده آنومال) ادامه می‌یابد. با افزایش عمق گسترش، محدوده مقادیر بیشینه روی مقاطع تغییر محسوسی دارد که با تغییر رنگ قرمز به قهوه‌ای به خوبی دیده می‌شود (شکل ۵-۹-الف، ب). این حالت پس از عبور از عمق ۲ کیلومتری (عمق کف تاقدیس) مجدداً تکرار می‌شود به این ترتیب سطح بالایی و پایینی تاقدیس مشخص می‌گردد. از طرفی وجود تنها منحنی‌های بیشینه این موضوع نیز بیان می‌نماید که در این تاقدیس هیچگونه اختلاف چگالی ناشی از وجود مواد هیدروکربوری دیده نمی‌شود. این موضوع در بخش بعدی بیشتر تشریح می‌شود.

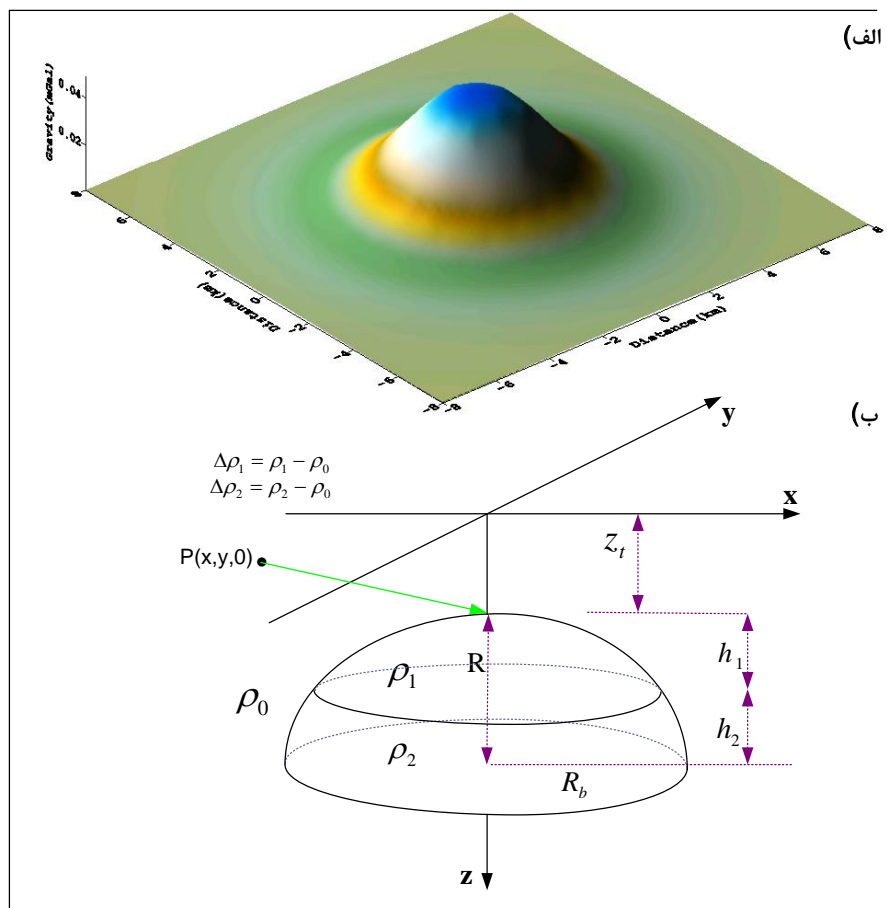


شکل ۵-۹: مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی از یک مدل تاقدیسی فاقد هیدروکربور (شکل ۵-۸) با تعداد هارمونیک‌های $M=N=31$ برای عمق‌های الف) ۱۰۰۰، ب) ۱۸۰۰، ج) ۲۰۰۰، د) ۲۵۰۰، ه) ۳۰۰۰ متری

۵-۴-۳-۲- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی ناشی از یک تاقدیس حاوی هیدروکربور

به منظور بررسی ویژگی‌های گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی حاصل از یک تاقدیس حاوی مواد هیدروکربوری و شناسایی این گونه ساختارها از ساختارهای غیر هیدروکربوری، مدلی همانند شکل (۵-۱۰-ب) طراحی گردید. این مدل که یک عرقچین کروی است به دو بخش مجزا با اختلاف چگالی متفاوت که نشان دهنده تفاوت چگالی ناشی از وجود مواد هیدروکربوری و آب ($\Delta\rho_1 \neq \Delta\rho_2$) می‌باشد، تشکیل شده است. پارامترهای مربوط به این مدل در جدول (۵-۴) ارائه شده است. اثر گرانی این مدل

(شکل ۵-۱۰-الف) روی یک محدوده به ابعاد (۴۰×۴۰) کیلومتر مربعی با استفاده از الگوریتم و کد تهیه شده (فصل ۳) به روش برانبارش لایه‌های مختلف [Anticline3D] محاسبه شد.



شکل ۵-۱۰: الف) اثر گرانی سه بعدی ناشی از یک تاقدیس سه بعدی حاوی هیدروکربور، ب) مدل سه بعدی یک تاقدیس حاوی هیدروکربور، p نقطه محاسبه‌ای روی سطح اندازه‌گیری می‌باشد.

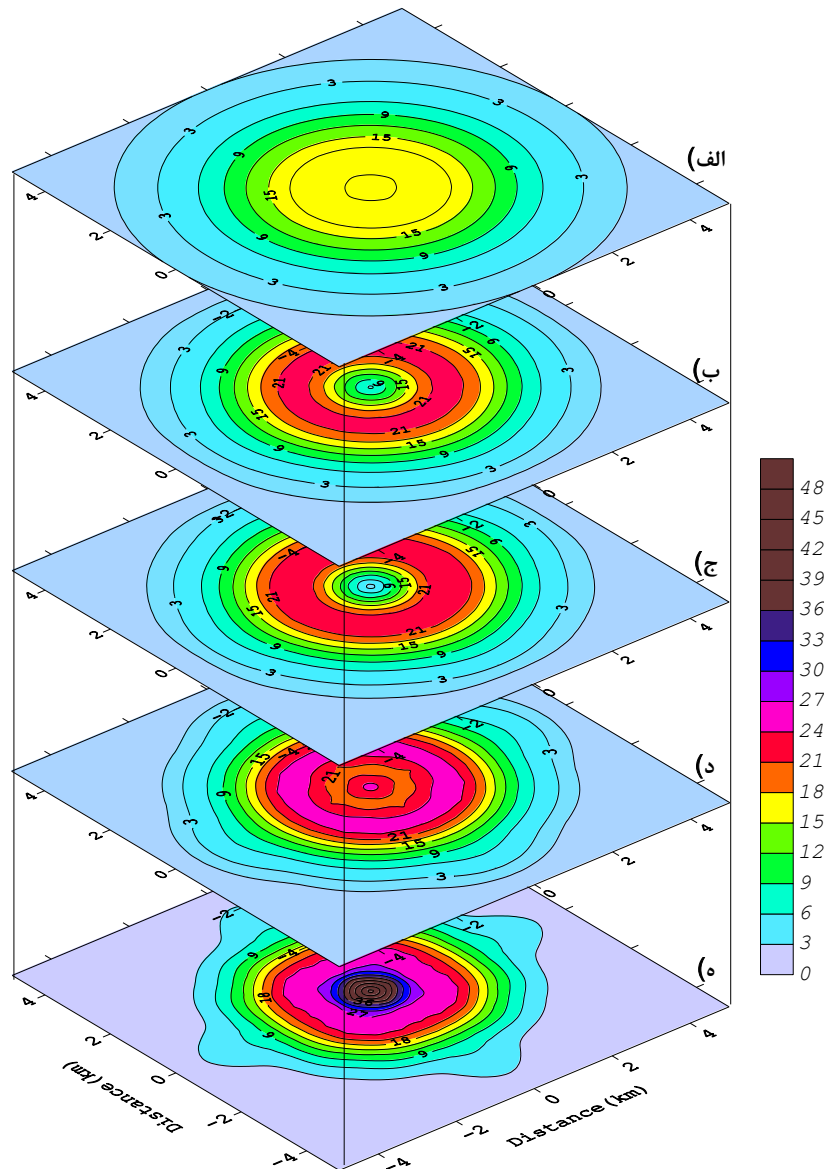
جدول ۵-۴: پارامترهای مورد استفاده در مدل تاقدیس سه بعدی حاوی هیدروکربور

مشخصات تاقدیس	تاقدیس اشباع از مواد هیدروکربوری
عرض کف تاقدیس $D=2R$	۲ کیلومتر
عمق کف تاقدیس $H=z_t+h_1+h_2$	۲ کیلومتر
ضخامت بخش بالایی تاقدیس h_1	۱۰۰ متر
ضخامت بخش پایینی تاقدیس h_2	۱۰۰ متر
اختلاف چگالی بخش بالایی $\Delta\rho_1$	۰/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب
اختلاف چگالی بخش پایینی $\Delta\rho_2$	۰/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب

به منظور محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال ابتدا تعداد جملات هارمونیک بهینه به روش تغییرات بیشینه مقادیر آن تعیین گردید. برای مدل مذکور مقدار آن عدد ۳۲ انتخاب شد. سپس براساس این تعداد جملات در راستای محورهای x و y ($N=M=32$) مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی در عمق-های مختلف محاسبه شد و در شکل (۱۱-۵) ارائه شده است.

مطابق شکل (۱۱-۵) با افزایش عمق گسترش تغییرات قابل ملاحظه‌ای در روی نقشه‌های گرادیان کل نرمال سه بعدی دیده می‌شود. روی نقشه مربوط به افق ۱۸۰۰ متری (سطح بالایی تاقدیس) و افق ۲۰۰۰ متری (سطح زیرین تاقدیس) محدوده کمینه با مقادیر خیلی کم (به رنگ آبی آسمانی در شکل (۱۱-۵-ب،ج) در مرکز مقادیر بیشینه دیده می‌شود. ولی این حالت در افق‌های بالاتر (شکل ۱۱-۵-الف) و پایین‌تر (شکل ۱۱-۵-ه، و) دیده نمی‌شود. بنابراین می‌توان گفت که با گذر از عمق آنومالی به افق‌های پایین‌تر این وضعیت (وجود کمینه‌ها درون محدوده بیشینه‌ها) عوض شده و مرکز آنومالی تاقدیس با مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال معلوم می‌گردد. وجود محدوده‌های مقادیر کمینه در بین محدوده‌های بیشینه در این نقشه‌ها تایید کننده این ویژگی در مدل دو بعدی می‌باشد. به عبارتی دیگر، همان‌طور که در فصل چهارم اشاره شد، تاقدیس حاوی مواد هیدروکربوری با ویژگی مقادیر کمینه گرادیان کل نرمال محصور به وسیله مقادیر بیشینه آن‌ها شناخته می‌شوند. به این ترتیب با مقایسه دو شکل (۱۱-۵) و (۹-۵) تفکیک دو تاقدیس سه بعدی حاوی و فاقد هیدروکربور امکان پذیر است.

همان‌طور که اشاره شد، با گذر از عمق آنومالی حاصل از وجود هیدروکربور مقادیر کمینه گرادیان کل نرمال از روی نقشه‌ها حذف شده و فقط مقادیر بیشینه‌ها ظاهر می‌شود. این حالت با افزایش عمق گسترش ادامه می‌یابد. ولی با افزایش زیاد عمق یعنی دور شدن از منبع آنومال از وسعت منحنی‌های بیشینه کم شده و در حاشیه‌ها وضعیت آشفتگی روی منحنی‌ها نمایان می‌شود.



شکل ۵-۱۱: مقادیر گرادیان کل نرمال گرانی از تاقدیس سه بعدی حاوی مواد هیدروکربوری (شکل ۵-۱۰) با تعداد هارمونیک‌های $M=N=32$ برای الف) ۱۰۰۰، ب) ۱۸۰۰، ج) ۲۰۰۰، د) ۲۵۰۰، ه) ۳۰۰۰ متری

۵-۴-۴- مدل گنبد نمکی

یکی از ساختارهای مهم زمین‌شناسی جهت تجمع مواد هیدروکربوری و تشکیل تله‌های نفتی، گنبد‌های نمکی می‌باشند. این ساختارها بسته به شرایط می‌توانند تله‌های نفتی مختلف و ارزشمندی را در کناره‌ها، یال‌ها و یا بر روی بخش بالایی آن‌ها به تنهایی و یا به صورت ترکیبی با ساختارهای تاقدیسی و گسلی تشکیل دهند [Nettleton, 1948 and 1957; Jenkins et al, 1983].

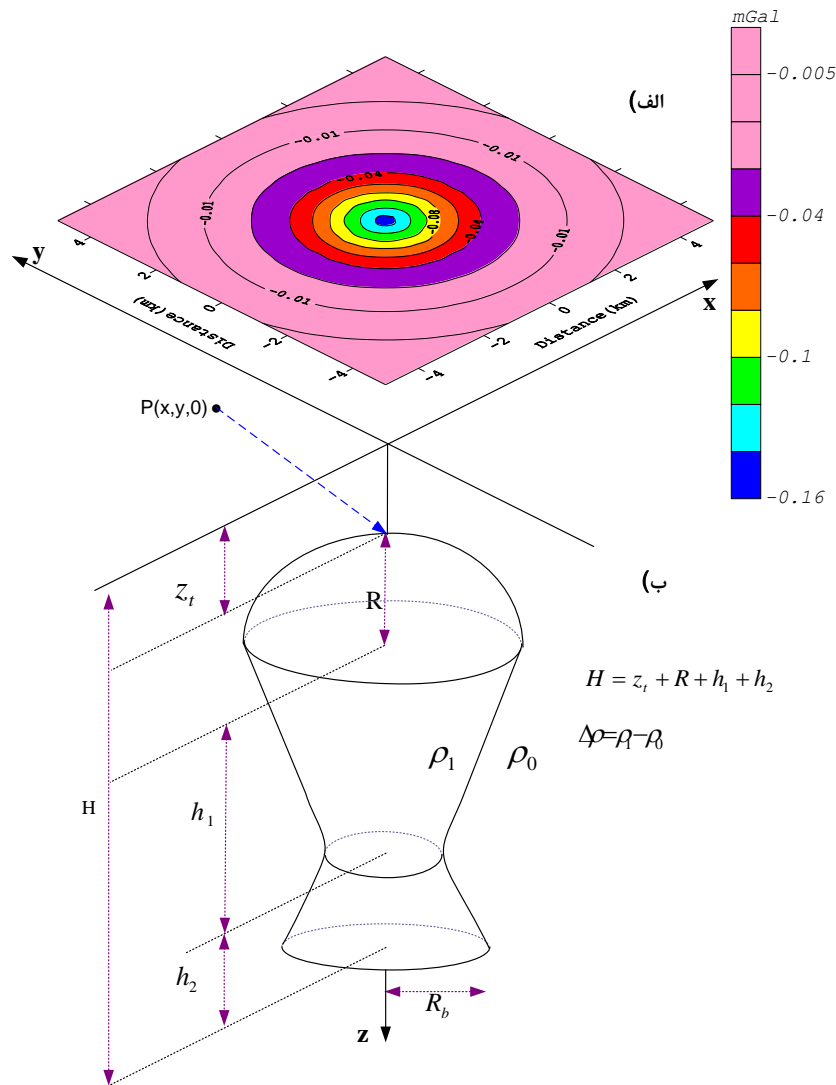
به منظور بررسی شرایط و ویژگی‌های گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی حاصل از این نوع ساختارها در حالت سه بعدی، در ادامه بحث مدل‌های سه بعدی گنبد‌های نمکی تشریح می‌شوند. با توجه به اشکال پیچیده مخازن نوع گنبد نمکی و مشکل بودن محاسبه اثر گرانی آن‌ها، مدل‌های گنبد نمکی ساده‌ای انتخاب گردید. در تعیین نوع و شکل گنبد نمکی سعی گردید مدل‌هایی طراحی شوند که تداعی کننده ساختارهای واقعی زمین شناسی باشند [Hughes, 1999] و تا حدود زیادی دارای شکل هندسی منظم بوده تا محاسبه اثر گرانی آن روی یک شبکه راحت‌تر باشند.

برای نیل به این هدف، ابتدا گنبد نمکی که هیچ گونه اثری از وجود منابع هیدروکربوری در آن وجود نداشته، مورد بررسی و پس از آن گنبد نمکی همراه با تله‌های هیدروکربوری مد نظر قرار گرفت. برای این کار شکل گنبد نمکی به صورت ترکیبی از چند ساختار جداگانه در نظر گرفته شد. اثر گرانی مدل در هر دو حالت، روی یک شبکه به وسیله الگوریتم و کدهای تهیه شده به روش برانبارش لایه-های مختلف محاسبه گردید.

۵-۴-۱- محاسبه مقدار NFG آنومالی‌های گرانی از یک گنبد نمکی

شکل (۵-۱۲-ب) نمایی از یک گنبد نمکی را نشان می‌دهد که تلفیقی از یک نیمکره در بالا، مخروط ناقص معکوس در وسط و مخروط ناقص کوچکتر در بخش زیرین می‌باشد. مقادیر پارامترهای لازم برای محاسبه اثر گرانی این مدل در جدول (۵-۵) ارائه شده است.

اثر گرانی این مدل روی یک محدوده (۴۰×۴۰) کیلومتر مربعی با توجه به عمق زیرین گنبد نمکی در یک شبکه مربعی به فواصل یک کیلومتری محاسبه گردید و با توجه به اینکه نمای سه بعدی آن به علت مقادیر منفی به خوبی دیده نمی‌شود مقادیر گرانی به صورت نقشه دو بعدی در شکل (۵-۱۲-الف) ارائه شده است.



شکل ۵-۱۲: الف) اثر گرانی ناشی از یک گنبد نمکی، ب) مدل سه بعدی یک گنبد نمکی، p نقطه محاسبه‌ای روی سطح اندازه‌گیری می‌باشد.

همچنین با توجه به کوچک بودن وسعت آنومالی گرانی در شبکه محاسبه داده‌ها، برای نمایش واضح تر تغییرات مقادیر میدان گرانی و همچنین در مورد مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی، شبکه به صورت (۱۰×۱۰) کیلومتر مربع رسم شده است.

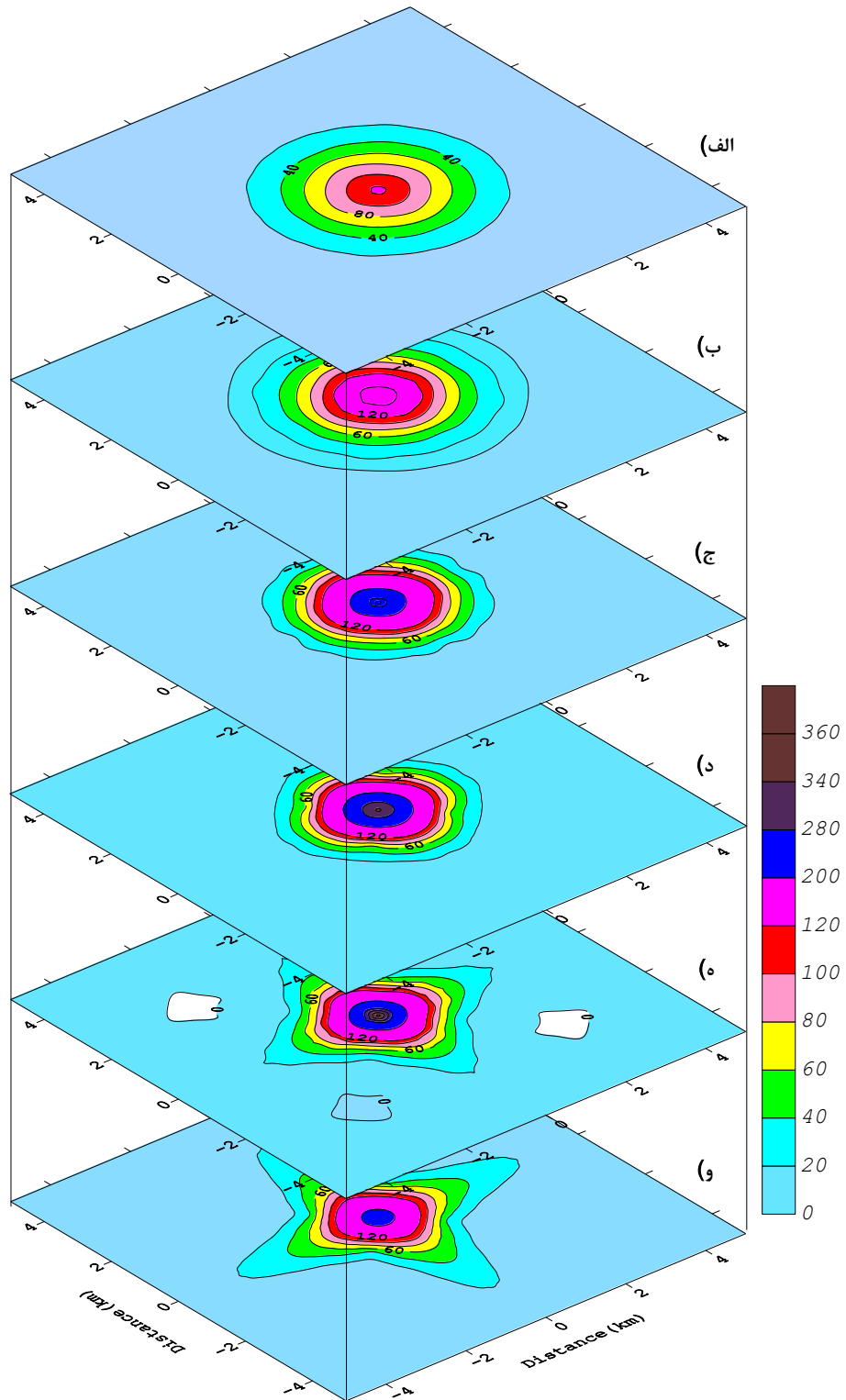
برای این مدل با توجه به عمق سطح بالا و کف گنبد نمکی، وضعیت گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی در افق‌های عمقی تا ۳۰۰۰ متری مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی از الگوریتم و برنامه تهیه شده [SaltDome3D] استفاده گردید.

جدول ۵-۵: پارامترهای مورد استفاده در مدل گنبد نمکی شکل (۵-۱۲)

مشخصات گنبد نمکی	مقادیر پارامترهای مورد نیاز
شعاع بخش بالای گنبد نمکی R	۰/۵ کیلومتر
شعاع قاعده بالایی مخروط کوچک R_t	۰/۲۵ کیلومتر
شعاع قاعده پایینی مخروط کوچک R_b	۰/۳۲۵ کیلومتر
عمق سطح بالای گنبد نمکی Z_t	۱ کیلومتر
ارتفاع مخروط بالایی h_1	۱ کیلومتر
ارتفاع مخروط پایینی h_2	۰/۵ کیلومتر
عمق سطح زیرین (کف) گنبد نمکی H	۳ کیلومتر
اختلاف چگالی گنبد نسبت به محیط اطراف $\Delta\rho$	۰/۱- گرم بر سانتی متر مکعب

با معلوم بودن ساختار کلی مدل مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی برای عمق‌های ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ متری محاسبه گردید. جهت محاسبه این مقادیر لازم است که ابتدا تعداد جملات هارمونیک سری فوریه دو بعدی در دو راستای محور x و y نیاز تعیین گردد. برای تعیین این اعداد، پروفیل‌های در دو راستای مذکور تهیه و تعداد هارمونیک به روش بیشینه نسبی مقادیر NFG تخمین زده شد. با انتخاب عدد $M=N=49$ به عنوان مقدار بهینه، مقادیر NFG سه بعدی آنومالی گرانی در عمق‌های مذکور محاسبه گردید و نقشه منحنی‌های هم مقدار (مقاطع افقی) آن رسم گردید (شکل ۵-۱۳).

مطابق این شکل منحنی‌های بیشینه بسته گرادیان کل نرمال در عمق‌های مختلف یک اختلاف چگالی را مشخص می‌کند که منطبق با محل گنبد نمکی می‌باشد. به عبارت دیگر تغییر در ساختار و ظاهر منحنی‌های بیشینه گرادیان و مقادیر آن‌ها می‌تواند بیان کننده موقعیت عمقی جسم آنومال باشد. با افزایش عمق گسترش میدان، مقدار NFG در افق ۲۰۰۰ متری بیشینه می‌گردد و بعد از آن مقدار NFG کم شده و با گذر از عمق ۳۰۰۰ متری، اغتشاش در منحنی‌های آن ظاهر می‌شود که بیانگر گذر از عمق مورد نظر است.



شکل ۵-۱۳: نقشه گرادیان کل شمال سه بعدی آنومالی‌های گرانی یک گنبد نمکی (شکل ۵-۱۲) با تعداد هارمونیک $M=N=49$ در عمق‌های مختلف (الف) ۵۰۰، (ب) ۱۰۰۰، (ج) ۱۵۰۰، (د) ۲۰۰۰، (ه) ۲۵۰۰، (و) ۳۰۰۰ متری

۵-۴-۲- محاسبه مقدار NFG سه بعدی آنومالی گرانی از یک گنبد نمکی حاوی هیدروکربور

به منظور بررسی ویژگی‌های NFG سه بعدی آنومالی‌های گرانی حاصل از یک گنبد نمکی که همراه با تله نفتی باشد، مدل سه بعدی دیگری تهیه گردید. در طراحی این مدل یک بخش تله نفتی به مدل قبل اضافه شد به طوری که در اطراف یال‌های گنبد نمکی یک مخزن هیدروکربوری به صورت یک مخروط ناقص با شعاع قاعده بیشتر محاط بر آن انتخاب گردید. بدین ترتیب در حاشیه مخروط ناقص وارونه، یک مخروط ناقص نرمال محاط بر گنبد با چگالی متفاوت نسبت به سنگ‌های دربرگیرنده جهت تله‌های نفتی مد نظر قرار گرفت (شکل ۵-۱۴-ب).

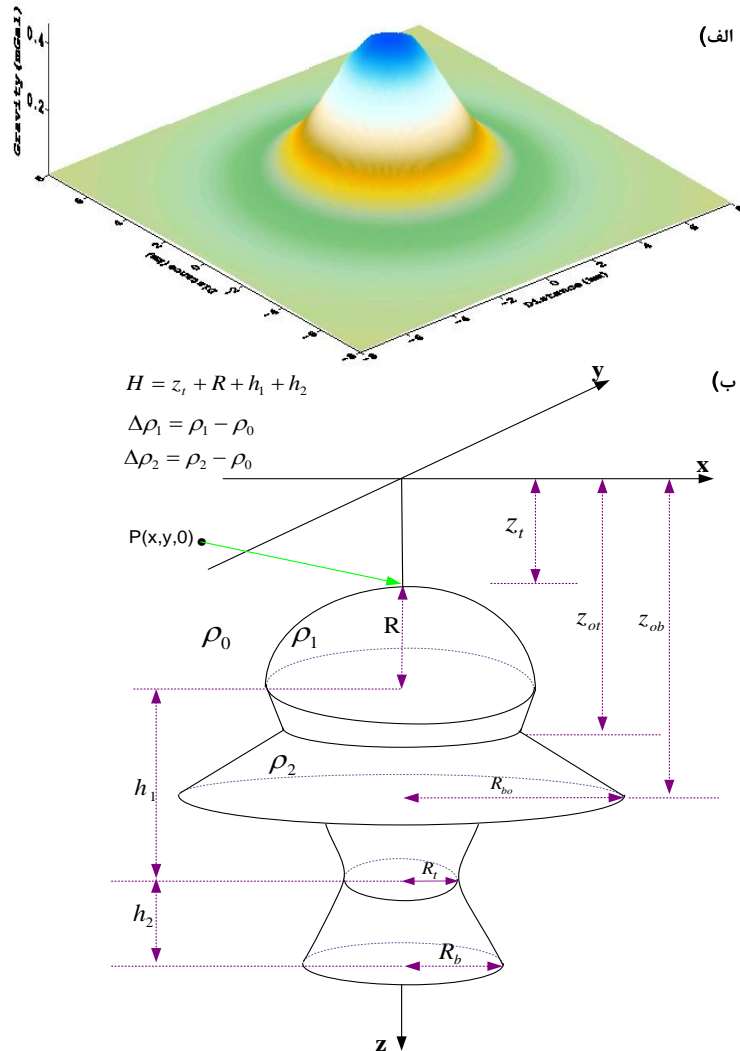
پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه اثر گرانی ناشی از این مدل همانند شعاع نیمکره بالایی، عمق سطح رویی و زیرین گنبد، عمق سطح زیرین و رویی تله نفتی در جدول (۵-۶) ارائه شده است. براساس الگوریتم و کد تهیه شده، در نقاط محاسبه‌ای روی شبکه، ابتدا به طور جداگانه اثر گرانی گنبد نمکی با اجزای مختلف آن یعنی یک نیم کره در بالا و دو مخروط ناقص در بخش زیرین، و سپس بخش نفتگیر که از یک مخروط ناقص نرمال با شعاع بزرگتر به طور محاط بر گنبد است، محاسبه گردید. سپس با جمع این دو بخش مقدار اثر گرانی گنبد نمکی و نفتگیر به دست آمد (شکل ۵-۱۴-الف).

جدول ۵-۶: پارامترهای مورد استفاده در مدل گنبد نمکی به همراه تله نفتی*

مشخصات گنبد نمکی	مقادیر پارامترهای مورد نیاز
عمق سطح بالایی هیدروکربور Z_{to}	۱/۶۵ کیلومتر
عمق سطح زیرین هیدروکربور Z_{bo}	۲/۱۵ کیلومتر
شعاع مخروط تله نفتی R_0	۲/۳۵ کیلومتر
اختلاف چگالی گنبد نمکی نسبت به محیط اطراف $\Delta\rho_1$	-۰/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب
اختلاف چگالی تله نفتی نسبت به محیط اطراف $\Delta\rho_2$	+۰/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب
*: سایر پارامترهای مشابه جدول (۵-۵) می باشد.	

برای محاسبه گرادیان کل نرمال سه بعدی روی تک تک نقاط محاسبه‌ای گرانی، لازم است که مقادیر بهینه تعداد جملات سری فوریه دو بعدی در دو راستای x و y به روشی که قبلاً تشریح شد تخمین زده شود. با تخمین و انتخاب اعداد مناسب هارمونیک ($M=N=۴۵$)، مقادیر NFG برای

عمق‌های ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری به فواصل ۵۰۰ متری به تفکیک محاسبه و نقشه مقاطع افقی آن‌ها رسم گردید (شکل ۵-۱۵).

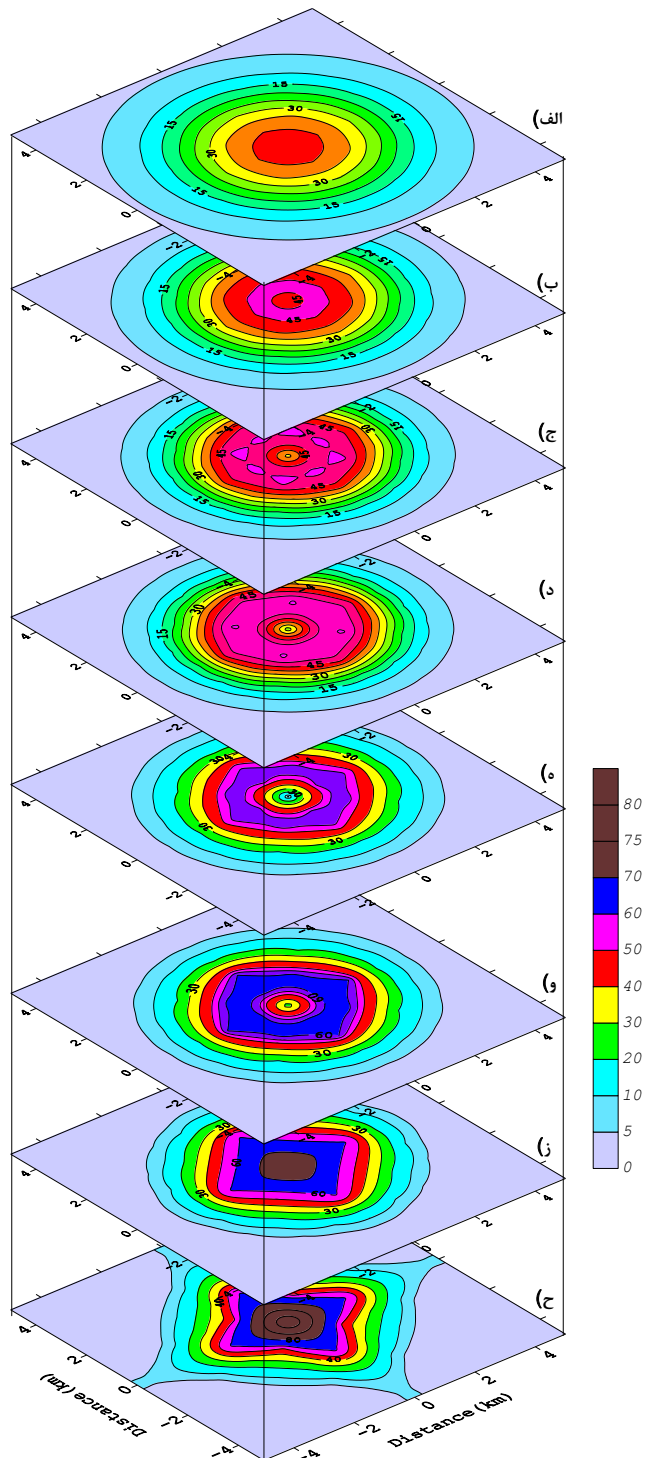


شکل ۵-۱۴: (الف) اثر گرانی مدل، (ب) مدل سه بعدی یک گنبد نمکی به همراه تله هیدروکربوری، p نقطه محاسبه‌ای روی سطح اندازه‌گیری می‌باشد.

مطابق شکل (۵-۱۵) با افزایش عمق تغییراتی در مقدار و شکل ظاهری منحنی‌های میدان گرادیان کل نرمال مربوط ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر منحنی‌های بیشینه با رنگ قهوه‌ای تیره نشانگر موقعیت جسم آنومال می‌باشد (گنبد نمکی)، ولی با افزایش عمق روی مقاطع افقی علاوه بر تغییرات مقادیر بیشینه، منحنی‌های کمینه‌ای نیز به تدریج در اشکال ظاهر و سپس محو می‌شود. مطابق شکل

(۵-۱۵-۵) مقادیر کمینه با رنگ روشن‌تر (زرد) در مرکز آنومالی ظاهر شده و در عمق ۲۰۰۰ متری

نیز با رنگ سبز تا آبی دیده می‌شود (شکل ۵-۱۵-۵).



شکل ۵-۱۵: گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی‌های گرانی از یک گنبد نمکی همراه با تله نفتی (شکل ۵-۱۴) با تعداد هارمونیک $M=N=45$ در عمق‌های الف) ۵۰۰، ب) ۱۰۰۰، ج) ۱۵۰۰، د) ۱۶۵۰، ه) ۲۰۰۰، و) ۲۱۵۰، ز) ۲۵۰۰، ح) ۳۰۰۰ متری

با مراجعه به جدول (۵-۶)، می‌توان گفت که نقشه‌های NFG در عمق‌های ۱۵۰۰ و ۲۱۵۰ متری به نوعی بیان‌کننده تغییرات چگالی ناشی از وجود مواد هیدروکربوری می‌باشد که متناسب با مقادیر عددی جدول می‌باشد. این ویژگی یعنی وجود محدوده‌های کمینه محصور با مقادیر بیشینه پس از عبور از عمق ۲۱۵۰ متری (وجود اختلاف چگالی ناشی از هیدروکربور) کاملاً از بین رفته و مجدداً مقادیر بیشینه NFG در مرکز دیده می‌شود.

مقایسه این مدل با مدل گنبد نمکی فاقد مواد هیدروکربوری نشان می‌دهد که با تهیه نقشه مقادیر گرادیان کل نرمال در افقی‌های مختلف می‌توان گنبد‌های نمکی که در اطرافش دارای تله نفتی است را نسبت به سایر انواع آن‌ها تفکیک نمود. علاوه بر این عمق تقریبی تله نفتی نیز قابل شناسایی است که می‌تواند نقش بسزایی در اکتشاف منابع هیدروکربوری به لحاظ تعیین نقاط حفاری داشته باشد.

۵-۴-۵- مدل‌های ترکیبی

در عمل ساختارها و توده‌های زمین‌شناسی خیلی پیچیده می‌باشند بنابراین شناسایی و آشکارسازی آن‌ها در کارهای اکتشافی به روش‌های تفسیر بستگی دارد که در صورت موفقیت سبب تولید نتایج مناسب‌تر خواهد شد. بنابراین برای شبیه‌سازی اشکال زمین‌شناسی در این بخش مدل ترکیبی برای ارزیابی روش گرادیان کل نرمال تهیه گردید. این مدل از پنج جسم آنومال شامل سه کره مدفون با ابعاد متفاوت، یک گنبد نمکی و یک تاقدیس حاوی هیدروکربور بوده که مشخصات و موقعیت آن‌ها در جدول (۵-۷) ارائه گردیده است. اثر گرانی این مدل روی شبکه منظم (شکل ۵-۱۶) با تهیه الگوریتم و کد محاسبه گردید.

به منظور تعیین تعداد جملات هارمونیک بهینه برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی آنومالی گرانی از این مدل، دو پروفیل در راستای AB و CD تهیه شد. این پروفیل‌ها طوری ترسیم گردیدند که از مرز اجسام آنومال گذشته و هر یک از آن‌ها از مرکز سه جسم آنومال عبور

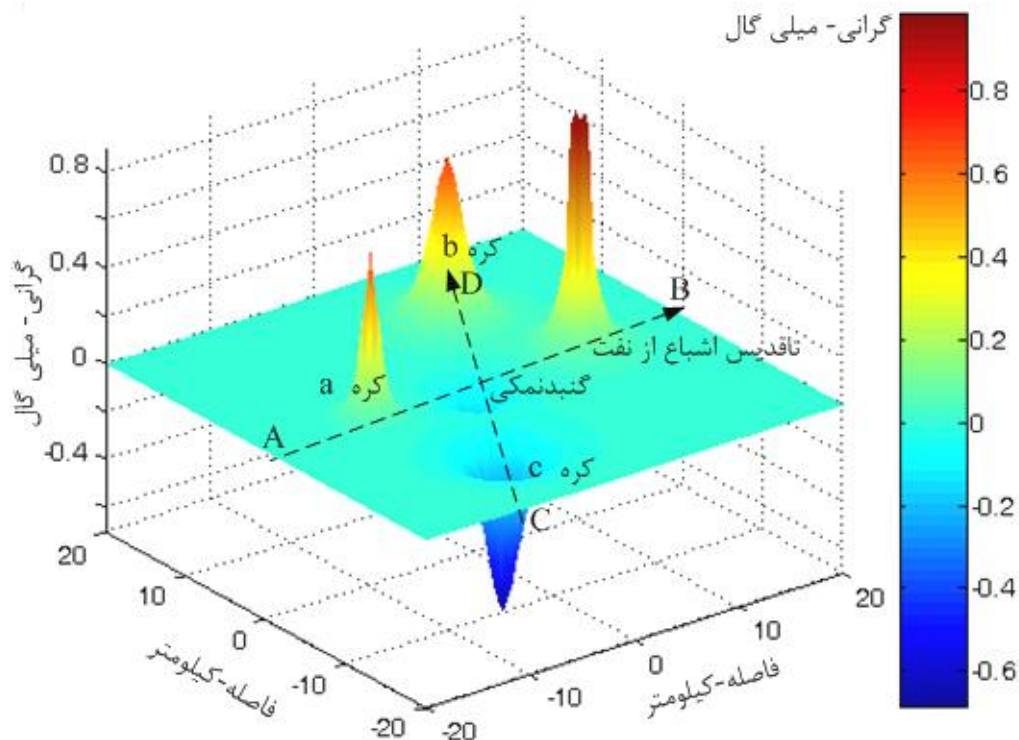
نماید. سپس با تعیین تعداد جملات بهینه $N=52$ مقادیر گرادیان کل نرمال دو بعدی در راستای دو پروفیل محاسبه گردید که مقطع NFG پروفیل AB در شکل (۵-۱۷) ارائه شده است.

جدول ۵-۷: پارامترهای مورد استفاده در یک مدل ترکیبی حاوی چند جسم آنومال

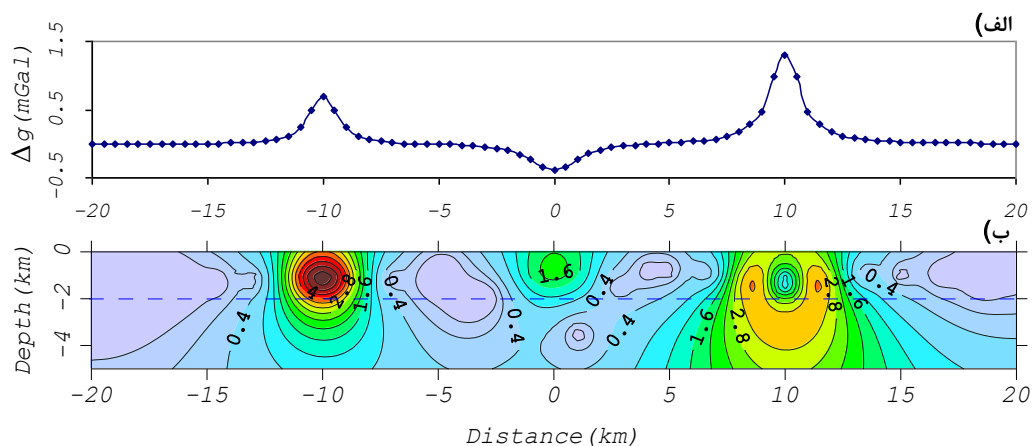
جسم آنومال		کره a	کره b	کره c	تاقدیس	گنبد نمکی
مختصات و موقعیت اجسام آنومال	X (km)	-۱۰	۵	-۵	۱۰	۰
	Y (km)	۰	۱۰	-۱۰	۰	۰
عمق تا مرکز جسم (km)		۱/۰	۲/۰	۲/۰	-	-
عمق تا سطح بالای جسم (km)		۰/۵	۱/۰	۱/۰	۱,۵	۱
شعاع جسم (km)		۰/۵	۱/۰	۱/۰	*۴/۰	۰/۵
عمق کف جسم (km)		۱/۵	۳/۰	۳/۰	۲/۰	۲/۵
اختلاف چگالی با محیط اطراف (gr/cm^3)		۰/۲	۰/۱	-۰/۱	-۰/۱ و *۰/۱	-۰/۲

*: گسترش کف (قطر) تاقدیس می باشد.

** مربوط به تاقدیس است که به دلیل وجود هیدروکربور در بخش بالا ($\Delta\rho=-0/1$) و وجود آب شور در بخش پایین ($\Delta\rho=+0/1$) دارای اختلاف چگالی متفاوت می باشد.



شکل ۵-۱۶: اثر گرانی ناشی از یک مدل ترکیبی شامل چند جسم آنومال که مشخصات آن ها در جدول (۵-۷) ارائه شده است. خطوط خط چین جهت دار پروفیل های مورد نظر را نشان می دهد.



شکل ۵-۱۷: الف) اثر گرانی ناشی از چند جسم آنومال در راستای پروفیل AB در شکل (۵-۱۶)، ب) مقطع گرادیان کل نرمال دو بعدی در راستای پروفیل AB با تعداد هارمونیک های $N=52$

مطابق شکل (۵-۱۷) موقعیت و عمق منابع آنومال در مقطع گرادیان کل نرمال دو بعدی کاملاً واضح بوده و تاقدیس اشباع از هیدروکربور نیز با یک کمینه محصور در دو بیشینه مشاهده می‌شود. به این ترتیب بدون در نظر گرفتن نوع جسم آنومال می‌توان گفت که توده سمت چپ و وسطی این پروفیل (کره a و گنبد نمکی) حاوی منابع هیدروکربوری نبوده ولی توده سمت راست (تاقدیس) از نفت اشباع می‌باشد. به عبارت دیگر به روش گرادیان کل نرمال می‌توان چند توده آنومال را در یک منطقه تا حدودی زیادی از هم تفکیک نمود.

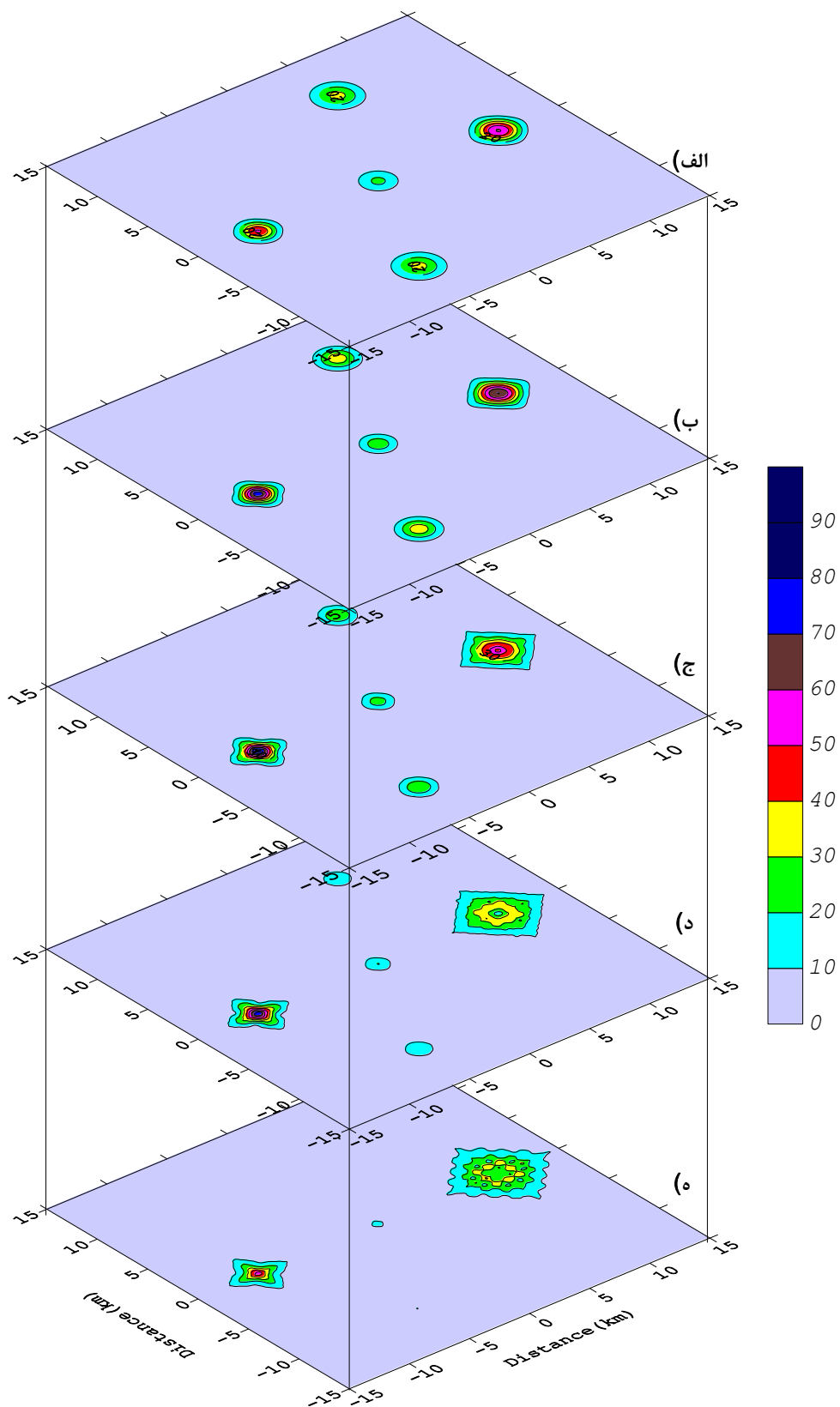
با توجه به مشخصات اجسام آنومال می‌توان گفت که عمق اجسام، بزرگی اجسام و هندسه آن‌ها در روی مقطع گرادیان کل نرمال تاثیر مستقیم دارد و سبب تولید تصاویر بهتر یا نامناسب‌تری در آشکارسازی اجسام می‌گردد. به منظور بررسی بیشتر این مدل گرادیان کل نرمال سه بعدی نیز در عمق‌های مختلف محاسبه و نقشه مقاطع افقی آن در عمق‌های ۱۰۰۰، ۱۳۰۰، ۱۵۰۰، ۱۸۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ متری رسم گردید (شکل ۵-۱۸). مطابق شکل (۵-۱۸) تفکیک و آشکارسازی اجسام آنومال به خوبی صورت گرفته و همچنین اثر وجود تاقدیس حاوی هیدروکربور نیز با یک کمینه واقع در داخل محدوده بیشینه (شکل ۵-۱۸-ج، د) مشخص شده است. با توجه به این که نمایش سه بعدی و کامل شبکه محاسبه‌ای سبب کوچک شدن اثر اجسام روی مقاطع افقی می‌گردد، برای نمایش بهتر ابعاد شبکه کمتر نشان داده شده است.

به منظور بررسی و اعتبار سنجی بیشتر روش گرادیان کل نرمال سه بعدی ارائه شده در این رساله، روش شبه سه بعدی بکار رفته توسط تران (۲۰۰۴) برای مدل مذکور مورد استفاده قرار گرفت. فایل داده‌ای گرانی حاصل از این مدل توسط کد کامپیوتری تهیه شده توسط ایشان اجرا و نتایج حاصل به صورت نقشه مقاطع افقی برای عمق‌های ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری در شکل (۵-۱۹) رسم گردید.

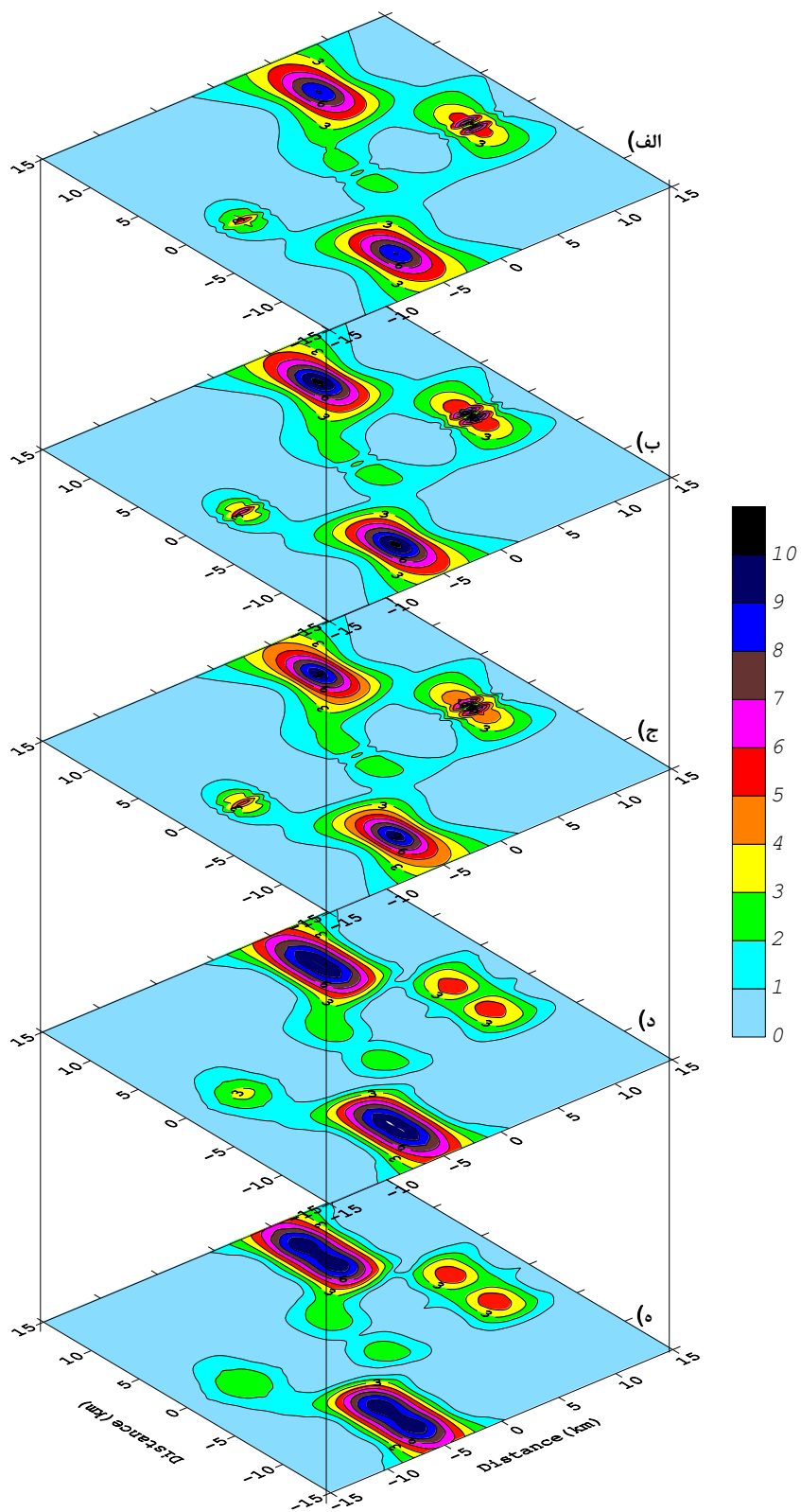
در محاسبه گرادیان کل نرمال در این حالت نیز تعداد جملات هارمونیک مورد نیاز عدد $N=52$ انتخاب گردید. مطابق شکل (۵-۱۹) اگر چه اثر ناشی از وجود پنج جسم آنومال یا به عبارتی دیگر موقعیت افقی اجسام تا حد زیادی مشخص می‌باشد ولی تفکیک آن‌ها به خوبی صورت نگرفته است. از طرف دیگر دو جسمی که به لحاظ ابعاد بزرگتر بوده‌اند (کره های b و c) دارای اثر بیشتری روی نقشه بوده و اثر گنبد نمکی (در مرکز) نقشه تا حد زیادی از بین رفته است.

علاوه بر موارد ذکر شده در بالا به نظر می‌رسد تغییری چندانی روی منحنی‌های گرادیان کل نرمال در عمق‌های مختلف اتفاق نمی‌افتد و لذا بررسی عمق اجسام آنومال امکان پذیر نمی‌باشد. با مقایسه دو شکل (۵-۱۸) و (۵-۱۹) به روشنی می‌توان دریافت که میزان کارایی و تفکیک کنندگی روش سه بعدی ارائه شده در این رساله به مراتب بهتر از روش تران [Tran, 2004] می‌باشد.

با بررسی نتایج به دست آمده از کاربرد روش گرادیان کل نرمال سه بعدی روی مدل‌های مختلف در این فصل می‌توان گفت این روش با در نظر گرفتن سری فوریه دو بعدی توانسته است تا حد زیادی مشکلات مربوط به تفکیک و آشکارسازی آنومالی‌های سه بعدی و همچنین مشخص نمودن تله‌های نفتی از سایر ساختارها را بر طرف نماید. همچنین کاربرد توام دو روش گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی روی مدل‌های مذکور در دو فصل چهارم و پنجم نشان می‌دهد که این روش نسبت به روش مرسوم تفسیر و تحلیل آنومالی‌ها از قابلیت و توانمندی بالایی برخوردار است. بنابراین به منظور بررسی بیشتر توانمندی‌های روش ارائه شده روی داده‌های واقعی میدان پتانسیل حاصل از منابع هیدروکربوری و معدنی، در فصل بعد نمونه‌هایی از داده‌های گرانی و مغناطیس مورد بحث قرار می‌گیرند.



شکل ۵-۱۸: گرادیان کل شمال سه بعدی آنومالی‌های گرانی ناشی از یک مدل ترکیبی با چند جسم آنومال (شکل ۵-۱۶) با تعداد هارمونیک $M=N=52$ در عمق‌های الف) ۱۰۰۰، ب) ۱۵۰۰، ج) ۲۰۰۰، د) ۲۵۰۰، ه) ۳۰۰۰ متری



شکل ۵-۱۹: گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی‌های گرانی یک مدل ترکیبی با چند جسم آنومال (شکل ۵-۱۶) با تعداد هارمونیک $N=52$ به روش تران [Tran, 2004] در عمق‌های الف) ۱۰۰۰، ب) ۱۵۰۰، ج) ۲۰۰۰، د) ۲۵۰۰، ه) ۳۰۰۰ متری

فصل ششم

کاربرد روش کرادیمان کل نرمال روی داده‌های واقعی

۶-۱- مقدمه

شناسایی مناطق امید بخش و پتانسیل بالا و اکتشاف منابع هیدروکربوری به وسیله روش گرانی-سنجی از مراحل آغازین هدف عملیات اکتشافی در هر منطقه است. در صورتی که از این روش به طور مناسب استفاده شود می‌تواند راهگشای مسائل مهمی برای دیگر فعالیت‌های اکتشافی نظیر روش حفاری و لرزه‌نگاری باشد. همان طوری که اشاره شد، روش گرادیان کل نرمال یکی از روش‌های قدرتمند در تفسیر داده‌های گرانی است. در فصل‌های چهارم و پنجم مدل‌سازی ساختارهای مختلف مخازن هیدروکربوری و ویژگی‌های این روش در حالت‌های دو و سه بعدی مورد بررسی قرار گرفت و علاوه بر آن با مدل‌سازی داده‌های مصنوعی، توانایی روش مذکور در شناسایی منابع نفتی تا حدودی مورد آزمون قرار گرفت. در این فصل در نظر است، به منظور اعتبار سنجی هر چه بیشتر روش گرادیان کل نرمال، از دو سری داده واقعی استفاده شود. سری اول داده‌ها مرتبط با منابع هیدروکربوری و سری دوم مربوط به ذخایر معدنی می‌باشد. داده‌های میدانی نفتی ایران مربوط به دشت آبادان، قم، قشم و حوضه طبس بوده و داده معدنی در ارتباط با کانسار آهن اُجَت آباد سمنان می‌باشد.

علاوه بر داده‌های فوق، از سه مجموعه داده صحرایی گرانی جهت ارزیابی صحت عملکرد هر چه بیشتر الگوریتم‌ها و برنامه‌های کامپیوتری تهیه شده در روش‌های گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی استفاده گردید و نتایج حاصل با نتایج روش‌های بکار رفته توسط دیگران مقایسه گردید. این مجموعه داده‌ها قبلاً توسط سایر پژوهشگران با روش‌های دیگری مورد بررسی قرار گرفته و وضعیت آنومالی‌ها توسط داده‌های اکتشافی مختلف تایید شده است. دو مجموعه از داده‌های گرانی فوق مرتبط به اکتشاف منابع هیدروکربوری جنوب شرق ویتنام و گنبد نمکی هومبل در آمریکا و دیگری مربوط به اکتشاف معدن مس موبرون کانادا بوده است.

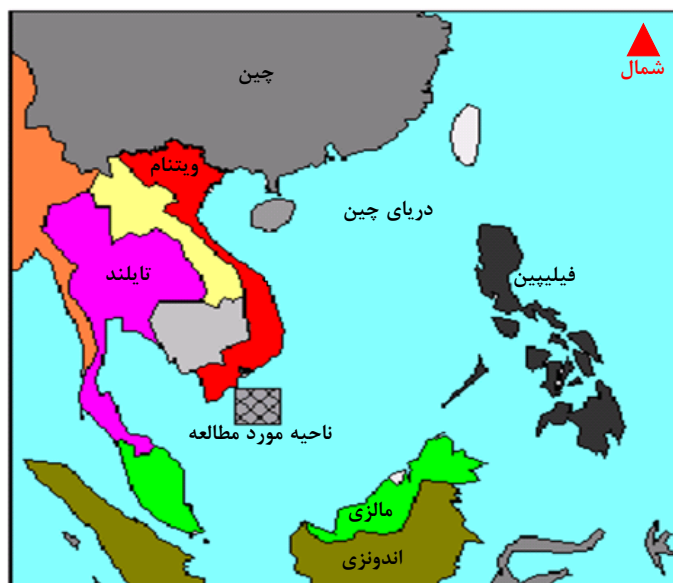
با توجه به نحوه اخذ داده‌های گرانی از شرکت ملی نفت ایران و همچنین جهت بررسی انواع ساختارهای زمین شناسی ممکن برای تله‌های نفتی به ویژه دو نوع تاقدیسی و گنبد نمکی و بررسی آن‌ها در حالات دو و سه بعدی و ارزیابی بهتر عملکرد روش گرادیان کل نرمال سه بعدی پیشنهادی در مطالعه حاضر، سعی شده است از داده‌های میدانی نفتی متفاوت استفاده شود. علاوه بر این، داده‌های استفاده شده هر کدام دارای ویژگی‌های خاص نظیر وجود یا عدم وجود رخنمون ساختارها در سطح زمین و یا موقعیت جغرافیایی مختلف آن‌ها می‌باشد.

۶-۲- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی جنوب شرق ویتنام

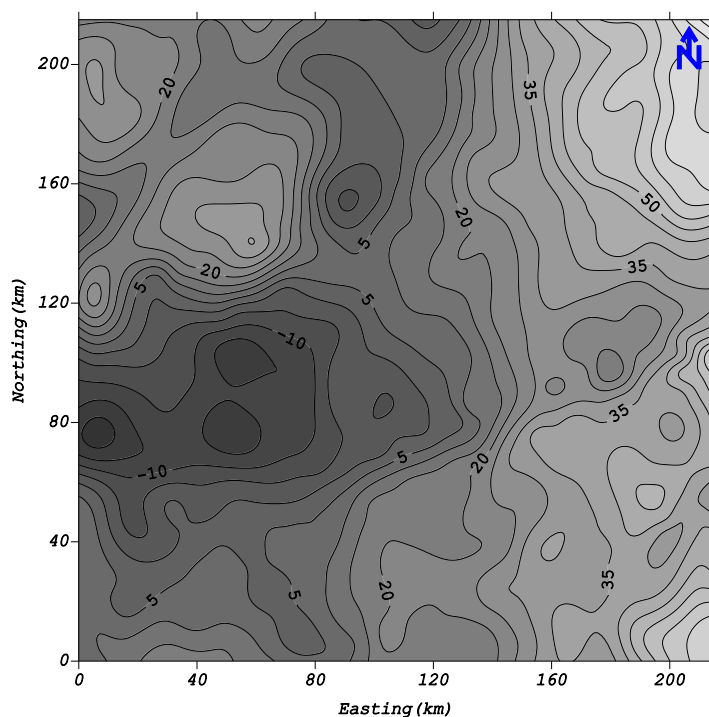
منطقه مورد مطالعه در منتهی‌الیه جنوب شرق ویتنام در حوضه دریای شرق ویتنام واقع است^{۸۵} (شکل ۶-۱). بررسی‌های ژئوشیمیایی، لرزه‌نگاری و حفاری‌های اکتشافی مبین وجود ذخایر نفت و گاز در سازندهای ائوسن- الیگوسن و میوسن زیرین در کف دریا است که بیشتر آن‌ها در سنگ‌های تکتونیزه لایه‌های سنوزوئیک زیرین تمرکز یافته‌اند. در این حوضه تعداد زیادی چاه اکتشافی حفر شده که بیشتر آنها به ذخایر نفت و گاز برخورد کرده‌اند [Tran, 2004].

میدان گرانی در این منطقه، در یک شبکه اکتشافی متراکم با دقت زیاد اندازه‌گیری شده است. محاسبات آنومالی گرانی در یک شبکه منظم مربعی با فاصله یک کیلومتری انجام شده و سپس نقشه آنومالی بوگه با فاصله کنتوری دو میلی‌گال رسم شده است. دامنه تغییرات آنومالی‌های گرانی ۳۰- تا ۹۰ میلی‌گال می‌باشد (شکل ۶-۲). گسترش مقادیر منفی آنومالی‌های گرانی در راستای شمال شرق- جنوب غرب تا تقریباً شمالی- جنوبی است و در بخش‌های شرقی منطقه مورد مطالعه و بخش‌هایی از شمال غرب منطقه، دارای آنومالی مثبت می‌باشد. ضخامت رسوبات در حوضه نفتی مذکور متفاوت از یک کیلومتر در ساحل تا ۱۳ کیلومتر در مرکز حوضه رسوبی در تغییر است [Tran, 2004].

^{۸۵} - داده‌های گرانی مربوط به این منطقه از دکتر دونگ توآن تران (Dong Tuan Tran) از انستیتو اقیانوس شناسی ویتنام دریافت شده است.



شکل ۶-۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه [Tran, 2004]



شکل ۶-۲: نقشه آنومالی بوگه در ناحیه مورد مطالعه، برحسب میلی گال

از دهه ۱۹۸۰ تاکنون چاه‌های اکتشافی زیادی برای شناسایی منابع نفت-گاز در این منطقه حفر شده که سبب اکتشاف تعداد زیادی مخزن تاقدیسی حاوی نفت و گاز شده است. عمق چاه‌های اکتشافی متفاوت بوده و تا ۵۰۰۰ متری به درون سازندهای زمین شناسی نفوذ کرده است. بسیاری از

چاه‌های حفر شده به مخازن نفت و گاز برخورد کرده و بقیه چاه‌ها خشک بوده‌اند (شکل ۶-۳). همان طور که پیشتر اشاره گردید، آقای تران از نتایج حفاری‌های صورت گرفته به منظور انتخاب بهینه تعداد جملات هارمونیک جهت محاسبه ضرایب سری فوریه و به تبع آن مقادیر گرادیان کل نرمال استفاده نمود [Tran, 2004]. در اینجا ابتدا از الگوریتم تهیه شده به روش آقای تران برای محاسبه مقدار NFG شبه سه بعدی برای آنالیز داده‌ها استفاده شده و سپس همان داده‌ها به روش پیشنهادی در مطالعه حاضر برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل با هم مقایسه شده‌اند.

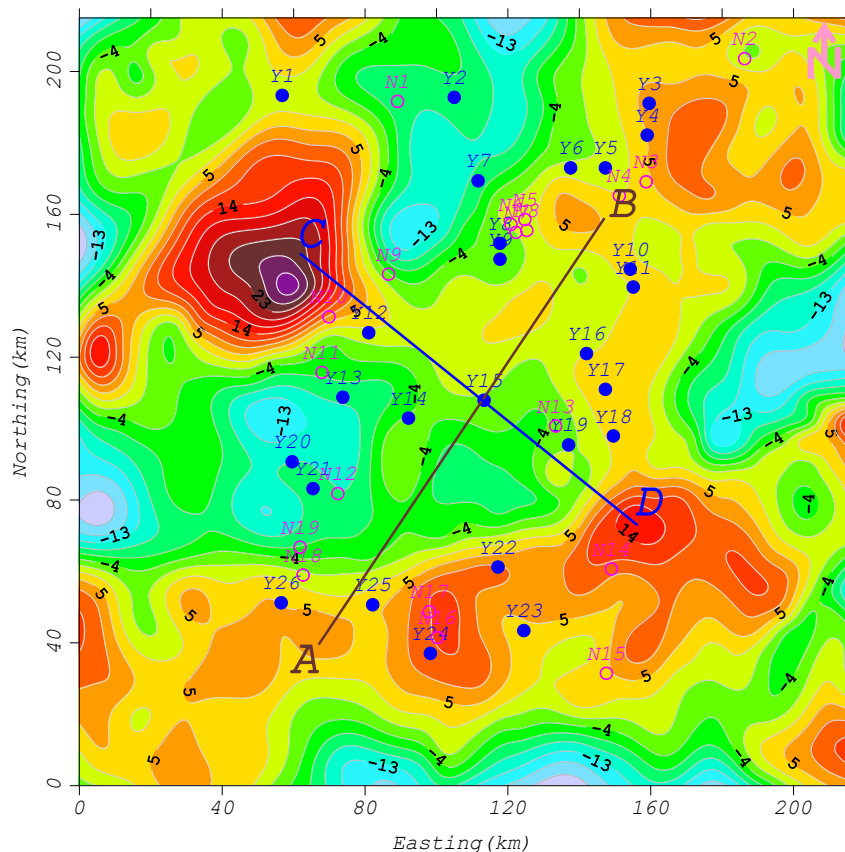
۶-۲-۱- تخمین تعداد هارمونیک بهینه جهت محاسبه گرادیان کل نرمال دو بعدی

شکل (۶-۳) نقشه آنومالی باقی‌مانده گرانی تهیه شده را همراه با محل حفر چاه‌های اکتشافی در ناحیه مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به مشخص بودن مختصات و عمق دو چاه اکتشافی Y15 و Y25، تران (۲۰۰۴) جهت تعیین تعداد جملات هارمونیک مورد نیاز، دو پروفیل موازی هم گذرنده از چاه‌های اکتشافی مذکور تهیه نمود^{۸۶}. مطابق شکل (۶-۴) طول پروفیل‌ها حدود ۵۳ کیلومتر در نظر گرفته شده که با توجه به این که عمق چاه‌های اکتشافی منطقه کمتر از ۵ کیلومتر، بنابراین طول پروفیل حدود ۵۰ کیلومتر طبق نظر برزکین برای بررسی موضوع کافی بوده است. براساس داده‌های حاصل از عملیات حفاری عمق دو چاه اکتشافی Y15 و Y25، که به مخزن نفت و گاز رسیده، به ترتیب در حدود ۳۲۵۰ و ۳۰۰۰ متر می‌باشد [Tran, 2004].

مقادیر گرادیان کل نرمال در راستای پروفیل‌های مورد نظر به روش سعی و خطا برای تعداد زیادی از جملات هارمونیک محاسبه و مقاطع عرضی تغییرات مقدار گرادیان کل نرمال در صفحه X-Z ترسیم شده است. بدین ترتیب با مقایسه مقاطع تهیه شده با داده‌های حفاری آن تعداد از جملات هارمونیکی که به ازای آن مقادیر منحنی‌های کمینه گرادیان کل نرمال بیشترین انطباق را با مخازن

^{۸۶} در مقاله ارائه شده توسط ایشان محل پروفیل‌ها مشخص نشده است.

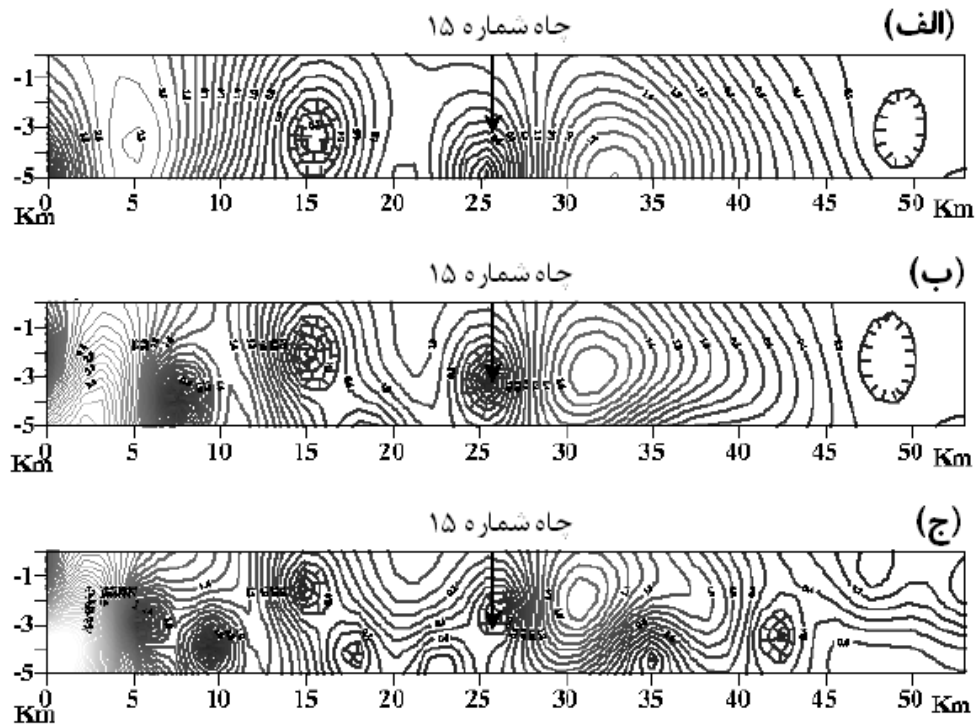
شناخته شده داشته‌اند به عنوان عدد بهینه در نظر گرفته شده است. در شکل (۴-۶) مقطع عرضی که مقادیر گرادیان کل نرمال در آن برای تعداد جملات هارمونیک ۴۶، ۴۸ و ۵۰ در امتداد پروفیل گذرنده از چاه شماره ۱۵ توسط آقای تران (۲۰۰۴) محاسبه گردیده، نشان داده شده است [Tran, 2004].



شکل ۳-۶: نقشه آنومالی باقی‌مانده گرانی براساس روش روند سطحی مرتبه ۳، و محل حفر چاه‌های اکتشافی در منطقه. چاه‌هایی که با علامت دایره توپر مشخص شده به نفت رسیده و سایر چاه‌ها (دایره توخالی) خشک بوده‌اند. پروفیل‌های AB و CD توسط نگارنده رسم شده است.

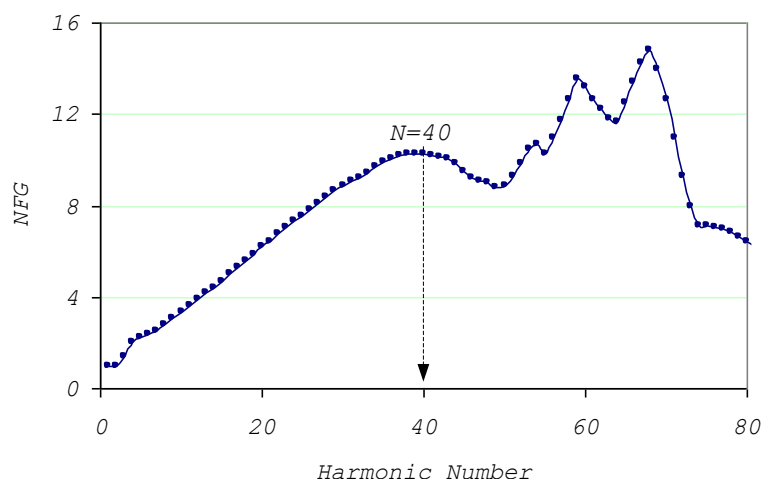
همان چنانکه در شکل (۴-۶-الف) در محل حفر چاه شماره ۱۵ دیده می‌شود در $N=46$ ، عمق منحنی‌های بسته مقادیر کمینه گرادیان کل نرمال پایین‌تر از عمق مخزن را نشان می‌دهد، در حالی که در مقطع ترسیمی با $N=50$ (شکل ۴-۶-ج)، مقادیر کمینه NFG عمق بالاتری را نسبت به داده‌های حفاری نشان می‌دهد. در $N=48$ مقطع رسم شده بیشترین و بهترین انطباق را با مخزن هیدروکربور دارد (شکل ۴-۶-ب). به این ترتیب مقدار بهینه تعداد جملات هارمونیک برای محاسبه

مقادیر گرادیان کل نرمال در منطقه مورد مطالعه عدد ۴۸ منظور شده و مقطع مورد نظر (شکل ۴-۶) ترسیم گردید [Tran, 2004].



شکل ۴-۶: گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی روی مقطع عرضی عبوری از چاه Y15 (پروفیل AB) با تعداد جملات (الف) ۴۶، (ب) ۴۸ و (ج) ۵۰ [Tran, 2004].

همان طور که در فصل چهارم اشاره گردید، در تحقیق حاضر به منظور تعیین تعداد بهینه جملات سری فوریه برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال روشی جدیدی ارائه گردید که بدون استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری یا حفاری مقدار بهینه تعداد جملات هارمونیک را تخمین می‌زند. در این مرحله مقادیر گرادیان کل نرمال در راستای پروفیل‌های انتخابی، که بهتر است عمود بر گسترش آنومالی‌های موجود در ناحیه باشد، با مقادیر زیادی از جملات هارمونیک محاسبه گردید. سپس نمودار تغییرات مقادیر محاسبه‌ای گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک متفاوت رسم گردید (شکل ۵-۶). مطابق شکل مذکور عدد بهینه برابر ۴۰ می‌باشد که به ازای آن اولین مقدار بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال روی نمودار تغییرات ظاهر شده است ($N=40$).



شکل ۶-۵: تغییرات تعداد جملات هارمونیک نسبت به مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال

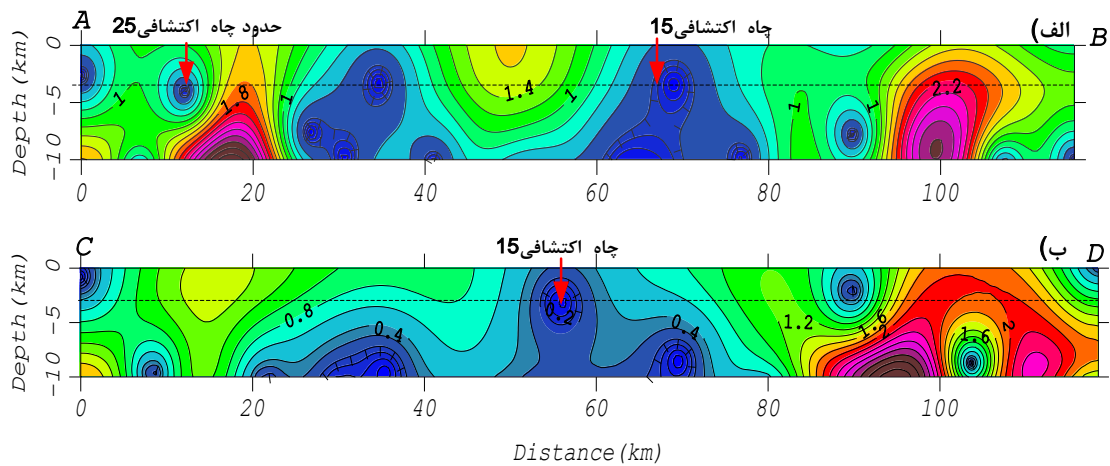
جدول ۶-۱: تغییرات تعداد جملات هارمونیک نسبت به مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال

۴۲	۴۱	۴۰	۳۹	۳۸	تعداد هارمونیک
۱۰/۱۳۴	۱۰/۲۰۳	۱۰/۲۶۹	۱۰/۲۴۸	۱۰/۲۳۹	بیشینه NFG

براساس این تعداد جملات هارمونیک گرادیان کل نرمال دو بعدی در راستای پروفیل‌های AB و CD با مد نظر قرار دادن عدد ۴۰ محاسبه و مقطع عرضی آن‌ها رسم گردید (شکل ۶-۶). مطابق این شکل در پروفیل AB چهار محدوده کمینه دیده می‌شود که دو تای آن‌ها در بخش میانی پروفیل بوده که موقعیت یکی از آن‌ها بر چاه شماره ۱۵ منطبق است. عمق مقادیر کمینه بسته NFG در حدود ۳ کیلومتری را نشان می‌دهد که با نتایج حاصل از روش تران هماهنگی خوبی دارد. در گوشه سمت چپ پروفیل AB نیز تا حدودی موقعیت چاه شماره ۲۵ قابل بررسی است. از طرفی بر روی پروفیل CD نیز موقعیت چاه شماره ۱۵ به خوبی مشخص و تایید کننده پروفیل قبلی می‌باشد.

۶-۲-۲- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی

نقشه‌های کنتروری در یک افق خاص می‌تواند بیانگر موقعیت منحنی کمینه بسته مربوط به ذخایر نفت و گاز باشد. همچنین با داشتن مقادیر سه بعدی داده‌های NFG آزادی عمل در انتخاب محل حفاری‌های آتی و ترسیم پروفیل در جهت‌های دلخواه فراهم می‌شود.

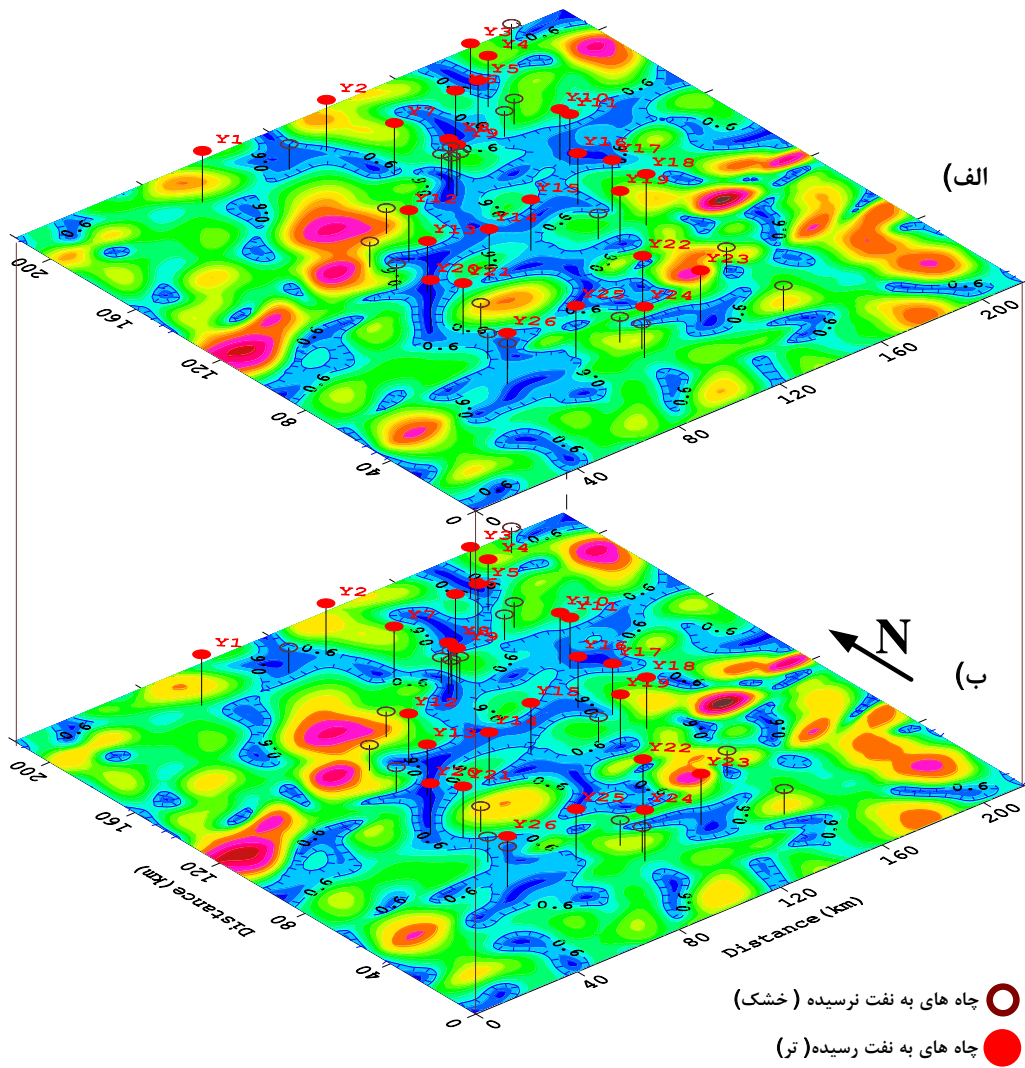


شکل ۶-۶: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی برای پروفیل‌های AB و CD شکل (۳-۶) با $N=40$

برای تعیین نواحی پتانسیل‌دار نفت و گاز تا عمق حدود ۵۰۰۰ متر، تران (۲۰۰۴) مقدار گرادیان کل نرمال شبه سه بعدی داده‌های گرانی را محاسبه نمود. با ملاحظه سازندهای زمین‌شناسی حوضه نفتی و داده‌های حاصل از چاه‌های اکتشافی، عمق‌های ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری به فواصل هر ۵۰۰ متر برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی انتخاب و مقدار عددی بهینه N برای همه افق‌ها ۴۸ در نظر گرفت. در این حالت موقعیت منحنی‌های کمینه مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی به ذخایر نفت و گاز احتمالی مرتبط است. در شکل (۶-۷) توزیع فضایی مناطق کمینه گرادیان کل نرمال به صورت مناطق هاشور خورده با منحنی آبی رنگ در دو افق ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ متری رسم شده است. به عبارت دیگر تغییرات گرادیان کل نرمال، ناشی از تغییرات سه بعدی چگالی مربوط به سازندهای زمین‌شناسی زیرسطحی می‌باشد [Tran, 2004].

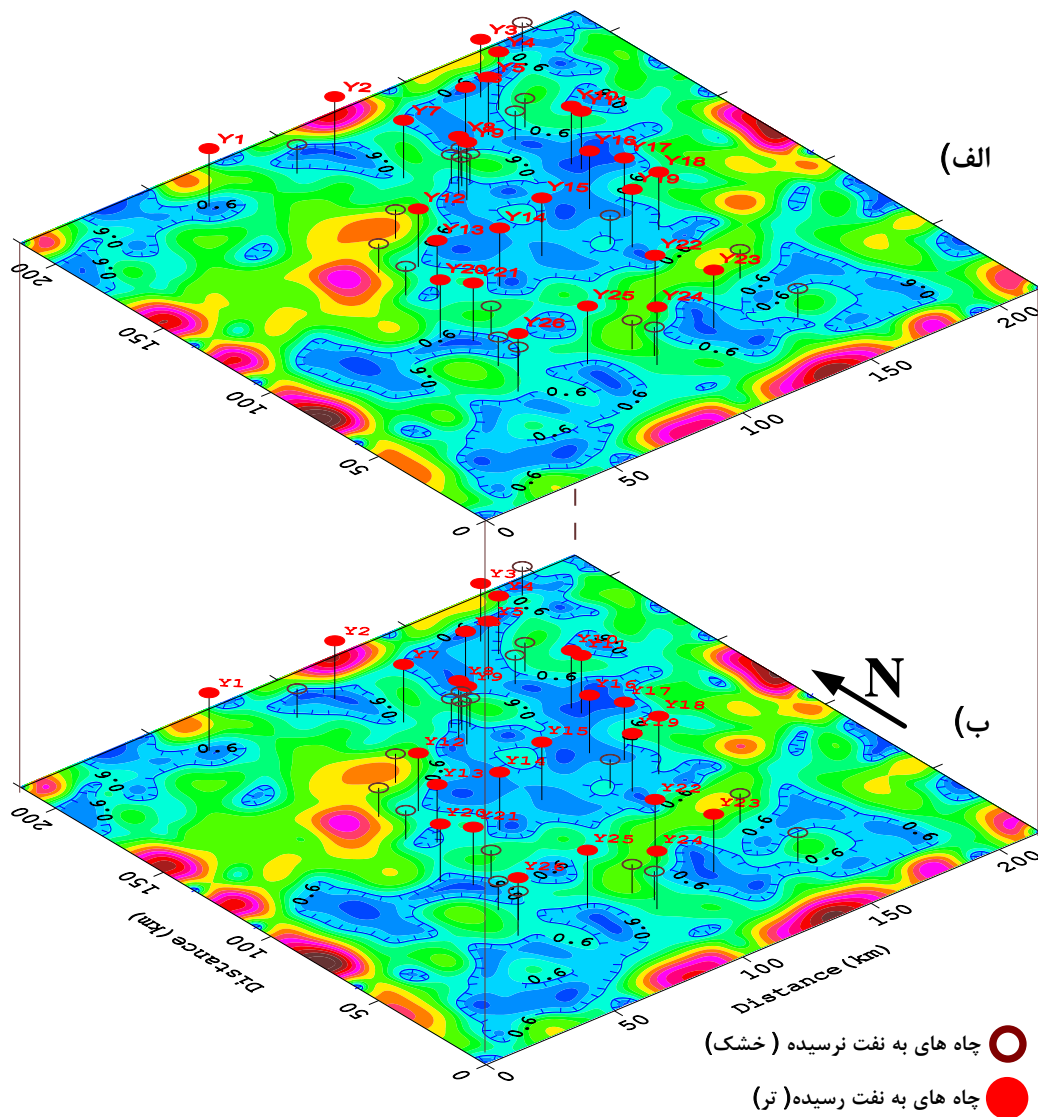
به منظور مقایسه و بررسی قابلیت روش سه بعدی پیشنهادی در فصل پنجم با روشی که توسط تران (۲۰۰۴) استفاده شد، مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی با منظور نمودن تعداد هارمونیک‌های ۴۰ ($M=N=40$) به کمک الگوریتم و برنامه تهیه شده در فصل پنجم محاسبه گردید. نقشه مقادیر NFG تهیه شده برای دو افق ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ متری (با توجه به عمق چاه‌های اکتشافی) در شکل (۶-۸) ارائه شده است. مطابق این شکل عمده چاه‌های اکتشافی که به مخازن هیدروکربوری برخورد نموده‌اند در محدوده‌های مقادیر کمینه گرادیان کل نرمال واقع می‌باشند.

با مقایسه شکل‌های (۶-۷ و ۶-۸) نواحی با پتانسیل بالای مخازن نفت و گاز در منطقه مورد مطالعه به صورت محدوده‌های کمینه همدیگر را به خوبی تایید نموده و در بیشتر موارد روش جدید سه بعدی ارائه شده پاسخ‌های مناسب‌تری نشان می‌دهد.



شکل ۶-۷: گرادیان کل شمال آنومالی‌های گرانی به روش شبه سه بعدی تران (۲۰۰۴)، الف) افق ۳۰۰۰ متری و ب) ۳۵۰۰ متری، تعداد جملات هارمونیک $N=48$ ، موقعیت مناطق پتانسیل بالا با رنگ آبی و در محدوده منحنی‌های آبی رنگ دیده می‌شود.

همان طوری که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، غالب چاه‌های اکتشافی که به مخازن نفت و گاز برخورد نموده‌اند، مطابقت خوبی با مقدار کمینه گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی دارند. البته لازم به یادآوری است که تعدادی از چاه‌های اکتشافی نیز تطابق مناسبی با مقدار کمینه گرادیان کل نرمال ندارند که احتمالاً ناشی از ناهمگنی چگالی در ساختارهای عمیق‌تر بوده و یا این که عمق نفوذ این چاه‌ها تا افق مربوطه نبوده است.



شکل ۶-۸: گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی به روش سه بعدی با محاسبه سری فوریه دو بعدی (ارائه شده در فصل ۵)، الف) افق ۳۰۰۰ و ب) ۳۵۰۰ متری، تعداد جملات هارمونیک $M=N=40$ ، موقعیت مناطق پتانسیل بالا با رنگ آبی و در محدوده منحنی‌های آبی رنگ دیده می‌شود.

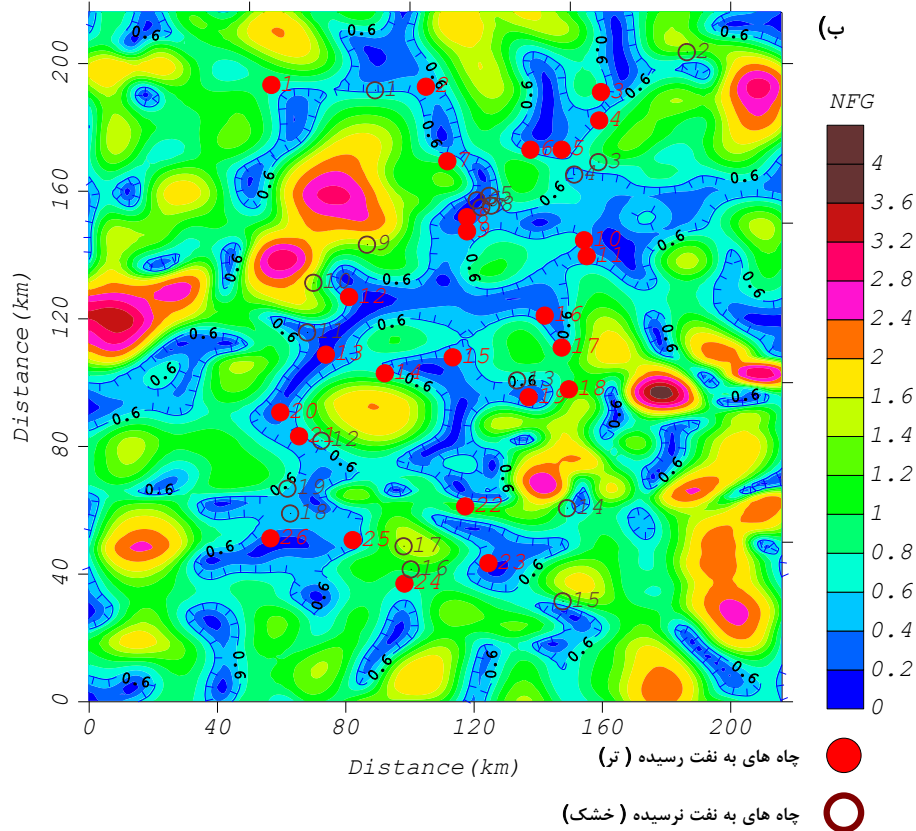
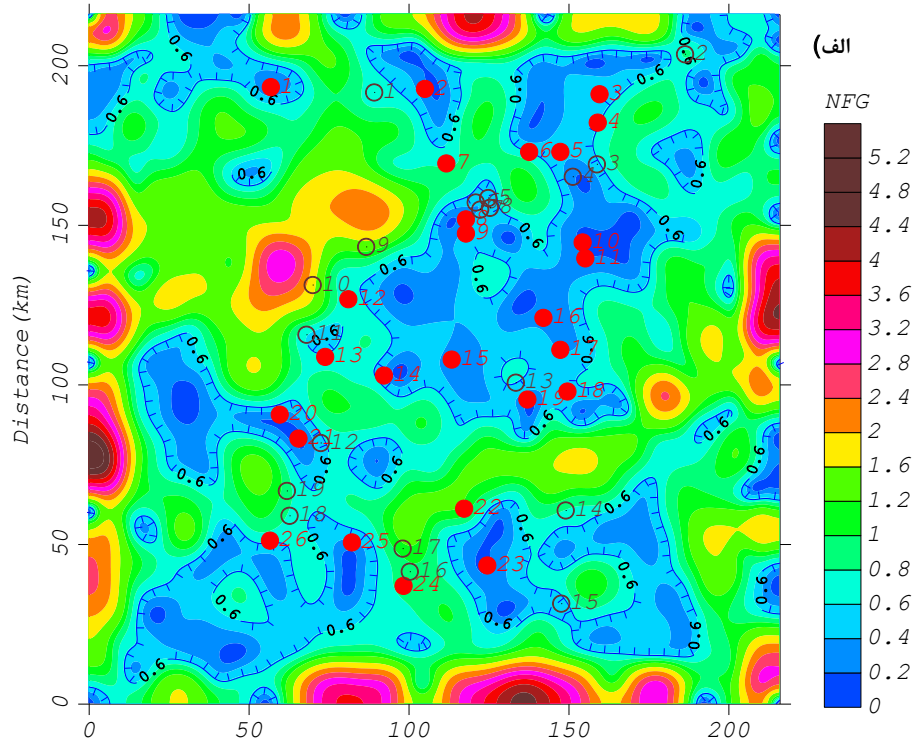
۶-۲-۳- بررسی آماری چاه های اکتشافی در منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی اعتبار سنجی روش سه بعدی ارائه شده، نقشه گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی این منطقه برای عمق ۳۵۰۰ متری و چاه‌های اکتشافی تر و خشک انتخاب گردید. همان طور که قبلاً ذکر شد این نقشه‌ها به وسیله دو روش ارزیابی شده است. برای مقایسه این دو روش از پارامترهای آماری استفاده گردید. با توجه به وضعیت داده‌های میدان گرادیان کل نرمال که به صورت منحنی‌های تراز رسم شده است و مجموعه‌ای از داده‌های زیاد را در بر می‌گیرد بنابراین برای بررسی آماری باید مقادیر مربوطه طبقه‌بندی شوند تا یک فراوانی معنی‌دار پدید آید.

چون مقادیر کمینه گرادیان کل نرمال نشان دهنده پتانسیل منابع هیدروکربوری است و هر چه مقدار آن کمتر باشد اعتبار آن بیشتر است لذا مقادیر این داده‌ها براساس نقشه رسم شده به فواصل ۰/۲ طبقه‌بندی گردید (جدول ۶-۲). پس از این دسته‌بندی مقادیر فراوانی تعداد چاه‌های اکتشافی در موقعیت بین این منحنی‌ها از روی نقشه گرادیان کل نرمال شمارش گردید (شکل ۶-۹). پس از معلوم شدن فراوانی مطلق چاه‌ها در هر محدوده، برای رسم یا نمایش هیستوگرام تعداد چاه‌ها در دامنه مربوطه مقادیر فراوانی نسبی هر دسته مشخص و نمودار آن رسم گردید (شکل ۶-۱۰).

جدول ۶-۲: طبقه بندی مقادیر گرادیان کل نرمال در شش بازه مشخص

دامنه مقدار NFG	تعداد چاه ها	متوسط دامنه (m)	درصد فراوانی (f)	f×m	f×m ²
۰/۲≤Gn≤۰	۴	۰/۱	۱۵/۳۸	۰/۴	۰/۰۴
۰/۴≤Gn≤۰/۲	۹	۰/۳	۳۴/۶۲	۲/۷	۰/۸۱
۰/۶≤Gn≤۰/۴	۸	۰/۵	۳۰/۷۷	۴/۰	۲/۰
۰/۸≤Gn≤۰/۶	۳	۰/۷	۱۱/۵۴	۲/۱	۱/۴۷
۱/۰≤Gn≤۰/۸	۱	۰/۹	۳/۸۵	۰/۹	۰/۸۱
>۱/۰ Gn	۱	۱/۱	۳/۸۵	۱/۱	۱/۲۱
مجموع	۲۶			۱۱/۲	۶/۳۴
روش سه بعدی پیشنهادی	ξ=۴/۳۳۳			۰/۴۳۰۷۷	
۰/۲≤Gn≤۰	۳	۰/۱	۱۱/۵۴	۰/۳	۰/۳
۰/۴≤Gn≤۰/۲	۸	۰/۳	۳۰/۷۷	۲/۴	۰/۷۲
۰/۶≤Gn≤۰/۴	۱۰	۰/۵	۳۸/۴۶	۵/۰	۲/۵
۰/۸≤Gn≤۰/۶	۱	۰/۷	۳/۸۵	۰/۷	۰/۴۹
۱/۰≤Gn≤۰/۸	۳	۰/۹	۱۱/۵۴	۲/۷	۲/۴۳
>۱/۰ Gn	۱	۱/۱	۳/۸۵	۱/۱	۱/۲۱
مجموع	۲۶			۱۲/۲	۷/۳۸
روش تران (۲۰۰۴)	ξ=۴/۳۳۳			۰/۴۶۹۲۳۱	



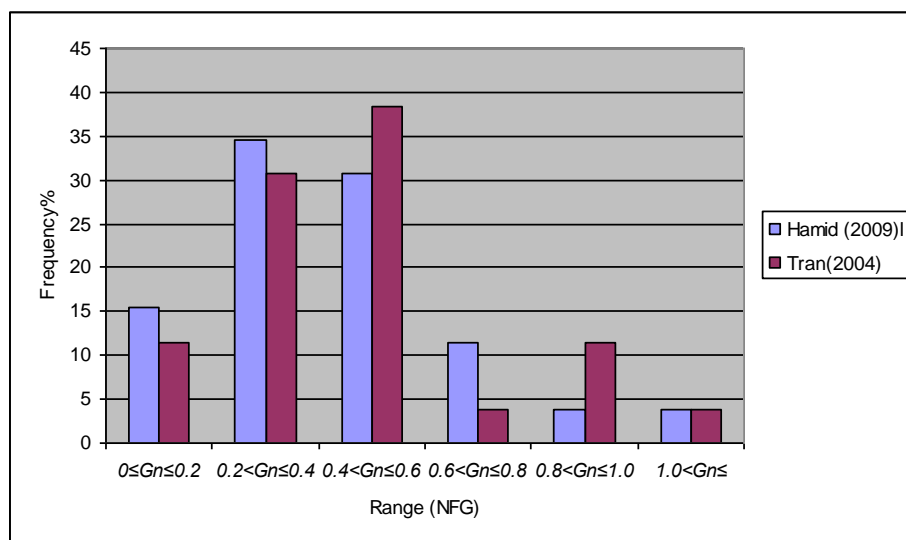
شکل ۶-۹: نقشه گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی‌های گرانی برای افق ۳۵۰۰ متری، همراه با مناطق امید بخش برای اکتشاف منابع هیدروکربوری که با منحنی هاشور خورده مشخص شده است. الف) روش سه بعدی پیشنهادی در این رساله، ۷۷/۷۸ درصد چاه‌های اکتشافی با نتایج گرادیان کل نرمال مطابقت دارند، ب) روش شبه سه بعدی تران (۲۰۰۴)، ۷۳/۳۳ درصد چاه‌های اکتشافی با نتایج گرادیان کل نرمال مطابقت دارند.

۴-۲-۶- پارامترهای آماری توزیع چاه‌ها

برای بررسی موضوع پارامترهای میانگین، واریانس، انحراف معیار، ضریب تغییرات و حدود اطمینان حفر چاه‌ها در مناطق امیدبخش محاسبه گردید. چون داده‌ها دارای حجم پایه‌ای متفاوتی می‌باشند، پس داده‌ها بایستی به نسبت بزرگی پایه آن‌ها در محاسبه میانگین وزن دار شوند. برای این منظور اگر داده‌ها X_i و وزن متناظر با آن‌ها f_i نشان داده شود پس؛

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (1-6)$$

که در آن n تعداد داده‌ها می‌باشد.



شکل ۶-۱۰: هیستوگرام فراوانی نسبی چاه‌های اکتشافی روی نقشه گرادیان کل نرمال سه بعدی در افق ۳۵۰۰ متری

به همین ترتیب مقدار واریانس یا پراش داده‌های چاه‌های اکتشافی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n f_i x_i^2 - (\sum_{i=1}^n f_i)(\bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n f_i - \xi} \quad (2-6)$$

که در آن X_i معدل حد بالا و پایین هر طبقه، ξ میانگین همه فاکتورهای وزنی است.

در آزمون‌های آماری مانند تی-استیودنت، برای مقایسه میانگین‌های دو جامعه با تعداد نمونه‌های m و n با توجه به معلوم بودن میانگین دو جامعه، درجه آزادی هر جامعه یک واحد کمتر از تعداد نمونه‌های آن جامعه است بنابراین درجه آزادی کل برابر $(m-1)+(n-1)$ است. میزان خطای وابسته به تخمین در سطح اعتماد معین محاسبه می‌گردد تا میزان اعتبار تخمین مشخص شود لذا با داشتن سطح اعتماد ۹۰ درصد (در کارهای اکتشافی معمولاً بین ۸۴ تا ۹۵ منظور می‌شود) براساس جدول تی-استیودنت و رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_i = \frac{St}{\sqrt{n}} \quad (3-6)$$

که در آن S مقدار انحراف معیار، t ضریب مربوط به سطح اعتماد مورد نظر است و n تعداد نمونه‌ها یا داده‌های مورد بررسی است.

جدول ۳-۶: پارامترهای مورد نیاز برای تعیین حدود اطمینان مقادیر NFG کمینه

نام روش	تعداد چاه‌ها	میانگین NFG	واریانس	انحراف معیار	ضریب تغییرات	خطای تخمین	حد بیشینه	حد کمینه
روش رساله	۲۶	۰/۴۳۱	۰/۰۷۰	۰/۲۶۴	٪ ۶۱/۴	۰/۰۹۹	۰/۵۲۹	۰/۳۳۲
تران (۲۰۰۴)	۲۶	۰/۴۶۹	۰/۰۷۶	۰/۲۷۶	٪ ۵۸/۹	۰/۱۰۳	۰/۵۷۲	۰/۳۶۶

با توجه به جدول‌های (۲-۶) و (۳-۶) و شکل (۶-۱۰)، متوسط مقدار گرادیان کل نرمال برای تعیین محدوده‌های امیدبخش و چاه‌های اکتشافی به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۴۷ است. مقدار انحراف معیار داده‌ها در دو روش به ترتیب ۰/۲۶۴ و ۰/۲۷۶ می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه مقدار کمینه کمتر در ارائه نتایج معتبرتر بهتر است لذا روش پیشنهادی جواب‌های مناسب‌تری ارائه داده است.

برای تعیین میزان خطای وابسته به تخمین در سطح اعتماد ۹۰ درصد، مقدار تی-استیودنت از جدول مربوطه ۱/۹ تعیین می‌گردد. با توجه به رابطه ذکر شده مقدار خطای به اندازه ۰/۰۹۹ به دست می‌آید. بنابراین در سطح اعتماد ۹۰ درصد، مقدار میانگین NFG براساس داده‌های حفاری اکتشافی بین ۰/۵۲۹ و ۰/۳۳۲ در تغییر است در حالی که این موضوع برای نتایج حاصل از روش تران (۲۰۰۴) بین ۰/۵۷۲ و ۰/۳۶۶ قرار می‌گیرد. بدین ترتیب می‌توان گفت که روش پیشنهادی در این رساله نتایج بهتری ارائه داده است.

۶-۳- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی میدان نفتی آبادان

۶-۳-۱- مقدمه

میدان نفتی آبادان^{۸۷} (تاقدیس اروند) در ناحیه دزفول شمالی یعنی دشت آبادان واقع بوده و فاقد هر گونه رخنمون بوده و با عملیات لرزه‌نگاری در طی سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ مشخص گردید. امتداد این تاقدیس در جهت شمال غرب-جنوب شرق بوده و با تاقدیس خرمشهر دارای روند مشابهی می‌باشد. با توجه به نقشه‌های عمقی ژئوفیزیکی، در افق‌های بنگستان و خامی دارای بستگی^{۸۸} است. این تاقدیس بر روی افق‌های سروک و فهلیان به ترتیب دارای ابعاد ۳۵×۴ و ۴۳×۴ کیلومتر و بستگی قائم به ترتیب ۸۰ و ۱۲۰ متر می‌باشد [تیموری و صفاری ۱۳۸۷].

به منظور تعیین پتانسیل هیدروکربوری سازندهای گروه خامی و ارزیابی توان هیدروکربوری سازندهای گروه بنگستان حفاری چاه اروند (Ar) بر روی رسوبات عهد حاضر شروع گردید و پس از حفر سازندهای مختلف در نهایت در عمق ۴۴۰۶ متری سازند گرو خاتمه یافت. براساس نمودارهای چاه‌نگاری، سازند فهلیان (فهلیان بالایی) به صورت حفره باز بدون باز کردن زون آب مورد لایه آزمایشی قرار گرفت که نتیجه آن وجود نفت به میزان غیراقتصادی بود. ولی لایه آزمایشی در افق‌های بین ۴۲۳۲ تا ۴۲۹۲ متری یعنی سازند فهلیان پایینی وجود نفت اقتصادی [تیموری و صفاری ۱۳۸۷] را به اثبات رساند. علاوه بر چاه اکتشافی اروند چند چاه دیگر در دشت آبادان حفر شده است که دو چاه خرمشهر (Kh) و امید (Om) نیز بر روی نقشه‌های گرانی آورده شده است. هدف از حفر این چاه‌ها شناسایی پتانسیل‌های منابع نفتی در سازندهای گروه خامی به ویژه سازند فهلیان بوده است که همه آن‌ها وجود نفت در سازند مذکور را نشان می‌دهند.

^{۸۷}. داده‌های گرانی این بخش از مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران اخذ شده است.

^{۸۸}. Closure.

۶-۳-۳- اطلاعات ژئوفیزیکی

ساختمان تاقدیسی ارونند بدون هیچگونه رخنمونی در سطح زمین در منطقه دشت آبادان واقع شده است. این ساختمان با عملیات لرزه نگاری در طی سال های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ مشخص گردید. خطوط لرزه نگاری دو بعدی برداشت شده، بر روی این میدان شامل خطوط ۸۳۲۰۱ ، ۸۳۲۰۲ ، ۸۳۲۱۲ ، ۸۳۲۱۴ ، ۸۳۲۱۶ و A ۸۲۴۰۱ می باشد. با توجه به خطوط لرزه نگاری دو بعدی برداشت شده در محدوده ساختمان ارونند و نتایج پردازش نهایی این خطوط، تعبیر و تفسیر افق های سروک و فهلیان بر روی این خطوط انجام شد. طبق نتایج به دست آمده از مطالعه وارون سازی بر روی این خطوط، در محدوده ساختمان ارونند افق فهلیان پایینی دارای مقادیر امپدانس پایینی می باشد که بیانگر شرایط مخزنی مطلوب است [تیموری و صفاری ۱۳۸۷].

۶-۳-۴- اطلاعات چینه شناسی چاه ارونند

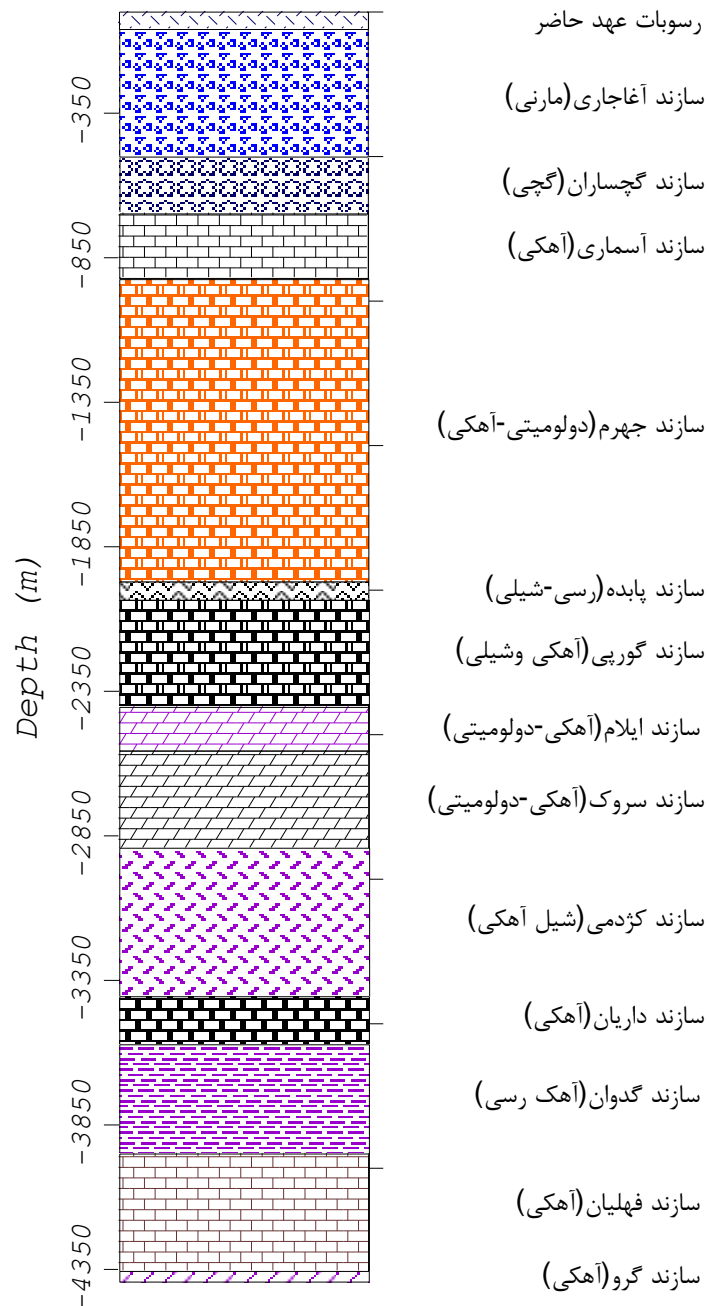
براساس نتایج ارزیابی پتروفیزیکی چاه ارونند شماره یک، وضعیت چینه شناسی (شکل ۶-۱۱) این چاه در اعماق مختلف به طور خلاصه به شرح زیر می باشد [تیموری و صفاری ۱۳۸۷]:

رسوبات عهد حاضر از سطح زمین تا عمق ۵۲ متری ادامه دارد.

سازند آغاچاری (۵۲-۵۰۴ متری)، با مارن های رنگین و گاهی ماسه ای شروع و به باندهای ماسه-سنگی رسی تا آهکی با تناوب از مارن ها و نازک لایه های گچی ادامه می یابد. بخش زیرین آن بیشتر از لایه های ماسه سنگی با نازک لایه هایی از آهک به صورت هم شیب روی سازند گچساران قرار می گیرد.

سازند گچساران (۵۰۴-۶۹۷ متری)؛ حد بالایی این سازند با لایه های انیدریتی شروع و به لایه های رس سنگی و کمی آهکی به صورت متناوب با انیدریت ادامه دارد. نازک لایه های آهکی در فواصل مختلف سازند بین رس سنگ ها و انیدریت ها دیده می شود. حد پایینی این سازند با سازند آسماری به صورت هم شیب بوده است.

سازند آسماری (۶۹۷-۹۲۸ متری)؛ این سازند با سنگ آهک و به طور موضعی سنگ آهک رسی شروع و با تناوبی از لایه‌های ماسه‌سنگی و گاهی گل‌سنگ، و گاهی سنگ آهک ادامه می‌یابد. در بخش قاعده بر ضخامت ماسه سنگ افزوده شده و به صورت همشیب بر روی سازند جهرم قرار می‌گیرد.



شکل ۶-۱۱: ستون چینه شناسی چاه اکتشافی اروند

سازند چهارم (۹۲۸-۱۹۷۰ متری)؛ بخش ابتدایی با سنگ‌های دولومیتی آغاز و با لایه‌های نازکی از سنگ آهک کمی رس‌دار به صورت متناوب با انیدریت‌های نازک لایه ادامه می‌یابد. بخش میانی شامل لایه‌های از شیل‌های سیاه رنگ و همچنین دولومیت ضخیم لایه می‌باشد که بر روی آهک‌های رسی ضخیم لایه بخش قاعده‌ای به صورت همشیب بر روی سازند پابده قرار می‌گیرد.

سازند پابده (۱۹۷۰-۲۰۲۴ متری)؛ شامل رس‌سنگ، آهک‌های رسی ضخیم لایه با تناوبی از لایه‌های نازک شیل و رس‌سنگ در آهک‌های رسی بوده و به صورت همساز بر روی سازند گورپی قرار می‌گیرد. سازند گورپی (۲۰۳۴-۲۴۱۶ متری)؛ شامل سنگ آهک، شیل و مقدار کمی دولومیت بوده و فاقد پتانسیل هیدروکربوری است.

سازند ایلام (۲۴۱۶-۲۵۵۴ متری)؛ متشکل از سنگ آهک، با مقدار کمی دولومیت و شیل است و آبخیز می‌باشد.

سازند سروک (۲۵۵۴-۲۸۹۳ متری)؛ نیز از سنگ آهک، مقدار کمی دولومیت و شیل تشکیل یافته است. اشباع آب در این سازند بالاست و بنابراین از نظر وجود هیدروکربور از پتانسیل مطلوبی برخوردار نیست.

سازند کژدمی (۳۱۲۰-۳۴۱۴ متری)؛ سازند کژدمی در بخش بالایی و میانی متشکل از آهک و شیل و در بخش پائینی که دربرگیرنده بخش بورگان می‌باشد عمدتاً شامل شیل و ماسه و مقادیر کمتری آهک است. در طول سازند کژدمی فواصل هیدروکربوری به صورت پراکنده به چشم می‌خورد که به دلیل تخلخل پائین، ضخامت کم و با درصد اشباع آب بالا از اهمیت چندانی برخوردار نمی‌باشد. بخش ماسه‌ای بورگان نیز آبخیز است.

سازند داریان (۳۴۱۴-۳۵۷۶ متری)؛ شامل سنگ آهک و مقادیر کمی شیل می‌باشد. در این سازند فواصلی با تخلخل بالا وجود دارد که به دلیل درصد بالای اشباع از آب (بیش از ۵۰ درصد) فاقد پتانسیل هیدروکربوری بوده و آبخیز می‌باشد.

سازند گدوان (۳۹۵۲-۳۵۷۶ متری)؛ بیشتر شامل آهک و شیل است. فواصل هیدروکربوری به طور پراکنده در این سازند دیده می‌شود که به دلیل تخلخل پائین قابل توجه نمی‌باشند.

سازند فهلیان (۳۹۵۲-۴۳۵۸ متری)؛ بیشتر متشکل از آهک و مقادیر متغیری کانی‌های رسی می‌باشد. بخش‌های بالایی و میانی سازند فهلیان متراکم‌تر بوده و فاقد پتانسیل هیدروکربوری است. بخش پائینی سازند فهلیان بر اساس خواص پتروفیزیکی و بررسی نمودارها به دو لایه تقسیم می‌شود:

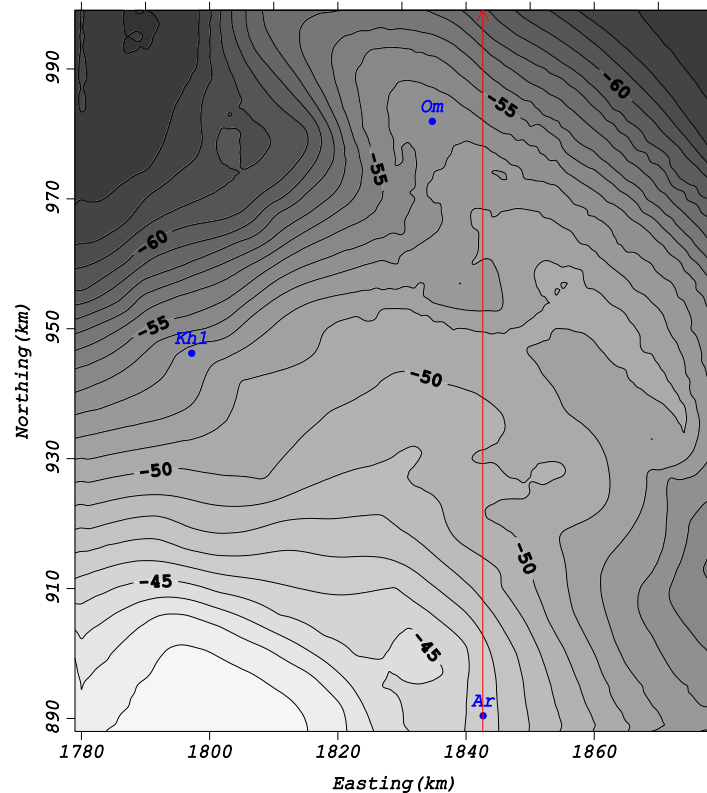
الف- فواصل عمقی ۴۲۰۰ تا ۴۲۳۲ متری که تخلخل ۳ تا ۵ درصد دارد و درجه اشباع آب ۲۰ تا ۴۰ درصد می‌باشد. بر اساس تست انجام شده در این فاصله عمقی، نتیجه آن آب، نفت و گاز بود که میزان آب بالا می‌باشد.

ب- فاصله عمقی ۴۲۴۳/۵ تا ۴۲۹۳ متری با تخلخل ۳ تا ۸ درصد و درجه اشباع آب ۱۰ تا ۴۰ درصد که نتایج حاصل از آزمایش چاه در این فاصله عمقی نیز دارای آب، نفت و گاز می‌باشد.

- در فاصله عمقی بین ۴۳۰۶ تا ۴۳۹۳ متری هیدروکربور به صورت ناچیز و پراکنده مشاهده می‌شود. سازند گرو، حد فاصل (۴۳۵۸ تا ۴۳۹۳ متری)؛ غالباً آهک و کانی‌های رسی است و سازند از نظر مخزنی آبخیز می‌باشد.

۶-۳-۵- داده‌های گرانی سنجی

مقادیر داده‌های گرانی سنجی به وسیله یک فایل داده‌ای از شرکت ملی نفت ایران (مدیریت اکتشاف) تهیه گردید. سپس نقشه آنومالی بوگه آن با فاصله منحنی‌های هم مقدار یک میلی‌گال رسم شد. همه محاسبات مربوط به نقشه‌های گرانی سنجی و گرادیان کل نرمال داده‌ها تحت یک شبکه منظم ۱×۱ کیلومتری انجام گردید. دامنه تغییرات مقدار گرانی در ناحیه ۶۵- تا ۴۱- میلی‌گال بوده و روند تغییرات اصلی جنوب غرب به شمال شرق است. در بخش شمال شرق محدوده مورد مطالعه روند زون زاگروس یعنی شمال غرب- جنوب شرق را نشان می‌دهد (شکل ۶-۱۲).



شکل ۶-۱۲: آنومالی بوگه در منطقه دشت آبادان همراه با محل حفر چاه‌های اکتشافی، فاصله منحنی‌ها یک میلی‌گال

۶-۳-۵-۱- تعیین تعداد جملات سری فوریه برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال

همان طوری که در بحث مدل‌سازی عنوان گردید مقدار گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی به تعداد جملات سری فوریه وابسته می‌باشد. براساس تحقیقات به عمل آمده مقدار گرادیان کل نرمال به مقدار طول پروفیل محاسباتی در روش دو بعدی و همچنین مقدار ابعاد شبکه در روش سه بعدی بستگی دارد. براساس عمق پیش بینی برای اجسام آنومال، طول بهینه پروفیل برای نیل به نتایج دقیق‌تر باید ۱۳ برابر عمق مورد جستجو باشد [Aghajani et al, 2009b]. بنابراین با توجه به ابعاد محدوده برداشت عمق جستجو بین ۵ تا ۸ کیلومتر لحاظ شده است. با توجه به این که استفاده از داده‌های آنومالی باقی‌مانده نتایج مناسب‌تری از گرادیان کل نرمال ارائه می‌دهد [Zeng et al, 2002; Tran, 2004]، ابتدا به روش روند سطحی نقشه آنومالی باقی‌مانده تهیه گردید (شکل ۶-۱۳). برای انتخاب تعداد جملات بهینه سری فوریه جهت محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال، مقدار NFG با

تعداد زیادی از N در راستای چندین پروفیل محاسبه شد و در نهایت مقدار ۲۴ به عنوان عدد بهینه تعداد هارمونیک‌ها (N) انتخاب شد.

۶-۳-۵-۲- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی داده‌های گرانی

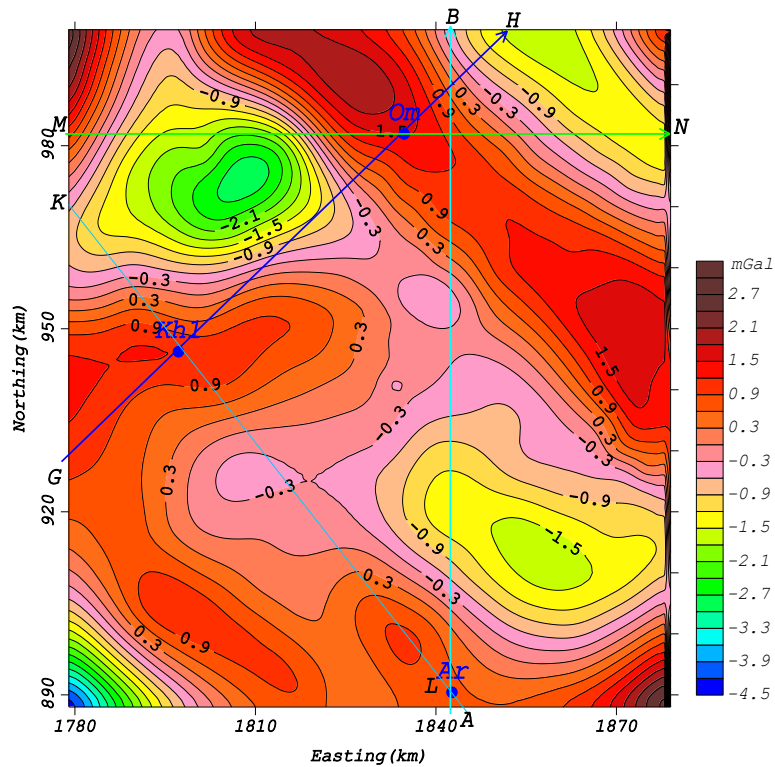
مطابق شکل (۶-۱۳)، یکی از پروفیل‌ها مورد استفاده جهت محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال، پروفیل AB، یعنی پروفیلی که از چاه اکتشافی اروند (Ar) می‌گذرد ($x=1843$) می‌باشد. بنابراین با اطلاعات اضافی موجود یعنی نتایج حفاری و نیز نتایج ژئوفیزیک می‌توان نتایج حاصل از روش گرادیان کل نرمال را بررسی نمود. طول این پروفیل که دارای راستای شمالی- جنوبی است ۱۱۰ کیلومتر بوده که انتظار می‌رود [Aghajani et al, 2009b] بتوان ساختارهای تا عمق ۸ کیلومتری را به آسانی تشخیص داد. علاوه بر پروفیل مذکور پس از اخذ موقعیت مکانی دو چاه اکتشافی دیگر در منطقه که به نفت رسیده‌اند (چاه‌های Kh1 و Om)، مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی روی پروفیل‌های AB، GH، KL و MN محاسبه و مقاطع آن‌ها رسم گردید (شکل ۶-۱۴).

مطابق شکل (شکل ۶-۱۴-د) محدوده‌های کمینه در مقطع دو بعدی مقادیر NFG وجود دارد که توسط مقادیر بیشینه آن احاطه شده است. براساس نتایج مدل‌سازی و همچنین بررسی‌های انجام شده [Zeng et al, 2002; Tran, 2004; Aghajani et al, 2009c]، این محل‌ها به احتمال زیاد دارای تمرکز بالای پتانسیل نفتی می‌باشد. با توجه به اطلاعات حاصله از روش‌های ژئوفیزیکی و چاه اکتشافی (Ar)، عمق سازند حاوی مواد هیدروکربوری بین ۴۲۰۰ تا ۴۳۰۰ متری گزارش شده است. که با نتیجه به دست آمده از نقشه گرادیان کل نرمال مطابقت خوبی دارد.

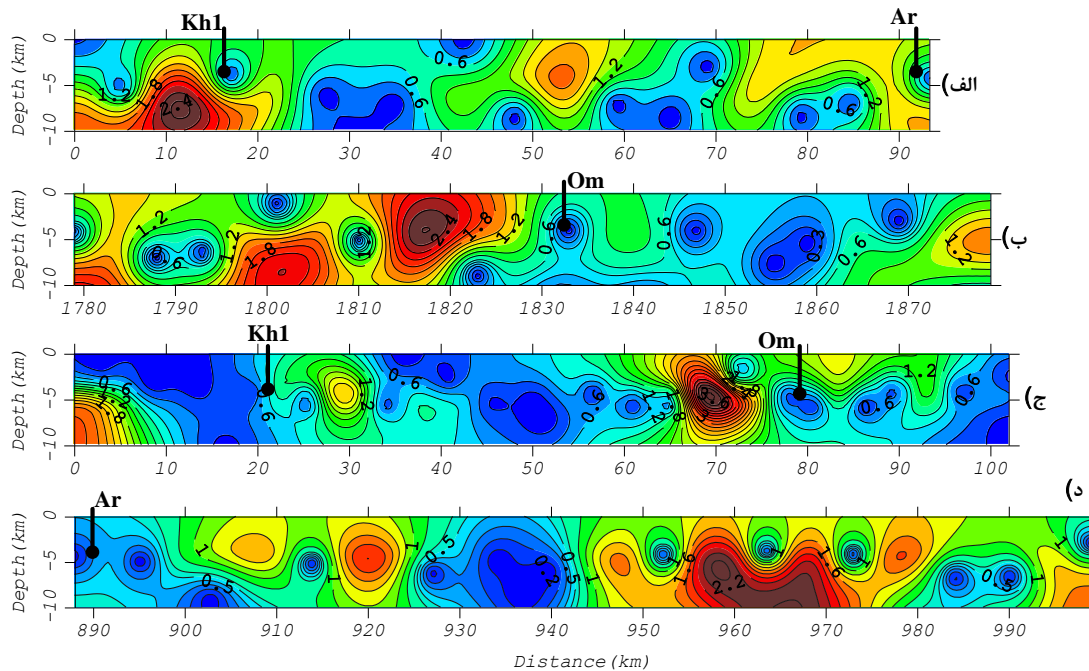
البته شایان توجه است که براساس مدل‌سازی‌های انجام شده دقیق‌ترین جواب برای حالتی پدید می‌آید که جسم آنومال در مرکز پروفیل اندازه‌گیری قرار گرفته باشد. هرچند چاه مذکور در حاشیه جنوبی محدوده اکتشافی قرار گرفته و اعتماد به داده‌های حاشیه‌ای زیاد نیست، ولی با این وجود نتیجه به دست آمده انطباق خوبی با داده‌های حفاری دارد.

مطابق شکل (۶-۱۴-الف، ب، ج) نتایج حاصل از مقاطع NFG و موقعیت چاه‌های اکتشافی موجود

در منطقه به خوبی همدیگر را تایید می‌نمایند.



شکل ۶-۱۳: نقشه آنومالی‌های باقی‌مانده منطقه دشت آبادان و موقعیت چاه‌های اکتشافی و پروفیل‌ها جهت محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی

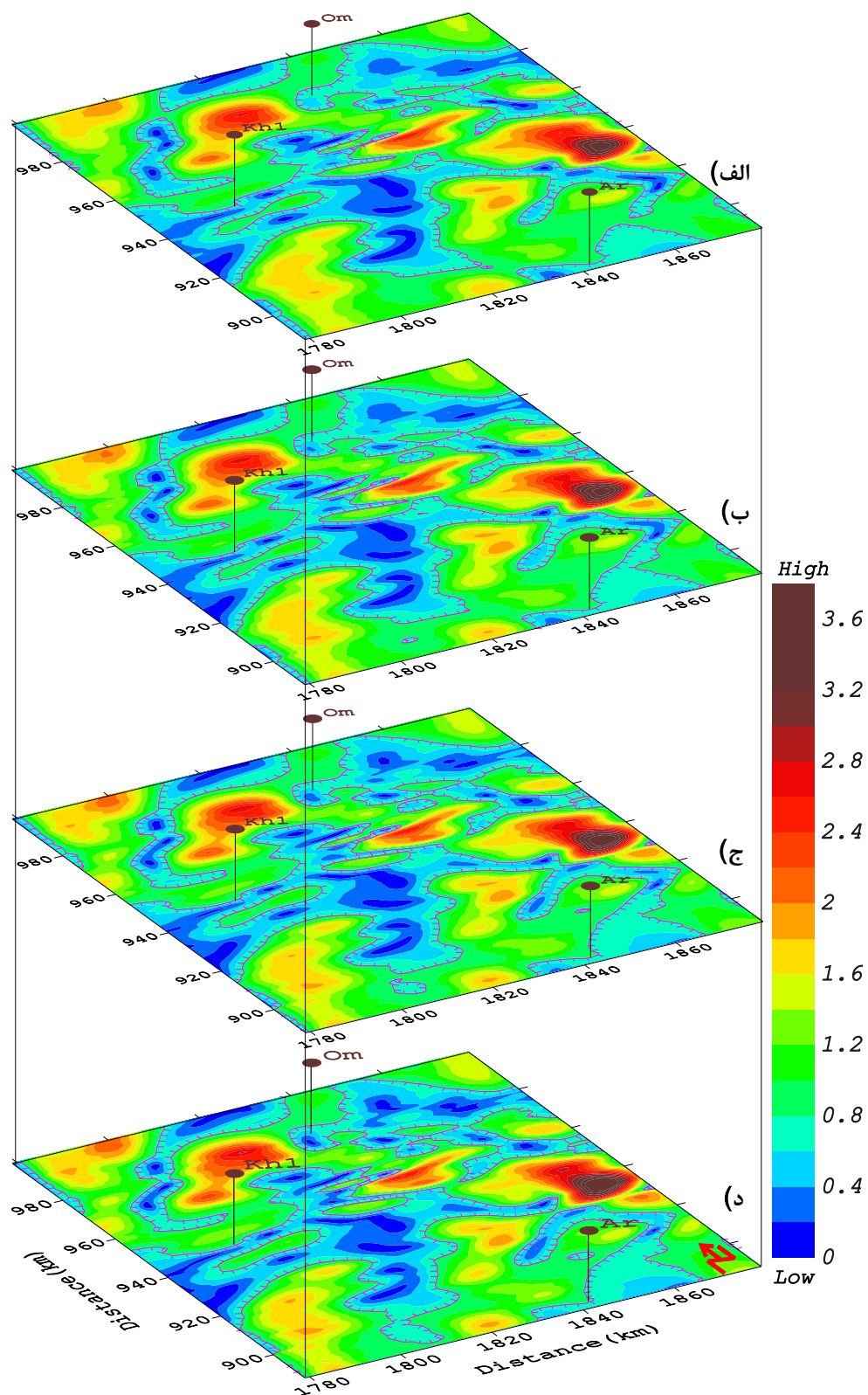


شکل ۶-۱۴: مقاطع گرادیان کل نرمال دو بعدی روی پروفیل‌های واقع بر نقشه آنومالی گرانی. محل چاه‌های اکتشافی روی پروفیل‌ها مشخص شده است. الف) پروفیل KL، ب) پروفیل MN، ج) پروفیل GH، د) پروفیل AB

۶-۳-۵-۳- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی

بدیهی است که ارائه نتایج سه بعدی روش گرادیان کل نرمال با توجه به زمین‌شناسی منطقه از اعتبار بیشتری برای کارهای بعدی برخوردار است. بر اساس ابعاد محدوده اندازه‌گیری آنومالی‌های گرانی (۹۰×۱۱۰) کیلومتر، در این ناحیه بیشترین عمق مورد جستجو برای تله‌های نفتی برای جواب مناسب حدود ۷ کیلومتر می‌باشد و با توجه به داده‌های حفاری در این منطقه بیشترین عمق مورد بررسی ۵۵۰۰ متر در نظر گرفته شد.

براساس اطلاعات چاه ارونند و شرایط زمین‌شناسی منطقه، مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی‌های گرانی برای اعماق ۲۵۰۰ تا ۵۵۰۰ متری به فواصل ۵۰۰ متری و با لحاظ نمودن $M=N=24$ محاسبه گردید. برای مشخص نمودن مناطق پتانسیل بالا هیدروکربوری در منطقه مورد مطالعه، نقشه مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی برای چهار افق ۳۵۰۰، ۴۰۰۰، ۴۵۰۰ و ۵۰۰۰ متری در شکل (۶-۱۵) ارائه شده است. مقادیر کمینه NFG در عمق‌های مختلف به عنوان راهنمایی برای تعیین آنومالی‌های حاصل از اختلاف چگالی می‌باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود موقعیت چاه‌های اکتشافی انطباق خوبی با محدوده‌های کمینه گرادیان کل نرمال سه بعدی افق‌های ۳۵۰۰ تا ۵۰۰۰ متری دارند و تایید کننده نتایج حاصل از روش گرادیان کل دو و سه بعدی می‌باشد. علاوه بر آنچه گفته شد، مطابق شکل (۶-۱۵)، نکته قابل توجه در مورد میدان جنوبی این منطقه این است که بخش بیشتر آن در کشور عراق قرار دارد. همچنین مناطق امیدبخش نفتی در این حوضه شرق و شمال غرب چاه اکتشافی امید و شمال شرق آبادان می‌باشد. بنابراین مناسب‌ترین نقاط برای ادامه عملیات اکتشافی روی این میادین پیشنهاد می‌شود.



شکل ۶-۱۵: نمایش نقشه مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی با تعداد جملات $M=N=24$ در عمق های الف) ۳۵۰۰ متر، ب) ۴۰۰۰ متر، ج) ۴۵۰۰ متر و د) ۵۰۰۰ متر، مناطق امیدبخش هیدروکربوری به رنگ آبی و با منحنی های صورتی رنگ دیده می شود.

۴-۶- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی در حوضه نفتی قم

۴-۶-۱- مقدمه

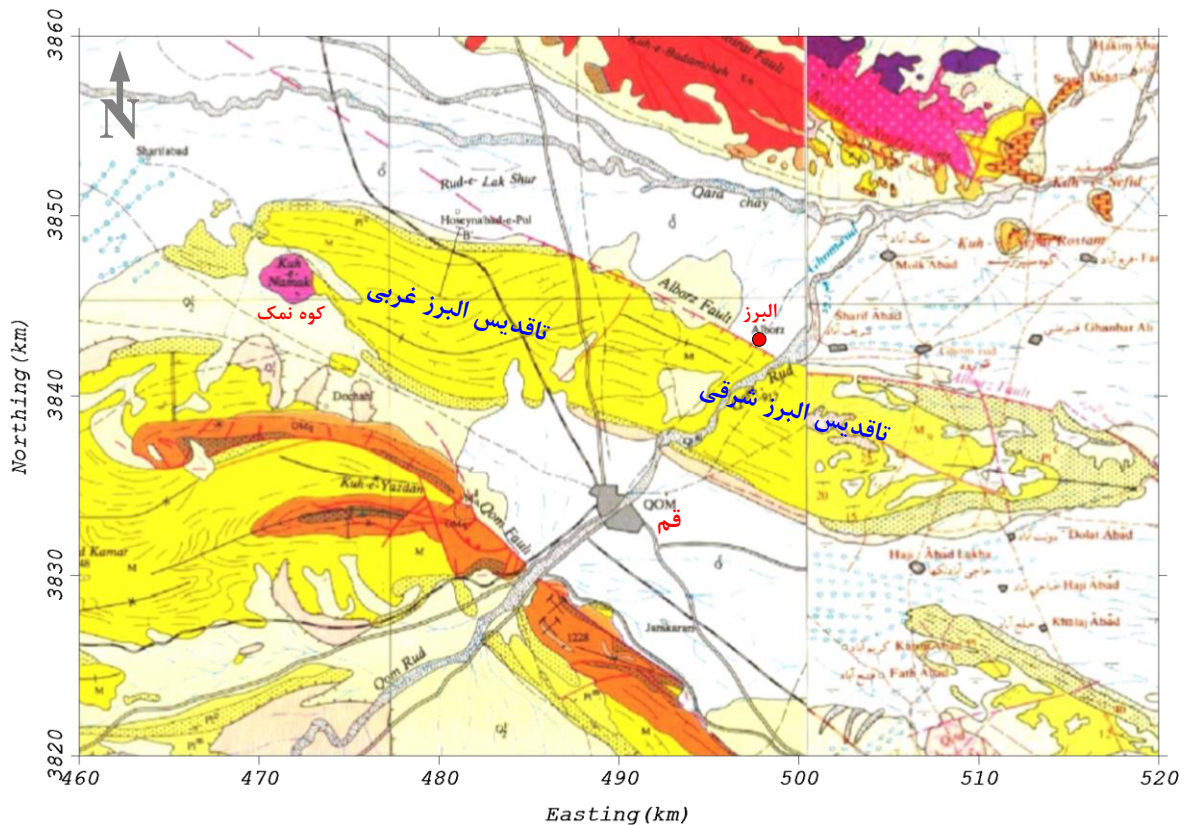
حوضه نفتی البرز قم در شمال غربی، شمال و شرق شهر قم در محدوده‌ای به عرض جغرافیایی $34^{\circ} 35'$ تا $34^{\circ} 50'$ شمالی و طول جغرافیایی $49^{\circ} 55'$ تا $51^{\circ} 15'$ شرقی با روند شمال غربی- جنوب شرقی واقع شده است. جاده قدیم و بزرگراه تهران- قم و نیز راه آهن تهران- قم به صورت عرضی آن را قطع می‌نمایند. بخش اعظم منطقه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ قم و انتهای شرقی محدوده در چهار گوش آران قرار می‌گیرد. دسترسی به منطقه با وجود راه‌های آسفالتی و شنی به آسانی امکان پذیر است (شکل ۶-۱۶).



شکل ۶-۱۶: موقعیت جغرافیایی، محدوده و راه‌های دسترسی به حوضه نفتی البرز قم [اطلس راه‌های ایران، سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۸۸]

این منطقه به همراه منطقه دیگری در ادامه تاقدیس شرقی بنام سراج در جنوب شرقی قم، در دهه ۱۹۵۰ و بعد از آن به دلیل وجود نفت، مورد توجه شرکت ملی نفت ایران و شرکت‌های نفتی خارجی بوده و از این رو مورد مطالعات ژئوفیزیکی و حفاری قرار گرفته است. به دلیل ساختمان چین-خورده و تاقدیسی و وجود نفت در ساختمان زیرزمینی و به اعتبار وجود دهکده البرز در بخش شمالی آن به نام حوضه نفتی البرز معروف می‌باشد (شکل ۶-۱۷).

در این حوضه تعداد ۱۷ چاه اکتشافی حفر شده که برخی آنها به ذخایر نفت و گاز برخورد کرده‌اند. بررسی‌های زمین‌شناسی، گرانی‌سنجی، لرزه‌نگاری و چاه‌های اکتشافی مبین وجود ذخایر نفت و گاز در سنگ‌های آهکی سازند قم می‌باشند که سنی معادل میوسن تا الیگوسن دارند و هم‌ارز طبقات معروف آسماری در جنوب ایران می‌باشد [پارسی، ۱۹۷۴].



شکل ۶-۱۷: زمین‌شناسی حوضه نفتی البرز- سراج، نیمه شرقی برگرفته از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ آران [امامی، ۱۳۷۱] و نیمه غربی آن از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ قم می‌باشد [امامی و حاجیان، ۱۹۸۱]

۶-۴-۲- چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخش کوچکی از حوضه وسیع قم است که پی‌سنگ آن را سنگ‌های آتشفشانی و یا آتشفشانی-رسوبی ائوسن و بخشی از الیگوسن تشکیل می‌دهد. محصول رسوب‌گذاری در حوضه قم تشکیل دو سازند قرمز زیرین و قم است که در یک محیط دریایی کم عمق تا خشکی نهشته شده‌اند. سازند قرمز بالایی دو سازند مزبور را می‌پوشاند، سن آنها از الیگوسن بالایی تا کواترنر

برآورد شده است. سازندهای رسوبی و سنگ‌های آتشفشانی همراه آنها در ناحیه قم ضخامت در حدود ۵۰۰۰ متر را تشکیل می‌دهند [امیدی، ۱۳۶۹].

برونزدهای متعلق به رسوبات حوضه قم را در مناطق مختلف اطراف قم می‌توان مشاهده نمود، واحدهای سنگی که در سطح زمین در ساختمان البرز رخنمون دارند شامل سازند قرمز بالایی و کنگومرای نئوژن پایانی هستند که در برخی نقاط توسط رسوبات جوان دوره چهارم پوشیده می‌شوند، ولی واحدهایی که در روند تشکیل ساختمان چین خورده البرز و دگرشکلی ناحیه‌ای درگیر بوده‌اند، به جز واحدهای مزبور باید از سازندهای قم و قرمز زیرین در عمق نام برد که بر روی پی سنگ آتشفشانی و یا آتشفشانی-رسوبی ائوسن قرار گرفته‌اند [امیدی، ۱۳۶۹].

سنگ مخزن در این ناحیه لایه‌های سنگ آهک می‌باشد که به نام تشکیلات قم معروف می‌باشند و سن آن میوسن تا الیگوسن بوده و معادل سازند آهکی آسماری در جنوب ایران می‌باشد. سنگ پوشش لایه‌های نمکی می‌باشد که سنگ پوشش بسیار مناسبی است. در مورد سنگ مادر یعنی طبقه نفت‌زا دلایل کافی در دست است که در خود سازند قم بوده است. سازند قم دارای لایه‌های سنگ آهکی-مارنی و شیل می‌باشد که سنگ‌های آهکی توانسته است سنگ مخزن باشد و تصور می‌رود که لایه‌های مارنی و شیلی سنگ مادر بوده‌اند [پارسی، ۱۹۷۴]. مطابق نقشه‌های زمین‌شناسی و داده‌های حفاری، ضخامت سنگ‌های رسوبی در این ناحیه متفاوت بوده ولی در نزدیکی تاق‌دیس البرز شرقی و میدان سراج‌ه تا عمق ۵۵۰۰ متر نیز گزارش شده است [زمانی پدram و حسینی، ۱۳۷۱].

مطالعات ژئوفیزیکی وجود دو تاق‌دیس مجزا از یکدیگر را در زیر زمین تأیید نموده است و در افق سنگ مخزن یعنی بر روی سازند قم دو نفتگیر را نشان می‌دهد که نفتگیر شرقی کم عمق‌تر و نفتگیر غربی عمیق‌تر می‌باشد به طوری که بلندترین نقطه نفتگیر شرقی نسبت به سطح دریا عمق ۱۸۰۰ متر و بلندترین نقطه نفتگیر غربی نسبت به سطح دریا ۲۲۵۰ متر عمق دارند [پارسی، ۱۹۷۴].

۶-۴-۲-۱- تاقدیس البرز شرقی

بعد از انجام مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی در سال ۱۹۵۱ اولین چاه اکتشافی بر روی این تاقدیس (شکل ۶-۱۷) حفر گردید که به واسطه انتخاب محل نامناسب و مشکلات فنی به نتیجه نرسید. چاه‌های اکتشافی بعدی نیز ناموفق بودند تا اینکه چاه شماره ۵ در سال ۱۹۵۶ پس از رسیدن به سنگ مخزن در عمق حدود ۲۶۸۰ متر بر اثر فشار زیاد مخزن فوران نمود. حفر چاه‌های بعدی (۶ و ۷ و ۸) که به آب نمک رسید نیز نشان داد که وسعت مخزن کمتر از حد پیش‌بینی شده بوده است. سپس چاه‌های شماره ۹ و ۱۰ و ۱۱ حفر و پس از رسیدن به منطقه نفتی، به مدت ۲ سال مورد بهره‌برداری قرار گرفتند تا این که آب نمک موجود در نفت از حد متعارف بیشتر شد و در نتیجه بهره‌برداری از این چاه‌ها متوقف گردید. با مشاهده این پدیده و نتایج حاصله از حفاری چاه‌های ۱۲ و ۱۴ محدود بودن وسعت مخزن و کمی ستون نفت به اثبات رسید [پارسی، ۱۹۷۴].

۶-۴-۲-۲- تاقدیس البرز غربی

این تاقدیس بین کوه نمک قم و تاقدیس البرز شرقی قرار دارد. عملیات ژئوفیزیکی وجود تله نفتی با ابعاد تقریبی ۷ در ۳ کیلومتر را نشان می‌دهد. بلندترین نقطه این افق در عمق نزدیک به ۲۲۵۰ متر از سطح دریا و حدود ۳۲۰۰ متر از سطح زمین می‌باشد و چنانکه ملاحظه می‌شود در شکل (۶-۱۷) این تاقدیس در سمت شرق به وسیله دو گسل قطع گردیده به نحوی که دو بستگی را بوجود آورده است و در سمت غرب نیز به گنبد نمکی محدود می‌گردد. در کل شرایط از لحاظ وجود ساختمان و سایر شرایط لازم نظیر بستگی قائم کافی و سنگ پوشش برای محبوس نگاه داشتن مواد هیدروکربور، مناسب به نظر می‌رسد. در سال ۱۹۶۴ حتی برنامه حفاری بر روی این تاقدیس تنظیم گردید و محل چاه نیز آماده گردید ولی میزان ذخیره محتمل در آن زمان اقتصادی تشخیص داده نشد [پارسی، ۱۹۷۴].

۶-۴-۳- گنبد نمکی قم

گنبد نمکی قم معروف به کوه نمک در انتهای شمال غربی تاقدیس البرز و در دماغه^{۸۹} غربی آن در سطح زمین به صورت یک برآمدگی مرتفع با مساحتی دایره‌ای شکل را در برمی‌گیرد و بلندترین نقطه در منطقه مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۶-۱۷). گنبد نمکی قم یکی از گنبدهای ایران مرکزی (مانند گنبدهای نمک کویر جنوب سمنان، شمال شرقی اردکان) است که اساساً از نمک با ناخالصی‌هایی از رس تشکیل شده است. سطح گنبد نمکی توسط رس‌های قرمز مایل به زرد پوشیده شده است [امیدی، ۱۳۶۹].

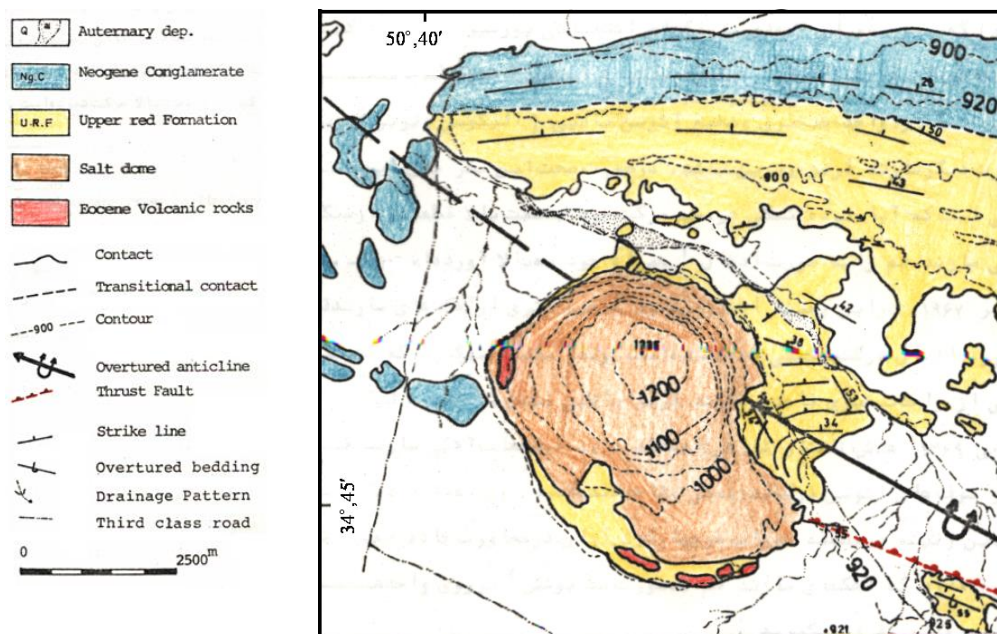
در زمینه منشأ این گنبد نمکی تحقیقات کافی به عمل نیامده و تاکنون نیز نظر واحدی ابراز نشده است. به طور کلی در حوضه مرکزی ایران دو منشأ برای گنبدهای نمکی می‌توان ذکر نمود؛ یکی سازند قرمز زیرین (زیر سازند قم) و دیگری واحد تبخیری قاعده سازند قرمز بالایی است [امیدی، ۱۳۶۹]. آقاشاهی و زمردیان، با مطالعات گرانی سنجی گنبد نمکی قم نتیجه گرفتند که گنبد مذکور ریشه‌ای عمیق ندارد [AghShahi and Zomorrodian, 1981]. عبایی و همکاران که سازند قرمز زیرین را به دو بخش تبخیری زیرین و لایه‌های قرمز بالایی تقسیم می‌کنند به استناد سن‌یابی به روش رادیواکتیو و گرده‌شناسی^{۹۰} اعتقاد دارند که گنبد نمکی قم از واحد تبخیری زیرین مشتق شده و در امتداد یک منطقه گسلی (شکل ۶-۱۸) به سمت بالا حرکت نموده است [Abaei et al, 1963].

از طرف دیگر داده‌های چاه شماره ۱ در غرب ساختمان البرز نشان می‌دهد که ضخامت بخش تبخیری قاعده سازند قرمز بالایی در بخش غربی البرز بیش از بخش شرقی آن است. نکته قابل توجه این است که نه تنها ضخامت بخش تبخیری در اثر حرکت به سمت بالا (به فرض این که منشأ گنبد نمکی باشد) کاهش نیافته بلکه بیشتر از بخش شرقی نیز هست. همچنین نقشه تراز ساختاری رأس سازند قرمز زیرین حاکی از وجود یک ساختمان گنبدی در این سازند در زیر زمین می‌نماید. بنابراین

^{۸۹} - Nose

^{۹۰} - Pollen analysis = Pollinology

بر اساس داده‌های موجود می‌توان استنباط نمود که گنبد نمکی قم از واحدهای تبخیری قبل از سازند قم مشتق شده است و نظر آقاشاهی و زمردیان، در این زمینه که گنبد نمکی قم دارای ریشه عمیق نیست چندان به واقعیت نزدیک نیست، ولی هنوز به درستی مشخص نشده است [امیدی، ۱۳۶۹].



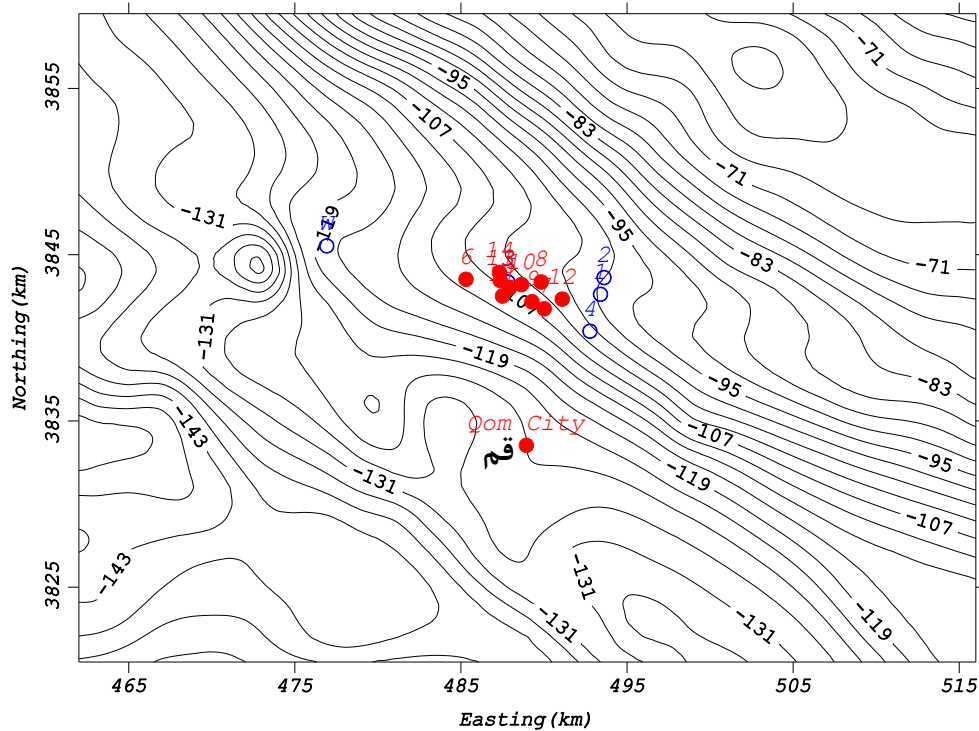
شکل ۶-۱۸: موقعیت گنبد نمکی قم در ساختمان چین خورده البرز [امیدی، ۱۳۶۹].

۶-۴-۴- داده‌های گرانی سنجی

داده‌های گرانی مورد استفاده در این بخش به صورت یک فایل داده‌ای از اداره ژئوفیزیک (بخش غیرلرزه‌ای) مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران دریافت شد. ابعاد محدوده برداشت ۵۴×۳۹ کیلومتر مربع بوده که روی نقاطی به فاصله ۵۰۰ متری بر روی ۵۵ پروفیل به فاصله ۱۰۰۰ متری برداشت شده است. آنومالی گرانی در یک شبکه منظم با ابعاد یک کیلومتری محاسبه شده و نقشه آنومالی بوگه منطقه با فاصله کنتوری دو میلی‌گال رسم گردید (شکل ۶-۱۹).

مطابق شکل (۶-۱۹) روند و امتداد آنومالی‌های گرانی به طور کلی امتداد شمال غرب- جنوب شرق بوده ولی در مرکز ناحیه حدود غرب شهر قم و گنبد نمکی این روند کمی دستخوش تغییر شده است. براساس روش روند سطحی، آنومالی‌های باقی‌مانده گرانی در ناحیه قم تعیین گردیدند که

آنومالی ناحیه‌ای در این منطقه از مرتبه سه روند سطحی تبعیت می‌کند. شکل (۶-۲۰) نقشه آنومالی باقی‌مانده، محل حفر چاه‌های اکتشافی و موقعیت پروفیل‌ها را نشان می‌دهد.



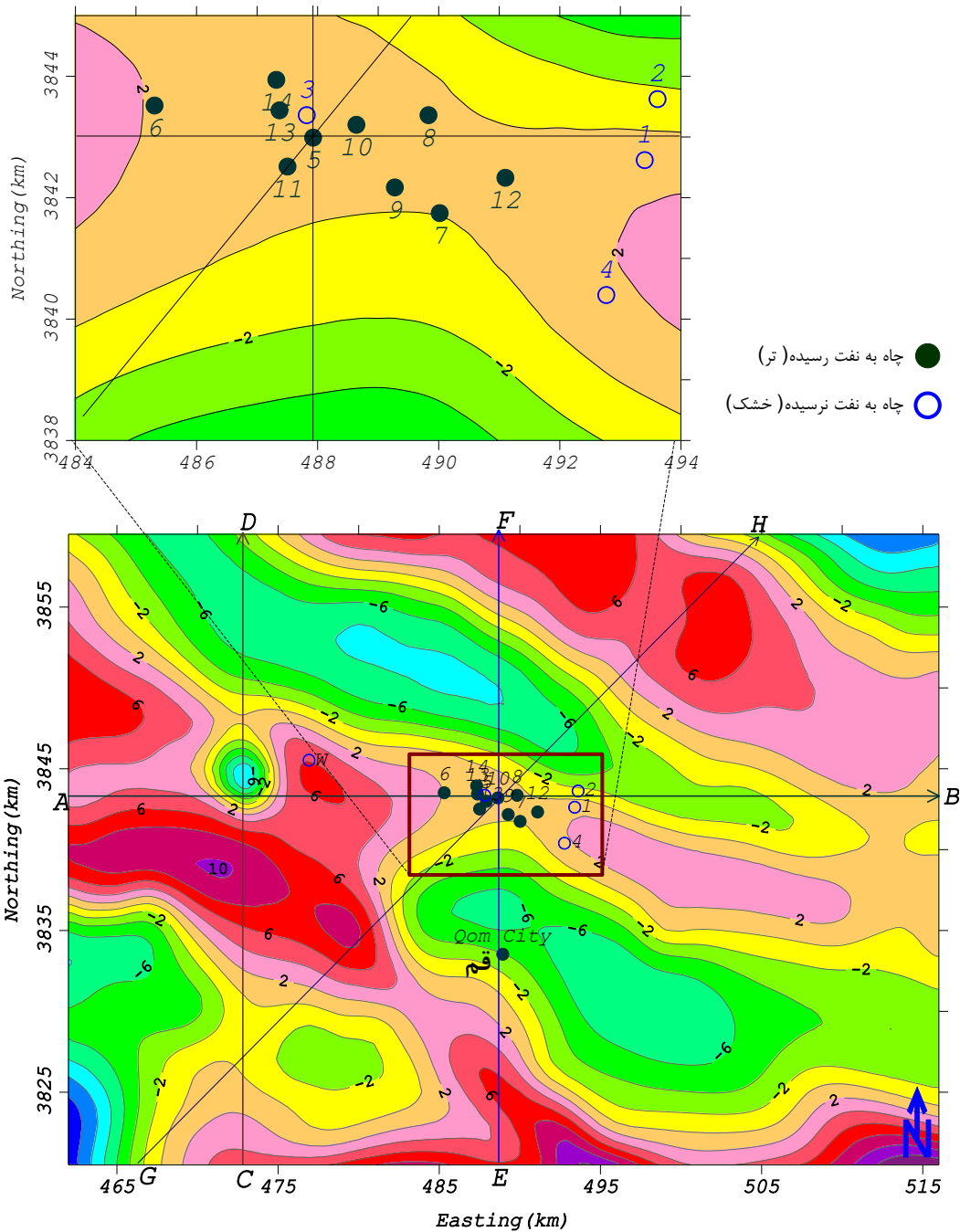
شکل ۶-۱۹: نقشه آنومالی بوگه تهیه شده برای ناحیه نفتی قم

۶-۴-۵- مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی داده‌های گرانی

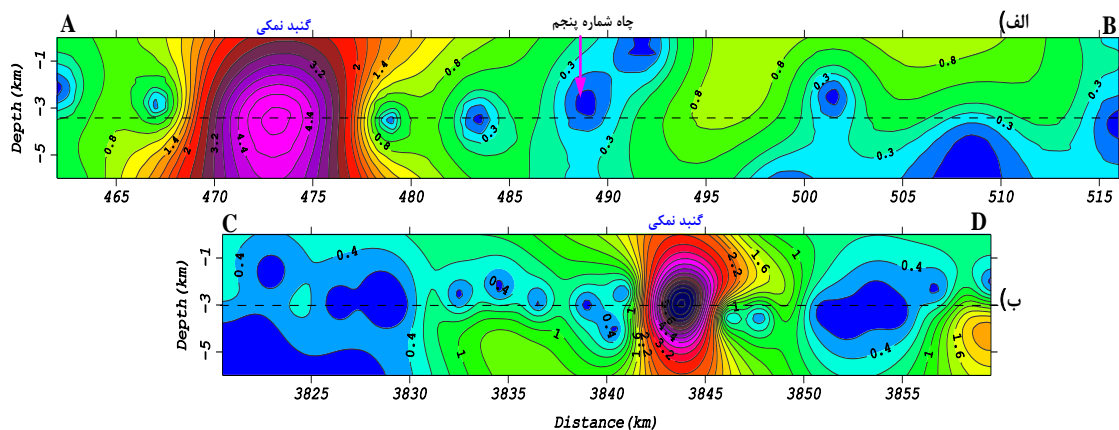
جهت محاسبه گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی ضروری است که پارامترهای مورد نیاز به ویژه تعداد جملات سری فوریه تعیین گردد. به منظور انتخاب بهینه تعداد جملات هارمونیک، علاوه بر استفاده از روش بیشینه نسبی مقدار گرادیان کل نرمال، از داده‌های قبلی موجود یعنی داده‌های حفاری و اطلاعات زمین‌شناسی نیز استفاده شد.

مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی با تعداد زیادی از N محاسبه گردید تا اولین مقدار بیشینه گرادیان کل نرمال که همان تعداد هارمونیک بهینه است، تعیین شد. پروفیل AB به طول ۵۵ کیلومتر (شکل ۶-۲۰) طوری در نظر گرفته شده که علاوه بر عبور از محل چاه اکتشافی شماره ۵ از نزدیکی گنبد نمکی نیز می‌گذرد. مقدار N متناظر با نمودار تغییرات مقادیر بیشینه گرادیان کل نرمال

نسبت به تغییرات تعداد هارمونیک‌ها در راستای این پروفیل رسم و مقدار بهینه N تعیین گردید که برابر با ۳۳ می‌باشد. سپس با توجه به این مقدار N ، مقادیر گرادیان کل نرمال در صفحه $X-Z$ محاسبه گردید (شکل ۶-۲۱-الف). مقدار N متناظر با مقدار اولین بیشینه نسبی NFG در راستای پروفیل CD به طول ۴۰ کیلومتر که عمود بر پروفیل AB و از گنبد نمکی نیز عبور می‌نماید، مقدار ۲۷ تعیین گردید. با منظور نمودن مقدار N برابر ۲۷ مقادیر گرادیان کل نرمال دو بعدی در امتداد این پروفیل محاسبه گردید (شکل ۶-۲۱-ب).



شکل ۶-۲۰: نقشه آنومالی باقی مانده گرانی ناحیه نفتی قم براساس روش روند سطحی با مرتبه سوم، محل حفر چاه‌های اکتشافی به نفت رسیده با دایره توپر و چاه‌های خشک با دایره توخالی و موقعیت پروفیل‌ها مشخص شده است.



شکل ۶-۲۱: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی در حوضه هیدروکربوری البرز قم، الف) روی مقطع گذرنده از گنبد نمکی در راستای محور X (امتداد پروفیل AB)، عدد بهینه $N=33$ است و ب) روی مقطع گذرنده از گنبد نمکی در راستای محور Y (امتداد پروفیل CD)، عدد بهینه $N=27$ است.

مطابق شکل (۶-۲۱) محل و موقعیت گنبد نمکی به وسیله منحنی‌های بیشینه گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی آشکار شده است. هر چند گنبد نمکی در سطح زمین دیده می‌شود ولی در هر دو پروفیل به لحاظ وجود گنبد نمکی کاملاً واضح بوده و منحنی‌های گرادیان کل نرمال دو بعدی توانسته علاوه بر موقعیت افقی تا حد زیادی وضعیت عمقی آن را نیز نشان دهد. که این وضعیت با توجه به اطلاعات زمین شناسی قابل بررسی بیشتر می‌باشد. بنابراین عمق گنبد نمکی را می‌توان به بیش از ۳۰۰۰ متر برآورد نمود.

براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ قم و گزارش زمین‌شناسان شرکت نفت، درباره گنبد نمکی قم می‌توان گفت که منشا نمک به طور عمده از ائوسن بالایی، الیگوسن و حتی الیگومیوسن (در مسیر صعود مواد تبخیری) است. از آنجایی که گنبد نمکی قم سازند قرمز بالایی را قطع نموده است و هم اکنون نیز فعال است پس جای‌گیری آن جوانتر از دوره میوسن است [آزمایی پدرام و حسینی، ۱۳۷۱؛ Abaei et al, 1963]. برای بررسی بیشتر موضوع، به طور مختصر در مورد سازندهای موجود در منطقه و ضخامت آن‌ها مطالبی ذکر می‌گردد تا در مورد عمق گنبد نمکی اطلاعات بیشتر به دست آید.

سازند قرمز بالایی (میوسن) در نیمه جنوبی محدوده ورقه قم رخنمون یافته و از گسترش زیادی برخوردار است. ضخامت آن در شمال کوه یزدان نزدیک به ۲۸۰۰ متر، حوالی قشلاق دو چاه در حدود ۲۷۰۰ متر و نیز در تاقدیس البرز و سراجه توسط زمین شناسان شرکت ملی نفت ۳۲۰۰ تا ۳۵۰۰ متر تعیین شده است [زمانی پدرام و حسینی، ۱۳۷۱].

سازند قم (الیگومیوسن) در نیمه جنوبی ورقه قم از گسترشی زیاد برخوردار است و در برگرنده سنگ آهک، مارن، ماسه سنگ، شیل و گچ و در برخی نقاط سنگ‌های آتشفشانی است. بیشترین ضخامت آن در نزدیکی روستای خورآباد و قشلاق دو چاه ۱۳۰۰ متر گزارش شده است [زمانی پدرام و حسینی، ۱۳۷۱].

سازند قرمز زیرین (الیگوسن) در حوالی روستای خورآباد، کوه دو برادر، کمرکوه و قشلاق دو چاه رخنمون دارد و براساس نوع سنگ شناسی هر یک از برونزدگی‌ها، زیر واحدهای کوچکتری در آن تفکیک شده‌اند. مرز بالایی آن توسط لایه‌های رسوبی دریائی سازند قم پوشیده می‌شود، که نشان دهنده تغییر رژیم کولایی- قاره‌ای به دریایی است. بر طبق گزارش زمین شناسان شرکت ملی نفت چاه شماره ۷ تاقدیس البرز نزدیک به ۵۱۷ متر از سازند قرمز زیرین را قطع کرده است، بدون آنکه به قاعده این سازند برسد [زمانی پدرام و حسینی، ۱۳۷۱].

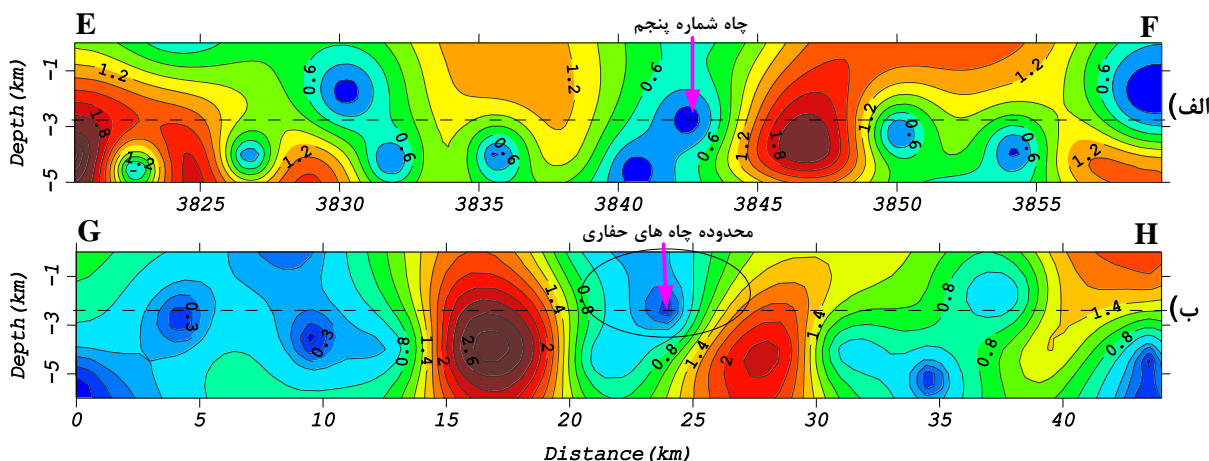
با مد نظر قرار دادن موارد اشاره شده و ضخامت سازندهای موجود در منطقه، می‌توان نتیجه گرفت که عمق زیرین تقریبی گنبد نمکی که از سازند قرمز پایینی منشا شده باشد بایستی حداقل بیشتر از ۴۰۰۰ متر باشد، بنابراین با توجه به این نتیجه و نتایج حاصل از مقاطع گرادیان کل نرمال می‌توان گفت که ریشه این گنبد بایستی به سازند قرمز زیرین برسد. هر چند بحث در این زمینه جزء اهداف این رساله نمی‌باشد و نیاز به اطلاعات زمین‌شناسی و حفاری مناسب دارد.

در پاسخ به این پرسش که آیا این گنبد نمکی توانسته نقش یک تله نفتی را بازی نماید، باید گفت با توجه به مدل‌سازی انجام شده در فصل چهارم و نتایج گرادیان کل نرمال دو بعدی آنومالی گرانی منطقه، می‌توان گفت که این گنبد به تنهایی نمی‌تواند حاوی تله نفتی باشد. ولی با توجه به اطلاعات

زمین‌شناسی که تاقدیس البرز غربی تا پای گنبد نمکی ادامه دارد امکان این که در دامنه تاقدیس و محل اتصال با گنبد بتواند محلی برای تمرکز مواد هیدروکربوری باشد، وجود دارد که در نقشه‌های سه بعدی بحث می‌شود.

علاوه بر پروفیل‌های بالا، مقادیر گرادیان کل نرمال دو بعدی برای دو پروفیل دیگر یکی در راستای محورهای و عبوری از چاه اکتشافی شماره ۵ (پروفیل EF در شکل ۶-۲۰) و دیگری پروفیل شمال شرقی-جنوب غربی (پروفیل GH در شکل ۶-۲۰) محاسبه و مقاطع آنها رسم گردید (شکل ۶-۲۲). براساس داده‌های حاصل از عملیات حفاری، عمق مخزن نفت در چاه اکتشافی ۵ حدود ۲۶۸۰ متر می‌باشد [پارسی، ۱۹۷۴]. براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی دو بعدی و مطابق (شکل ۶-۲۲-الف)، دو محدوده کمینه مشخص شده در تصویر (به ترتیب در فاصله ۳۸۳۰ و ۳۸۴۳) که محصور بین مقادیر بیشینه می‌باشند که به لحاظ تمرکز منابع هیدروکربوری حائز اهمیت می‌باشند. با ملاحظه موقعیت چاه‌های اکتشافی به نفت رسیده به ویژه شماره ۵ می‌توان عنوان نمود که با نتایج حاصل از کمینه‌های گرادیان کل نرمال تطابق خوبی دارد. در سمت راست این شکل نیز مقادیر کمینه‌ای وجود دارد که مطابقت خوبی با مقادیر NFG سه بعدی افق حدود ۳۰۰۰ متری دارند. هر چند به علت قرار گرفتن در حاشیه شمالی محدوده مورد بررسی، امکان اینکه داده‌ها از کیفیت خوبی برخوردار نباشند وجود دارد.

این موضوع روی مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی روی پروفیل GH (شکل ۶-۲۲-ب) نیز قابل بررسی است. مطابق این شکل سه محدوده کمینه محصور بین بیشینه در سمت چپ، وسط و سمت راست پروفیل دیده می‌شود که بخش میانی محل حفاری‌های اکتشافی می‌باشد. با توجه به اینکه پروفیل از چاه شماره ۵ نیز می‌گذرد لذا هماهنگی و انطباق خوبی بین داده‌های حفاری و نتایج حاصل از روش گرادیان کل نرمال دیده می‌شود. بنابراین محدوده‌های سمت چپ و راست پروفیل را می‌توان به عنوان مناطق پتانسیل دار برای تمرکز مواد هیدروکربوری دانست.



شکل ۶-۲۲: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی، الف) روی پروفیل EF گذرنده از چاه شماره ۵ و ب) روی پروفیل GH در امتداد جنوب غرب به شمال شرق و گذرنده از چاه شماره ۵، مقادیر منحنی‌های کمینه گرادیان کل نرمال به رنگ آبی همراه با چاه حفر شده دیده می‌شود.

۶-۴-۶- مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی

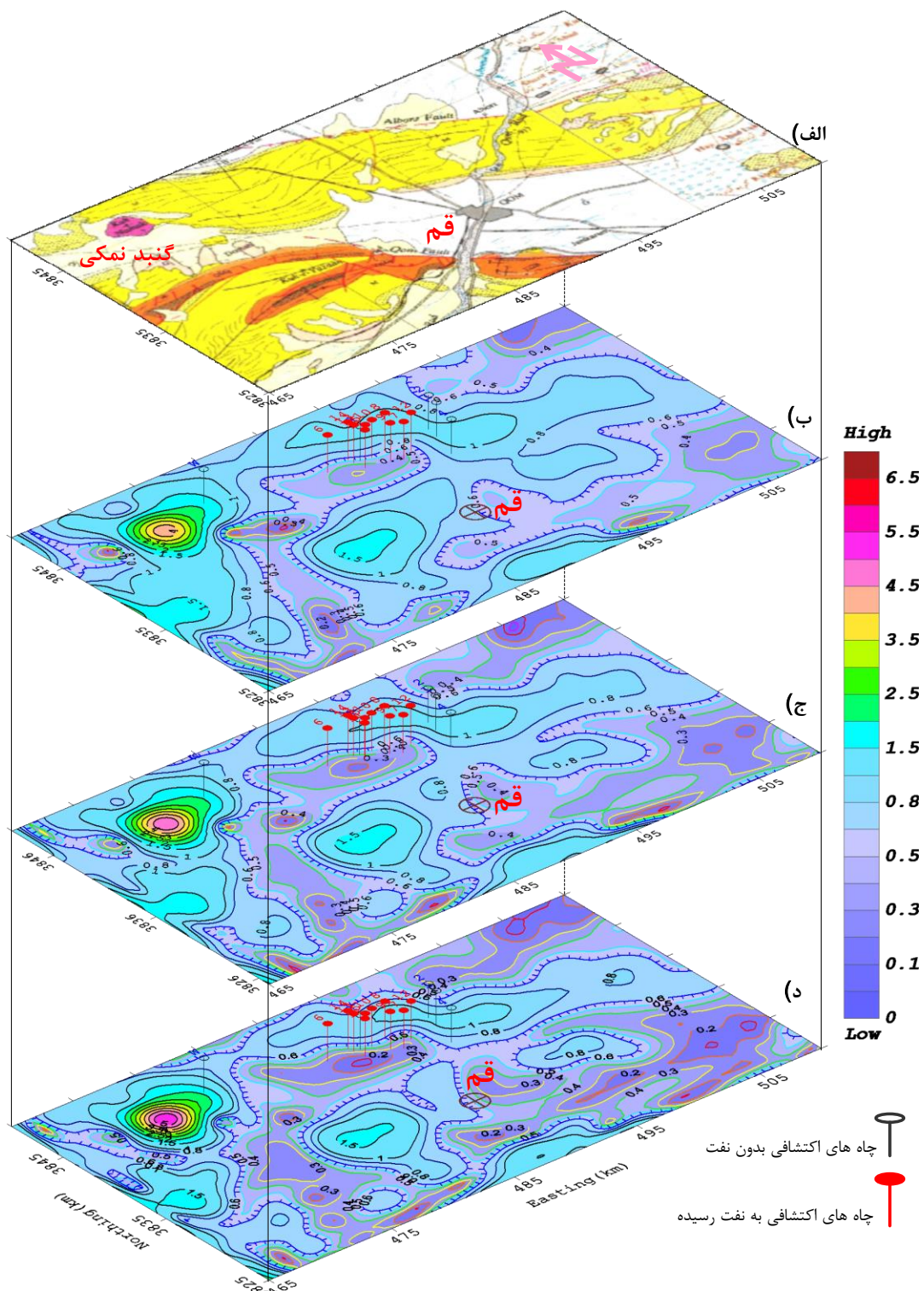
برای تعیین نواحی پتانسیل‌دار نفت و گاز تا عمق حدود ۵۰۰۰ متری، با ملاحظه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، ابعاد شبکه اندازه‌گیری داده‌های گرانی و داده‌های حاصل از چاه‌های اکتشافی، مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی به کمک برنامه تهیه شده برای افق‌های مختلف از عمق ۱۵۰۰ تا ۴۵۰۰ متری به فواصل ۵۰۰ متری محاسبه گردید. با توجه به متفاوت بودن ابعاد شبکه اندازه‌گیری داده‌های گرانی و همچنین روند قرارگیری آنومالی‌های در راستای شمال غرب- جنوب شرق، تعداد جملات هارمونیک سری فوریه برای محاسبه گرادیان کل نرمال سه بعدی متفاوت انتخاب شد. با بررسی انجام شده مناسب‌ترین تعداد جملات سری فوریه برای محاسبه مقادیر NFG در راستای محور x و y به ترتیب $M=33$ و $N=27$ منظور شد. در شکل (۶-۲۳) نقشه‌های گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی‌های گرانی ناحیه البرز قم برای عمق‌های ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ متری همراه نقشه زمین‌شناسی ارائه شده است.

مطابق شکل مذکور مقادیر کمینه NFG آنومالی‌های گرانی به عنوان مشخصه‌ای بیان‌کننده اختلاف چگالی می‌باشند که مرتبط با پتانسیل‌های هیدروکربوری در منطقه می‌باشد. مقادیر کمینه با کنتورهای کمتر از ۰/۶ به عنوان مناطق پتانسیل بالا انتخاب شده است. با توجه به شکل و انطباق

مقادیر کمینه NFG با موقعیت چاه‌های اکتشافی در ناحیه، می‌توان مناطق پتانسیل‌دار برای حفر چاه اکتشافی جدید را معرفی نمود. مطابق شکل، چاه‌های اکتشافی که به نفت رسیده‌اند با مشخصه قرمز رنگ (در بین آن‌ها چاه ۵ نیز وجود دارد) دیده می‌شوند که مطابقت خوبی با منحنی‌های مقادیر کمینه گرادیان کل نرمال دارد. چاه‌های خشک نیز با مشخصه آبی رنگ ارائه شده‌اند.

مطابق راهنمای رنگی شکل (۶-۲۳)، مناطق به رنگ بنفش که توسط منحنی هاشوردار آبی پر رنگ احاطه شده‌اند به عنوان مناطق پتانسیل‌دار برای منابع هیدروکربوری معرفی می‌گردد. با توجه به نتایج دو بعدی و مقایسه آن با نتایج سه بعدی مناطقی در حوالی جنوب تا جنوب شرق منطقه یعنی از حوالی قم تا سراج پتانسیل بالا معرفی می‌شوند. همچنین در گوشه راست و بالا نقشه یعنی حوالی شمال شرق روستای البرز و در جنوب غرب نقشه نیز مناطقی مشخصه شده که دارای مقادیر گرادیان کل نرمال کمینه می‌باشند. آنچه در بحث گرادیان کل نرمال دو بعدی گفته شد، به نظر می‌رسد که گنبد نمکی قم به عنوان یک تله نفتی نتوانسته عمل نماید. مطابق شکل (۶-۲۳) و نتایج بررسی‌های گرادیان کل نرمال سه بعدی مندرج در فصل پنجم، هیچگونه اثری از هیدروکربور در نتیجه پدیده گنبد نمکی دیده نمی‌شود. با توجه به نقشه‌های گرادیان کل نرمال سه بعدی، در این منطقه محدوده-های مقادیر کمینه NFG3D در بخش گنبد نمکی دیده نمی‌شود و تنها در حاشیه غربی و جنوب شرق این توده نمکی شرایط وجود یک تله نفتی دیده می‌شود.

دلایل وجود مقادیر کمینه در حاشیه‌های گنبد نمکی را می‌توان به عملکرد تاقدیس غربی و برخورد دنباله غربی آن به گنبد نمکی مربوط دانست. از طرفی وجود شرایط کمینه در درون یا موقعیت گنبد نمکی براساس مدل‌های سه بعدی دیده نمی‌شود. بنابراین با توجه به همه نکات و اطلاعات موجود از قبیل زمین‌شناسی، حفاری [پارسی، ۱۹۷۴؛ زمانی پدram و حسینی، ۱۳۷۱] نتایج دو بعدی و سه بعدی گرادیان کل نرمال گرانی می‌توان گفت که تله نفتی در اثر این گنبد نمکی تشکیل نشده و نمی‌تواند به عنوان تنها عامل در این مورد باشد. احتمالاً گنبد نمکی توانسته در برخورد با تاقدیس شرایطی را فراهم نماید تا در دامنه‌های دورتر آن امکان تمرکز نفت باشد.



شکل ۶-۲۳: نقشه زمین‌شناسی محدوده حوضه نفتی البرز قم با مشخصه شهر قم، گنبد نمکی (الف) و گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی‌های گرانی در افق‌های (ب) ۲۰۰۰، (ج) ۲۵۰۰ و (د) ۳۰۰۰ متری، موقعیت چاه‌های اکتشافی با علامت مشخصه روی نقشه‌ها دیده می‌شود.

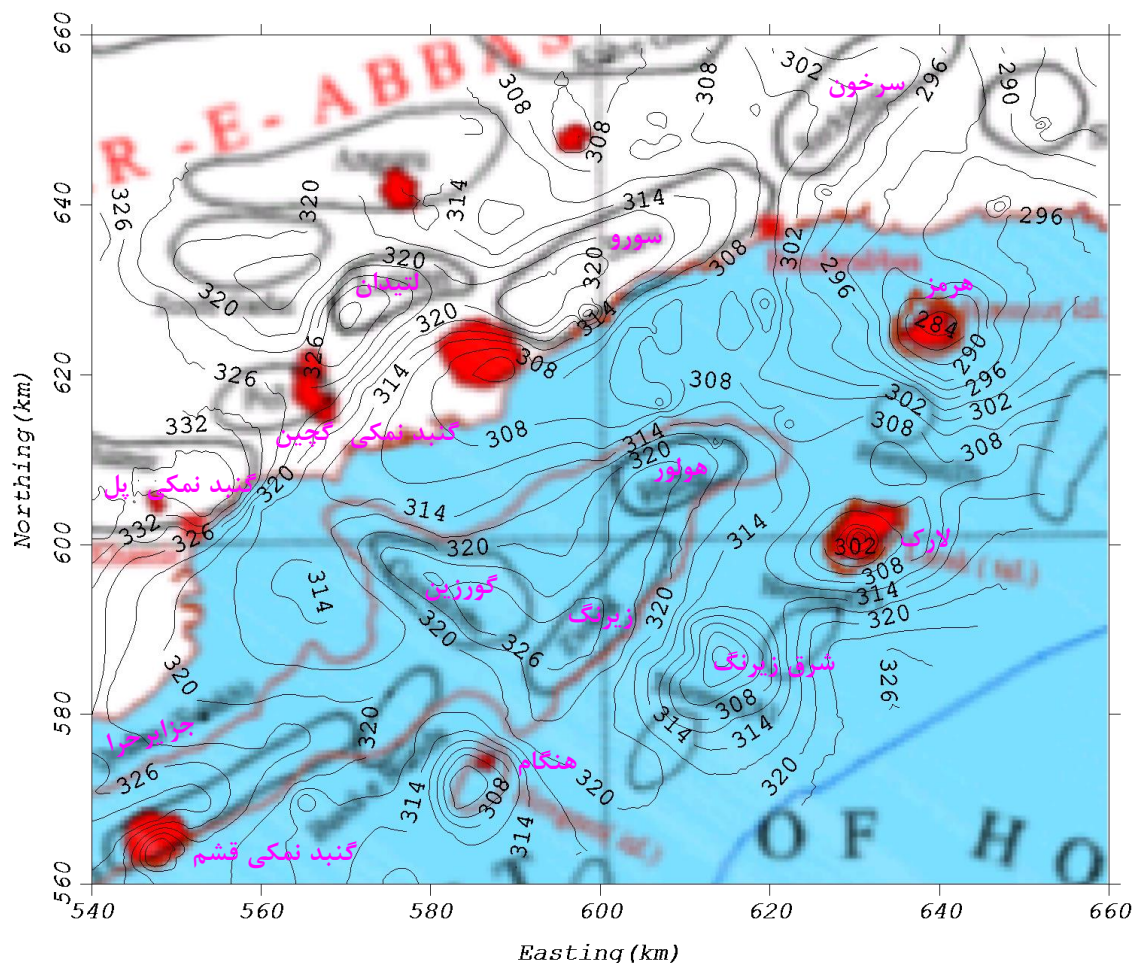
۶-۵- اکتشاف ذخایر هیدروکربنی در منطقه قشم

۶-۵-۱- مقدمه

عملیات گرانی سنجی خشکی- دریایی زون بندرعباس تا جزیره لاوان در سال ۱۹۶۰ توسط شرکت پی‌جویی‌های ژئوفیزیکی (GPC) در پنج منطقه انجام گرفت. نقشه آنومالی بوگه آن در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ بدون گزارش علمی تهیه گردید. در سال ۱۳۸۱ نقشه حاصل توسط گروه غیرلرزه‌ای مدیریت اکتشاف نفت رقومی و مورد بررسی مجدد قرار گرفت و نقشه‌های آنومالی بوگه و باقی‌مانده با روش‌های مختلف تهیه گردید. از این داده‌ها به منظور بررسی به روش گرادیان کل نرمال جهت شناسایی نفتگیرهای تاقدیسی و گنبد نمکی منطقه قشم استفاده گردید.

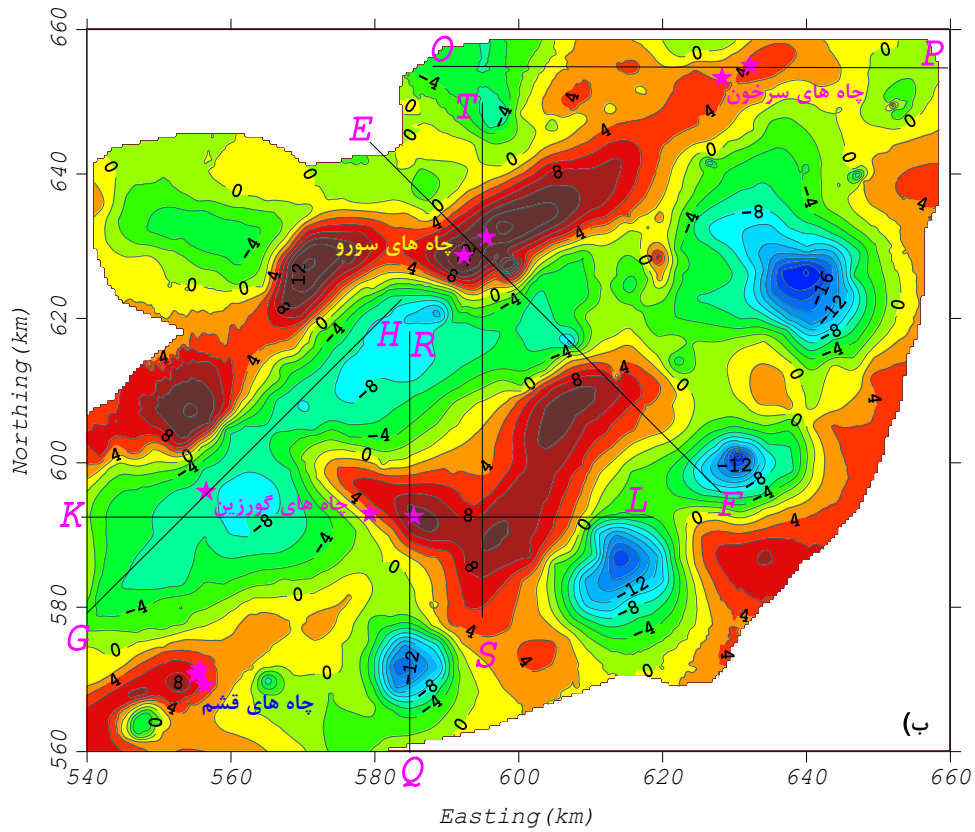
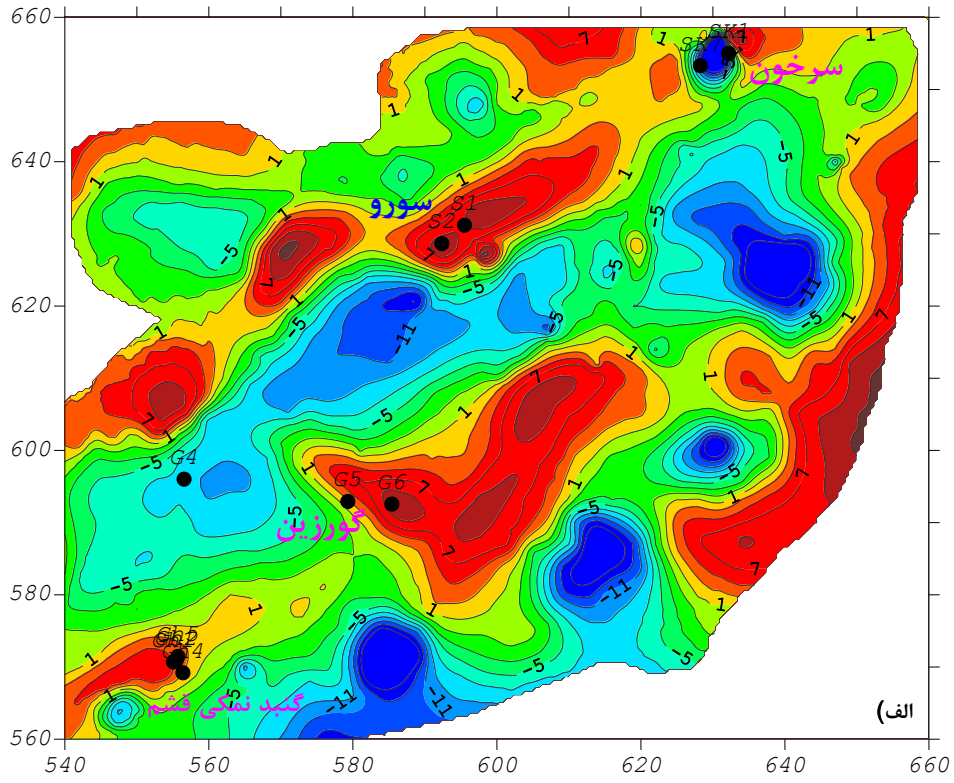
۶-۵-۲- داده‌های گرانی سنجی

داده‌های گرانی مورد نظر در مناطق کم عمق از غرب جزیره قشم تا جزیره هرمز و سواحل شمالی آن از سرخون تا لتیدان را در بر می‌گیرد. محاسبات آنومالی گرانی در این شبکه منظم با فاصله یک کیلومتری انجام شده و سپس نقشه گرانی با فاصله کنتوری سه میلی‌گال رسم گردید. دامنه تغییرات آنومالی‌های گرانی بوگه از ۲۹۷- تا ۳۳۰- میلی‌گال را شامل می‌شود. در نواری جنوبی ساحل جزیره ۵ آنومالی منفی به نام‌های هرمز، لارک، شرق زیرنگ، هنگام و قشم وجود دارد که ناشی از اثرات نمک است. منطقه حرا در منتهی الیه شمال غربی جزیره نیز در اثر بالآمدگی نمک پدیده آمده و تولید یک زون منفی گرانی در نقشه آنومالی گرانی بوگه در راستای جنوب غرب - شمال شرق تا زیر دشت بندرعباس (محدوده سرخون) نموده است. آنومالی‌های بسته منفی ناشی از نمک در برخی نقاط ساحل شمالی جزیره مانند گنبد نمکی پل، گچین و انگوران همانند نوار جنوبی در سطح رخنمون دارند. آنومالی گرانی زون قشم و شمال منطقه قشم شامل سورو تا لتیدان را به شکل زون بلند که احتمالاً ساختمان لاک‌پستی است مشخص می‌کند (شکل ۶-۲۴).



شکل ۶-۲۴: آنومالی بوگه منطقه اکتشافی قشم بر روی نقشه ساختارهای زمین‌شناسی (گنبد نمکی و تاق‌دیزی)

با توجه به این که آشکارسازی آنومالی‌های گرانی و تفسیر آن‌ها با استفاده از گرادیان کل نرمال روی مقدار باقی‌مانده گرانی، پاسخ‌های مناسب‌تری ارائه می‌نماید بنابراین لازم است تا با استفاده از روش‌های مناسب اثرات آنومالی ناحیه‌ای از آنومالی بوگه حاصل کسر شود تا آنومالی باقی‌مانده که هدف اصلی اکتشاف است شناسایی شود. با اعمال فیلتر روند سطحی مرتبه چهار مناسب‌ترین نقشه آنومالی مقدار باقی‌مانده گرانی به دست آمد که در شکل (۶-۲۵) این نقشه به همراه محل حفر چاه‌های اکتشافی و محل پروفیل‌ها ارائه شده است. در نقشه آنومالی باقی‌مانده مناطق گرانی بالا به رنگ قهوه‌ای تا قرمز و مناطق متاثر از نمک به رنگ آبی دیده می‌شود. در نتیجه زون کم عمق ساحلی بین قشم و بندر خمیر (شمال قشم) که شامل جنگل‌های حرا می‌باشد روی آنومالی نمکی قرار می‌گیرند.



شکل ۶-۲۵: آنومالی باقی مانده گرانی به روش روند سطحی با مرتبه ۴ همراه با موقعیت چاه های اکتشافی و محل پروفیل ها ، الف) داده های گرانی بدون تصحیح مقدار آن در محدوده سرخون ، ب) داده های گرانی با تصحیح مقدار آن

همین طور زون جنوبی قشم شامل آنومالی‌هایی است که بعضی از آن‌ها به صورت جزایر نمکی رخنمون داشته و برخی از آنومالی‌های نمکی (شرق زیرنگ) هنوز به سطح نرسیده است. در نتیجه زون شمالی و جنوبی جزیره قشم با گنبد‌های نمکی محدوده می‌شود که این دارای روند تقریبی شمال شرق-جنوب غرب هستند. بنابراین به نظر می‌رسد توپوگرافی خشکی قشم نیز بین این دو محدوده نمکی به صورت لاک‌پشتی باشد.

منطقه دیگری در شمال نوار ساحلی به موازات جزیره دارای مقدار گرانی مثبت (زیاد) شامل ساختمان‌های سرخون، سورو و لتیدان می‌باشد که توسط گنبد‌های نمکی نفوذی در شمال و نمک‌های حرا در جنوب محدود شده و آن را به صورت ساختار لاک‌پشتی با روند شمال شرق-جنوب غرب (متأثر از روند نمک‌ها) در آورده است. در منطقه ساحلی شمالی ساختمان‌های سرخون، سورو، لتیدان و خمیر به صورت نردبانی قرار گرفته‌اند.

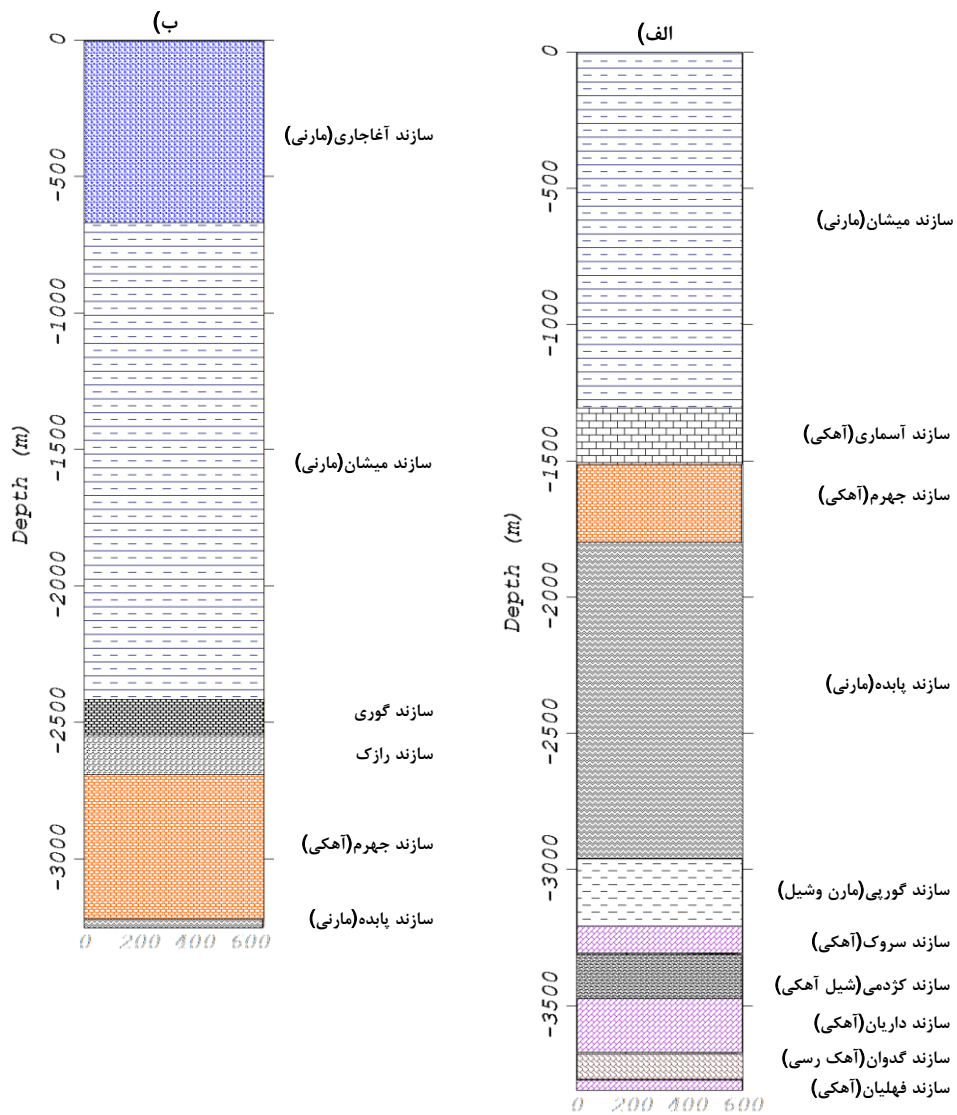
در جزیره قشم نیز دو روند آنومالی تقریباً عمود بر هم یکی به صورت شمال شرق-جنوب غرب شامل ساختمان‌های هولور، زیرنگ و قشم و دیگری در راستای شمال غرب-جنوب شرق شامل گورزین می‌باشد. در بخش شمال شرق منطقه مورد بررسی در محدوده میدان سرخون نیز احتمالاً ساختمان جدیدی وجود دارد که نیاز به بررسی زمین‌شناسی [اطباطبایی و همکاران، ۱۳۸۱] بیشتر دارد.

با بررسی انجام شده روی نقشه آنومالی باقی‌مانده (شکل ۶-۲۵-الف) یک محدوده کمینه معرف ساختار گنبدی در وسط ساختار سرخون واقع دیده می‌شود. ولی با مشاهده فایل داده‌های گرانی محدوده سرخون، مشخص گردید که در این قسمت یک اشتباه در مقدار داده گرانی رخ داده است و به جای عدد ۳۰۰/۴ میلی گال عدد ۲۰۰/۴ نوشته شده بود و به این دلیل سبب تولید یک آنومالی منفی گرانی در محدوده شده است (شکل ۶-۲۵-الف). با تصحیح این مقدار و تهیه نقشه آنومالی باقی‌مانده جدید این مشکل مرتفع گردیده و بیانگر یک ساختار تاقدیسی (شکل ۶-۲۵-ب) می‌باشد.

براساس گزارشات شرکت ملی نفت ایران چاه‌های حفاری شده در این منطقه عمدتاً به جهت اکتشاف نفت در سازند آسماری بوده که به دلیل نرسیدن به این هدف متوقف شده‌اند. ولی در دهه‌های اخیر چاه‌های جدید تولیدی گاز (سرخون ۷)، چاه اکتشافی سوو ۲ و گورزین ۵ برای توسعه مطالعات اکتشافی حفر شده‌اند. چاه گورزین ۵ بر روی ساختار زمین شناسی گورزین در عمق ۱۹۵۰ متری به گاز رسیده است.

چاه اکتشافی شماره ۲ سوو در ساختار سوو به منظور اکتشاف منابع هیدروکربوری در سازندهای مختلف نظیر سازندهای آسماری، جهرم، داریان و گدوان حفر شده است و تا عمق ۳۸۱۰ متری در سازند فهلیان ادامه یافت. براساس لایه آزمایشی در سازندهای مختلف به نظر می‌رسد که هیدروکربور موجود در سازندهای فوق اقتصادی نمی‌باشد. در سازند پابده در عمق ۲۷۱۳ متری مقدار جزئی نفت و در عمق ۲۷۲۱ جریان ضعیفی از نفت و گاز دیده شده است. سازند داریان مقادیری جزئی گاز نشان داده و در سازندهای گدوان و فهلیان هیچگونه اثری از هیدروکربور ثبت نشده است [پیرمادیان و صالحی‌راد، ۱۳۷۹]. ستون چینه‌شناسی برگرفته از اطلاعات حفاری این چاه در شکل (۶-۲۶-الف) ارائه شده است.

چاه شماره ۷ سرخون به عنوان یک چاه تولیدی گاز از سازندهای گوری بازده و جهرم در میدان گازی سرخون در سال ۱۳۶۱ حفر شده است. عملیات حفاری این چاه از سازند آغاچاری (سطح زمین) شروع و در عمق ۳۲۵۱ متری در سازند پابده به پایان رسیده است. عملیات لایه آزمایشی در عمق‌های ۲۴۸۵ تا ۳۲۵۰ متری (یعنی سازندهای گوری، رازک و جهرم) نشان می‌دهد که میزان تقریبی تولید گاز از مخزن گوری ۲۲ میلیون فوت مکعب در روز است. همچنین نتایج پتروفیزیکی ثابت می‌کند در سازند جهرم چاه از عمق ۲۸۳۲ متری این چاه درون آب قرار می‌گیرد و به دلیل درصد اشباع زیاد آب، هیدروکربور موجود در آن ناچیز و غیرقابل استفاده می‌باشد [مشتاقیان، ۱۳۶۳]. ستون چینه‌شناسی برگرفته از اطلاعات حفاری این چاه در شکل (۶-۲۶-ب) ارائه گردیده است.



شکل ۶-۲۶: ستون چینه شناسی در چاه های اکتشافی الف (سورو ۲ و ب) سرخون ۷

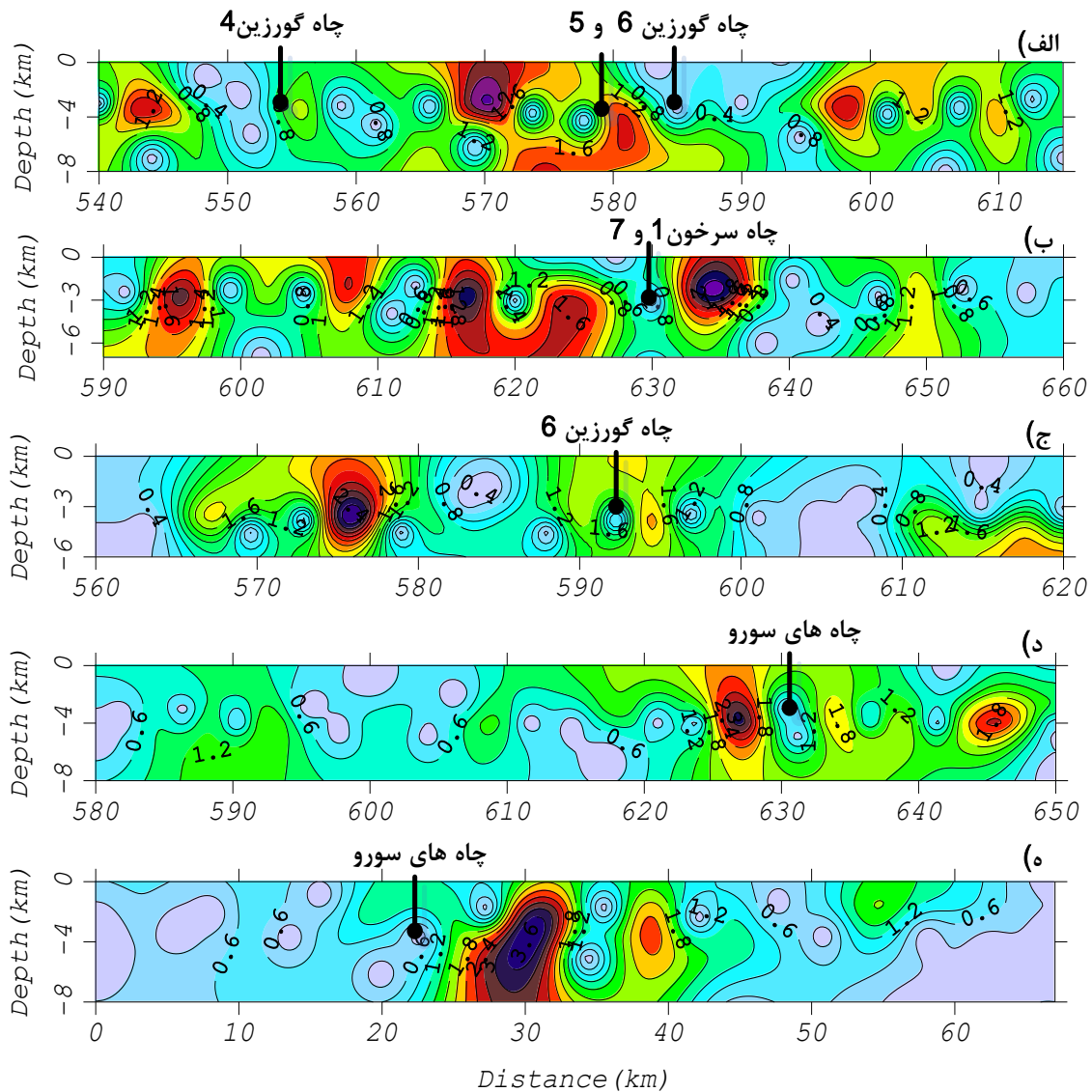
۶-۵-۳- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی داده های گرانی

به منظور تعیین تعداد جملات بهینه سری فوریه جهت محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال در دو حالت دو و سه بعدی، مقدار NFG با تعداد زیادی از N در راستای پروفیل‌های موجود در (شکل ۶-۲۵) محاسبه شد و در نهایت تعداد جملات بهینه هارمونیک در راستای محور طول‌ها عدد $(M=50)$ و در راستای محور عرض‌ها عدد $(N=45)$ انتخاب گردید.

در تعیین و انتخاب محل پروفیل‌ها وجود چاه‌های اکتشافی و ساختارهای مختلف موجود مد نظر بوده است. مطابق (شکل ۶-۲۷) با توجه به طول پروفیل‌ها، حدود ۷۰ کیلومتر، مناسب‌ترین عمق مورد کاوش کمتر از ۶ کیلومتر خواهد بود. در همه پروفیل‌ها مقادیر کمینه بسته محصور به بیشینه‌ها در فواصل مختلف دیده می‌شود. براساس مقطع OP که از ساختار سرخون می‌گذرد، یک مقدار کمینه در حدود $X=630$ کیلومتری و عمق تقریبی ۳ کیلومتری به وضوح قابل ردیابی است که محدوده چاه‌های سرخون می‌باشد (شکل ۶-۲۷-ب). این موضوع بیان کننده این مطلب است که در این محل یک تاقدیس حاوی هیدروکربور می‌تواند وجود داشته باشد که موقعیت آن روی نقشه آنومالی باقی‌مانده (شکل ۶-۲۵) با روند آنومالی مثبت نوار ساحلی بندرعباس قابل مشاهده است. علاوه بر این، نتیجه حاصل با نتایج حفاری چاه شماره ۷ سرخون که یک مخزن گازی در عمق ۳۲۰۰ متری را نشان می‌دهد کاملاً منطبق است.

دو پروفیل ST و EF با دو راستا متفاوت (شکل ۶-۲۵) از ساختار سورو عبور می‌نماید نتایج حاصل به ویژه روی پروفیل ST وجود یک کمینه NFG را در محل چاه‌های سورو نشان می‌دهد اگر چه میزان گاز این مخزن به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد (شکل ۶-۲۷-د-ه).

همچنین مقایسه دو مقطع KL و QR گذرنده از ساختارهای منطقه مانند گورزین (شکل ۶-۲۵) نشان می‌دهد که اگر چه چاه شماره ۶ در پروفیل QR یک محدوده کمینه را محصور به دو بیشینه نشان می‌دهد (شکل ۶-۲۷-ج)، ولی روی مقطع دیگر (KL) این محدوده زیاد امید بخش نیست. همچنین چاه شماره ۵ در کناره شرقی محدوده کمینه قرار گرفته و وجود هیدروکربور در این چاه به مقدار کمی دیده می‌شود و با تغییر محل چاه به سمت غرب آن در موقعیت مناسب از مقادیر کمینه قرار می‌گیرد که در نقشه سه بعدی واضح تر دیده می‌شود. در مقطع KL چاه گورزین ۴ روی یک محدوده کمینه قرار گرفته که همانند چاه شماره ۵ در کناره میدان قرار گرفته که در نقشه‌های سه بعدی موقعیت آن نسبت به مخزن هیدروکربوری قابل مشاهده است (شکل ۶-۲۷-الف).



شکل ۶-۲۷: مقاطع گرادیان کل نرمال دو بعدی در راستای پروفیل‌های مشخص شده در شکل (۶-۲۵)، الف) پروفیل KL (M=۵۰) ب) پروفیل OP (M=۵۰)، ج) پروفیل QR (N=۴۵)، د) پروفیل ST (M=۴۵) و ه) پروفیل EF (N=۴۵). عمق تقریبی برای نواحی امید بخش بر روی مقاطع براساس مقادیر کمینه و بیشینه حدود ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متری برآورد می‌شود.

نتایج حفاری نشان می‌دهد که چاه شماره ۶ خشک بوده و چاه شماره ۴ نیز فقط تا عمق ۱۶۰۰ متری در سازند آسماری حفر شده است. مطابق بررسی‌ها روی مقاطع NFG نشان داده شده در شکل (۶-۲۷)، می‌توان گفت که روی این مقاطع یا به عبارتی در منطقه مورد مطالعه، ساختارهای موجود حاوی مواد هیدروکربوری با ذخیره مناسبی می‌باشند که بعضاً با چاه‌های اکتشافی حفاری شده منطبق است. ولی نکته مهم در این نتایج، محل حفر برخی چاه‌ها براساس ساختارهای موجود است

که در برخی مواقع به مخزن هیدروکربوری برخورد ننموده است (ساختار گورزین). این موضوع به دو دلیل دلیل می‌تواند باشد نخست آنکه محل حفر چاه روی ساختار به درستی انتخاب نشده است که این موضوع روی مقاطع OP (شکل ۶-۲۷-ب، در محدوده ۶۱۰ کیلومتری)، و EF (شکل ۶-۲۷-ه، در محدوده ۳۵ کیلومتری) به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. دوم برخی مخازن در اعماق پایین‌تر از میزان حفاری قرار دارند که روی نقشه‌های سه بعدی که بعداً می‌آیند به خوبی قابل مشاهده است (چاه‌های اکتشافی گورزین و قشم روی این ساختارها). بنابراین عمق تقریبی مخازن هیدروکربوری در این منطقه روی مقاطع براساس مقادیر کمینه و بیشینه حدود ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متری برآورد می‌شود.

۶-۵-۴- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی

با توجه به این که ساختارهای زمین‌شناسی متفاوت در منطقه اعم از گنبد نمکی و تاقدیس بعضاً حالت سه بعدی دارند لذا این مورد می‌تواند مثال مناسبی برای ارزیابی توانمندی‌های روش گرادیان کل نرمال سه بعدی ارائه شده در این رساله باشد. از آنجایی که عمق حفاری انجام گرفته در منطقه بیشتر برای دسترسی به میادین نفتی موجود در سازند آسماری بوده است بنابراین غالب حفاری در عمق کم به اتمام رسیده است، ولی براساس ستون چینه‌شناسی چاه‌های سرخون-۷ و سورو-۲ مخازن گازی در سازند گورپی و پایین‌تر واقع می‌باشند بنابراین تخمین حدود این عمق و نیز وجود یا عدم وجود منابع هیدروکربوری (گازی) نقش مهمی در اکتشافات آتی در این منطقه دارد.

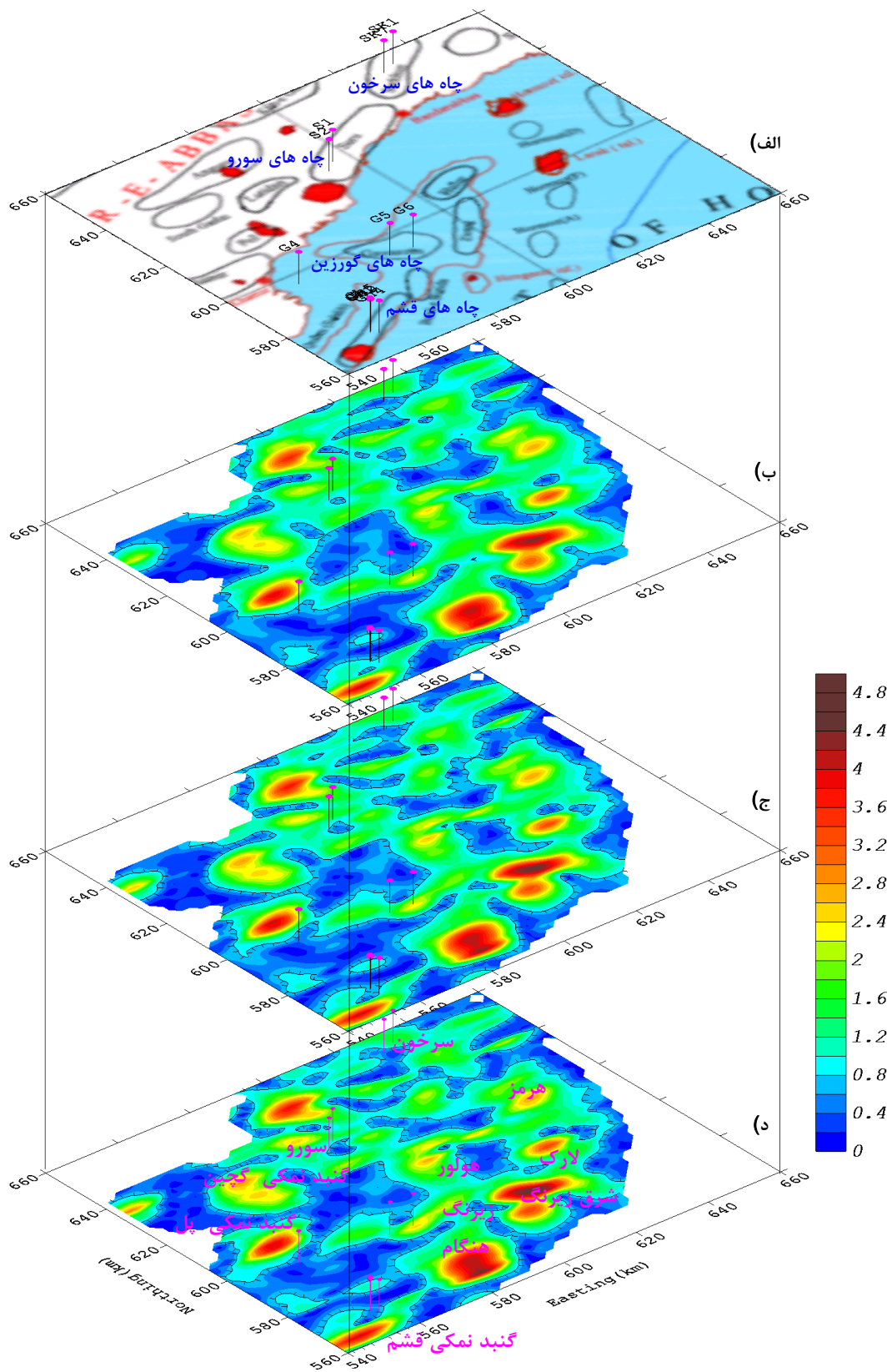
با توجه به ابعاد محدوده اندازه‌گیری (۱۲۰×۱۰۰ کیلومتر) و اطلاعات حفاری موجود، عمق جستجو منابع آنومال تا حدود ۸ کیلومتری به راحتی قابل بررسی می‌باشد. ولی با توجه به ستون چینه‌شناسی موجود از چاه‌های حفاری و نیز عمق سازند مخازن هیدروکربوری، مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی تا عمق ۵۰۰۰ متری محاسبه گردید. مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی حاصل از این میدان برای اعماق ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰، ۳۵۰۰، ۴۰۰۰، ۴۵۰۰ و ۵۰۰۰ متری با لحاظ نمودن مقادیر تعداد جملات $M=50$ و $N=45$ به ترتیب در راستای محورهای طول و عرض و

استفاده از سری فوریه دو بعدی محاسبه گردید. در شکل (۶-۲۸) چند نمونه از نقشه‌های مربوط به افق‌های مختلف به همراه مناطق پتانسیل بالا مواد هیدروکربوری با مشخصه آبی رنگ محدود به هاشور ارائه شده است.

مطابق شکل مذکور، مناطق آنومال و پتانسیل بالا مرتبط با ساختارهای تاقدیسی و گنبد نمکی می‌باشد. هرچه عمق گسترش افزایش می‌یابد در برخی ساختارها وضعیت منحنی‌های کمینه بهتر آشکارسازی می‌شود. عمده مناطق جنوب غرب تا غرب منطقه از پتانسیل بالاتری برخوردار است. حوالی گنبدهای نمکی لارک و شرق زیرنگ (شکل ۶-۲۵) محدوده‌های پتانسیل دار به طور واضح دیده می‌شود که عمقی حدود ۳ تا ۴ کیلومتر را نشان می‌دهند.

ساختار سورو، چاه شماره ۱ سرخون، چاه‌های ۵ و ۶ ساختار گورزین و چاه‌های قشم در محدوده-های کمینه قرار نمی‌گیرند که با نتایج داده‌های حفاری هماهنگی خوبی دارند. البته با افزایش عمق گسترش به ویژه چاه‌های قشم و چاه ۴ گورزین (شکل ۶-۲۸-ج-د) در محدوده پتانسیل بالا قرار می‌گیرند. به این ترتیب منطقه حدفاصل بین دو گنبد نمکی قشم و پل که ناحیه نمکی حرا قرار دارد می‌تواند یکی از نواحی امیدبخش برای اکتشافات آتی پیشنهاد گردد.

از دیگر نواحی می‌توان حدفاصل گنبد نمکی گچین و ساختار تاقدیسی گورزین را نام برد که از محدوده‌های مقادیر کمینه گرادیان کل نرمال گرانی می‌باشد. سخن آخر اینکه در بدبینانه‌ترین حالت اگر مقدار کمینه را $0/2$ برای تعریف مناطق پر پتانسیل فرض نماییم نواحی محدود به گنبدهای نمکی گچین، قشم و پل و ادامه شمال غربی آن‌ها از نقاط اصلی امیدبخش می‌باشند.

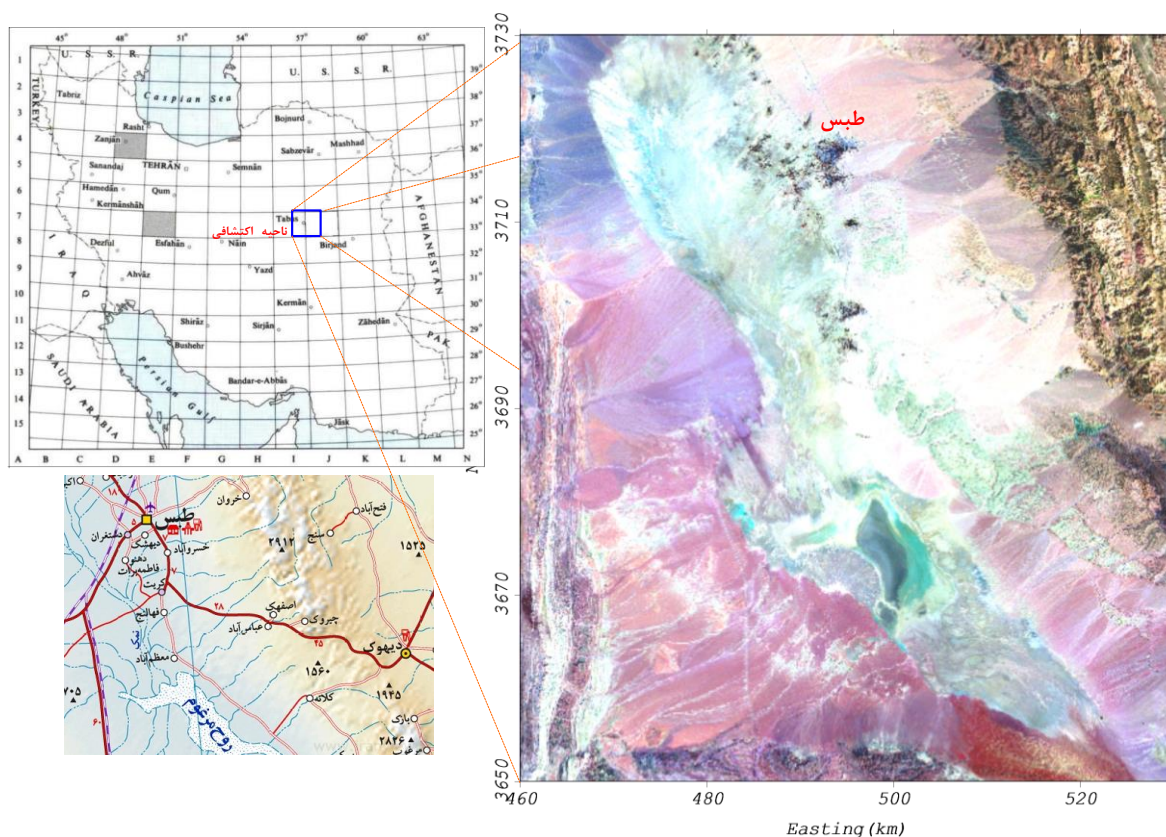


شکل ۶-۲۸: نقشه موقعیت میادین و چاه‌های اکتشافی در منطقه قشم (الف)، نقشه‌های گرادیان کل شمال سه بعدی با تعداد جملات ۵۰ و ۴۵ به ترتیب در راستای محورهای طول و عرض در اعماق (ب) ۳، (ج) ۳/۵ و (د) ۴ کیلومتری

۶-۶- پیش بینی مناطق پتانسیل بالای هیدروکربوری در حوضه طبس

۶-۶-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه طبس

منطقه عملیات اکتشاف گرانی سنجی طبس محدوده‌ای به وسعت ۴۵۴۵ کیلومتر مربع بین طول‌های جغرافیایی $۵۶^{\circ}۳۷'$ و $۵۷^{\circ}۲۰'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $۳۳^{\circ}۰۰'$ و $۳۳^{\circ}۴۵'$ شمالی را شامل می‌شود (شکل ۶-۲۹). منطقه مذکور شامل بخش شرقی چهارگوش طبس و بخش غربی چهارگوش بشرویه می‌باشد که از طرف شمال به طبس، از جنوب به کوه‌های پروده، از شرق به کوه‌های شتری و از غرب به کوه‌های کمر مهدی محدود می‌گردد.

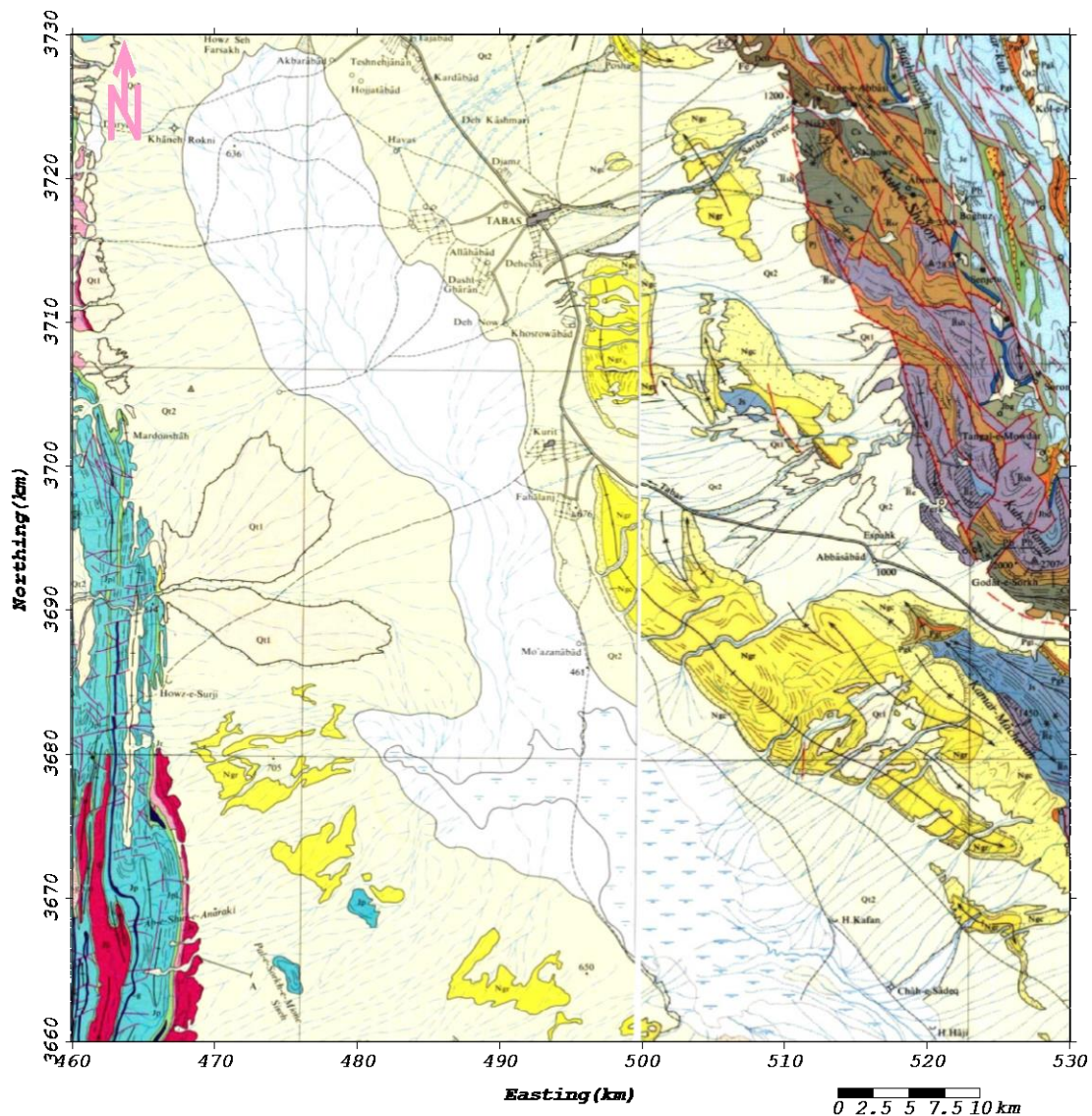


شکل ۶-۲۹: موقعیت جغرافیایی حوزه دشت جنوب طبس بر روی نقشه ایران و راه‌های دسترسی [سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۸۸] به همراه تصویر ماهواره‌ای [Landsat ETM⁺, 2002]

عملیات ژئوفیزیکی گرانی و مغناطیس سنجی زمینی در منطقه طبس با هدف تشخیص وجود یا عدم وجود آنومالی‌های احتمالی در زیر دشت مذکور و همچنین تعیین عمق سنگ بستر توسط شرکت ملی نفت ایران در سال ۱۳۶۳ شروع و در سال ۱۳۶۴ به پایان رسید. به طوری که در این منطقه ۲۸ خط گرانی سنجی شامل ۱۱۱۵ ایستگاه اندازه‌گیری به فواصل ۱/۵ کیلومتر از هم پیاده و برداشت گردیده است که فواصل پروفیل‌ها از یکدیگر مساوی و برابر ۳ کیلومتر بوده است. نقشه آنومالی بوگه داده‌های گرانی سنجی ناحیه طبس با روش‌های دو بعدی و ارتونرمال مورد تفسیر قرار گرفت و نقشه آنومالی باقی‌مانده حاصل از آن در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. مطابق این نقشه در حوضه طبس شش آنومالی مثبت و یک گسل در قسمت شمال غرب ناحیه با روند شمالی- جنوبی تشخیص داده شد [طباطبایی و نصرت ماکویی، ۱۳۷۲].

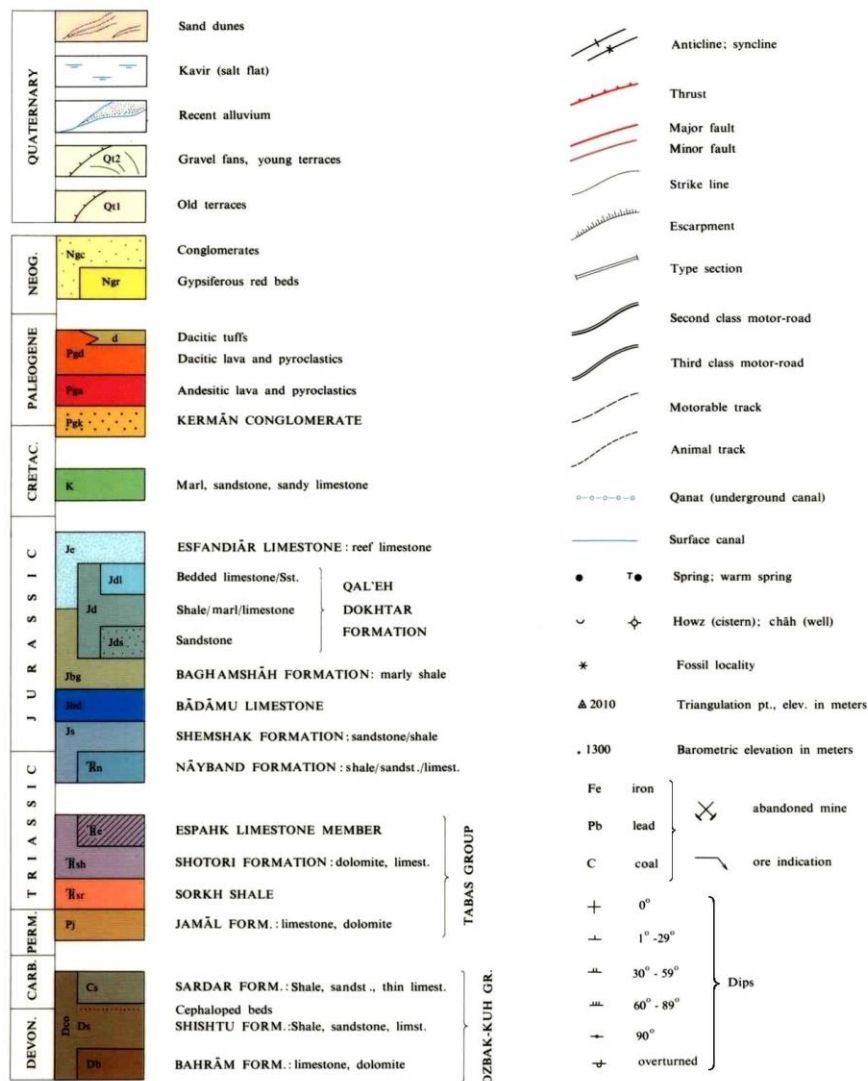
۶-۶-۲- زمین شناسی منطقه طبس

مطابق شکل (۶-۳۰) ناحیه مورد مطالعه بخشی از حوضه رسوب‌گذاری بلوک طبس با رسوبات آبرفتی عهد حاضر، مخروط افکنه‌ها، پادگانه‌های قدیمی و جوانتر کواترنر می‌باشد که در قسمت‌های مرکزی از رسوبات کویری و تلماسه‌های بیابانی پوشانده شده است. همچنین در بخش‌هایی از دشت برون‌زدگی‌هایی از لایه‌های قرمز همراه با ژئوپس، کنگلومرا و ماسه‌سنگ نئوژن مشاهده می‌شود. در سمت شرق منطقه، رشته کوه‌هایی که روند غالب آن‌ها شمال غربی- جنوبی شرق می‌باشد وجود دارند که بیشتر شامل رسوبات به شدت گسل و چین خورده سازندهای گروه ازبک کوه (با سن دونین و کرینیفور)، گروه طبس و سازندهای قلعه دختر می‌باشند. رسوبات موجود در سازندهای فوق در منطقه بیشتر شامل سنگ آهک، دولومیت، ماسه‌سنگ و شیل می‌باشند که در نهایت به سنگ‌های آهکی- ماسه‌ای و مارن کرتاسه منتهی می‌گردند [اشتوکلین و همکاران، ۱۹۶۹].



شکل ۶-۳۰: نقشه زمین‌شناسی منطقه اکتشافی طبس [اشتوکلین و همکاران، ۱۹۶۹ و آقانباتی، ۱۹۷۴]

رشته کوه‌های واقع در غرب منطقه مشابه بخش شرقی، دارای روند شمال غربی- جنوب شرقی می‌باشند. در شمال غرب رخمون‌های سنگی اغلب شامل دولومیت و سنگ‌های آهکی تریاس و سازندهای لایه قرمز همراه با مارن، کنگلومرا و ژئپس ژوراسیک می‌باشند که در بخش‌های غربی به سنگ‌های آهکی با میان لایه‌هایی از ژئپس و همچنین سنگ‌های آهکی ژئپس‌دار روشن ژوراسیک تغییر می‌یابند [آقانباتی، ۱۹۷۴؛ مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۴]. سازند مناسب از لحاظ سنگ منشا، سازند سردار از گروه ازبک کوه در کوه‌های شش انگشتی می‌باشد و سازند جمال از گروه طبس در رشته کوه‌های شتری به عنوان سنگ مخزن معرفی گردیده است [Hassanzadeh Sharif, 1985].



ادامه شکل ۶-۳۰: راهنمای نقشه زمین‌شناسی منطقه طبس [اشتوکلین و همکاران، ۱۹۶۹ و آقنابتی، ۱۹۷۴]

سازند سردار از شیل‌های سیاه رنگ و ماسه‌سنگ‌های نازک لایه و سازند جمال از شیل‌ها و ماسه سنگ‌ها و سنگ‌های آهکی و لایه‌های ذغالسنگ تشکیل یافته‌اند. مطابق شکل (۶-۳۰) چین‌خوردگی‌های منطقه با روند غالب شمال غربی- جنوب شرقی مشخص می‌شوند که مجموعه‌ای از تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها را بوجود آورده‌اند. علاوه بر چین‌خوردگی‌های فوق یک سری گسل‌ها و شکستگی‌هایی (با روند مشابه محور چین‌خوردگی‌ها)، خصوصاً در طرفین دشت وجود دارند. به نظر می‌رسد که مجموعه عوامل زمین‌شناسی شرایط مناسبی را برای تشکیل و ذخیره سازی مواد هیدروکربوری در منطقه طبس فراهم کرده باشند [Hassanzadeh Sharif, 1985].

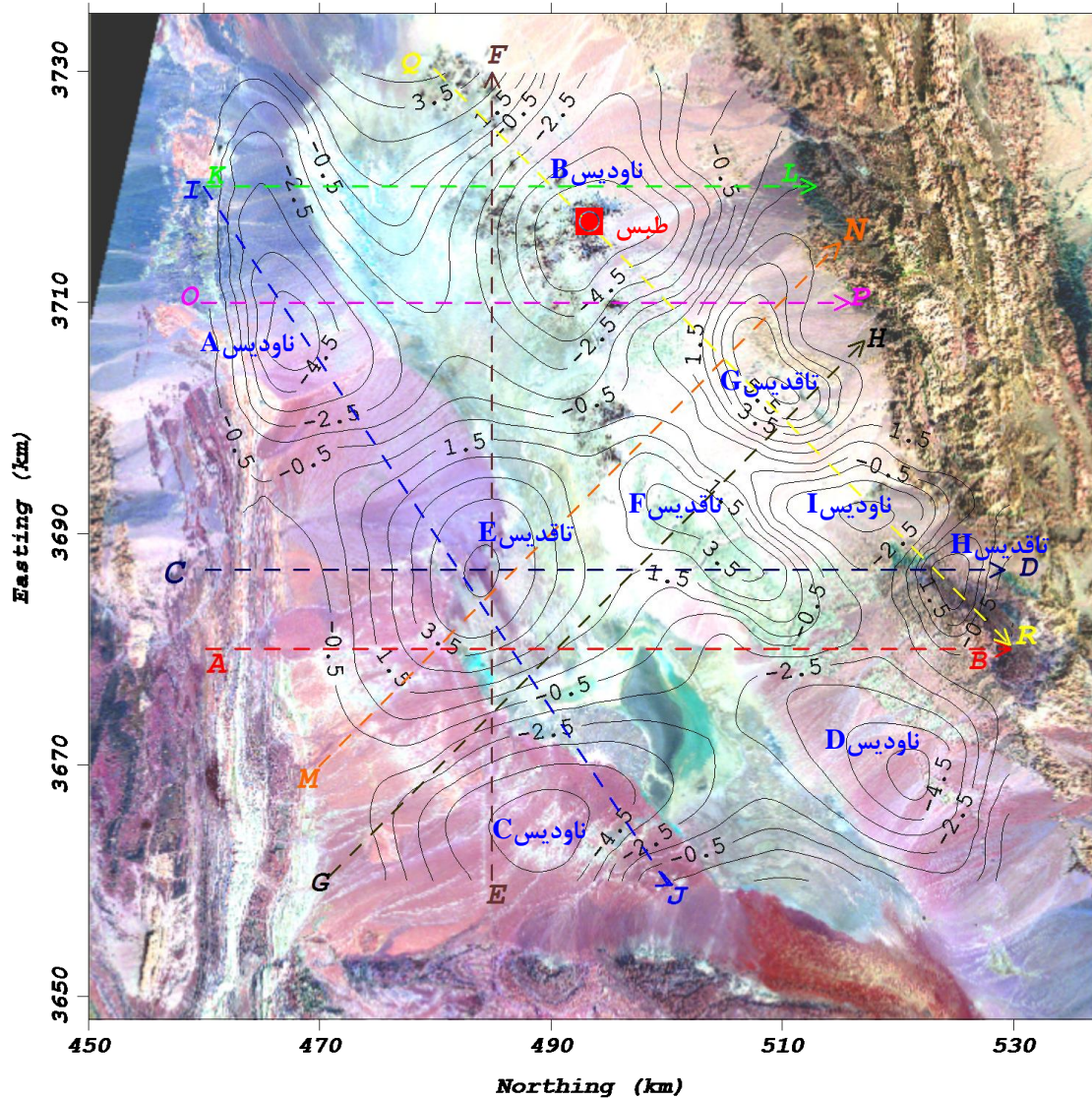
۶-۶-۳- محاسبه گرادیان کل نرمال دو بعدی داده‌های گرانی منطقه

نقشه آنومالی بوگه داده‌های گرانی اندازه‌گیری شده به فواصل کنتوری یک میلی‌گال رسم گردید پس از آن به منظور تعیین آنومالی باقی‌مانده، مقادیر آنومالی ناحیه‌ای از روش روند سطحی چند جمله‌ای درجه ۳ محاسبه و از آنومالی اندازه‌گیری شده کم شد. شبکه محاسباتی داده‌ها برای رسم نقشه‌ها و مقادیر گرادیان کل نرمال $0/5 \times 0/5$ کیلومتر در نظر گرفته شد. مقادیر گرانی باقی‌مانده بر روی نقشه حاصله دامنه تغییرات $6/5-$ تا $7+$ میلی‌گال را نشان می‌دهد (شکل ۶-۳۱).

مطابق این نقشه چند منطقه آنومال با مقادیر مثبت و منفی وجود دارد که بیانگر ساختار تشکیل دهنده حوضه رسوبی با ساختارهایی نظیر تاقدیس و ناودیس می‌باشد. بدیهی است که روند عمومی آنومالی‌های گرانی شمال غرب - جنوب شرق بوده که به خوبی با ساختارهای زمین‌شناسی اطراف دشت طبس هماهنگ است. برخی از آن‌ها نیز توسط گسل‌هایی از هم تفکیک شده‌اند (تاقدیس G با ناودیس B نمونه‌ای از این ساختارها می‌باشد).

مطابق مطالب عنوان شده در بخش‌های قبلی وجود یک محدوده کمینه احاطه شده توسط دو محدوده بیشینه بر روی مقطع دو بعدی گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی نشان دهنده موقعیت مخازن احتمالی تاقدیس شکل حاوی نفت و گاز در منطقه می‌باشد. از طرفی تهیه چنین مقطعی، رابطه بسیار نزدیک با تعداد جملات هارمونیک برای محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال دارد. جهت تعیین عدد بهینه برای جملات هارمونیک، پروفیل‌های زیادی تهیه گردید. در تعیین محل پروفیل سعی شده که امتداد پروفیل‌ها در حد امکان عمود بر امتداد آنومالی‌ها بوده و همچنین از تاقدیس‌های مرکزی نقشه [مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۴] عبور نمایند (شکل ۶-۳۱).

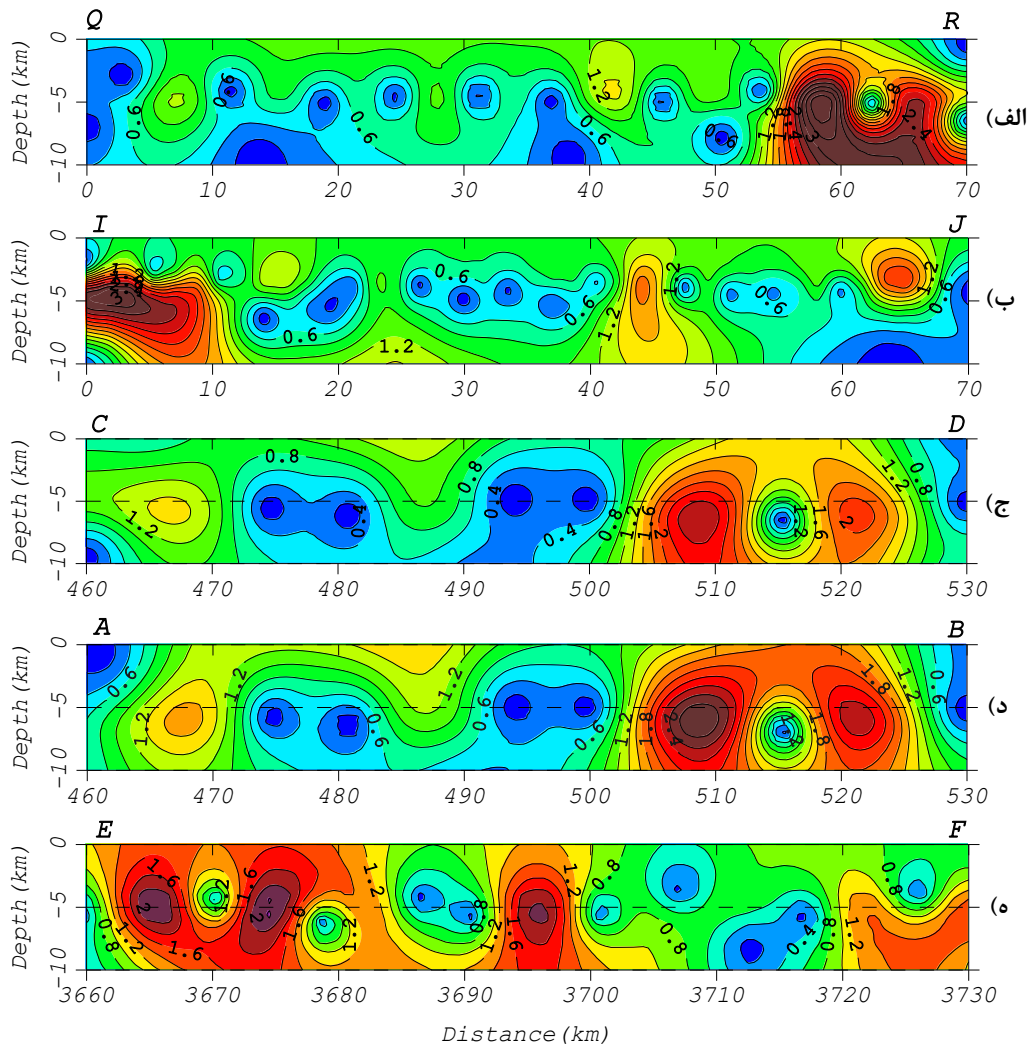
در راستای پروفیل‌های مختلف تعداد هارمونیک‌های سری فوریه برای محاسبه گرادیان کل نرمال تعیین گردید و سپس نمودار تغییرات مقادیر بیشینه NFG نسبت به تعداد جملات هارمونیک رسم و تعداد هارمونیک‌های بهینه عدد ۳۰ انتخاب شد. بر این اساس مقاطع گرادیان کل نرمال دو بعدی بر روی این پروفیل‌ها رسم گردید که برخی از آن‌ها در شکل (۶-۳۲) ارائه شده است.



شکل ۶-۳۱: نقشه کنتروری آنومالی باقی مانده حوضه طیس بر روی عکس نقشه سنجنده ETM⁺ از ماهواره لندست به همراه پروفیل‌های مختلف

مطابق (شکل ۶-۳۲) با توجه به طول پروفیل‌ها، حدود ۷۰ کیلومتر، بیش‌ترین و مناسب‌ترین عمق مورد جستجو کمتر از ۶ کیلومتر خواهد بود. در همه پروفیل‌ها مقادیر کمینه بسته محصور به بیشینه‌ها در فواصل مختلف دیده می‌شود. براساس دو مقطع AB و CD یک مقدار کمینه در حدود ۵۱۷ کیلومتری و عمق تقریبی ۶ کیلومتری به وضوح قابل ردیابی است. این موضوع بیان‌کننده این مطلب است که در این محل یک تاقدیس حاوی هیدروکربور می‌تواند وجود داشته باشد که موقعیت آن روی نقشه آنومالی باقی مانده (شکل ۶-۳۱) با تاقدیس H همخوانی دارد. با بررسی مجدد روی مقاطع مذکور ملاحظه می‌شود که در بخش میانی دو محدوده کمینه وجود دارد که توسط بیشینه‌ها

احاطه شده است. کمینه اولی در فاصله حدود ۴۸۰ و عمق تقریبی ۵ کیلومتری و کمینه دوم نیز در فاصله ۴۹۵ و عمق تقریبی ۵ کیلومتری واقع می‌باشند. این موضوع نشان دهنده وجود تاقدیس‌های E و F موجود در نقشه شکل (۶-۳۱) می‌باشد.



شکل ۶-۳۲: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی در راستای پروفیل‌های مختلف روی شکل (۶-۳۱). تعداد جملات سری فوریه عدد ۳۰ منظور شده است.

همچنین با مقایسه این دو مقطع با مقاطع II و EF ملاحظه می‌شود که موقعیت تاقدیس E توسط این مقاطع به ویژه مقطع EF نیز تایید شده است (فاصله ۳۶۹۰ در شکل ۶-۳۲-۵). با در نظر گرفتن همه شواهد موجود می‌توان بیان کرد که علاوه بر تاقدیس H دو تاقدیس مذکور نیز احتمالاً حاوی مواد هیدروکربوری بوده که عمق قرارگیری آن‌ها نسبت به تاقدیس قبلی متفاوت به نظر می‌رسد. البته

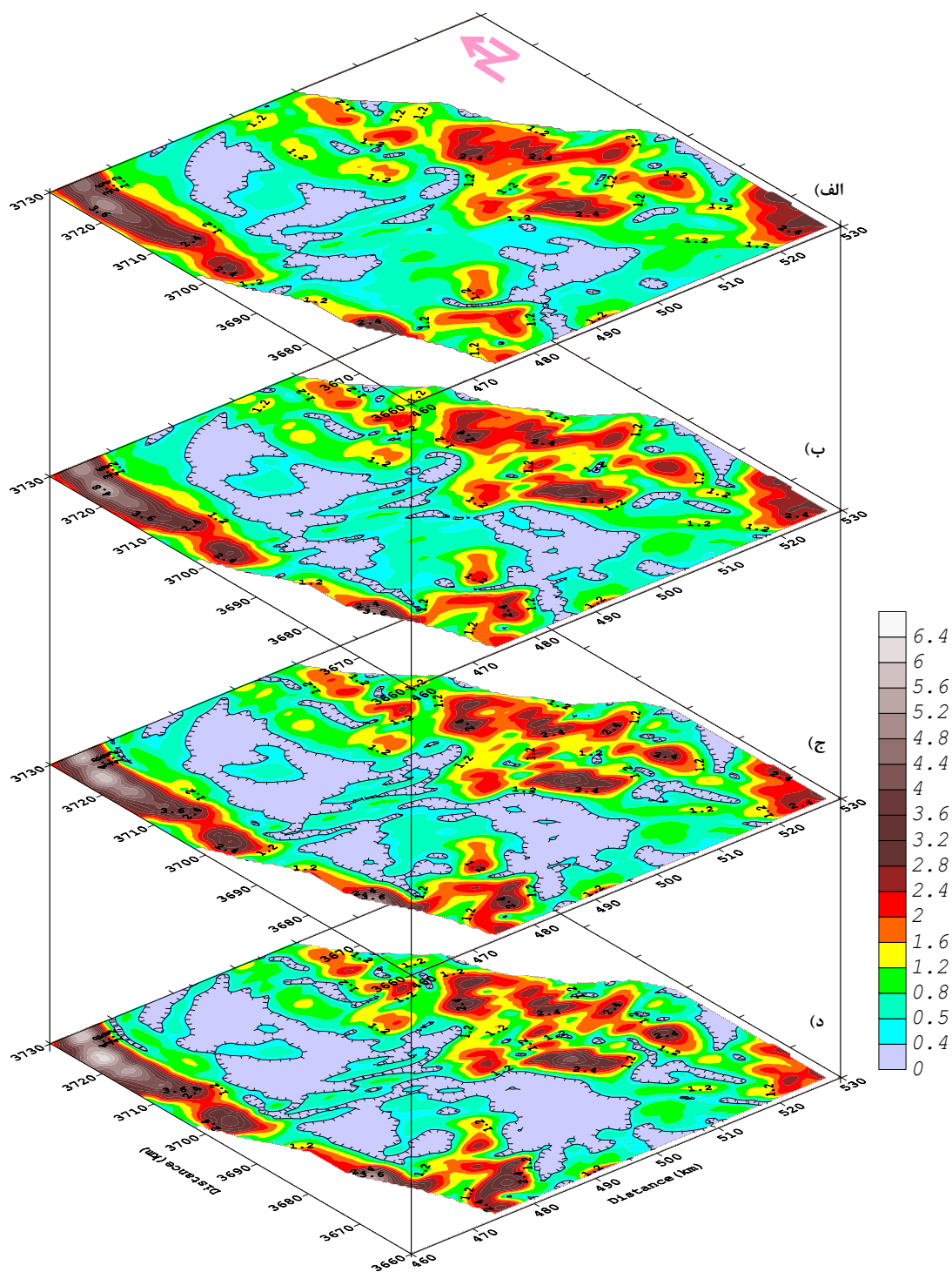
تخمین عمق آنومالی‌ها از روی این مقاطع به ویژه برای تاقدیس E با توجه به ماهیت سه بعدی آن بایستی بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

براساس پروفیل QR (شکل ۶-۳۲-الف)، دو محدوده کمینه محصور به مقادیر بیشینه در فاصله حدود ۳۸ و ۶۲ کیلومتری پروفیل وجود دارد که انطباق با موقعیت تاقدیس های G و H دارد. وسعت کم محدوده کمینه برای تاقدیس H احتمالاً نشان دهنده ابعاد کوچکتر مخزن مربوطه باشد که این موضوع در پروفیل های AB و CD نیز قابل بررسی است. البته شایان توجه است با توجه به مقاطع گرادیان کل نرمال و همچنین چین خوردگی و گسل خوردگی در حوضه طبس، وجود مخازن مرکب (تاقدیسی و گسله) دور از انتظار نیست.

۶-۶-۴- محاسبه گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی منطقه

همان طور که در شکل (۶-۳۱) دیده می‌شود، تاقدیس‌های E و H دارای ساختار سه بعدی می‌باشند بنابراین برای تحلیل بهتر داده‌ها لازم است که روش سه بعدی نیز بررسی گردد. با توجه به ابعاد شبکه اندازه‌گیری داده‌ها، بیشترین عمق مورد بررسی برای حصول نتایج مناسب در این ناحیه کمتر از ۷ کیلومتر می‌باشد. براساس نتایج داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، گرانی سنجی و مغناطیس سنجی قبلی، مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های گرانی برای افق‌های بیشتر از ۳ کیلومتری به فواصل ۵۰۰ متری محاسبه شد و نتایج تعدادی از آن‌ها در شکل (۶-۳۳) ارائه شده است.

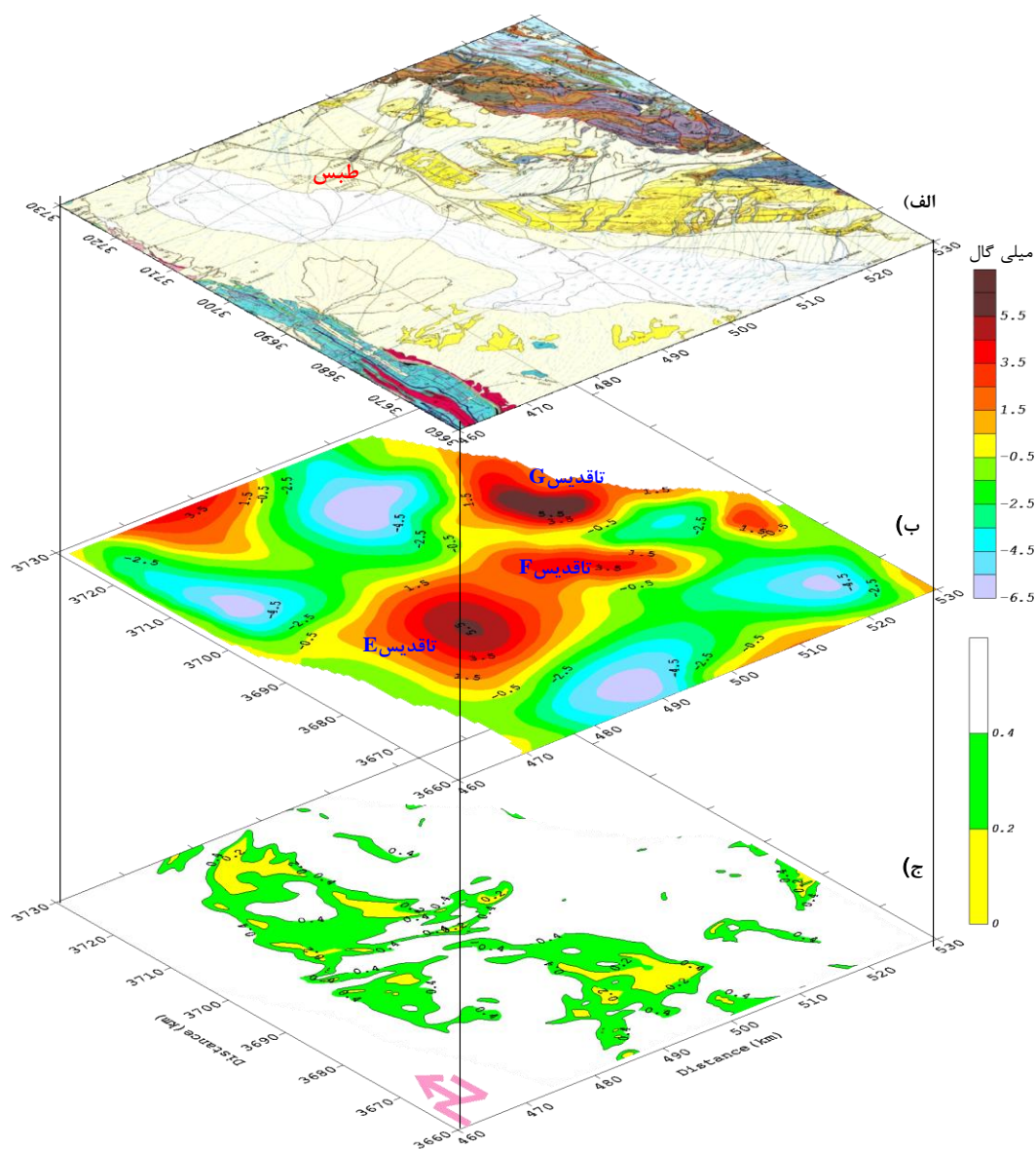
در این نقشه‌های عمقی، محدوده‌های با مقادیر گرادیان کل نرمال کمتر از ۰/۴ به عنوان مناطق با پتانسیل بالا در نظر گرفته شده‌است. مطابق شکل، نواحی امیدبخش به لحاظ تجمع مواد هیدروکربوری در بخش شمال و جنوب غرب ناحیه واقع شده‌اند، جایی که تاقدیس بزرگ E در آنجا دیده می‌شود. با مقایسه نقشه‌های کنتروری موقعیت تاقدیس E در شکل‌های (۶-۳۱) و (۶-۳۳) ملاحظه می‌شود که بخش بالایی آن در افق حدود ۵۰۰۰ متر قابل شناسایی بوده و در افق‌های پایین‌تر یعنی ۶۰۰۰ متری وسیع‌تر می‌گردد.



شکل ۶-۳۳: نقشه کنتوری گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی ناحیه طبس برای ترازهای عمقی الف) ۳، ب) ۴، ج) ۵ و د) ۶ کیلومتری، همراه مناطق امیدبخش هیدروکربوری (به رنگ سربی)

نتایج به دست آمده با این روش، نتایج حاصل از مطالعات قبلی را تایید می کند. براساس بررسی-های قبلی عمق بخش بالایی و مرکز این تاقدیس به ترتیب حدود ۴۰۰۰ متر [طباطبایی و نصرت ماکویی، ۱۳۷۲] و ۵۱۹۶ متر [مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۴] تخمین زده شده است.

متاسفانه در این ناحیه هیچ گونه اطلاعات عمقی تکمیلی نظیر داده‌های حفاری یا لرزه‌نگاری وجود ندارد. برای افزایش میزان اعتماد پذیری به نتایج حاصل و به منظور ایجاد یک نقشه مناطق احتمالی پر پتانسیل هیدروکربوری، مقادیر گرادیان کل نرمال مساوی ۰/۴ به عنوان مناطق امید بخش معرفی شده است. جهت نیل به این هدف، نقشه‌های تهیه شده در افق‌های مختلف در شکل (۳۳-۶) با بررسی مقادیر مختلف به صورت میان‌گیری با هم تلفیق شد تا مناطق پتانسیل بالا هیدروکربوری مشخص شود (شکل ۳۴-۶).

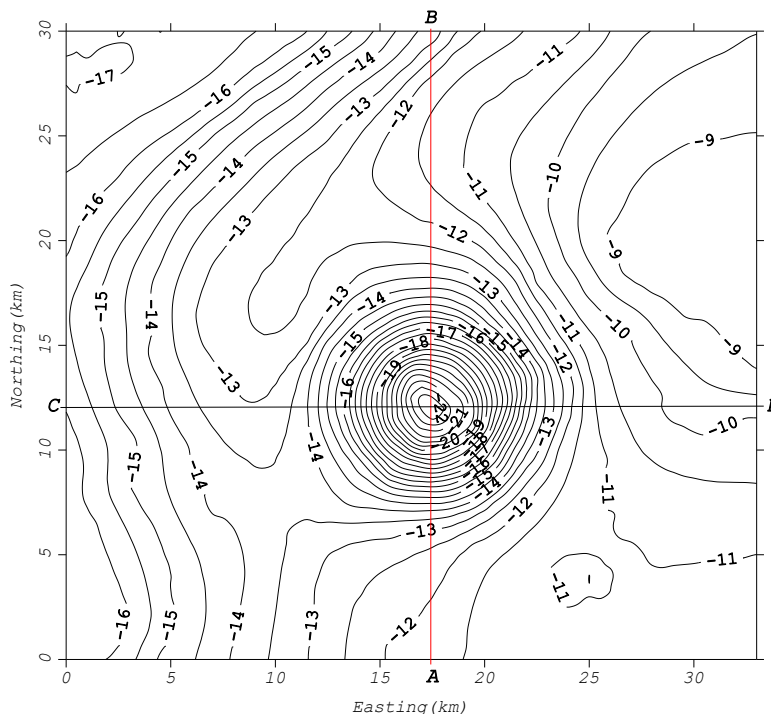


شکل ۳۴-۶: (الف) نقشه زمین‌شناسی، (ب) نقشه آنومالی گرانی و (ج) نقشه مناطق پتانسیل بالای وجود مواد هیدروکربوری ناحیه طبس (از تلفیق نقشه‌های کنتوری گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی افق‌های مختلف)

۶-۷- تفسیر آنومالی ناشی از میدان نفتی گنبد نمکی هومبل

میدان نفتی گنبد نمکی هومبل^{۹۱} یک میدان تولید نفت در آمریکا می‌باشد که در دو کیلومتری شهر هومبل در ساحل شمالی خلیج تگزاس در منطقه کانزاس آمریکا واقع شده است. سنگ مخزن این میدان نفتی که مقدار ناچیزی گاز دارد، سنگ‌های انیدریتی و آهکی سازندهای مربوط به دوره‌های ائوسن، میوسن، الیگوسن و پلیوسن می‌باشد. تله‌های نفتی گنبد نمکی هومبل هم در بخش سنگ پوشش و هم در بخش دامنه آن دیده می‌شود. هومبل دارای ذخیره قابل ملاحظه‌ای بوده که نزدیک به یک قرن از مخازن آن نفت استخراج می‌شود [USGS, 2009].

به منظور تعیین عمق قرارگیری این گنبد و بررسی وجود تله نفتی در اطراف آن، پس از رقومی کردن نقشه (شکل ۶-۳۵) آنومالی گرانی بوگه [Nettleton, 1976]، پروفیلی در راستای شمالی-جنوبی به فاصله نقاط ۰/۵ کیلومتر تهیه گردید و مقادیر عددی آن به عنوان فایل ورودی در برنامه تهیه شده در محیط Matlab مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۶-۳۶-الف).

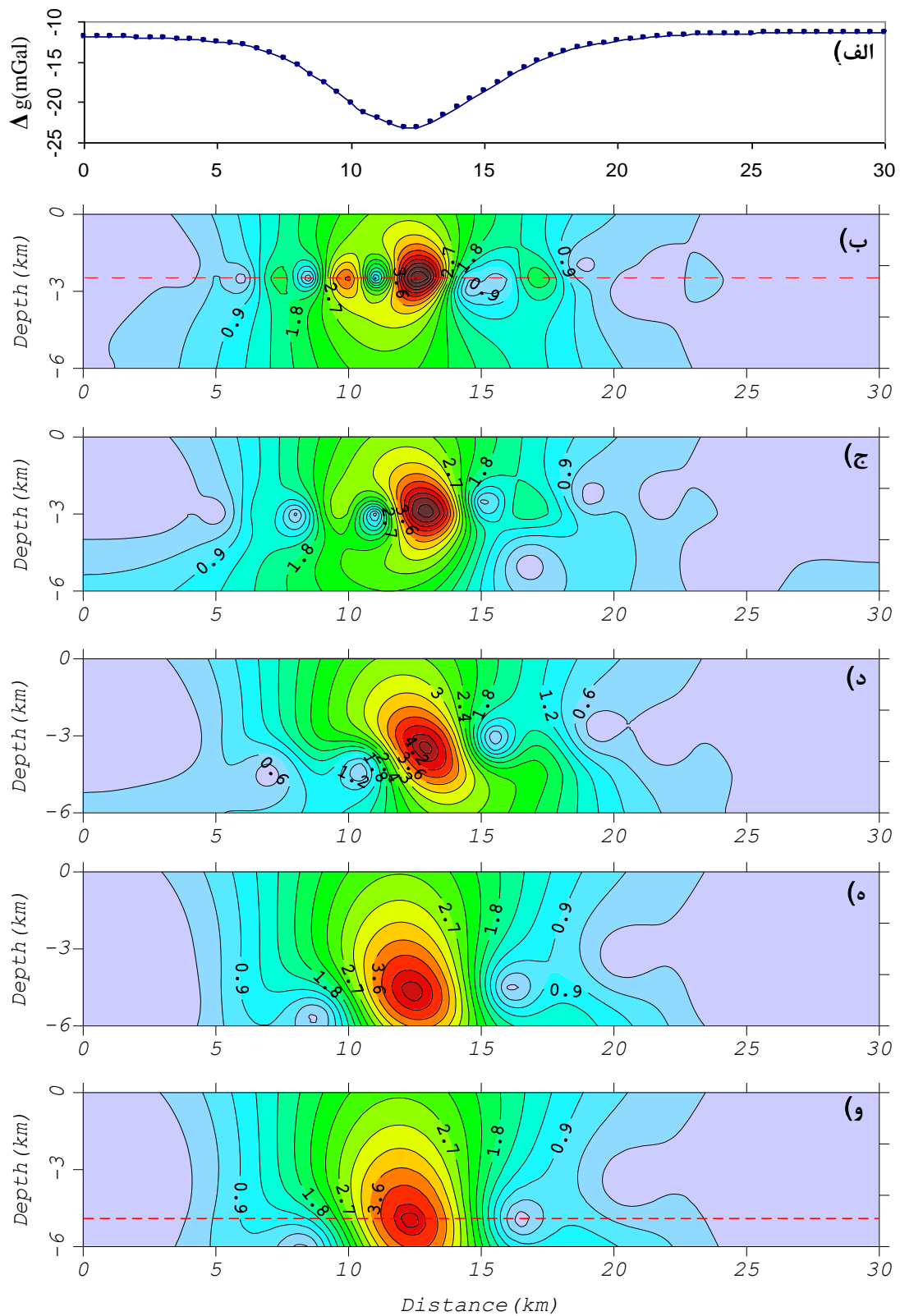


شکل ۶-۳۵: آنومالی گرانی بوگه از گنبد نمکی، هریس تگزاس [Nettleton, 1976]

^{۹۱} . Humble

تعداد جملات هارمونیک جهت محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی گرانی در راستای این پروفیل اعداد مختلف مانند ۱۷، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۴ انتخاب شد. مقادیر گرادیان کل نرمال دو بعدی داده‌های حاصل در صفحه X-Z و به فواصل مشخص $dz=dx=0/5$ کیلومتری محاسبه گردید. برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال به روش بیشینه نسبی تعداد جملات هارمونیک به مقدار $N=17$ تعیین گردید (شکل ۶-۳۶-و). مطابق شکل مذکور، مقدار بیشینه گرادیان کل نرمال در نقطه‌ای به مختصات $(0, -4/8)$ قرار گرفته است بنابراین عمق این گنبد حدود $4/8$ کیلومتر تخمین زده می‌شود. مطابق شکل (۶-۳۶-ب) و همان طوری که در فصل چهارم در مبحث مدل‌های گنبد نمکی اشاره گردید، می‌توان گفت که محدوده‌های مقادیر کمینه محصور بین بیشینه‌ها نشان دهنده وجود تله نفتی در این گنبد می‌باشد. همچنین با توجه به وجود سه محدوده کمینه (به رنگ آبی آسمانی) در بین مقادیر بیشینه در افق حدود $2/5$ کیلومتری می‌توان گفت که این تله حاوی هیدروکربور به صورت نفت و گاز می‌باشد که هر کدام از دو سطح جدا کننده به صورت یک مقدار کمینه ظاهر شده است. نتایج حاصل از این روش هماهنگی خوبی با شکل گنبد نمکی تخمینی توسط نتلتون (۱۹۷۶) براساس داده‌های حفاری و لرزه‌ای دارد. این آنومالی با فرض کروی بودن منبع آن برای تعیین عمق مرکز گنبد نمکی توسط پژوهشگران زیادی [Nettleton, 1976; Mohan et al., 1986; Abdelrahman and El-Araby, 1993] تفسیر شده است. نتایج به دست آمده از روش‌های مورد استفاده این پژوهشگران به همراه نتیجه حاصل از روش گرادیان کل نرمال با منظور نمودن مدل کروی در جدول (۶-۴) آورده شده است. نتایج به دست آمده در هماهنگی خوبی با نتایج حاصل از بررسی‌های مختلف دارد.

با توجه به ساختار سه بعدی این گنبد نمکی از روش گرادیان کل نرمال سه بعدی نیز استفاده گردید. بنابراین با استفاده از تعداد جملات سری فوریه $N=34$ که مشخص کننده وجود هیدروکربور است برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی استفاده گردید.

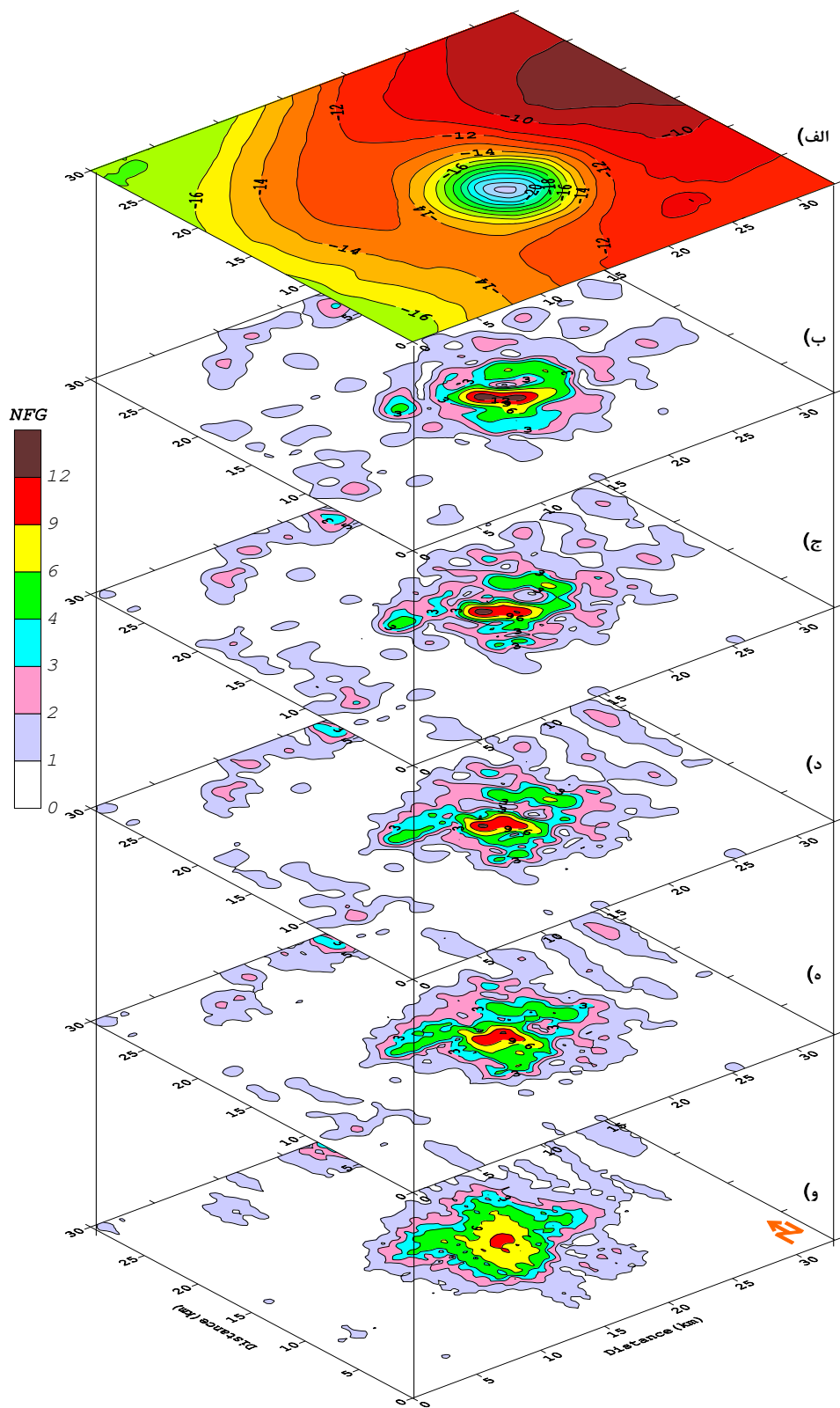


شکل ۶-۳۶: الف) اثر گرانی گنبد نمکی هومبل در راستای پروفیل A-B [Nettleton, 1976; Salem, 2003]. مقاطع
 گرادیان کل نرمال به ازای ب) $N=34$ ، ج) $N=30$ ، د) $N=25$ ، ه) $N=20$ ، و) $N=17$ (عمق تخمینی با تعداد جملات
 هارمونیک 17، $4/8$ کیلومتر است).

جدول ۴-۶: مقایسه نتایج حاصل از روش‌ها برای تفسیر گنبد نمکی هومبل

روش	نویسنده مقاله	مدل	عمق مرکز کره (کیلومتر)
منحنی‌های شاخص	نتلتون (۱۹۷۶)	کره	۴/۹۷
تبدیل ملین	موهان و همکاران (۱۹۸۶)	کره	۴/۹۶
تبدیل والش	شاو و اگراوا (Shaw & Agarwal 1997)	کره	۴/۹۸
کمترین مربعات	عبدالرحمان و ت. م. العربی (۱۹۹۳)	کره	۴/۹۲
میانگین متحرک	عبدالرحمان و ت. م. العربی (۱۹۹۶)	کره	۴/۶۰
روش عددی تخمین عمق	عبدالرحمان و همکاران (۱۹۹۹)	کره	۳/۰۵
کمینه‌سازی کمترین مربعات سوم	عبدالرحمان و همکاران (۲۰۰۱-a)	کره	۴/۹۶
روش جدید تخمین عمق	عبدالرحمان و همکاران (۲۰۰۱-b)	کره	۴/۹۵
فرمول ساده	سالم (Salem, 2003)	کره	۵/۱۵
متوسط عمق	براساس روش‌های فوق	کره	۴,۷۳
روش گرادیان کل نرمال	آقاجانی و همکاران (۲۰۰۹d)	کره	۴/۸۰

نقشه گرادیان کل نرمال سه بعدی برای افق‌های ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵ و ۵ کیلومتری رسم شد که تعدادی از آن‌ها در (شکل ۶-۳۷) ارائه شده است. مطابق شکل مذکور محدوده‌های کمینه از افق‌های ۲ کیلومتری تا افق ۳ کیلومتری محصور بین بیشینه‌ها دیده می‌شود و پس از آن از بین رفته که در شکل (۶-۳۷) و این موضوع به طور واضح به صورت یک بیشینه قابل مشاهده است. براساس بررسی مدل‌های سه بعدی در فصل پنجم، می‌توان عنوان نمود که وجود چنین مشخصه‌هایی سبب تایید نتایج دو بعدی شده و بیانگر این مطلب است که گنبد نمکی هومبل حاوی هیدروکربور می‌باشد. همچنین با توجه به این مشخصه می‌توان گفت که تله هیدروکربوری بایستی دارای عمقی بین ۲/۵ تا ۳ کیلومتری باشد که در نتایج دو بعدی نیز دیده می‌شود (شکل ۶-۳۷-ب، ج، د).



شکل ۶-۳۷: الف) اثر گرانی گنبد نمکی هومبل - نقشه گرادیان کل نرمال سه بعدی
 برای افق‌های ب) ۲، ج) ۲/۵، د) ۳، ه) ۳/۵، و) ۵ کیلومتری

۶-۸- تفسیر آنومالی گرانی ناشی از معدن مس مسیو سولفاید موبرون^{۹۲}

۶-۸-۱- مقدمه

توده مسیوسولفاید موبرون در نزدیکی شهر نوراندا^{۹۳} در ایالت کبک کانادا واقع شده است. سنگ میزبان این توده معدنی سنگ‌های آتشفشانی پرکامبرین میانی است. کانی‌سازی درون هاله سولفیدی متشکل از کانی پیریت به صورت توده‌ای و پراکنده به همراه مواد معدنی سولفیدی فلزات پایه با مقادیری کمی طلا و نقره می‌باشد. در این ناحیه اندازه‌گیری مقدار گرانی روی نقاط ایستگاهی به فاصله ۳۰ متری بر روی پروفیل‌هایی به فواصل ۶۰ متری انجام شده است. با اخذ داده‌ها^{۹۴}، نقشه آنومالی گرانی‌سنجی محدوده با فاصله شبکه‌بندی ۵×۵ متر تنظیم و منحنی‌ها به فاصله ۰/۰۵ میلی‌گال رسم و جهت محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال شده مورد استفاده قرار گرفت. دامنه تغییرات مقدار گرانی در نقشه ارائه شده در شکل (۶-۳۸) از ۰/۲- تا ۱/۷ میلی‌گال می‌باشد. مطابق این شکل، گسترش منحنی‌های کنتوری روی نقشه گرانی نشانگر ساختار ۲/۵ بعدی آن است، بنابراین در تفسیر می‌توان آن را به صورت دو یا سه بعدی بررسی نمود [Roy et al, 1999].

افزون بر این، مقطع اکتشافی در امتداد پروفیل AB همراه با اطلاعات حاصل از حفر چندین حلقه گمانه اکتشافی به منظور شناسایی وضعیت ماده معدنی در عمق در شکل (۶-۳۹) نشان داده شده است [Grant and West, 1965]. نتایج حاصل از مغزه‌های حفاری نشان می‌دهد که ماده معدنی با چگالی متوسط حدود ۴/۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب درون سنگ‌های آتشفشانی با چگالی ۲/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب قرار گرفته است. نتایج بررسی‌های ژئوفیزیکی و داده‌های حفاری همدیگر را به خوبی تایید می‌کند و بر این اساس شیب، عمق، گسترش ماده معدنی و ضخامت روباره تخمین زده شده است. ضخامت متوسط ماده معدنی تقریباً دو برابر عمق روباره می‌باشد (شکل ۶-۳۹). به طور کلی

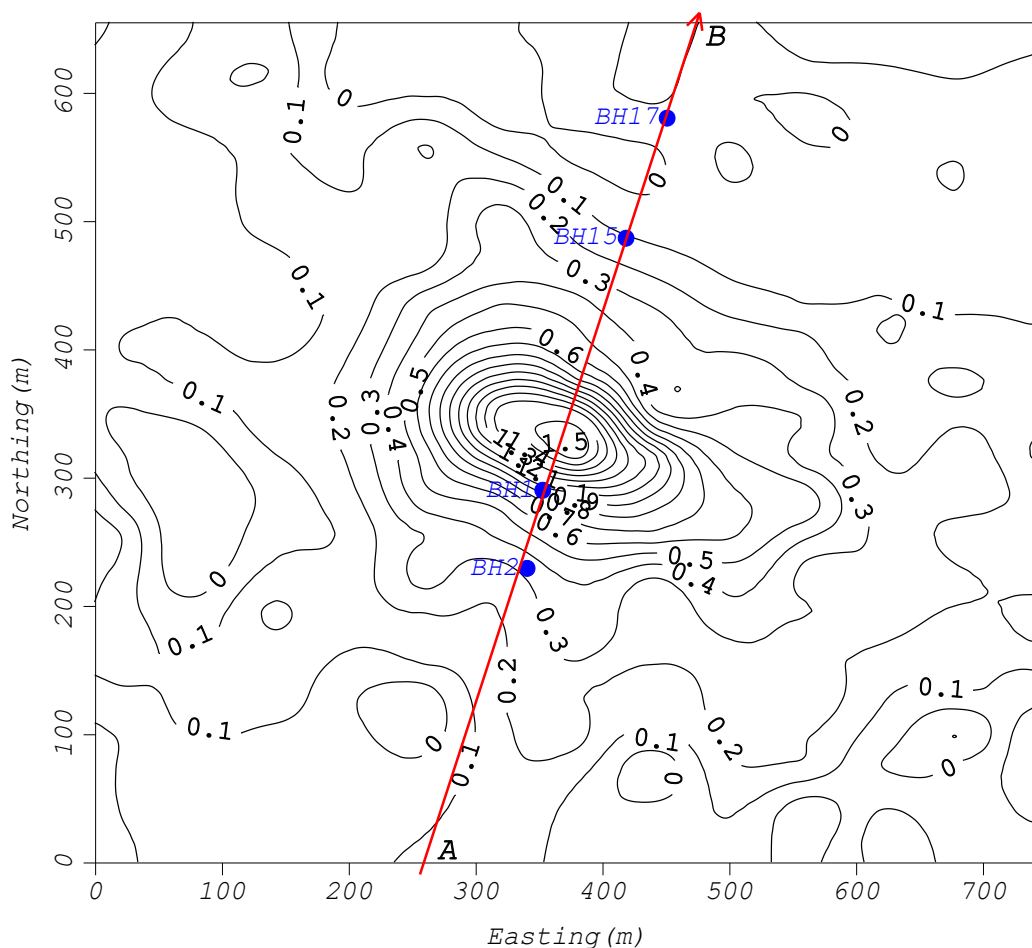
^{۹۲} . Moberun

^{۹۳} . Noranda

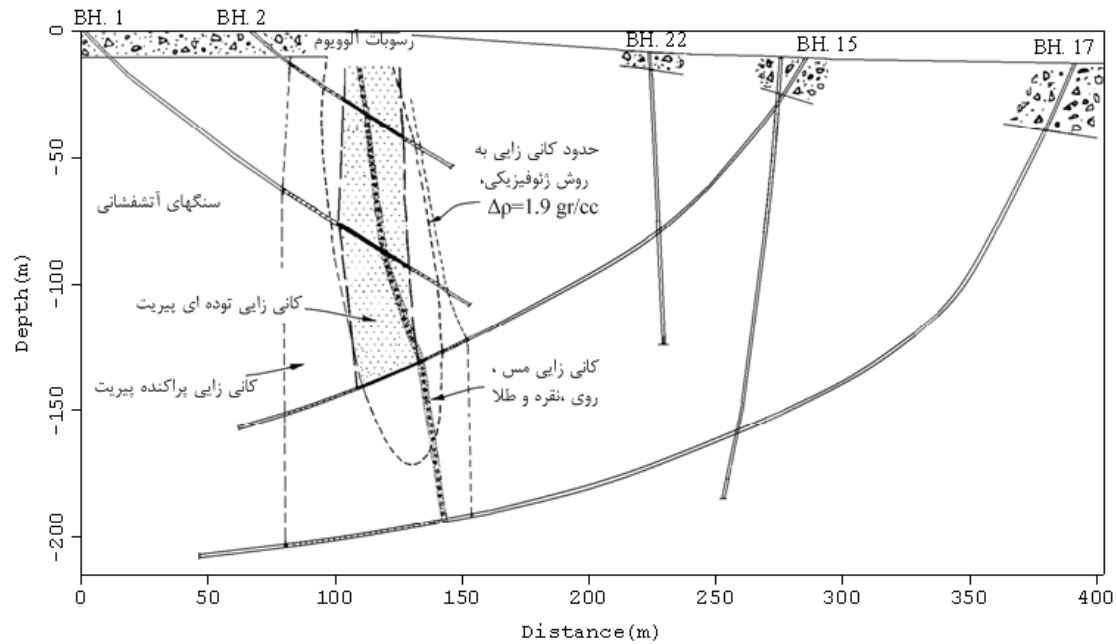
^{۹۴} - داده‌های گرانی این معدن از دکتر مارک پیلکینگتن (Dr. Mark Pilkington) از سازمان زمین‌شناسی کانادا دریافت گردید.

می‌توان گفت که گسترش طولی توده معدنی در حدود ۳۰۰ متر، عرض آن ۳۰ متر و بیشترین گسترش عمقی آن ۱۸۰ متر می‌باشد [Grant and West, 1965].

این توده معدنی به وسیله پژوهشگران زیادی مورد بررسی قرار گرفته و تفسیر شده است [Seigel, 1957; Grant and West, 1965; Roy et al, 1999; Abdelrahman and Abo-Ezz, 2008]. به منظور محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی حاصل از توده معدنی، پروفیلی عمود بر گسترش ماده معدنی از جنوب غرب به شمال شرق (پروفیل AB روی شکل ۳۸-۶) تهیه و مقادیر گرانی روی این پروفیل به فاصله ۵/۲۸ متری به دست آمد.



شکل ۳۸-۶: نقشه آنومالی گرانی ناشی از وجود توده معدنی موبرون و محل حفر گمانه‌های اکتشافی

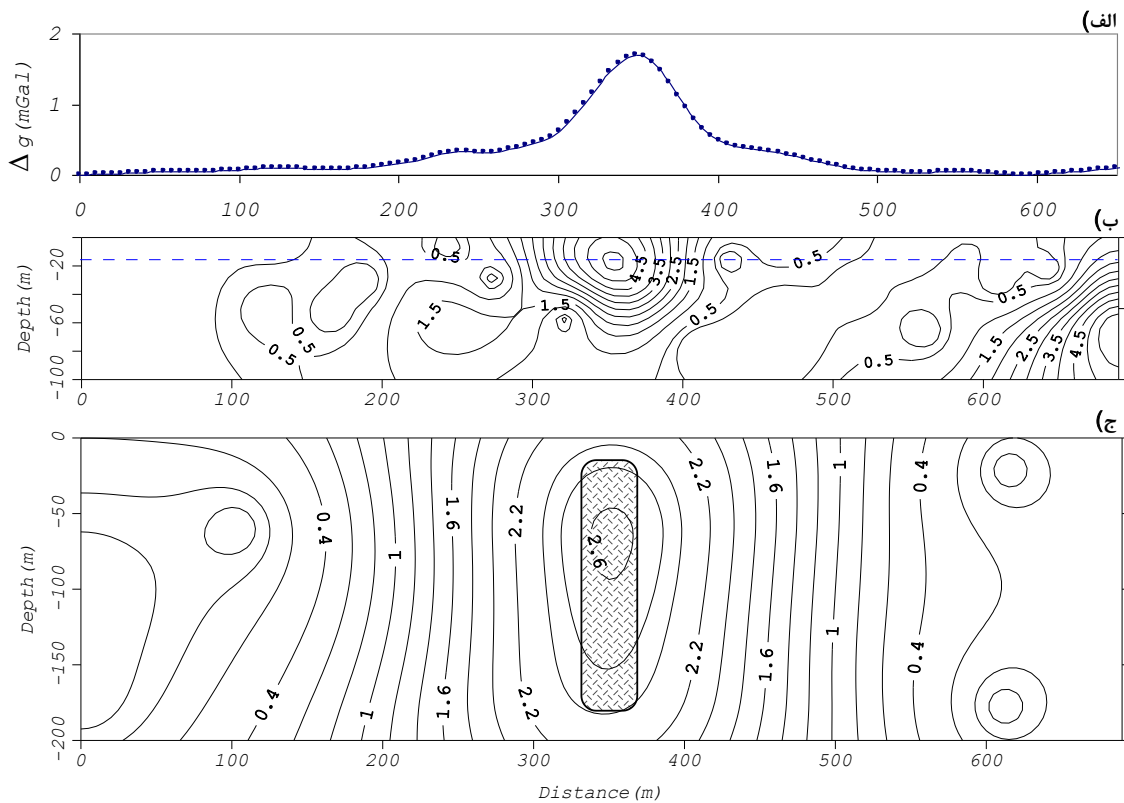


شکل ۶-۳۹: مقطع اکتشافی حاصل از گمانه‌های اکتشافی و داده‌های ژئوفیزیکی روی معدن مسیو سولفاید موبرون در امتداد پروفیل AB [Grant and West, 1965]

۶-۸-۲- تعیین N بهینه و محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی

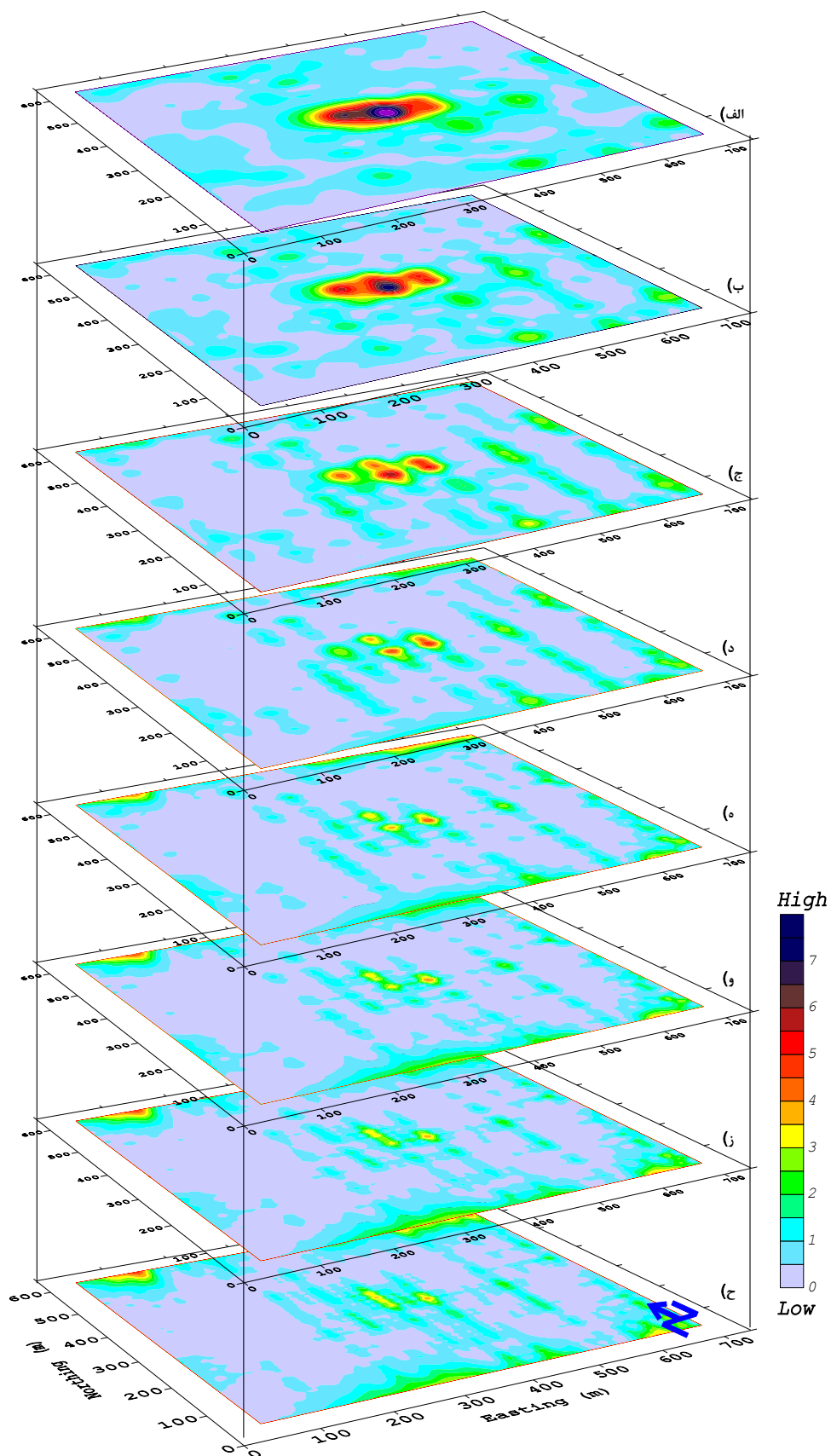
براساس شکل‌های (۶-۳۸ و ۶-۳۹)، با توجه به گسترش ماده معدنی در جهت شمال غربی- جنوب شرقی و موقعیت گمانه‌های اکتشافی روی مقطع اکتشافی، پروفیل AB جهت محاسبه گرادیان کل نرمال دو بعدی انتخاب گردید. در راستای این پروفیل مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی با تعدادی هارمونیک محاسبه و سپس به روش بیشینه نسبی تعداد جملات بهینه سری فوریه عدد ۴۴ انتخاب شد. با انتخاب $N=44$ ، مقدار بیشینه NFG داده‌های گرانی مطابق شکل (۶-۴۰-ب)، عمق سطح بالایی ماده معدنی (محور خط چین شده در شکل) را ۱۷ متر نشان می‌دهد که مطابقت خوبی با اطلاعات حفاری دارد. هر چند طول پروفیل اندازه گیری آنومالی گرانی برای تخمین گسترش عمقی ماده معدنی کافی نیست ولی جهت این کار مقادیر گرادیان کل نرمال در راستای پروفیل مورد نظر با تعداد جملات هارمونیک کمتر از ۴۴ تا ۵ محاسبه و شکل توده روی مقطع بررسی گردید. تنها در حالت $N=10$ پایین‌ترین عمق به صورت شکل (۶-۴۰-ج) دیده می‌شود و با انتخاب مقادیر کمتر از ۱۰، عمق مرکزی مقادیر بیشینه به طرف عمق‌های کمتر تغییر می‌یابد. بنابراین به این ترتیب می‌توان

گفت که ماده معدنی بیش از ۷۵ متر عمق داشته و همچنین گسترش عمقی آن تا حدود ۱۸۰ متر قابل پیش بینی است.



شکل ۶-۴: (الف) آنومالی گرانی در راستای پروفیل A-B در شکل ۶-۳، (ب) مقطع گرادیان کل نرمال با تعداد جملات هارمونیک $N=44$ (عمق سطح بالایی توده معدنی ۱۷ متر) و (ج) مقطع گرادیان کل نرمال با تعداد جملات هارمونیک $N=10$ (عمق بخش زیرین آن ۱۷۵ متر)

در این منطقه برای اکتشاف ماده معدنی مس داده‌های گرانی روی یک محدوده کوچک با ابعاد 700×700 متر اندازه‌گیری شده است. بنابراین با توجه به ابعاد کم محدوده اکتشافی بیشترین عمق اکتشاف مطمئن به روش گرادیان کل نرمال سه بعدی ۷۰ متر می‌باشد. مقادیر گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی گرانی حاصل از توده معدنی مسیوسولفاید موبرون با لحاظ $N=44$ و استفاده از سری فوریه دوگانه با برنامه کامپیوتری تهیه شده محاسبه گردید. برای بررسی گسترش عمقی توده معدنی نقشه مقادیر NFG برای اعماق مختلف محاسبه گردید که در شکل (۶-۴) این مقادیر برای اعماق ۱۵ تا ۸۵ متری ارائه شده است.

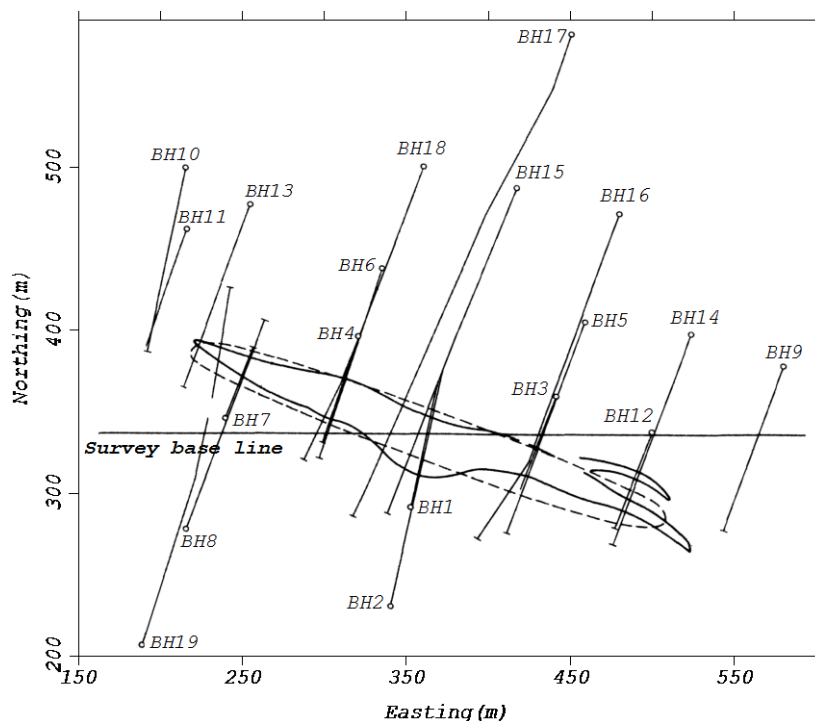


شکل ۶-۴۱: نقشه گرادیان کل شمال سه بعدی آنومالی گرانی موبرون در عمق‌های ۱۵ تا ۸۵ متری به فواصل ۱۰ متری

نتایج به دست آمده وجود یک توده آنومال سه بعدی را مطابق با توده معدنی سولفیدی نشان می‌دهد. شکل (۶-۴۱) توزیع مقدار بیشینه NFG داده‌های گرانی وابسته به عمق مورد مطالعه را که نشان دهنده تغییرات چگالی سنگی در سازندهای زمین شناسی زیرسطحی است نشان می‌دهد.

در شکل مذکور در اعماق بیش از ۵۵ متر منحنی‌های بیشینه NFG کاملاً واضح نمی‌باشند ولی تا عمق تقریبی ۸۵ متری می‌توان ماده معدنی را پی‌گیری نمود. به علت اینکه ابعاد اندازه‌گیری داده‌ها کافی نمی‌باشد پس از عبور از ۷۰ متری مقادیر نوفه زیاد شده و اثر ناشی از وجود توده معدنی روی نقشه‌های گرادیان کل نرمال سه بعدی به تدریج محو می‌شود.

علاوه بر این با بررسی شکل (۶-۴۱) به نظر می‌رسد که شکل ماده معدنی در اعماق تغییر نموده و به صورت دو شاخه جنوب شرقی و شمال غربی درآمده باشد. این موضوع با مقایسه نقشه محدوده معدنی براساس داده‌های حفاری [Grant and West, 1965] نیز تا حدود زیادی تایید می‌شود. مطابق شکل (۶-۴۲) ماده معدنی مس در دنباله جنوب شرق به دو بخش تقسیم شده است.



شکل ۶-۴۲: مقطع افقی از گسترش ماده معدنی در عمق ۴۵ متری و موقعیت گمانه‌های اکتشافی [Grant and West, 1965]

۶-۹- بررسی آنومالی‌های مغناطیسی کانسار آهن أجت‌آباد

۶-۹-۱- مقدمه

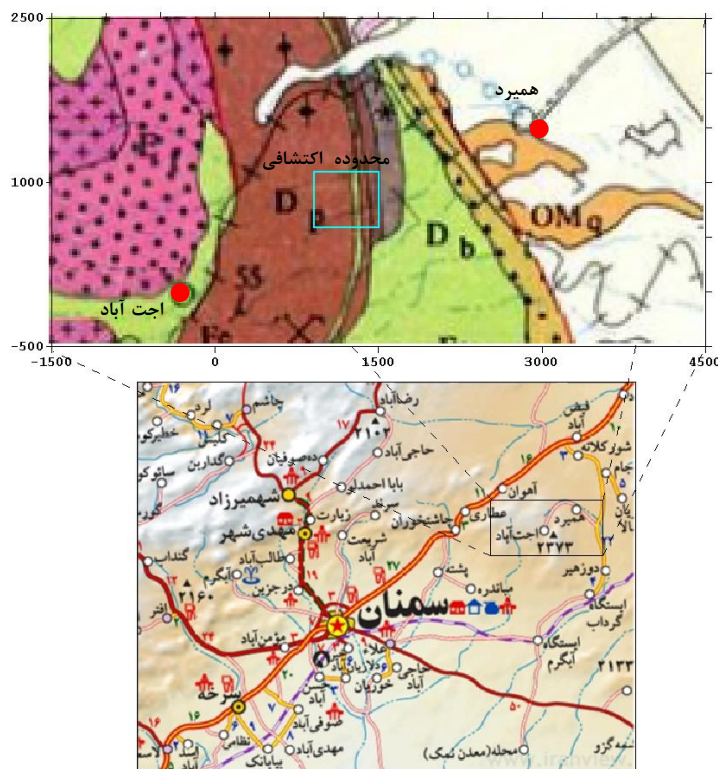
روش گرادیان کل نرمال برای تفسیر داده‌ها در روش‌های میدان پتانسیل بیشتر مورد استفاده است. بنابراین جهت تفسیر آنومالی‌های مغناطیسی در شمال شرق سمنان از این روش استفاده شد. در شمال شرق سمنان یکسری معادن و کانسارهای آهن وجود دارد که برخی از آنها مثل معدن همیرد برای مصارف مورد نیاز کارخانه‌های سیمان بهره‌برداری می‌شود. از جمله کانسارهای منطقه، کانسار أجت‌آباد است که به منظور اکتشاف بیشتر تحت بررسی مغناطیس‌سنجی قرار گرفته است [امرادزاده و همکاران، ۱۳۸۵].

مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که در روی این کانسار آثار معدنکاری قدیمی بیش از ۵۰ سال به صورت محدود در دو محل همراه با مقداری دپو از سنگ‌های آهن‌دار استخراج شده وجود دارد و حتی اقدامات اولیه برای کشیدن ریل برای دسترسی به محل و سکوی بارگیری نیز دیده می‌شود. با وجود چنین شواهدی که تلاش برای بهره‌برداری از کانسار فوق را نشان می‌دهد متأسفانه هیچگونه گزارش مدونی که مربوط به مسائل زمین‌شناسی و اکتشافی آن باشد، وجود ندارد [امرادزاده و همکاران، ۱۳۸۵]. کانسارهای آهن منطقه سمنان تحت عنوان کانسارهای هیدروترمال توسط بلیچ و براگین معرفی شده است [قربانی، ۱۳۸۱].

داده‌های مغناطیسی مورد استفاده در این بخش جهت یک کار تحقیقی در یک دوره آرام مغناطیسی توسط دو دستگاه مگنتومتر پروتون در یک محدوده مربعی با وسعت ۳۶ هکتار در امتداد ۲۲ پروفیل شرقی-غربی و ۳ پروفیل شمالی-جنوبی با فاصله نقاط اندازه‌گیری ۱۵ متر و فواصل پروفیلی ۲۰ متر برداشت شد. با چنین آرایش عملیات صحرایی در مجموع بیش از ۱۲۰۰ نقطه مورد برداشت مغناطیس‌سنجی قرار گرفت. پس از تصحیحات لازم روی داده‌های مغناطیسی برداشت شده مقادیر آنومالی باقی مانده محاسبه شده است [امرادزاده و دولتی، ۱۳۸۵]. در این بخش از این داده‌ها جهت تفسیر به روش گرادیان کل نرمال استفاده گردیده است.

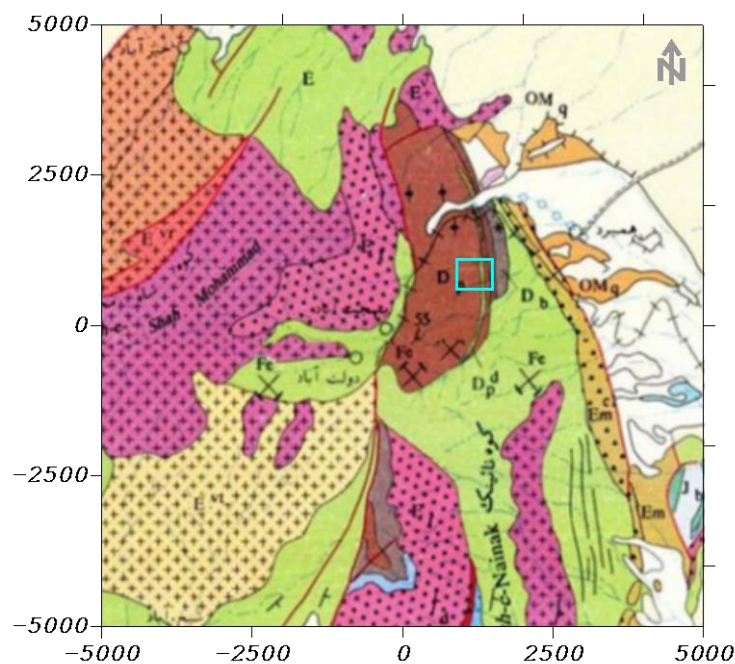
۶-۹-۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

منطقه اکتشافی مطابق شکل (۶-۴۳) در ۶۳ کیلومتری شمال شرق سمنان و در بخش جنوبی جاده سمنان به دامغان قرار دارد. از این مسافت، ۳ کیلومتر جاده اصلی آبخوری و ۱۰ کیلومتر جاده خاکی اختصاصی معدن همیرد و ۵۰ کیلومتر جاده آسفالتی سمنان به دامغان می‌باشد.



شکل ۶-۴۳: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه [سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۸۸] به همراه بخشی از نقشه زمین‌شناسی آن

بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اجام (شکل ۶-۴۴)، منطقه کانی‌سازی شده از ماسه‌سنگ-ها و سنگ‌های آهکی دونین تشکیل شده که در اطراف آن سنگ‌های سازند کرج شامل توف، آندزیت و سایر سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی‌های وابسته به ائوسن رخنمون دارند. علاوه بر آن در بخش‌های غربی و جنوبی ناحیه مورد بررسی، گنگلومرا و آهک کنگلومرایی مربوط به سازند فجن با سن ائوسن زیرین دیده می‌شوند. همچنین سنگ‌های نفوذی میکرودیوریت مربوط به ترشیری با وسعت کم در بخش جنوبی منطقه برونزد دارند.



SYMBOL	DESCRIPTION	شرح لیتولوژی
Q ^{t2}	Q ^{t2} : Subrecent alluvium, gravel fans	آبرفت های جوان و مخروط های فکته
Qpl	Qpl : Conglomerate, sandstone and clay	کنگلومرا، ماسه سنگ و رس
OMq	OMq : Limestone and gypsiferous marl	سنگ آهک و مارن گچ دار
Em	Em : Congl. marl. sst. Em ^{cl} : Conglomerate E ^{vr} : Rhyolitic tuff E : Tuff and shale	کنگلومرا، مارن و ماسه سنگ کنگلومرا توف ریولیتی توف و شیل
E ^{vsh}	E ^{vsh} : Volcanic rock and shale	سنگ آذرین و شیل
E ^v	E ^v : Lava	سنگ های آذرین
E ^{vt}	E ^{vt} : Andesitic lava and tuff	سنگهای آندزیتی و توف
E _f	E _f : Conglomerate and conglomeratic lst.	کنگلومرا و آهک کنگلومرایی
J _b	Shale, sandstone	ژوراسیک . سازند بغمشاه شیل و ماسه سنگ
J _{bl}	Sandy Limestone	ژوراسیک. سازند پروده. سنگ آهک ماسه ای
D _b	Limestone	دوین. سازند بهرام سنگ آهک
D _p	Dolomite Sandstone	دوین. سازند پایه آ، دولومیت ماسه سنگ
d	Microdiorite	میکرو دیوریت

شکل ۶-۴۴: نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه [بخشی از نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰، ۱ جام، علوی نائینی، ۱۳۸۴]

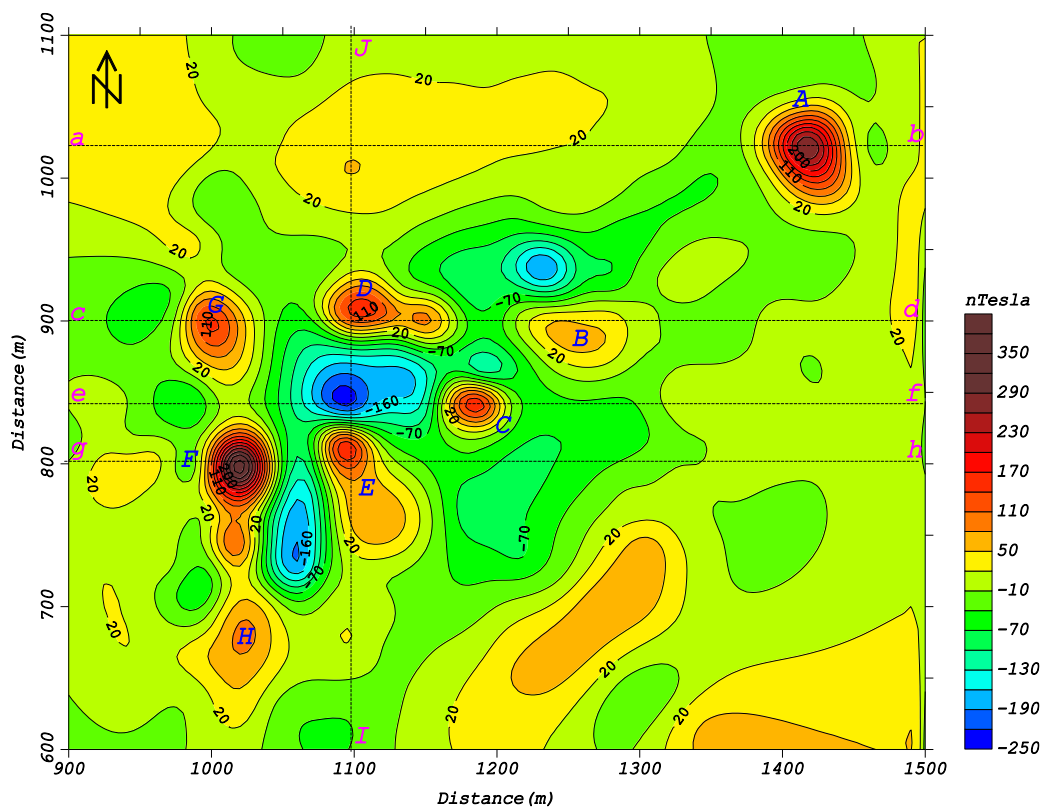
کانی‌سازی آهن در این منطقه عموماً از جنس مگنتیت و هماتیت می‌باشد که احتمالاً می‌تواند در اثر فعالیت‌های گرمائی ناشی از نفوذ سنگ‌های آندزیت - داسیت به داخل رسوبات آهکی، کنگلومرانی و همچنین سیلیس‌های با سن ائوسن باشد. از کانی‌های فرعی همراه ماده معدنی می‌توان به سیلیس و باریت اشاره نمود. توده‌های آهن‌دار عموماً به صورت رگه و دایک می‌باشند [مرادزاده و دولتی، ۱۳۸۵].

۶-۹-۳- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی آنومالی مغناطیسی

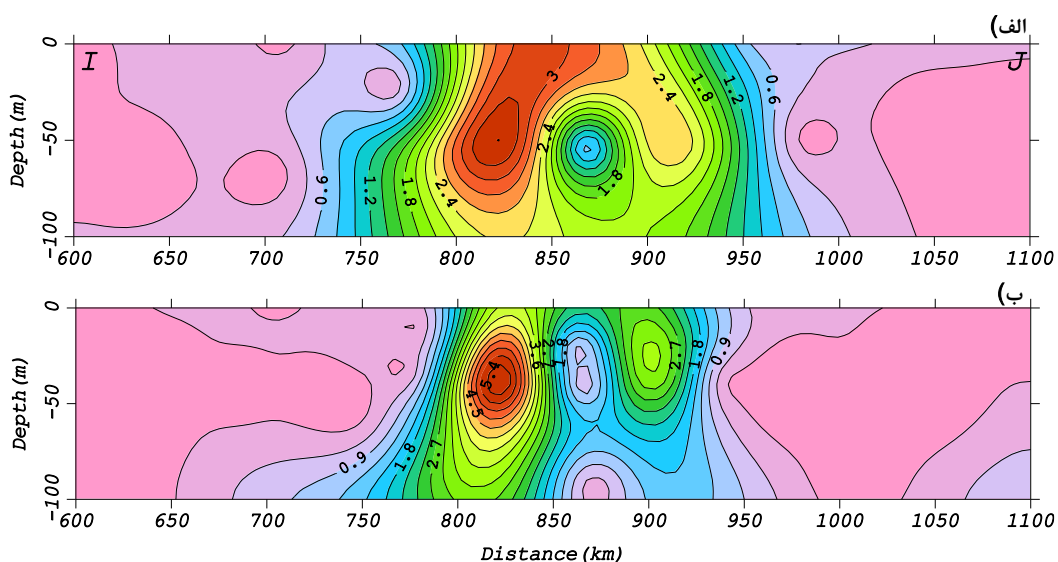
در این مطالعه از داده‌های آنومالی باقی‌مانده مغناطیسی منطقه که به روش روند سطحی با درجه ۷ توسط مرادزاده و دولتی (۱۳۸۵) تهیه شده جهت تفسیر استفاده می‌شود. شکل (۶-۴۵) نقشه آنومالی‌های باقی‌مانده مغناطیسی حاصل از توده‌های آهن‌دار را پس از حذف اثرات ناحیه‌ای نشان می‌دهد. چندین آنومالی مثبت (A, B, C, D, E, F, G) با منحنی‌های تراز بسته روی نقشه به وضوح قابل رویت هستند. روند عمومی غالب این آنومالی‌های مغناطیسی شمال شرق - جنوب غرب است.

مطابق شکل ۶-۴۵، در منطقه مورد مطالعه تعداد ۸ آنومالی وجود دارد که با حروف A, B, C, D, E, F, G و H مشخص شده‌اند. با توجه به این که غالب آنومالی‌ها دارای گسترش دو و نیم بعدی تا سه بعدی می‌باشند به همین جهت، در ابتدا برای به دست آوردن یک دید اولیه از مشخصات هر یک از منابع بوجود آورنده آنومالی‌ها، از روش گرادیان کل نرمال دو بعدی در راستای عمود بر امتداد گسترش کانی‌زایی یا آنومالی‌ها استفاده می‌شود. برای این کار بایستی تعداد جملات بهینه مورد استفاده جهت محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال دو بعدی تعیین شود.

بنابراین تعدادی پروفیل عمود بر امتداد و روند آنومالی‌های مغناطیسی در راستای شرقی-غربی و شمالی-جنوبی انتخاب شد شکل (۶-۴۵) و مقادیر گرادیان کل نرمال روی این پروفیل‌ها به تفکیک محاسبه گردید. سپس گرادیان کل نرمال دو بعدی روی این پروفیل‌ها رسم گردید (شکل‌های ۶-۴۶ و ۶-۴۷).



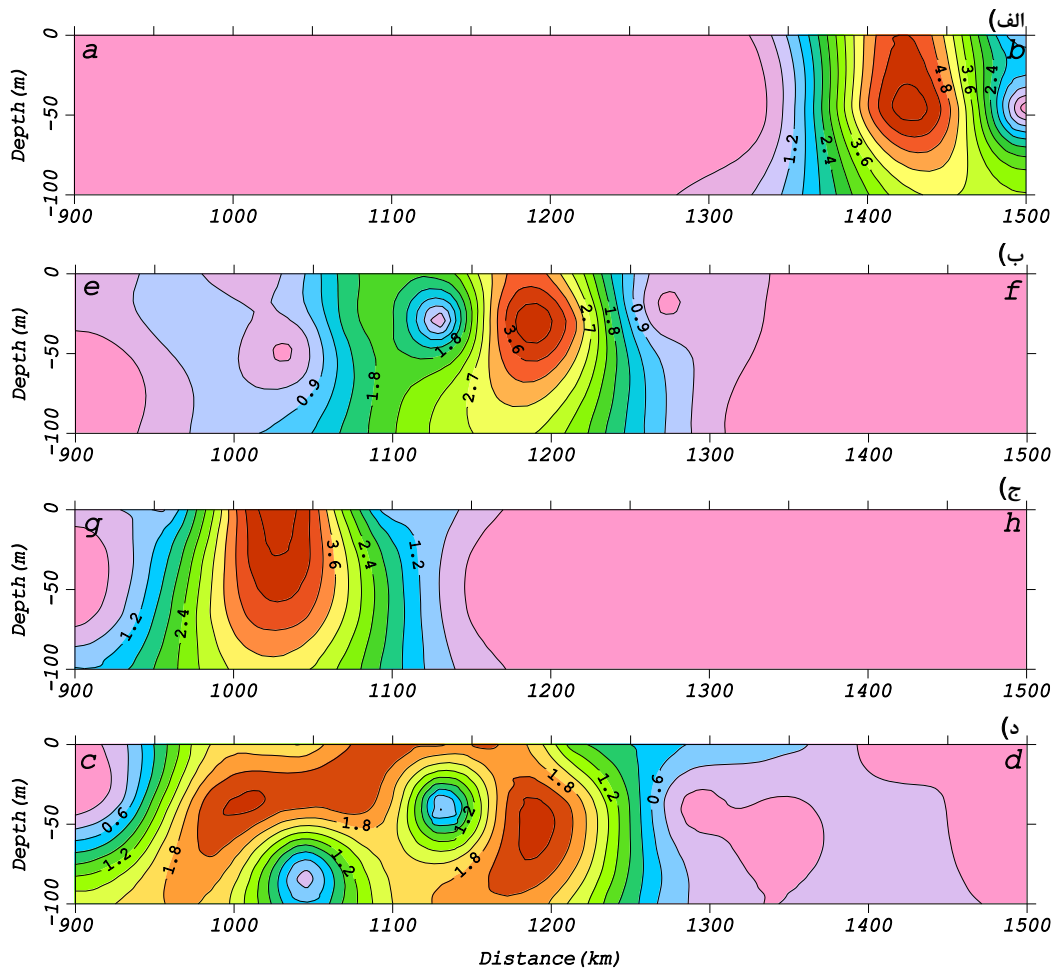
شکل ۶-۴۵: نقشه آنومالی باقی مانده مغناطیسی (نانوتسلا) حاصل از روش روند سطحی درجه ۷ همراه با آنومالی‌های A, B, C, D, E, F, G, H و



شکل ۶-۴۶: مقاطع گرادیان کل نرمال آنومالی مغناطیسی در راستای پروفیل گذرنده از آنومالی‌های E و D, تعداد جملات سری فوریه عدد ۲۵ (الف) و ۴۷ (ب) می‌باشد.

براساس موارد ذکر شده در بالا، تعداد جملات بهینه سری فوریه برای محاسبه گرادیان کل نرمال در فضای دو بعدی در راستای پروفیل II, عدد ۲۵ تعیین شد. با توجه به طول پروفیل (۵۰۰ متر)

بیشترین و مناسب‌ترین عمق اکتشاف کمتر از ۴۰ متر خواهد بود. در این پروفیل دو محدوده بیشینه نشان دهنده موقعیت و محل تقریبی آنومالی E و D می‌باشند. با توجه به ظاهر امر می‌توان گفت که این دو آنومالی احتمالاً در بخش بالایی باهم مرتبط بوده‌اند و احتمالاً در اثر فرسایش شاید بخش رویی از بین رفته است.



شکل ۶-۴۷: مقاطع دو بعدی گرادیان کل نرمال آنومالی‌های مغناطیسی کانسار آهن آجت آباد، الف) پروفیل a-b گذرنده از آنومالی A، ب) پروفیل e-f گذرنده از آنومالی C، ج) پروفیل g-h گذرنده از آنومالی F و د) پروفیل c-d گذرنده از آنومالی‌های D و B، تعداد جملات سری فوریه مورد استفاده عدد ۲۵ می‌باشد. محدوده تیره رنگ (قهوه‌ای) محل آنومالی‌ها می‌باشد.

بررسی شکل‌های (۶-۴۶) و (۶-۴۷) نشان می‌دهد که آنومالی‌های موجود در منطقه روی پروفیل‌ها به وسیله مقادیر بیشینه NFG مشخص شده است. موقعیت مقادیر بیشینه برای کلیه آنومالی‌ها نشان می‌دهد که گسترش عمقی آن‌ها از سطح زمین (آنومالی D، F) تا ۷۰ متری (آنومالی‌های A، B) است.

به این ترتیب می‌توان گفت که آنومالی‌های منطقه سطحی بوده و از ریشه زیادی برخوردار نیستند و به این ترتیب با در نظر گرفتن گسترش سطحی هر کدام از آنها بر روی نقشه آنومالی‌ها (شکل ۶-۴۵) می‌توان بزرگی هر کدام از آنومالی‌ها را تا حدودی تخمین زد.

مطابق شکل‌های (۶-۴۶) و (۶-۴۷) گسترش عمقی آنومالی D از بقیه آنومالی‌ها کمتر و احتمال این که آنومالی‌های B، D و G به طور پیوسته یک آنومالی را تشکیل دهند می‌باشد که در بخش زیرین آن‌ها توسط سنگ میزبان با مغناطیس شونده‌گی کمتر دیده شده است. نتایج بررسی‌های این روش و روش مدل‌سازی وارون داده‌های مغناطیسی [مرادزاده و دولتی، ۱۳۸۵]. در جدول (۶-۵) ارائه شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که کانسار به طور کلی از ریشه و ذخیره زیادی برخوردار نبوده است.

جدول ۶-۵: نتایج تخمین عمق به روش‌های مدل‌سازی وارون و گرادیان کل نرمال دوبعدی، مقادیر به متر است.

نام آنومالی	G	F	E	D	C	B	A
مدل سازی وارون*	۱۰	۱۴	۱۶/۸	۱۷/۹	۱۱۰	۱۰/۸	۲۶/۱
حدود عمق مرکزی (متر) (مطالعه حاضر)	۳۵	۲۰	۳۸	۲۵	۳۲	۵۰	۴۵

*: مرادزاده و دولتی، ۱۳۸۵

۶-۹-۴- محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی آنومالی مغناطیسی

مطابق شکل (۶-۴۵) به نظر می‌رسد که آنومالی‌های A، C، F و G دارای ساختار سه بعدی می‌باشند بنابراین برای تحلیل بهتر داده‌ها روش گرادیان کل نرمال سه بعدی نیز در این منطقه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به ابعاد محدوده اندازه‌گیری داده‌ها (۶۰۰×۵۰۰ متر)، بیشترین عمق مورد بررسی برای حصول نتایج مناسب در تحلیل سه بعدی کمتر از ۵۰ متر می‌باشد.

براساس نتایج دو بعدی و نیز نتایج کارهای قبلی [مرادزاده و دولتی، ۱۳۸۵] مقدار گرادیان کل نرمال سه بعدی داده‌های مغناطیسی برای افق‌های مختلف از ۱۰ تا ۹۰ متری محاسبه و نقشه مقاطع افقی رسم گردید (شکل ۶-۴۷). مطابق شکل مذکور آنومالی‌های موجود و نحوه گسترش عمقی آن‌ها به صورت مقادیر بیشینه NFG آنومالی‌های مغناطیسی در نقشه ترازهای عمقی مشاهده می‌شود.

مطابق شکل (۶-۴۸)، نقشه مقادیر گرادیان کل نرمال آنومالی‌های مغناطیسی تا افق ۶۰ متری روند و موقعیت آنومالی‌ها را تا حدی زیادی به تفکیک نشان می‌دهد ولی با افزایش عمق کل توده معدنی به جزء آنومالی A (با فاصله زیاد) توسط اغتشاشاتی به هم مرتبط می‌گردند.

با بررسی‌های انجام شده به نظر می‌رسد تا حد زیادی نتایج روش سه بعدی نتایج حاصل از روش دو بعدی را تایید می‌کند. نتایج به دست آمده از روش گرادیان کل نرمال سه بعدی نشان می‌دهد که آنومالی B اثر خیلی ضعیفی داشته و به نوعی حذف شده است که علت این امر می‌تواند ناشی از کوچک بودن آنومالی و همچنین اثر توده غیرمغناطیسی در شمال غرب آن باشد. مقایسه نتایج گرادیان کل نرمال در عمق‌های ۲۰ تا ۵۰ نشان می‌دهد که به جزء آنومالی B سایر آنومالی‌های ذکر شده گسترش سطحی خوبی دارند.

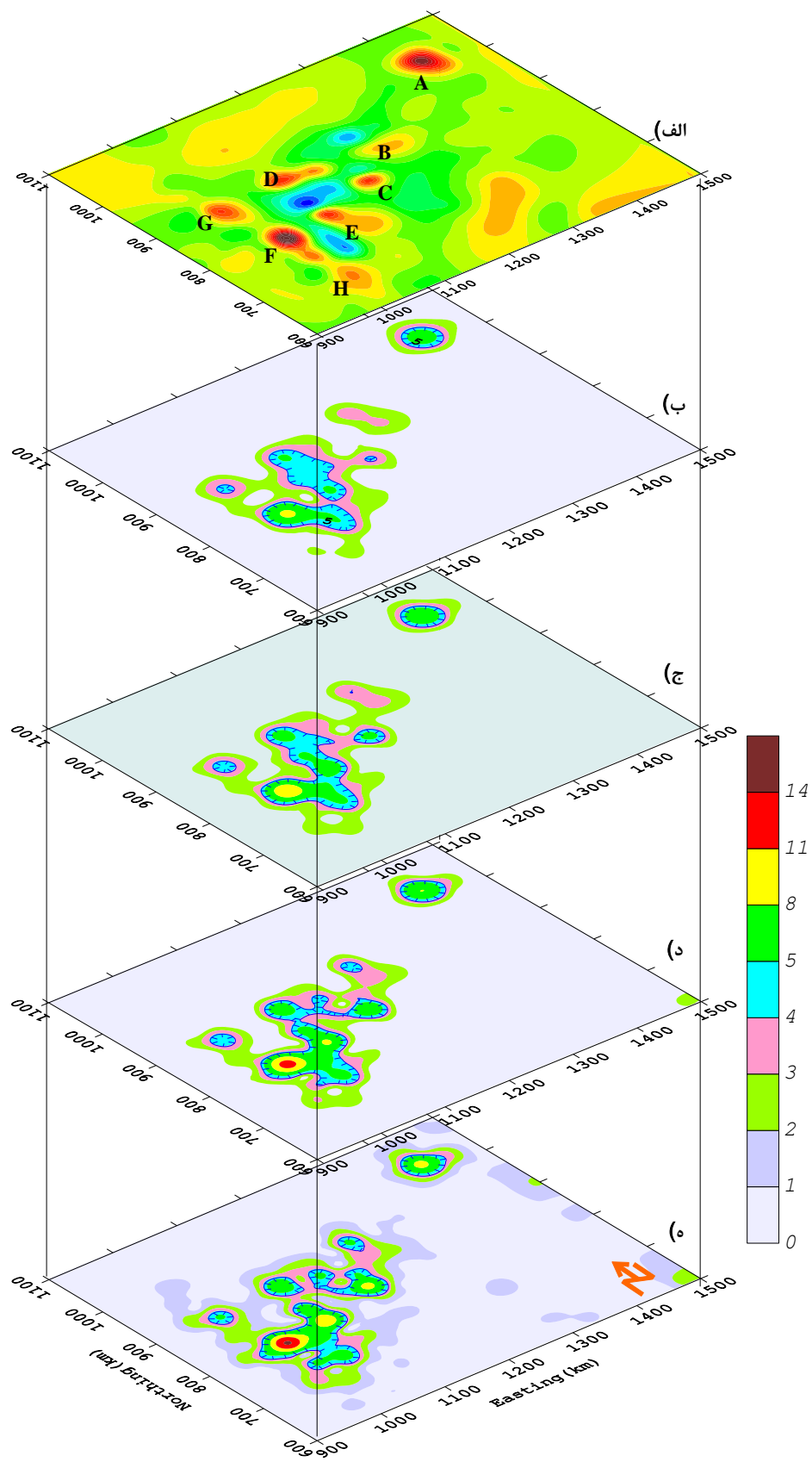
نتایج حاصل از مدل‌سازی سه بعدی آنومالی‌های مغناطیسی [مرادزاده و دولتی، ۱۳۸۵] نشان می‌دهد که به غیر از یک مورد یعنی آنومالی C سایر موارد بایستی در اعماق نزدیک سطحی قرار گرفته باشند (جدول ۶-۶). در مطالعه حاضر به روش دو بعدی هر چند گسترش عمقی خوبی برای آنومالی B دیده می‌شود ولی این موضوع به روش سه بعدی تایید نمی‌شود. از طرفی به دلیل ابعاد کم شبکه اندازه‌گیری، تخمین نتایج بهتر مسیر نمی‌باشد.

جدول ۶-۶: نتایج تخمین عمق به روش‌های مدل‌سازی وارون و گرادیان کل نرمال سه بعدی، مقادیر به متر است.

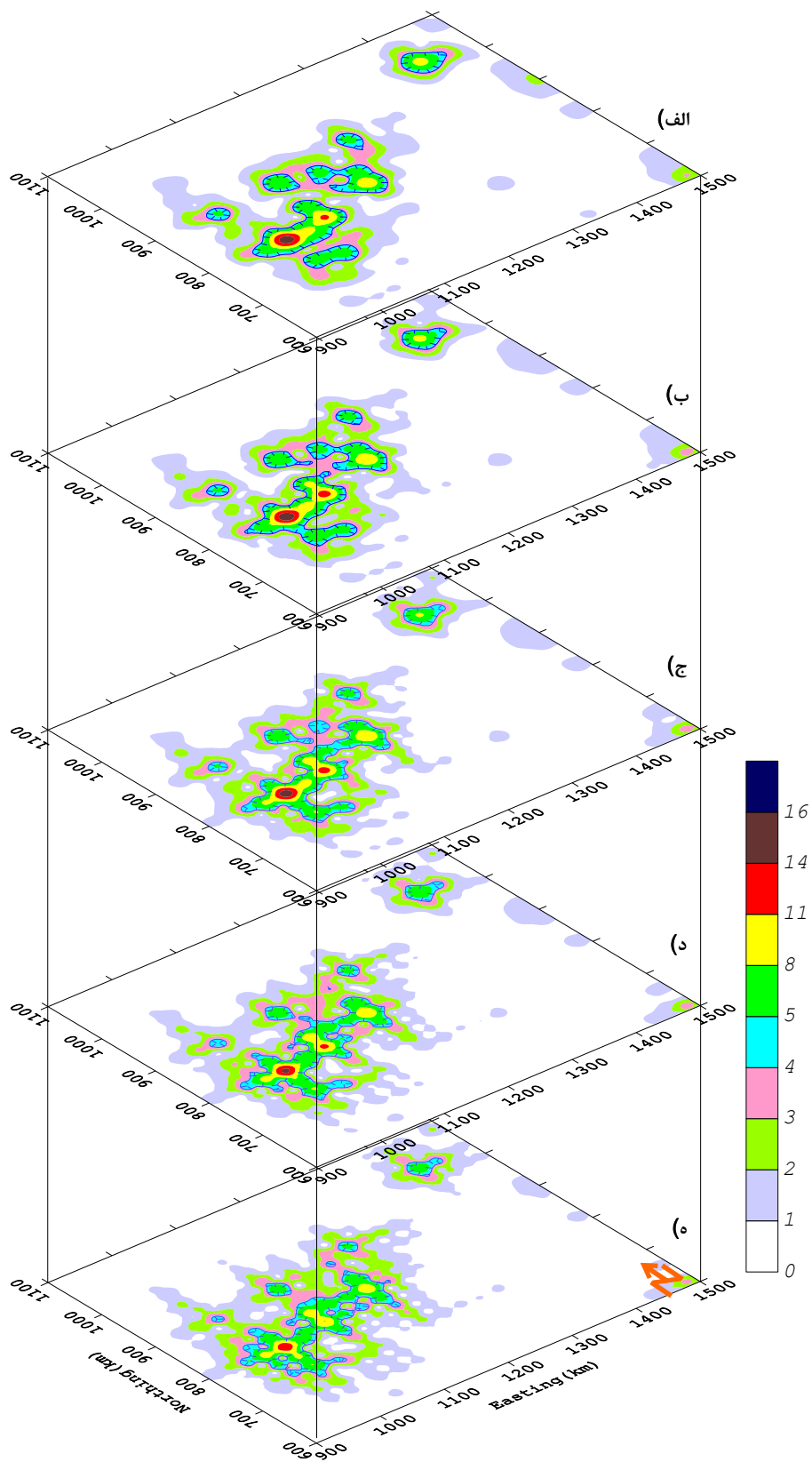
نام آنومالی	G	F	E	D	C	B	A
مدل سازی وارون*	۱۵	۱۰	۲۰	۱۲	۸۷	۱۵	۳۳
حدود عمق مرکزی (متر) (مطالعه حاضر)	۴۰	۱۰	۴۰	۳۰	۴۵	۳۵	۴۵

*: مرادزاده و دولتی، ۱۳۸۵

نتایج به دست آمده از دو روش تفسیر نشان می‌دهد که تشکیل کانسار در نزدیکی سطح زمین می‌باشد، زیرا این موضوع به شکل آثار معدنکاری قدیمی در نزدیکی آنومالی D (به صورت تونلی کوچک) و آنومالی F (ترانشه‌ای بزرگ) قابل مشاهده می‌باشد. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهند که عمق منطقه کانی‌سازی شده در این دو محل بین ۱۰ تا ۱۵ متر در تغییر است.



شکل ۶-۴۸: نقشه آنومالی مغناطیسی منطقه اجت آباد (الف) نقشه کنوری گرادبان کل شمال سه بعدی در افق‌های (ب) ۱۰ متری، (ج) ۲۰ متری، (د) ۳۰ متری، (ه) ۴۰ متری



ادامه شکل ۶-۴۸: نقشه کنتوری گرادیان کل شمال سه بعدی در افق‌های الف (۵۰ متری، ب) (۶۰ متری، ج) (۷۰ متری، د) (۸۰ متری، ه) (۹۰ متری)

براساس بررسی‌های انجام شده روی داده‌های گرانی حاصل از تله‌های هیدروکربوری و توده‌های معدنی می‌توان گفت که روش گرادیان کل نرمال یک روش موثر در تعیین و تفکیک مناطق آنومال نسبت به محیط اطراف است. همچنین این روش قابلیت آشکارسازی ساختارهای نفتی را از سایر ساختارها دارد. براساس نتایج حاصل از روش سه بعدی در هر افقی می‌توان موقعیت مناطق آنومال را مشخص نمود که برای تعیین نقاط حفاری چاه‌های اکتشافی اهمیت فراوان دارد. با توجه به این که روش گرانی در مراحل اولیه اکتشافی مورد استفاده قرار می‌گیرد بنابراین براساس نتایج حاصل از آن می‌توان برنامه اکتشافی لرزه‌ای و حفاری را تعیین نمود.

فصل، مقم

نتیج و پشهادات

۱-۷ جمع‌بندی و نتایج

به طور کلی هدف اصلی در بررسی‌های گرانی سنجی منابع هیدروکربوری آشکارسازی محل قرارگیری آن‌ها است، به این معنی که بتوان موقعیت افقی و عمقی آن‌ها را مشخص نمود. به منظور دستیابی به این هدف، آنومالی‌های گرانی به مولفه‌های دیگر میدان گرانی تبدیل می‌شود. یکی از روش‌های مناسب جهت این کار، استفاده از روش گرادیان کل نرمال داده‌های میدان گرانی می‌باشد. در این رساله ابتدا اصول و مبانی روش گرادیان کل نرمال دو بعدی برای اکتشاف منابع هیدروکربوری مورد بررسی قرار گرفت. سپس در فصول بعدی برخی ویژگی‌های آن بر روی ساختارهای مختلف تمرکز دهنده نفت و گاز بررسی و توسط داده‌های واقعی اعتبار سنجی شد. اهداف اصلی طراحی شده برای انجام رساله به صورت زیر بیان شده بود:

- تهیه الگوریتم و برنامه محاسباتی مقدار گرادیان کل نرمال دو بعدی براساس سری فوریه
- بررسی نقش عوامل موثر در محاسبه مقدار گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی نظیر تعداد جملات هارمونیک، طول پروفیل و فاصله نقاط اندازه‌گیری، توان تابع هموارساز، اختلاف چگالی و چگونگی بهینه‌سازی این پارامترها برای شناسایی هر چه بهتر منابع آنومال
- بررسی پاسخ روش مورد نظر روی مدل‌های دو بعدی از نفتگیرهای تاقدیسی و نوع گنبد نمکی

- بررسی روش‌های شبه سه بعدی موجود و ارائه روشی جدید برای مدل‌سازی سه بعدی کامل داده‌های گرادیان کل نرمال با لحاظ نمودن سری فوریه دو بعدی

- بررسی پاسخ روش گرادیان کل نرمال سه بعدی بر روی مدل‌های تله‌های نفتی سه بعدی با ساختارهای تاقدیسی و گنبد نمکی

- اعتبار سنجی روش با استفاده از داده‌های واقعی منابع هیدروکربوری و معدنی
- اهداف مذکور، اصول و مبانی روش و همچنین تهیه مدل‌های مصنوعی که تداعی‌گر شرایط زمین-شناسی انواع ساختارهای تله‌های نفتی (تاقدیسی و گنبد نمکی) باشد، همراه با نحوه محاسبه پاسخ

گرانی آن‌ها (با نوشتن برنامه کامپیوتری لازم) در حالت‌های دو و سه بعدی در فصول ۱ تا ۳ رساله تشریح گردید. برای محاسبه پاسخ گرانی مدل‌ها، الگوریتم‌ها و برنامه‌های مربوطه با استفاده از روش برانبارش لایه‌های مختلف و نیز منشورها و تیغه‌های نازک تهیه کدنویسی شد.

در مرحله بعدی در فصل ۴ با استفاده از پاسخ مدل‌ها، و تهیه الگوریتم و برنامه‌های مورد نیاز، در محیط نرم‌افزار Matlab، ضمن محاسبه گرادیان کل نرمال مدل‌های مختلف دو بعدی قابلیت‌ها و ویژگی‌های روش گرادیان کل نرمال مطالعه و برخی از پارامترهای موثر در آن (مانند N ، طول پروفیل، شبکه اکتشاف، فواصل نقاط اندازه‌گیری و...) با لحاظ مدل‌های زمین‌شناسی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و شیوه تعیین مقادیر بهینه و مناسب پارامترها مورد بحث قرار گرفت. در ادامه در فصل ۵ پس از بررسی روش‌های شبه سه بعدی بکار رفته توسط برخی محققین، روش سه بعدی کامل با لحاظ نمودن سری فوریه دو بعدی ارائه و با مدل‌های مختلف سه بعدی در شرایط مختلف مورد آزمون قرار گرفت. در خاتمه در فصل ۶، روش اصلاح شده گرادیان کل دو بعدی و همچنین روش جدید جهت محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال مدل‌های سه بعدی، برای چند مجموعه از داده‌های واقعی با منابع هیدروکربوری و ذخایر معدنی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصل با دیگر اطلاعات موجود اکتشافی مقایسه گردید.

براساس موارد مذکور نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر عنوان نمود:

- همان طور که پیش‌تر ذکر شد، روش گرادیان کل نرمال از ضرایب سری فوریه برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال استفاده می‌نماید. بنابراین مساله مهم و اصلی در این حالت تعیین مقدار بهینه تعداد جملات هارمونیک سری فوریه (N) می‌باشد. مرور منابع منتشره نشان می‌دهد که پژوهشگران برای تعیین مقادیر بهینه آن از داده‌های اضافی به ویژه حفاری استفاده می‌نمایند. مشکل اصلی استفاده از این روش در این است که در مراحل اولیه اکتشاف که عملیات گرانی سنجی صورت می‌گیرد بندرت اطلاعات عمقی مربوط به منابع آنومال ناشی از عملیات حفاری موجود است بنابراین استفاده از اینگونه داده‌های جانبی امکان‌پذیر نیست. برای فائق آمدن بر این

مشکل در مطالعه حاضر روشی برای تعیین بهینه تعداد جملات هارمونیک سری فوریه جهت محاسبه گرادیان کل نرمال ارائه شد که نیاز به داده‌های اضافی ندارد. در این روش که بنام بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال به صورت تابعی از تعداد جملات هارمونیک نام دارد با رسم نمودار تغییرات مقادیر گرادیان کل نرمال نسبت به تعداد جملات هارمونیک مختلف اولین مقدار بیشینه نسبی NFG تعیین می‌شود و سپس عدد N متناظر تولید کننده چنین بیشینه‌ای به عنوان مقدار بهینه هارمونیک تعیین می‌گردد.

- نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های مختلف ساختارهای کروی، استوانه قائم، استوانه افقی، تاقدیسی و گنبد نمکی شکل نشان می‌دهد که مقدار گرادیان کل نرمال حاصل از این مدل‌ها به شدت به تعداد بهینه جملات هارمونیک سری فوریه وابسته است.

- بررسی‌های انجام شده روی مدل‌های مختلف با اشکال و ابعاد یکسان ولی اختلاف چگالی متفاوت نشان داد که تغییر بزرگی اختلاف چگالی اجسام نسبت به محیط اطراف تاثیری در موقعیت بیشینه و یا کمینه منحنی‌های بسته مقادیر گرادیان کل نرمال ندارد. به عبارت کوچک یا بزرگ بودن مقدار اختلاف چگالی بین جسم و محیط اطراف در تعداد جملات هارمونیک مورد نیاز برای محاسبه گرادیان کل نرمال تاثیری نداشته در نتیجه موقعیت افقی اجسام آنومال در مقطع گرادیان کل نرمال ثابت می‌ماند. بنابراین توده‌های با اختلاف چگالی کم در صورتی که پاسخ گرانی آنها به دقت اندازه‌گیری شوند هم با این روش قابل آشکارسازی می‌باشند.

- نتایج نشان می‌دهد که مقدار مناسب و بهینه توان تابع هموار کننده لانکزوس μ (برای حذف اثرات نامطلوب در حین گسترش میدان) عدد ۲ می‌باشد که تا ۳ قابل افزایش می‌باشد.

- نتایج به دست آمده از مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که یکی از پارامترهای مهم و موثر روی مقادیر NFG و موقعیت عمقی منحنی‌های بسته بیشینه و یا کمینه آن، طول پروفیل اندازه‌گیری داده‌های میدان پتانسیل می‌باشد. به این ترتیب که با کاهش طول پروفیل اندازه‌گیری، مقادیر گرادیان کل نرمال کاهش یافته و موقعیت منحنی‌های بسته بیشینه یا کمینه که تعیین

کننده منابع آنومال می‌باشند به سطح زمین نزدیک‌تر شده و همچنین نوفه‌های فرکانس بالا نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه تخمین عمق توده‌های آنومال با خطا همراه خواهد بود. به عبارتی دیگر با تغییر طول پروفیل موقعیت منحنی‌های بسته مقادیر گرادیان کل نرمال و یا مقادیر کمینه آن‌ها به لحاظ عمقی روی مقاطع تغییر می‌نماید. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد که مناسب‌ترین طول پروفیل برای دستیابی به جواب‌های دقیق‌تر زمانی است که طول پروفیل به اندازه ۱۳ برابر عمق منابع مورد انتظار باشد تا تخمین عمق اجسام آنومال با دقت بیشتری همراه گردد.

- یکی از عوامل موثر در نتایج گرادیان کل نرمال فاصله نقاط اندازه‌گیری روی پروفیل می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که بهترین و مناسب‌ترین نتایج از روش زمانی به دست می‌آید که ابعاد محدوده اندازه‌گیری داده‌ها بزرگ باشد و فاصله بین نقاط اندازه‌گیری روی هر یک از پروفیل‌ها برابر نصف و یا حداکثر عرض جسم آنومال در راستای گسترش پروفیل تعیین گردد.

- نتایج نشان می‌دهد که روش گرادیان کل نرمال داده‌های میدان پتانسیل یک ابزار موثر برای تخمین موقعیت افقی و عمق اجسام آنومال است حتی اگر توده آنومال دارای اختلاف چگالی خیلی کمی نسبت به محیط اطراف باشند. این روش از تخمین عمق به دست آمده از موقعیت منحنی‌های (میدان‌های) گرادیان کل نرمال به عنوان یک ابزار عملی جهت تخمین مقدار عمق اجسام آنومال و موقعیت افقی آن‌ها استفاده می‌کند.

- نتیجه مطالعه نشان می‌دهد که وجه تمایز و مزیت روش گرادیان کل نرمال نسبت به روش‌های مرسوم و معمول تفسیر داده‌های میدان پتانسیل (گرانی) در شاخصی است که علاوه بر آشکارسازی تله‌های تاقدیسی و تخمین عمق آن‌ها، وجود یا عدم وجود مواد هیدروکربوری در آن‌ها را نیز بیان می‌نماید. به این صورت که ساختارهای تاقدیسی بدون مواد هیدروکربوری روی مقاطع دو بعدی و نقشه‌های سه بعدی گرادیان کل نرمال به صورت منحنی‌های بسته بیشینه ظاهر می‌شوند که موقعیت مرکز آن عمق تاقدیس را نشان می‌دهد. ولی برای ساختارهای تاقدیسی حاوی نفت (نفتگیر تاقدیسی) روی مقاطع یکسری منحنی‌های بسته کمینه‌ای ظاهر می‌شود که

توسط محدوده‌های بیشینه مقادیر گرادیان کل نرمال محصور شده است. فاصله بین دو مقادیر بیشینه و کمینه در مقاطع NFG به ابعاد نفتگیر تاقدیسی (مخزن) بستگی دارد. بنابراین وجود مقدار کمینه گرادیان کل نرمال آنومالی‌های گرانی مشخصه‌ای برای اکتشاف آنومالی‌های چگالی وابسته به مخازن احتمالی نفت و گاز است. این مشخصه در نقشه‌های سه بعدی (مقاطع افقی NFG) نیز نشان دهنده موقعیت نفتگیر بوده که به عنوان شاخصی برای تعیین محل حفر چاه‌های اکتشافی می‌باشد.

- بررسی‌های انجام شده در کار حاضر نشان می‌دهد که گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی حاصل از یک گنبد نمکی به صورت منحنی‌های بیشینه‌ای روی مقاطع قائم و افقی ظاهر می‌شود که با انتخاب تعداد جملات مناسب عمق گنبد نمکی نیز مشخص می‌گردد. برای بررسی وضعیت مقادیر گرادیان کل نرمال داده‌های گرانی حاصل از یک گنبد نمکی حاوی مواد هیدروکربوری از اطراف یال‌های آن، مدل‌های مختلفی (ساده و یا به همراه سازندهای اطراف آن) تهیه و اثر گرانی و سپس مقادیر گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی آن‌ها محاسبه گردید. نتایج حاصل از این مدل‌سازی نشان می‌دهد که وجود تله نفتی به صورت مقادیر کمینه گرادیان کل نرمال ظاهر می‌شود که به وسیله منحنی‌های مقادیر بیشینه محصور شده‌اند. براساس این مشخصه نتایج مناسب و قابل اعتمادی برای داده‌های واقعی ارائه می‌شود.

به منظور اعتبار سنجی روش دو بعدی و روش سه بعدی ارائه شده و مشخص نمودن توانمندی آن، داده‌های گرانی از میداین مختلفی نفتی مورد استفاده قرار گرفت. هر کدام از این داده‌ها دارای ویژگی‌هایی بودند که سبب آشکار نمودن قدرت و توانمندی روش شدند. داده‌های مورد استفاده مربوط به موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی مختلف و ساختارهای زمین‌شناسی متفاوت نظیر تاقدیسی (طبس، دشت آبادان)، تاقدیسی و گنبد نمکی (قم)، تاقدیسی و گنبد نمکی (حوزه کم عمق دریایی و خشکی قشم) و حوزه‌های رسوبی زیردریایی به همراه چاه‌های اکتشافی زیاد (ویتنام) و گنبد نمکی حاوی میدان نفتی (هومبل) بوده‌اند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها به صورت زیر می‌باشد:

- در میدان نفتی با ساختار تاقدیسی در دشت آبادان سه چاه اکتشافی با موقعیت و عمق مشخص وجود دارد که همگی تایید کننده نتایج حاصل از روش گرادیان کل دو و سه بعدی برای وجود منابع هیدروکربور می‌باشند. در جنوب منطقه مورد مطالعه و نزدیک خط مرزی، چاه اکتشافی اروند در عمق حدود ۴۲۰۰ متری به مخزن نفتی برخورد نموده است ولی نکته قابل توجه این است که بخش اعظم این مخزن در کشور عراق (فاو) قرار دارد. همچنین مناطق امیدبخش نفتی در این حوضه شرق چاه اکتشافی امید و شمال شرق آبادان تا شرق خرمشهر می‌باشد. بنابراین مناسب‌ترین نقطه برای عملیات حفاری روی مخزن وسیع در شمال شرق شهر آبادان پیشنهاد می‌شود.

- با توجه به حجم زیاد حفاری در حوزه نفتی جنوب شرق کشور ویتنام، داده‌های گرانی این منطقه با روش‌های گرادیان کل نرمال دو بعدی و سه بعدی ارائه شده در مطالعه حاضر و همچنین روش شبه سه بعدی تران (۲۰۰۴) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل با دقت قابل قبول و بهتر از روش تران مناطق پتانسیل‌دار نفتی را آشکار نموده است. طوری که غالب چاه‌هایی که به منابع هیدروکربوری برخورد نموده‌اند در داخل نقشه پر پتانسیل هیدروکربوری تهیه شده توسط روش‌های گرادیان کل نرمال ارائه شده در مطالعه حاضر قرار می‌گیرند درحالی که دیگر چاه‌های حفاری شده خارج از زون پر پتانسیل خشک می‌باشند.

- نتایج حاصل از بکارگیری روش روی داده‌های حوضه نفتی قم نشان داد که عمق توده گنبد نمکی بیش از ۳۰۰۰ متر بوده و هیچگونه تله نفتی مرتبط با آن نیست. همچنین نتایج حاصل از روش NFG در بخش تاقدیس البرز شرقی با اطلاعات و داده‌های حفاری مبنی بر وجود و یا عدم وجود هیدروکربور کاملاً منطبق است.

- کاربرد روش روی داده‌های گرانی حوضه طبس که هیچ‌گونه کار اکتشافی عمقی انجام نشده است، مناطق مستعدی را نشان می‌دهد که با تفسیرها و مدل‌سازی‌های قبلی روی این منطقه

هماهنگی خوبی داشته و علاوه بر آن نشان می‌دهد که عمق ساختارها (تاقدیسی) زیاد بوده است و می‌تواند حاوی حجم بالایی از هیدروکربور باشد.

- از نتایج قابل توجه در بخش داده‌های واقعی، بکارگیری روش گرادیان کل نرمال روی داده‌های گرانی گنبد نمکی هومبل در آمریکا می‌باشد. با تهیه مقاطع قائم (دو بعدی) گرادیان کل نرمال، عمق این گنبد در حدود ۴/۸ کیلومتر تخمین زده شد که با نتایج مدل‌سازی‌های دیگر محققین هماهنگ است. همچنین به کارگیری روش گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی نشان می‌دهد که این گنبد نمکی در عمق حدود ۲/۵ کیلومتری دارای تله حاوی نفت و گاز می‌باشد طوری که مشخصه وجود مخازن نفت و گاز در مقاطع قائم و افقی گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی به صورت مقادیر کمینه محصور بین بیشینه‌ها به خوبی ملاحظه می‌باشد که این مطلب در تطابق کامل با نتایج حفاری‌ها و دیگر داده‌های اکتشافی است.

- کاربرد روش NFG روی داده‌های گرانی منطقه قشم که در آن مجموعه‌ای از ساختارهای تاقدیسی و گنبد نمکی در ساحل و مناطق کم عمق دریایی است، نتایج قابل توجهی ارائه داده است. براساس نتایج بکارگیری گرادیان کل نرمال سه بعدی مناطق پتانسیل‌دار هیدروکربوری مشخص گردید که صحت وجود هیدروکربور در این منطقه از نظر موقعیت افقی و حتی عمقی با برخی از حفاری‌های صورت گرفته تأیید شده است در حالی که چاه‌های حفاری شده خارج از مناطق با پتانسیل بالا هیدروکربوری در خارج از محدوده کمینه نقشه گرادیان کل نرمال خشک بوده‌اند. البته ذکر این نکته ضروری است که در این منطقه عملیات اکتشافی مربوط به سال‌های گذشته بوده و بحث اصلی اکتشافی روی نفت در سازند آسماری بوده است و عمده حفاری‌ها تا چنین عمقی صورت گرفته است. متأسفانه هیچگونه حفاری در حوالی گنبدهای نمکی منطقه صورت نگرفته است ولی براساس نقشه‌های گرادیان کل نرمال سه بعدی، مناطق پر پتانسیل و امیدبخش هیدروکربوری در جنوب غرب (حوالی شمال گنبد قشم تا گنبد نمکی پل) و شمال غرب منطقه (ساختارهای تاقدیسی) معرفی می‌گردد که محل حفر چاه‌های اکتشافی قشم، سرخون ۷ و

گورزین ۴ در محدوده مناطق امیدبخش قرار می‌گیرند. چاه‌های اکتشافی سوورو روی یک مخزن کوچکی حفر شده که بیانگر حجم کم و غیرقابل استفاده این مخزن می‌باشد.

- نتایج به دست آمده از روش مذکور روی داده‌های گرانی معدن مس مسیو سولفاید موبرون کانادا و روی آنومالی‌های مغناطیسی اجت آباد سمنان نشان داد که این روش می‌تواند به عنوان یک راهکار موثر در اکتشاف مواد معدنی قلمداد شود. در این حالت علاوه بر شناسایی مناطق آنومال تا حد زیادی عمق کانی‌زایی یا توده‌های آنومال قابل بررسی خواهد بود.

- نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های مصنوعی و داده‌های واقعی نشان می‌دهد که بکارگیری توام مقاطع گرادیان کل نرمال دو بعدی و نقشه‌های سه بعدی آن دارای اعتبار مناسبی در آشکارسازی و موقعیت‌یابی آنومالی‌های موثر در منابع هیدروکربوری و معدنی می‌باشند. روش گرادیان کل نرمال سه بعدی به علت استفاده همزمان تعداد هارمونیک‌ها در دو جهت روی صفحه $x-y$ نتایج مناسب‌تر ارائه می‌نماید و در مقایسه با روش‌های شبه سه بعدی سبب بارزسازی بهتر اجسام آنومال می‌شود.

- بر اساس نتایج به دست آمده، از این روش می‌توان در تفکیک ساختارهای تاقدیسی و گنبد نمکی شکل حاوی هیدروکربور از سایر تله‌های خشک، انتخاب محل حفر چاه‌های اکتشافی، برنامه‌ریزی برای فعالیت‌های اکتشافی بیشتر استفاده نمود که سبب تسریع در عملیات اکتشافی و کاهش هزینه‌های اجرایی می‌شود. بدین منظور بهترین نتایج در روش گرادیان کل نرمال دو و سه بعدی تحت شرایط زیر به دست می‌آید.

۱. ذخایر هیدروکربنی دارای ضخامت مناسب و کافی جهت ایجاد آنومالی گرانی مناسب باشند و امکان اندازه‌گیری این اختلاف آنومالی وجود داشته باشد.

۲. محدوده مورد اکتشاف برای داده‌های گرانی به اندازه مناسب وسیع باشد. اندازه‌گیری داده‌های میدان پتانسیل بر روی شبکه‌های منظم و در امتدادهای عمود بر امتداد ساختارهای زمین‌شناسی و با دقت بیشتری انجام شود.

۳. طول پروفیل‌ها و فاصله نقاط اندازه‌گیری به طور مناسب و مطابق روالی صورت گیرد که قبلاً به آن‌ها اشاره شد.

۴. همچنین برای افزایش اطمینان پذیری و امکان آشکارسازی و تشخیص نواحی پتانسیل‌دار هیدروکربوری و معدنی با استفاده از داده‌های گرانی، بهتر است اثر میدان ناحیه‌ای از مقادیر مشاهده‌ای کسر گردد.

۲-۷- پیشنهادات

- هر چند در این رساله روشی جدید برای تعیین مقدار بهینه تعداد جملات هارمونیک (سری فوریه) ارائه شده که تا حد زیادی مشکلات نبود اطلاعات تکمیلی را حل می‌نماید، با این حال به دلیل اهمیت این پارامتر در تعیین مقادیر بیشینه نسبی گرادیان کل نرمال، مطالعه بیشتر در به دست آوردن رابطه‌های دیگر بین NFG و N پیشنهاد می‌شود.
- فرمول کردن روابط بین مقادیر گرادیان کل نرمال و تعداد هارمونیک، طول پروفیل، فاصله بین نقاط اندازه‌گیری
- انجام مطالعات تکمیلی‌تر در این زمینه می‌تواند برای شناخت قابلیت این روش درحالتی که مدل‌ها حالتی پیچیده‌تری از ساختارهای زیر سطحی را مانند تاقدیس‌های پلانچدار، تاقدیس‌هایی که توسط گنبد‌های نمکی قطع شده‌اند و یا نفتگیرهای تاقدیسی و گنبد نمکی پیچیده و مرکب سه بعدی را تشکیل دهند، مفید واقع شود.
- بررسی بیشتر روی شکل و هندسه دیگر نفتگیرها به ویژه نفتگیرهای نوع گسلی و چینه‌ای و یافتن رابطه‌ای بین هندسه آن‌ها و سایر پارامترهای موثر در محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال
- تعیین روابط مناسبی بین تعداد جملات هارمونیک در حالت سه بعدی و ابعاد شبکه اندازه‌گیری داده‌ها
- بررسی تاثیر توان عملگر گرادیان (0) در نتایج حاصل از گرادیان کل نرمال

پیوست‌های رساله

پیوست الف: روش‌های تحلیل آنومالی‌های گرانی

پیوست ب: روش‌های عددی محاسبه ضرایب فوریه

پیوست ج: الگوریتم محاسباتی گزاردیان کل زمان شبه‌به‌بعدی

پیوست الف

روش های تفکیک آنومالی های کرانی

هدف اصلی از تفکیک آنومالی های میدان پتانسیل حذف و تعدیل اثرات ناحیه ای از مقادیر میدان پتانسیل اندازه گیری شده و رسیدن به آنومالی های محلی و یا باقی مانده است که بیشتر نشان دهنده توده های آنومال کم عمق می باشند. در این پیوست به طور خلاصه روش های مرسوم تفکیک آنومالی ها توضیح داده می شوند.

الف-۱- جداسازی آنومالی ها به روش گرافیکی

در این روش ابتدا ژئوفیزیکدان از ظاهر پروفیل و یا نقشه منحنی میزان تصمیم می‌گیرد که اثر ناحیه‌ای گرانی چگونه است؟ این کار با رسم خطوطی که از کنار تغییرات محلی عبور کرده و فقط بخش‌های با انحنای وسیع‌تر را روی یک پروفیل یا روی منحنی کنتوری آنومالی به هم وصل می‌کند انجام می‌شود [Robinson & Coruh, 1988]. به این ترتیب با مشخص کردن اثر ناحیه‌ای روی پروفیل یا منحنی، مقدار آنومالی محلی محاسبه می‌شود. سپس مقادیر حاصل از آن رسم می‌گردد تا نقشه آنومالی گرانی محلی برای تحلیل آماده شود.

متأسفانه روش مشخصی در این زمینه وجود نداشته و هیچ دو ژئوفیزیکدانی قضاوت یکسانی در این باره نخواهند داشت. از آنجایی که طرح ناحیه‌ای کاملاً وسیع و ساده است و آنومالی‌های محلی به سادگی قابل تشخیص هستند قضاوت در مورد آنها احتمالاً یکسان است. اما آنجایی که آنومالی‌های محلی کوچک هستند و منابع با ابعاد متوسط به طرح ناحیه‌ای اضافه می‌شود می‌توانیم انتظار اختلاف عقاید بزرگتر را داشته باشیم.

الف-۲- روش روند سطحی

در این روش، میدان ناحیه‌ای از مقادیر مشاهده‌ای بوسیله روش کمترین مربعات یا روش اورتونرمال تقریب زده می‌شود [Oldham & Sutherland, 1955]. این روش براساس محاسبه سطحی (به روش ریاضی) استوار است که بهترین تطابق را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای داشته باشد. در این روش بر داده‌های گرانی مشاهده‌ای سطحی عبور داده می‌شود که پیچیدگی معادله ریاضی سطح مورد نظر به روند حاکم بر داده‌ها بستگی دارد. در حالت کلی معادله سطح مذکور برای حالت دوبعدی به صورت زیر است [Krumbein, 1959; Miller, 1956; Unwin, 1978; Sarma & Selvaraj, 1990]:

$$T(x, y) = A_{00} + A_{10}x + A_{01}y + A_{11}xy + A_{20}x^2 + A_{02}y^2 + A_{21}x^2y + \dots + A_{mn}x^m y^n \quad (\text{الف-۱})$$

که در آن $T(x,y)$ مقدار آنومالی ناحیه‌ای، A_{ij} ضرایب سطح مذکور، X و Y مختصات نقاط مشاهده‌ای داده‌ها می‌باشند. پس از عبور دادن سطح مزبور بر داده‌های گرانی ناحیه برداشت شده، مقدار محلی یا باقی‌مانده گرانی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_i = G_i - T_i \quad (\text{الف-۲})$$

که در آن G_i داده‌های مشاهده‌ای، T_i پاسخ سطح مزبور به عنوان اثر ناحیه‌ای و R_i نماینده آنومالی باقی‌مانده می‌باشد.

درجه روند سطحی به پیچیدگی زمین شناسی ناحیه‌ای بستگی دارد. از درجه روند سطحی بیشتر برای همپوشانی بین مقادیر سطح مزبور و مقادیر داده‌های مشاهده‌ای در شرایط پیچیده‌تر زمین-شناسی استفاده می‌شود [Dobrin & Sovit, 1988]. به منظور ارزیابی درجه نیکویی برازش سطح مورد نظر با داده‌های اندازه‌گیری شده از آزمون آماری F استفاده می‌شود [Unwin, 1978].

الف-۳- شبکه بندی یا عددی کردن داده‌ها

تفکیک آنومالی‌های محلی و ناحیه‌ای به روش هموار نمودن گرافیکی منحنی‌های گرانی وقت‌گیر است. این روش برای تحلیل مناطق بزرگ با ساختارهای پیچیده گرانی بوگه غیرعملی است. روش‌هایی که برای تخمین مقدار آنومالی ناحیه‌ای در یک نقطه، از متوسط وزنی مقادیر نقاط اطراف استفاده نمایند، سودمندتر هستند. زیرا این روش‌ها عددی هستند و پردازش داده‌ها با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری سریع و محاسبات لازم با سرعت زیادی انجام می‌شود، حتی اگر ناحیه مورد بررسی دارای وسعت زیادی باشد.

از روش‌های متوسط‌گیری می‌توان با مشکلات بسیار کمتری استفاده نمود، اگر مقادیر گرانی بوگه در فواصل مساوی در یک ناحیه معلوم باشد [Telford et al, 1991]. در عین حال، برای بیشتر برداشت‌های گرانی به دلیل شرایط توپوگرافی و محیطی دسترسی به نقاط مشاهده‌ای با مشکلاتی روبرو است لذا در چنین مواردی اندازه‌گیری‌ها روی یک شبکه نامنظم انجام می‌گیرد. بنابراین، تعیین

مقادیر گرانی بوگه در یک شبکه منظمی از نقاط، قبل از جداسازی آنومالی‌های محلی از ناحیه‌ای روشی متداول است. برای انجام این کار از روش‌های مختلف شبکه‌بندی مانند کریجینگ، عکس مجذور فاصله و غیره استفاده کرده و براساس داده‌های مشاهده‌ای، مقادیر شتاب جاذبه روی نقاط گرهی شبکه برآورد می‌شود. فواصل بایستی به گونه‌ای انتخاب شود که همه طرح‌های منحنی میزان بتواند از مقادیر شبکه، بازسازی شود. برای انجام این عمل، می‌توان از برنامه‌های کامپیوتری موجود کمک گرفت.

الف-۳-۱- هموار کردن به روش میانگین‌گیری

در یک محل آنومالی ناحیه‌ای را می‌توان از متوسط گرانی بوگه منطقه اطراف آن تخمین زد. این مسأله به دلیل اهمیت مقدار گرانی ناحیه‌ای در همه جا می‌باشد، در حالی که مقدار آنومالی محلی فقط در چند ایستگاه نزدیک به هم اهمیت دارد. حتی در نقاط اطراف نقطه گرهی، نقاطی تاثیر بیشتر دارند که نسبت به نقطه گرهی نزدیکتر هستند. در این روش ابتدا مقدار متوسط هر نقطه مشاهده‌ای با استفاده از پنج مقدار گرانی بوگه از جمله مقدار خود آن نقطه و نزدیک‌ترین دو نقطه همسایه آن محاسبه می‌شود. سپس مقادیر عددی میانگین‌های بدست آمده توسط خط چین به هم وصل شده، که میانگین متحرک^{۹۵} نامیده می‌شود [Robinson & Coruh, 1988]. به عبارت دیگر عمل میانگین‌گیری از نقطه‌ای به نقطه دیگر تکرار می‌شود تا مقادیر میانگین کلیه نقاط بدست آید.

الف-۳-۲- میانگین‌گیری وزنی

برای تخمین مقدار Δg_R هر نقطه، به روش میانگین‌گیری می‌توان به سادگی با جمع کردن چند مقدار Δg_B و سپس تقسیم بر تعداد مقادیر استفاده شده انجام داد. در این حالت فرض بر این است که همه مقادیر گرانی بوگه به طور یکسان اهمیت دارند. ولی این عمل همیشه نتیجه درستی ارائه نمی‌دهد [Robinson & Coruh, 1988] و لازم است از روش‌های میانگین‌گیری وزنی استفاده نمود. برای به دست آوردن میانگین وزنی، ابتدا به مقادیر گرانی بوگه بسته به فاصله‌ای که از نقطه گرهی

^{۹۵} . Moving average

مورد تخمین دارند، ضرایب وزنی مناسبی (نقاط نزدیک‌تر وزن بیشتر و نقاط دورتر وزن کمتر) داده می‌شود. این عمل با ضرب مقدار Δg_B هر نقطه در یک ضریب وزنی مناسب انجام می‌شود. سپس با جمع حاصل ضرب‌ها و تقسیم بر تعداد نقاط مورد استفاده می‌توان مقدار آنومالی ناحیه‌ای را تخمین زد. برای تعیین ضرایب وزنی مورد نیاز در عملیات ریاضی فوق روش‌های زیادی وجود دارد. از کاربردی‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش گسترش به بالا^{۹۶} و فیلتر نمودن طول موج^{۹۷} اشاره کرد.

الف-۳-۳- روش گریفین

روش گریفین یک روش ساده تحلیلی برای محاسبه آنومالی باقی‌مانده است. برای تحلیل کامپیوتری این روش، داده‌ها بایستی به صورت شبکه‌های منظم مربعی یا مستطیلی رقومی شوند. به علت این که در حاشیه‌های نقشه امکان محاسبه آنومالی ناحیه‌ای وجود ندارد بدین جهت این امر از محدودیت‌های این روش می‌باشد. در این روش برای محاسبه مقدار آنومالی ناحیه‌ای در هر نقطه، دایره‌های با شعاع‌های مختلف متناسب با مقیاس نقشه انتخاب کرده و مرکز آن‌ها را بر روی ایستگاه‌های گرانی قرار می‌دهند. مقادیر اثرات ناحیه‌ای از میانگین اعداد واقع بر روی این دوایر حاصل می‌گردد که تعداد آن‌ها متناسب با شعاع دایره ترسیمی، متفاوت است. مقدار متوسط اثر ناحیه‌ای هر ایستگاه از رابطه زیر به دست می‌آید [Griffin, 1948]

$$g_{reg.} = \bar{g}(r) \cong \frac{1}{n} [g(r, \varphi_1) + g(r, \varphi_2) + \dots + g(r, \varphi_n)] \quad (\text{الف-۳})$$

که در آن φ زاویه نقطه مورد نظر روی دایره می‌باشد که در خلاف جهت عقربه‌های ساعت اندازه-گیری می‌شود و r شعاع دایره مورد نظر است.

نتیجه حاصل از این روش بستگی به شعاع دایره دارد. مشخص است که اگر شعاع کوچک باشد اثرات ناحیه‌ای به آنومالی بوگه نزدیک می‌شود و مقدار باقی‌مانده به سمت صفر میل می‌کند. از طرف

^{۹۶}. Upward continuation

^{۹۷}. Wave-length filtering

دیگر برای شعاع‌های بزرگتر اثرات ناحیه‌ای ناچیز بوده و مقدار باقی‌مانده تقریباً برابر با آنومالی بوگه می‌شود. هر چه شعاع آباک‌های دایره بزرگتر باشد، اطلاعات بیشتری از چهار گوشه نقشه آنومالی بوگه حذف خواهد شد. به همین دلیل باید از دایره با شعاع‌های متفاوت برای تخمین مقادیر ناحیه‌ای استفاده نمود و مقادیر به دست آمده در هر مورد را با نتایج دیگر روش‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی مقایسه نمود و سپس شعاع درست را برای محاسبه به دست آورد.

الف-۴- تفکیک به روش طول موجی

در این روش با عملیات ریاضی می‌توان برای تقویت الگوهای آنومالی ناحیه‌ای یا الگو آنومالی‌های محلی استفاده نمود [Robinson & Coruh, 1988]. این روش بر این ایده استوار است که هر الگوی تغییرات در راستای یک پروفیل را می‌توان با جمع نمودن توابع تناوبی مناسب بازسازی نمود. به این صورت که هر موج یا تابع تناوبی، طول موج مشخص و دامنه موج داشته و فاصله اولین قله آن از انتهای چپ پروفیل مشخص می‌باشد. با جمع منحنی توابع متناوب مناطق بیشینه دامنه همدیگر را تقویت نموده و در سایر مناطق سبب تضعیف دامنه موج‌ها می‌شود.

برای تعیین منحنی‌های مناسب جهت بازسازی پروفیل گرانی از عملیات ریاضی تحلیل‌های تناوبی استفاده می‌شود. برای این منظور جهت معرفی مقدار گرانی بوگه در هر فاصله مشخص X روی پروفیل در محور طول‌ها، فرمول زیر بکار می‌رود [Robinsons & Coruh, 1988]:

$$g_B(x) = A_1 \cos\left(2\pi \frac{x-d_1}{L_1}\right) + A_2 \cos\left(2\pi \frac{x-d_2}{L_2}\right) + A_3 \cos\left(2\pi \frac{x-d_3}{L_3}\right) + \dots \quad (\text{الف-۴})$$

هر جمله $A \cos\{2\pi(x-d)/L\}$ معرف یک تابع متناوب است. جستجو برای انتخاب منحنی‌های تناوبی برای بازسازی پروفیل گرانی اولین مرحله در فیلتر نمودن طول موجی است. مرحله بعدی، جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای و محلی است که با حذف بعضی از جمله‌ها در رابطه (الف-۴) انجام می‌شود. وقتی که اثرات آنها حذف می‌شود اثراتی ناشی از طول موج‌های خاص تعیین شده و می‌توان

آن‌ها را جدا یا فیلتر نمود. با جمع نمودن جمله‌های مربوط به طول موج بلند یا ناحیه‌ای و حذف آن‌هایی که مربوط به طول موج‌های کوتاه هستند، می‌توان تا حد زیادی پروفیل آنومالی ناحیه‌ای را برآورد نمود. فیلتر نمودن طول موجی در طی مراحل تعیین طول موج لازم برای بازسازی پدیده‌های یک پروفیل یا نقشه و حذف طول موج‌های مزاحم و نویز انجام می‌شود. مجموعه ضریب‌هایی که برای فیلتر نمودن اثرات ناحیه‌ای استفاده می‌شود متفاوت از مجموعه مورد نیاز برای حذف آنومالی‌های محلی است. هیچ کدام از عملیات فیلتر کردن به طور کامل آنومالی‌های ارزشمند را از انواع نوفه تفکیک نمی‌نماید، ولی سبب بارز شدن آنومالی‌های محلی می‌گردند [Ulrych, 1967; Zurflueh, 1968].

الف-۵- روش گسترش به سمت بالا

در این روش تحلیلی، داده‌های گرانی از یک سطح مبنا به روش ریاضی بر روی سطوحی دیگر در بالای سطح مبنای اصلی محاسبه می‌گردند تا بدین ترتیب اثرات آنومالی‌های سطحی بر روی داده‌ها، کم رنگ‌تر گشته و اثرات آنومالی‌های عمیق‌تر تقویت گردند. بنابراین این روش مشابه یک فیلتر پایین گذر است که با حذف (کاهش) اثرات سطحی سبب هموارسازی داده‌ها می‌گردد [مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۳]. در نقشه‌های تهیه شده به این روش هرچه از سطح مبنا دور شویم آنومالی‌های کوچک با طول موج کوتاه ضعیف شده و در نتیجه آنومالی‌های ناحیه‌ای با طول موج بلند باقی می‌مانند [Hansen & Miyazaki, 1984; Bergeron et al 1990; Fedi et al, 1999].

در این روش داده‌های گرانی اندازه‌گیری شده توسط معادله (الف-۵) از سطح برداشت داده‌ها بر روی سطوح ترازوی بالاتر از سطح برداشت تصویر می‌شوند [Bhattacharyya, 1972].

$$g(x, y, -z) = - \int_0^{\infty} \frac{\bar{g}(r).z.rdr}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \quad (\text{الف-۵})$$

که در آن $g(x, y, -z)$ مقدار هم ارز میدان گرانی در یک نقطه بر روی سطح دیگری در بالای سطح مینا با فرض مثبت بودن Z به طرف پایین است. همچنین مقدار میانگین میدان گرانی در اطراف دایره‌ای به شعاع r می‌باشد و به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\bar{g}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g(r, \theta) d\theta \quad (\text{الف-۶})$$

در عمل یک شبکه منظم مربعی در روی نقشه آنومالی بوگه پیاده می‌شود، سپس به مرکز رئوس شبکه یعنی نقطه‌ای که گسترش بر روی انجام آن می‌شود دوایری به شعاع‌های مختلف r_1, r_2, r_3, \dots و r_n رسم می‌شود. اگر مقدار متوسط گرانی بر روی هر یک از دوایر مذکور با نام‌های $g(r_1), g(r_2), g(r_3), \dots$ و $g(r_n)$ مشخص شود، در این صورت مقدار میدان گسترش یافته به طرف بالا از فرمول زیر مشخص می‌شود [Bhattacharyya, 1972; Robinson & Coruh, 1988].

$$U.C. = K_0 g(0) + k_1 \bar{g}(r_1) + K_2 \bar{g}(r_2) + \dots + K_n \bar{g}(r_n) \quad (\text{الف-۷})$$

به طوری که:

$$\sum_{i=0}^x K_i = 1 \quad (\text{الف-۸})$$

که $\bar{g}(r_i)$ مقدار متوسط گرانی بر روی هر یک از دوایر در روی صفحه $z = 0$ ، r_i شعاع دوایر مختلف؛ k_i ثابت‌های گسترش به سمت بالا و $g(0)$ مقدار آنومالی بوگه بر روی مرکز دوایر می‌باشند. روش گسترش به سمت بالا طرح آنومالی ناحیه‌ای را به صورت قابل ملاحظه‌ای آشکار می‌سازد.

پیوست (ب)

روش‌های عددی حل انتگرال محاسبه ضرایب فوریه

ب- روش‌های عددی حل انتگرال محاسبه ضرایب فوریه

در این بخش روش‌های عددی برای توابعی که انتگرال‌گیری از آنها در یک بازه مشخص با استفاده از روش‌های مرسوم تحلیلی مشکل یا غیرممکن است معرفی می‌شوند. در ادامه بحث از روش‌های نیوتن-کاتس^{۹۸} نظیر قاعده دوزنقه (تابع چندجمله‌ای خطی)، روش سیمپسون (تابع چند جمله‌ای درجه دوم) و روش فیلون بحث می‌شود.

اگر مقادیر تابعی برای هر متغیری در دو نقطه‌ای معلوم باشد، از آن دو نقطه می‌توان یک خط روی آن‌ها برازش نمود. در صورتی که سه نقطه وجود داشته باشد از آن‌ها می‌توان یک منحنی چندجمله‌ای درجه دوم و با چهار نقطه منحنی چند جمله‌ای درجه سوم (مکعبی^{۹۹}) برازش نمود. در این روش‌ها با تقسیم محدوده انتگرال‌گیری به فاصله‌های کوچکتر، سطح زیر منحنی تابع را می‌توان محاسبه نمود.

ب-۱- انتگرال‌گیری با استفاده از چند جمله‌ای خطی (روش دوزنقه)

برای محاسبه مقادیر ضرایب سری فوریه براساس انتگرال معادله (ب-۱)، فرض می‌شود که بتوان مقدار تابع $f(x)$ را به راحتی برای همه مقادیر x بین a و b محاسبه نمود. این بدین معنی است که برای یک تابع مجموعه‌ای از مقادیر داده‌ها وجود داشته باشد [Otto & Denier, 2005; Steven, 2007].

$$f(x) = \Delta g(x,0) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right), \quad a = -L, \quad b = L \quad \text{و} \quad B_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) dx \quad (\text{ب-۱})$$

^{۹۸}. Kats-Newton

^{۹۹}. Cubic

به منظور تعیین و محاسبه یک فرم برای انتگرال‌گیری، هر نقطه روی منحنی مورد نظر به صورت مجموعه‌ای از (x_j, f_j) تعریف می‌شود، که در آن z از یک تا N متغیر است. تعدادی نقاط متوالی (x_j, f_j) و (x_{j+1}, f_{j+1}) را می‌توان طوری در نظر گرفت که توسط خطوط راست به هم متصل شوند. معادله خطی که این نقاط را به هم وصل کند به صورت زیر قابل تعریف است [Otto & Denier, 2005]:

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \Rightarrow y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (\text{ب-۲})$$

در این حالت:

$$f_L(x) = f_j + \frac{f_{j+1} - f_j}{h}(x - x_j) \quad (\text{ب-۳})$$

که مقدار $h = x_{j+1} - x_j$ فاصله بین دو نقطه متوالی در نظر گرفته می‌شود و $f_L(x)$ مقدار تابع خطی است. اگر مقدار انتگرال تابع $f_L(x)$ بین دو نقطه x_j و x_{j+1} به عنوان مساحت زیر منحنی به صورت $A_{j,j+1}$ تعریف شود، پس:

$$A_{j,j+1} = \int_{x_j}^{x_{j+1}} f_L(x) dx = \int_{x_j}^{x_{j+1}} \left[\frac{f_{j+1} - f_j}{h}(x - x_j) + f_j \right] dx \quad (\text{ب-۴})$$

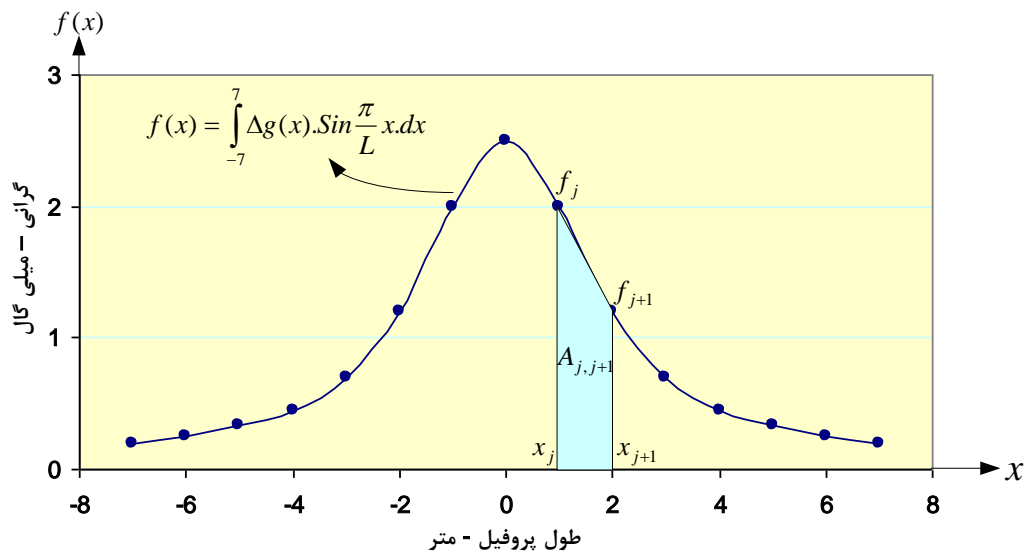
اکنون تبدیل خطی $X = x - x_j$ طوری تعریف می‌شود که $dX = dx$ باشد. پس وقتی $x = x_j$ باشد یعنی $X = 0$ و اگر $x = x_{j+1}$ باشد، در آن صورت $X = h$ خواهد شد. پس معادله (ب-۴) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$A_{j,j+1} = \int_{X=0}^h \left(\frac{f_{j+1} - f_j}{h} X + f_j \right) dX \quad (\text{ب-۵})$$

در نتیجه انتگرال به صورت زیر خواهد بود:

$$A_{j,j+1} = \frac{h}{2}(f_j + f_{j+1}) \quad (\text{ب-۶})$$

عبارت فوق مساحت یک دوزنقه مطابق شکل (ب-۱) است که رئوس آن عبارتند از: (x_j, f_j) ، $(x_{j+1}, 0)$ ، (x_{j+1}, f_{j+1}) و $(x_j, 0)$. مساحت یک دوزنقه میانگین طول دو خط موازی محور عرض‌ها ضربدر اندازه فاصله قائم بین دو قطعه مورد بررسی می‌باشد. یعنی $(x_{j+1} - x_j) \times (f_j + f_{j+1}) / 2$



شکل ب-۱: محاسبه مساحت زیر منحنی با تقریب مساحت دوزنقه

بدین ترتیب این روش به قاعده دوزنقه معروف است به منظور تعیین سطح کل از $x=a$ تا $x=b$ می‌توان مساحت کلیه نوارهای دوزنقه‌ای شکل زیر منحنی را جمع نمود [Otto & Denier, 2005].

$$Area = \sum_{j=1}^{N-1} A_{j,j+1} = \sum_{j=1}^{N-1} \frac{h}{2} (f_j + f_{j+1}) \quad (\text{ب-۷})$$

به منظور انجام محاسبات معادله فوق را به صورت سری زیر می‌توان نوشت [Otto & Denier, 2005]:

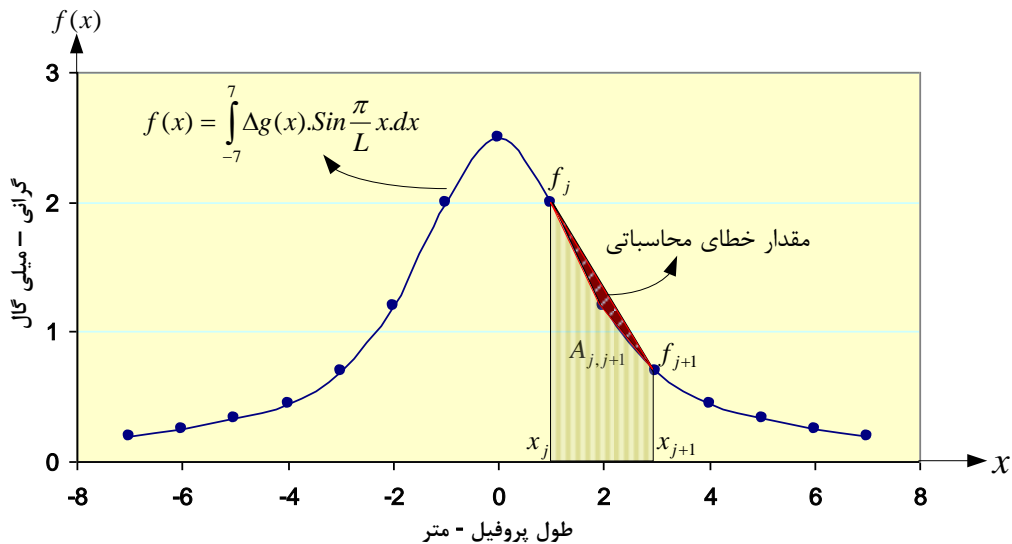
$$Area = \frac{h}{2} (f_1 + f_2) + \frac{h}{2} (f_2 + f_3) + \frac{h}{2} (f_3 + f_4) + \dots + \frac{h}{2} (f_{N-2} + f_{N-1}) + \frac{h}{2} (f_{N-1} + f_N) \quad (\text{ب-۸})$$

$$Area = \frac{h}{2} (f_1 + 2f_2 + 2f_3 + \dots + 2f_{N-1} + f_N) \approx \int_a^b f(x) dx$$

ب-۱-۱ مقدار خطای روش دوزنقه

تعداد نقاط مورد نیاز برای محاسبه انتگرال بستگی به مقدار دقتی دارد که در جواب معادله نیاز است. مقدار خطا در این محاسبه منظور نشده است، چون در حل این روش، منحنی بین نقاط (x_j, f_j) و (x_{j+1}, f_{j+1}) به صورت یک خط راست در نظر گرفته شده است. مقدار خطا را می توان با استفاده از روش مربعی در فاصله محدودی با سه نقطه روی منحنی کاهش داد [Otto & Denier, 2005].

حال اگر تعداد نقاط اندازه گیری کم باشد، عرض هر یک از نوارها دارای اندازه بیشتری بوده و بدین ترتیب مقدار خطای محاسبه زیاد خواهد شد. مقدار خطای محاسبه در این روش، آن بخش از شکل دوزنقه است که در بخش بالای منحنی قرار می گیرد (شکل ب-۲).



شکل ب-۲: تقریب مقدار خطای محاسبه ای به روش دوزنقه

برای تخمین این مقدار سری تیلور را به صورت زیر می توان نوشت:

$$f(x) = f(x_j) + \frac{f(x_{j+1}) - f(x_j)}{h} (x - x_j) + \frac{(x - x_j)(x - x_{j+1})}{2} \frac{d^2 f}{dx^2} \Big|_{x=\xi} \quad (9-ب)$$

که در آن $\xi \in [x_j, x_{j+1}]$ است. در نتیجه انتگرال به صورت زیر بدست می آید:

$$\int_{x_j}^{x_{j+1}} f(x) dx = \frac{h}{2} \{f(x_j) + f(x_{j+1})\} + \frac{h^3}{6} \frac{d^2 f}{dx^2} \Big|_{x=\xi} \quad (10-ب)$$

در نتیجه مقدار خطا با استفاده از جمله دوم در معادله فوق متناسب با h^3 و مشتق دوم $f^{(2)}(\xi)$ است. بنابراین اگر مشتق دوم در محدوده انتگرال گیری صفر شود، مقدار خطا واقعا صفر می شود. برای محاسبه ضرایب فوریه (B_n) به روش دوزنقه، کدهای لازم براساس الگوریتم نشان داده شده در شکل (ب-۳) تهیه گردید.

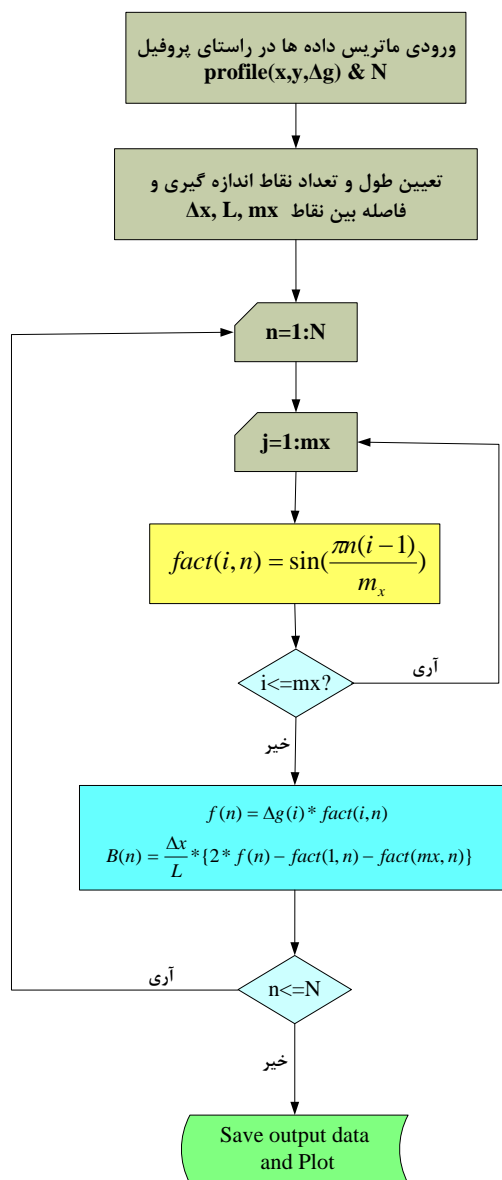
در این الگوریتم ابتدا ماتریس داده های گرانی در راستای یک پروفیل خوانده می شود. سپس با توجه به تعداد نقاط و فاصله بین آنها طول پروفیل تعیین می گردد. پس از وارد نمودن تعداد جملات هارمونیک مختلف، مقادیر جمله سینوسی محاسبه و برای هر نقطه در مقدار تابع گسسته گرانی ضرب می شود. سپس مقدار سطح زیر منحنی تابع گرانی تبدیل شده به روش دوزنقه محاسبه می شود که با ضرب ضرایب موجود در فرمول، مقادیر ضرایب سری فوریه محاسبه می شود.

ب-۲- محاسبه ضرایب سری فوریه به روش فیلون

یکی دیگر از روش های محاسبه ضرایب سری فوریه روش فیلون است [Filon, 1928]. این روش برای محاسبه انتگرال هایی به فرم $\Delta g(x, z) \sin(p_0 x)$ و $\Delta g(x, z) \cos(p_0 x)$ استفاده شده است [Flinn, 1960; Frazer & Guttrust, 1984].

تابع $\Delta g(x, z) \sin(p_0 x)$ در بازه a تا b را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\int_a^b \Delta g(x, z) \sin(p_0 x) dx = \frac{b-a}{2M} \sum_{j=0}^{M-1} \left\{ -\alpha F_1 + \frac{\beta}{2} F_2 + \gamma F_3 \right\} \quad (\text{ب-۱۱})$$



شکل ب-۳: مراحل محاسبه مقادیر ضرایب سری فوریه به روش ذوزنقه

که در آن پارامترهای موجود به صورت زیر تعریف شده است؛

$$F1 = \Delta g(x_{j+1}, z_{j+1}) \cos(p_0 x_{j+1}) - \Delta g(x_j, z_j) \cos(p_0 x_j)$$

$$F2 = \Delta g(x_{j+1}, z_{j+1}) \sin(p_0 x) - \Delta g(x_j, z_j) \sin(p_0 x_{j+1}) - \cos(p_0 x_j)$$

$$F3 = \Delta g\left(\frac{x_j + x_{j+1}}{2}, \frac{z_j + z_{j+1}}{2}\right) \sin\left(\frac{p_0}{2}(x_j + x_{j+1})\right)$$

(ب-۱۲)

$$\alpha = \frac{1}{\theta^3} (\theta^2 + \frac{\theta}{2} \sin 2\theta - 2 \sin^2 \theta)$$

$$\beta = \frac{2}{\theta^2} (1 + \cos^2 \theta) - \frac{2}{\theta^3} \sin 2\theta$$

$$\gamma = \frac{4}{\theta^3} [\sin \theta - \theta \cos \theta]; \quad \theta = \frac{\pi m}{2(M-1)}; \quad p_0 = \frac{\pi m}{L}$$

با توجه به معادله (ب-۱۱)، با منظور نمودن مقادیر صفر برای تابع $\Delta g(x,0)$ در مرزهای پروفیل،

ضرایب سری فوریه مطابق روش فیلون (B_{nf}) به صورت زیر بدست می‌آید [Filon, 1928]:

$$B_{nf} = \frac{1}{M-1} \left\{ \beta \sum_{j=0}^{M-1} \Delta g(j) \sin \frac{\pi n}{2(M-1)} + \frac{\gamma}{2} \sum_{j=1}^{M-1} [\Delta g(j) + \Delta g(j+1)] \sin \frac{\pi n}{2(M-1)} (2j+1) \right\} \quad (\text{ب-۱۳})$$

اگر ضرایب براساس فرمول فیلون محاسبه شود میزان خطای میانگین مربعات برابر است [Aydin, 2007].

$$m_{bf} = \pm 0.82 \frac{\delta \Delta g}{\sqrt{M}} \quad (\text{ب-۱۴})$$

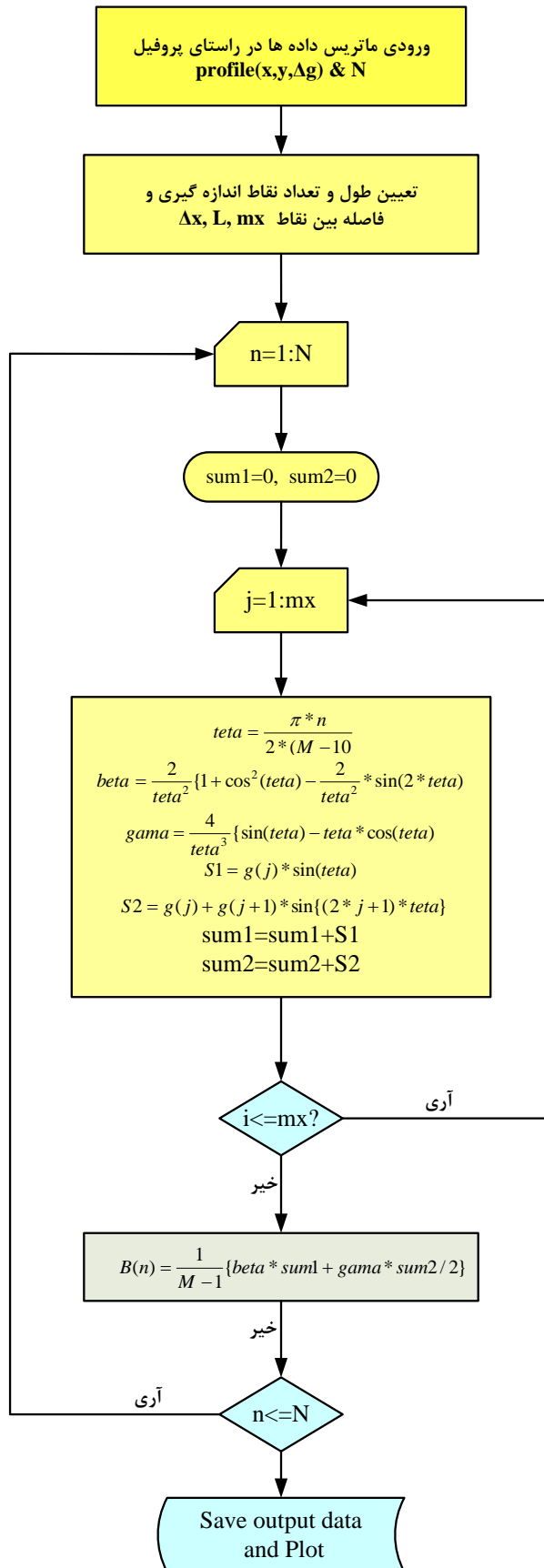
ولی اگر این ضرایب به روش فرمول دوزنقه محاسبه گردد مقدار خطا به صورت زیر است [Aydin, 1997].

$$m_b = \pm 1.41 \frac{\delta \Delta g}{\sqrt{M}} \quad (\text{ب-۱۵})$$

همان طور که ملاحظه می‌شود میزان خطای میانگین مربعات m_b به تعداد جملات هارمونیک بستگی ندارد. در روش فیلون میزان خطای ضرایب هارمونیک محاسبه شده تقریباً نصف حالت قبل می‌باشد. بنابراین ضرایب B_{nf} که مطابق روش فیلون محاسبه شده‌اند تعیین دقیق‌تری از مقادیر میدان گرادیان کل نرمال را فراهم می‌سازد.

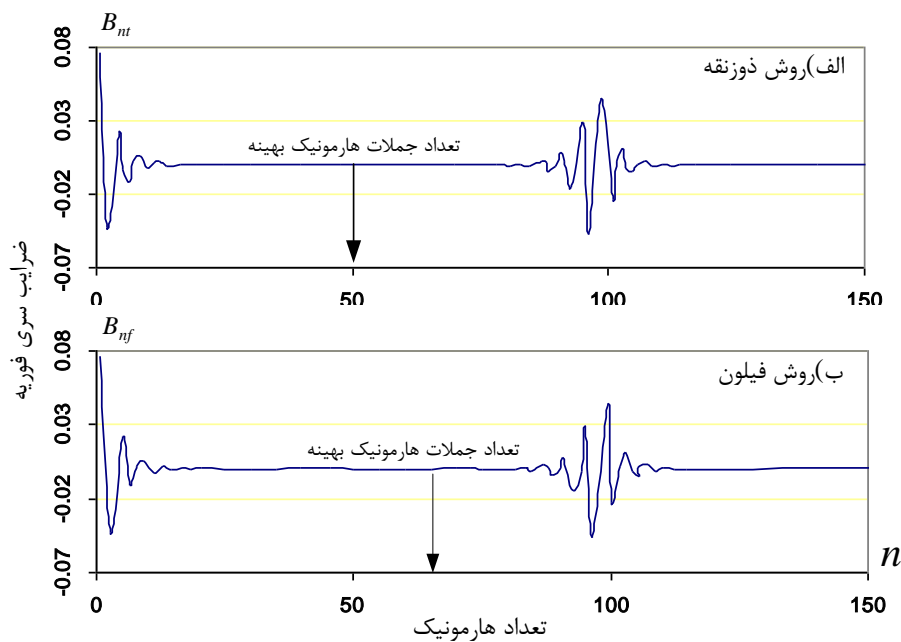
علاوه بر روش‌های مذکور همان طور که پیشتر نیز اشاره گردید روش‌های دیگری نیز برای حل عددی انتگرال‌ها وجود دارد که به علت عدم استفاده، از شرح آن‌ها پرهیز می‌شود. هر یک از روش‌های محاسبه دارای محدودیت‌هایی در تعداد نقاط اندازه‌گیری است که می‌توان بسته به نیاز از آن‌ها استفاده نمود. در محاسبات به منظور کاهش میزان خطا بهتر است از دو روش استفاده و نتایج با هم مقایسه شوند.

فلوچارت محاسبه مقادیر ضرایب فوریه به روش فیلون در شکل (ب-۴) ارائه شده است. همانند روش دوزنقه، در این روش نیز ابتدا داده‌های گرانی به صورت یک ماتریس سه ستونی و تعداد جملات هارمونیک (N) خوانده می‌شود. سپس با تعیین تعداد نقاط محاسبه‌ای، طول پروفیل و فاصله نقاط محاسبه‌ای، براساس معادلات ذکر شده مقادیر ضرایب فوریه محاسبه و در یک ماتریس برای استفاده در برنامه محاسبه NFG2D ذخیره می‌شود.



شکل ب-۴: مراحل محاسبه مقادیر ضرایب سری فوریه به روش فیلون

به منظور مقایسه دو روش ذکر شده، نمودار طیف تغییرات ضرایب سری فوریه نسبت به تعداد جملات هارمونیک با استفاده از تابع آنومالی گرانی ناشی از یک استوانه افقی محاسبه گردید. محل تعداد جملات بهینه مورد نظر در دو روش مذکور روی شکل مشخص شده است (شکل ب-۵). مطابق شکل نمودار طیفی تغییرات جزئی نشان می‌دهد ولی در روش فیلون تعداد جملات بهینه برای محاسبه مقادیر گرادیان کل نرمال جملات بیشتری نسبت به روش دوزنقه دارد. از طرفی دقت آن در محاسبه ضرایب بیشتر می‌باشد [Aydin, 2007].

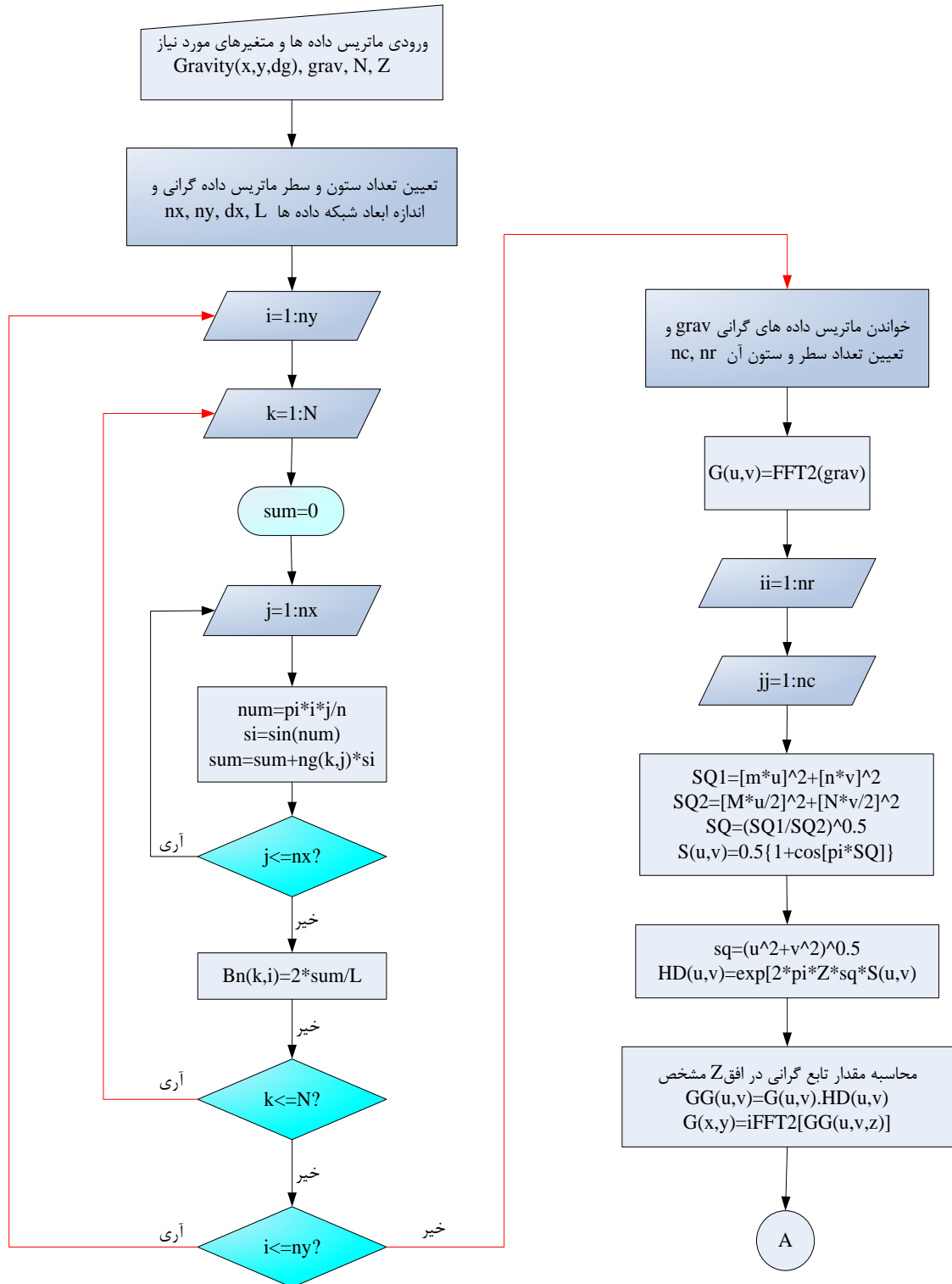


شکل ب-۵: نمودار تغییرات طیفی ضرایب محاسبه شده نسبت به تعداد جملات هارمونیک برای مقادیر آنومالی گرانی، حاصل از یک استوانه افقی در طول پروفیل الف) قاعده دوزنقه و ب) فرمول فیلون $\Delta g(x,0)$

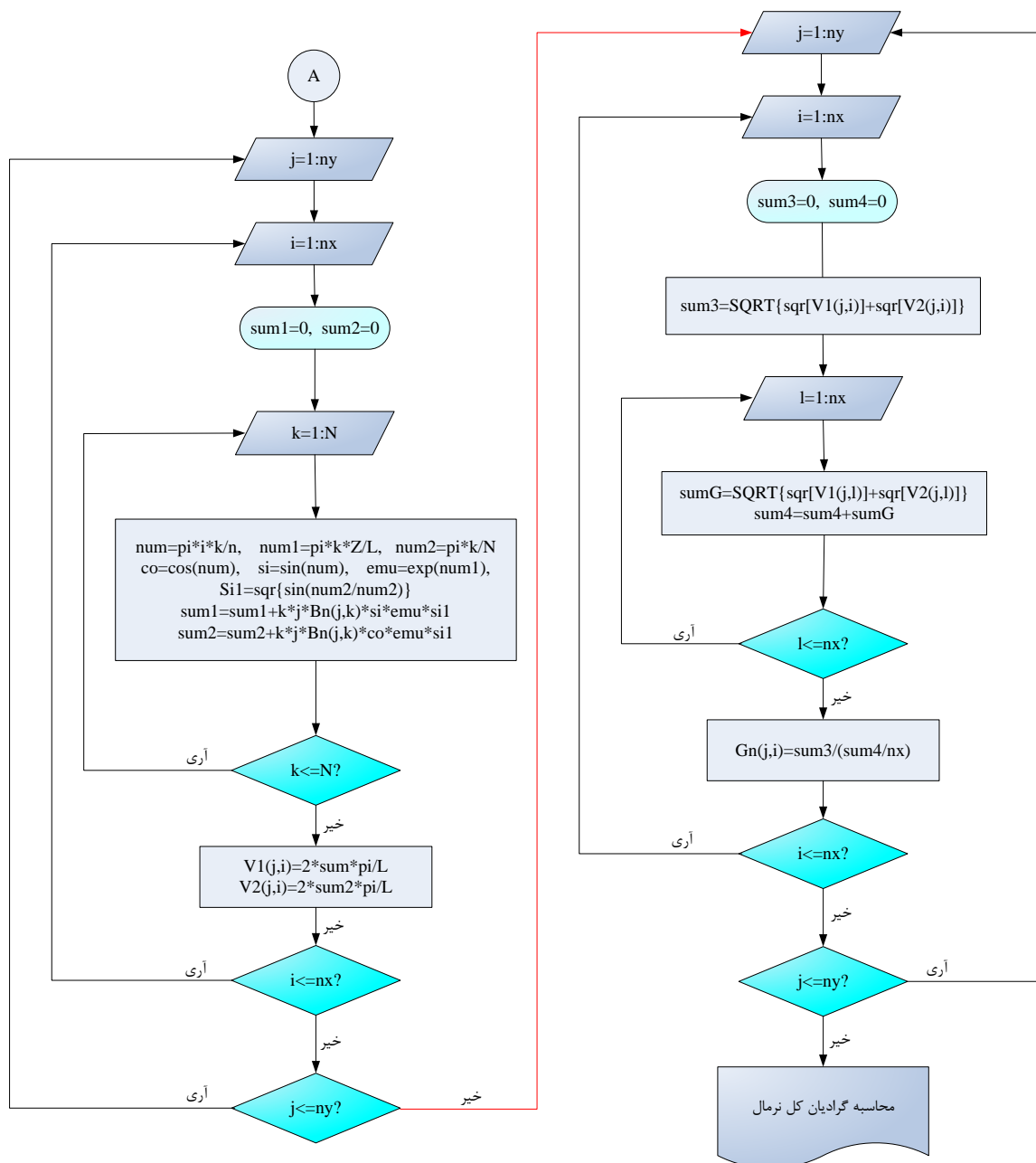
پیوست (ج)

الگوریتم محاسباتی کرایمان کل زمان شبهه بعدی

پیوست (ج-۱): الگوریتم محاسبه کرایمان کل زمان شبهه بعدی به روش زنک و بچاران [Zeng et al, 2002]



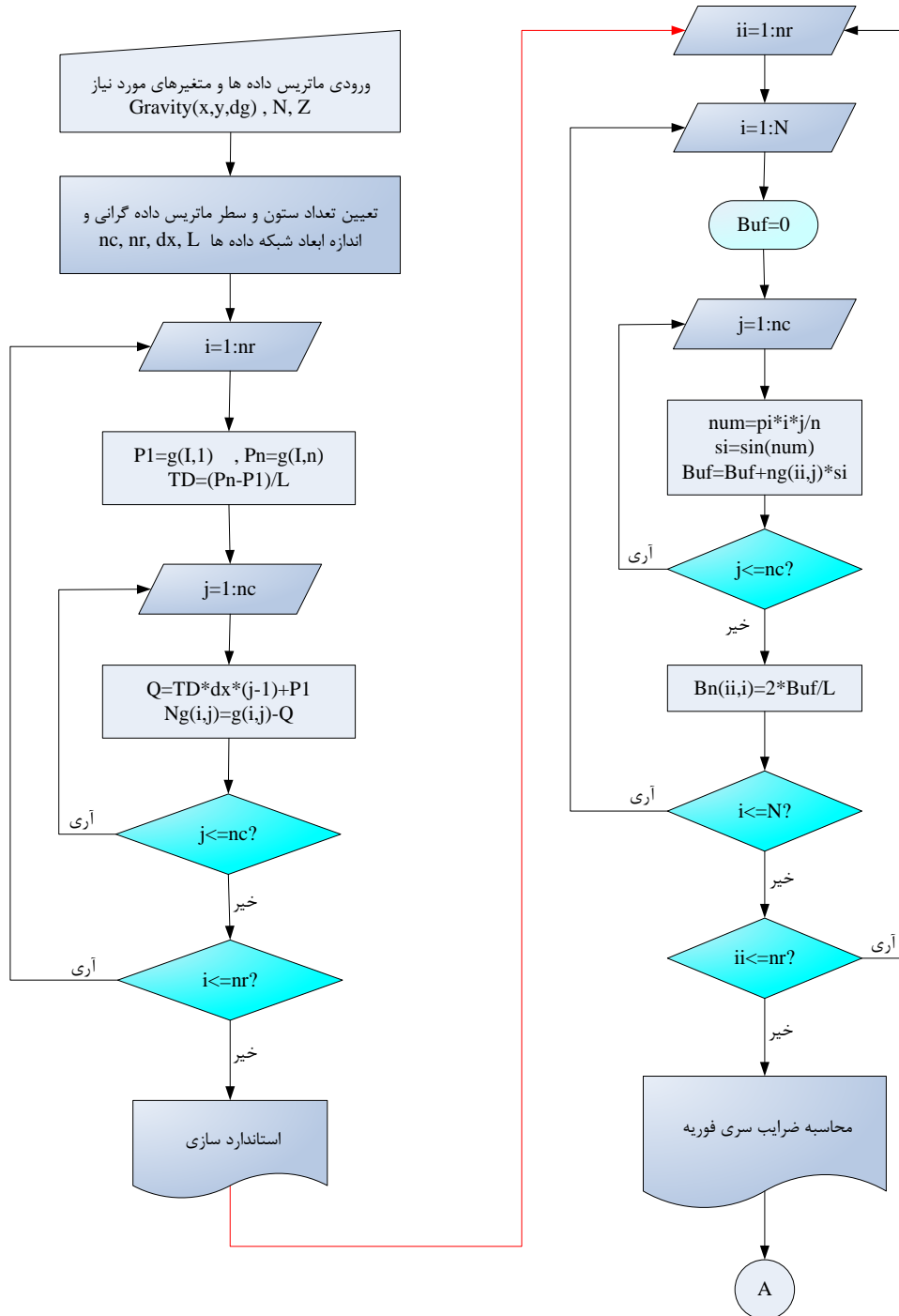
ادامه پیوست (ج-۱): الگوریتم محاسبه گرادیان کل نرمال شده بعدی به روش زنک و بچاران [Zeng et al, 2002]



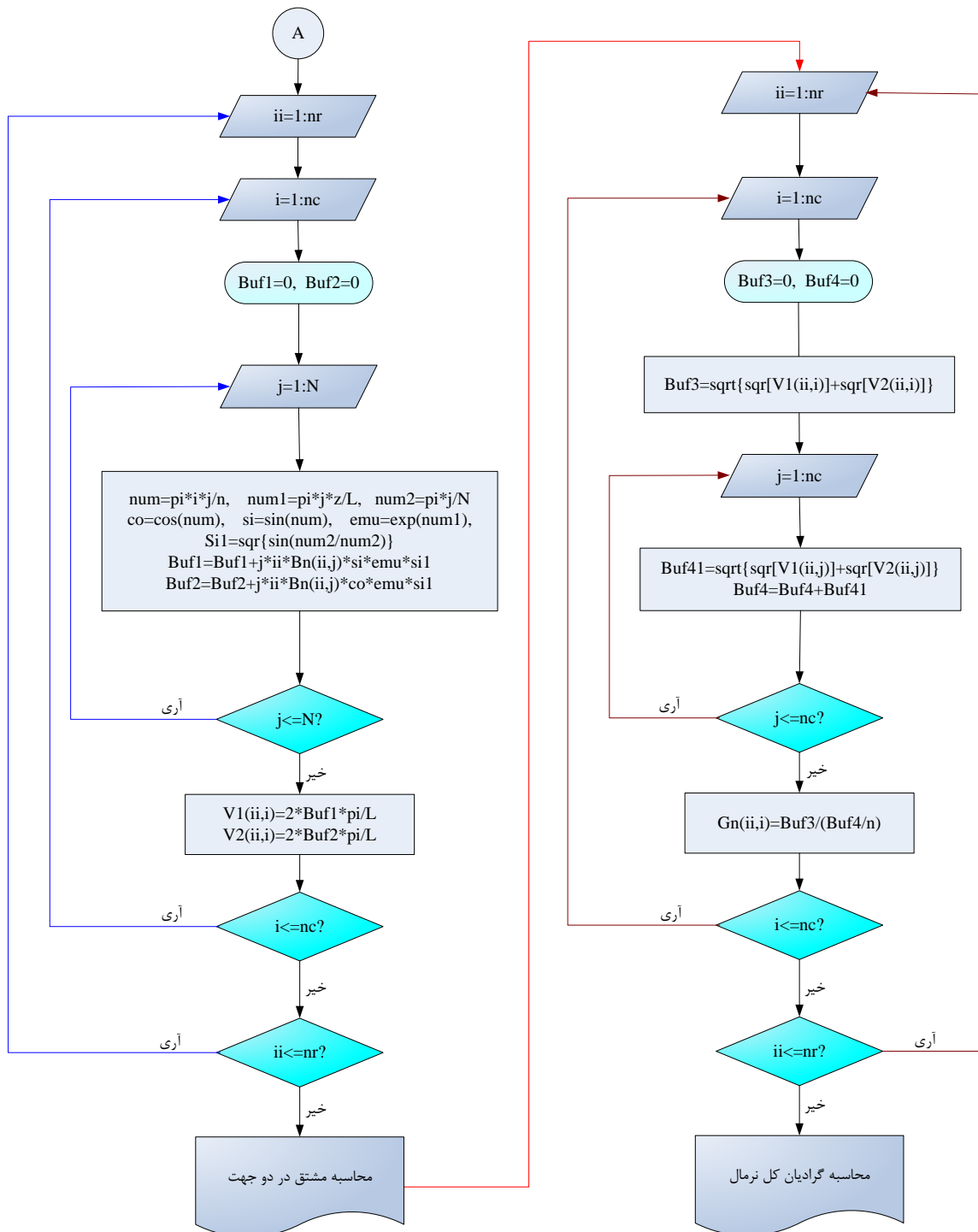
فلوچارت (پیوست ج-۱) از چهار بخش تشکیل شده است که در بخش اول محاسبه مقادیر ضرایب سری فوریه انجام می‌شود. در بخش دوم این فلوچارت میدان گرانی در افق‌های مختلف به روش

تبدیل فوریه انجام می‌شود. بدین صورت که از تابع گرانی در سطح تبدیل فوریه گرفته می‌شود و سپس برای گسترش میدان به سمت پایین از یک تابع نمایی و تابع هموارساز استفاده می‌شود که علاوه بر تبدیل میدان سبب کاهش اثرات نامطلوب و اغتشاشات می‌شود. تابع تبدیل یافته در تابع گسترش ضرب شده و نتیجه حاصل تبدیل فوریه معکوس گرفته می‌شود که همان مقدار تابع در افق مورد نظر است. در ادامه مقادیر مشتق‌های اول میدان گرانی در افق مورد محاسبه می‌گردد. در بخش پایانی مقادیر گرادیان کل و گرادیان کل نرمال در هر نقطه براساس معادله (۵-۱) محاسبه می‌شود.

پیوست (ج-۲): الگوریتم محاسبه گرادیان کل شمال شبه سده بعدی روش تران [Tran, 2004]



ادامه پیوست (ج-۲): الگوریتم محاسبه گرادیان کل نرمال شده بعدی روش تران [Tran, 2004]



منابع فارسی

- آقاجانی، ح.، مرادزاده، ع. و هوآلین، ز.، (۱۳۸۹) "تخمین موقعیت افقی و عمق آنومالی‌های گرانی با استفاده از گرادیان کل نرمال شده (NFG)" **مجله علوم زمین**، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات کشور، زیر چاپ.
- آقاجانی، ح. و مرادزاده، ع.، (۱۳۸۵)، "تشخیص گنبد‌های نمکی به روش گرادیان کل نرمال آنومالی-های گرانی"، **گردهمایی ۲۵ علوم زمین**، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- آقناباتی، ع.، (۱۹۷۴)، نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ طیس، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
- اشتوکلین، ج.، افتخارنژاد، ج.، هوشمندزاده، ع.، و زاهدی، م.، (۱۹۶۹)، نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ بشروئیه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
- امامی، م.ه.، (۱۳۷۱)، نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ آران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
- امامی، م.ه. و حاجیان، ج.، (۱۹۸۱)، نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ قم، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
- امیدی، پ.، (۱۳۶۹)، پایان‌نامه ارشد: "تحلیل خمیدگی ساختاری تاقدیس البرز-شمال قم"، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- پارسی، م.، (۱۹۷۴)، گزارش داخلی: "یادداشت زمین‌شناسی وضع ذخایر نفتی تاقدیس‌های البرز غربی و البرز شرقی"، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران.
- پیرمادیان، ب.، صالحی‌راد، غ.ر.، (۱۳۷۹)، گزارش داخلی: "گزارش نهایی عملیات حفاری و تکمیل چاه سورو-۳"، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، اداره کل حفاری اکتشافی
- تیموری، غ.ر.، صفاری، ب.، (۱۳۸۷)، گزارش داخلی: "گزارش تکمیلی زمین‌شناسی چاه اروند-۱"، اداره ژئوفیزیک، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران.
- زمانی پدram، م.، و حسینی، ح.، (۱۳۷۱)، نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ قم، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
- سازمان نقشه برداری کشور، (۱۳۸۸)، اطلس راه‌های ایران.
- طباطبایی، س.ه.، و نصرت‌ماکویی، ت.، (۱۳۷۲)، گزارش داخلی شماره ۷: "تفسیر آنومالی‌های گرانی سنجی و مغناطیسی در حوضه طیس"، اداره ژئوفیزیک، مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران.
- طباطبایی، س.ه.، غروری، م.ع.، ایوبی، م. و پوررضا، س. (۱۳۸۱)، "تعبیر و تفسیر مجدد گرانی کم عمق (دریایی-خشکی) خلیج فارس"، گزارش ژئوفیزیکی داخلی ۱۹۸۹، مدیریت اکتشاف نفت، بخش غیرلرزه‌ای.
- علوی نائینی، م.، (۱۳۸۴)، نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ جام، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

قربانی، م.، (۱۳۸۱)، گزارش ۲: "دیبچه ای بر زمین شناسی اقتصادی ایران"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، پایگاه ملی داده‌های علوم زمینی کشور.

مرادزاده، ع.، دولتی ارده‌جانی، ف.، آگاه، آ.، و طباطبایی، س.ه.، (۱۳۸۳) "اکتشاف تله‌های هیدروکربوری منطقه طبس به کمک داده‌های گرانی"، اولین کنفرانس مهندسی معدن ایران، ص ۲۱۰۷-۲۰۹۷، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

مرادزاده، ع.، دولتی ارده‌جانی، ف.، آگاه، آ.، و طباطبایی، س.ه.، (۱۳۸۴)، "اکتشاف تله‌های هیدروکربوری طبس با روش جدید وارون‌سازی سه بعدی داده‌های گرانی"، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۱، شماره ۲، ص ۳۴-۲۳.

مرادزاده، ع.، دولتی ارده‌جانی، ف.، (۱۳۸۵)، طرح پژوهشی: "اکتشاف و مدل‌سازی مغناطیسی کانسار آهن اجت آباد سمنان"، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۸۱ صفحه

مرادزاده، ع.، دولتی ارده‌جانی، ف.، و طیبی، ب.، (۱۳۸۵) "تفسیر کیفی داده‌های مغناطیسی کانسار آهن اجت آباد سمنان"، بیست و پنجمین همایش علوم زمین، ص ۱۰۷، تهران.

مشتاقیان، ع.، (۱۳۶۳)، گزارش داخلی: "گزارش تکمیلی چاه سرخون هفت"، اداره کل زمین شناسی گسترشی اهواز، شرکت ملی نفت ایران

- Abaei, L. Ansari, H.J. Badakhshan, A. and Jafari, A. (1963) "History and development of the Alborz and Saraje fields of central Iran", Proceeding of the 6th World Petroleum Congress, Frankfurt, Section II, Paper 13.
- Abdelrahman, E.M. and El-Araby, T.M. (1993) "A least-square minimization approach to depth determination from moving average residual gravity anomalies" *Geophysics*, 59, pp 1779-1784.
- Abdelrahman, E. M. and El-Araby, T.M. (1996) "Shape and depth solutions from moving average residual gravity anomalies" *Journal of Applied Geophysics*, 36, pp 89-95.
- Abdelrahman, E.M. Abo-Ezz, E.R. and Radwan, A.H.A. (1999) "A numerical approach to depth determination from residual gravity anomaly due to two structures" *Pure and applied geophysics*, 154, pp 329-341.
- Abdelrahman, E.M. El-Araby, H.M. El-Araby, T.M. and Abo-Ezz, E.R. (2001a) "Three least-squares minimization approaches to depth, shape and amplitude coefficient determination from gravity data" *Geophysics*, 66, 4, pp 1105-1109.
- Abdelrahman, E.M. El-Araby, T.M. El-Araby, H.M. and Abo-Ezz, E.R. (2001b) "A new method for shape and depth determinations from gravity data" *Geophysics*, 66, 6, pp 1774-1780.
- Abdelrahman, E.M. and Abo-Ezz, E.R. (2008) "A Least-Squares Standard Deviation Method to Interpret Gravity Data due to Finite Vertical Cylinders and Sheets" *Pure and Applied Geophysics*, 165, pp 947-965.
- Acton, F. S. (1990) "Numerical Methods" 2nd printing, Washington, DC: Math. Assoc. Amer., pp. 228.
- Ager, C.A. (1982) "Vertical gravity gradient surveys: Field results and interpretations in British Columbia, Canada" *Geophysics*, 47, 6, pp. 919-925.
- Aghajani, H. and Moradzadeh, A. (2007) "Detection of iron deposits by normalized full gradient method: Ojatabad deposit, Iran", *7th International Scientific Conference SGEM 2007*, Albena Co., Bulgaria, pp. 59 (1-7), No. 31-7173.
- Aghajani, H. and Moradzadeh, A. (2008) "Salt domes' depth estimation using normalized full gradient of gravity data" *21th World Mining Congress & Expo*, Poland, pp. 11-19 (Proceeding in CD).
- Aghajani, H. Moradzadeh, A. and Zeng, H. (2009a) "Normalized Full Gradient of Gravity Anomaly Method and Its Application to the Mobern Sulfide Body, Canada" *World Applied Sciences Journal* 6, 3, pp 392-400.
- Aghajani, H. Moradzadeh, A. and Zeng, H. (2009b) "Determining of optimum the length of profile in normalized full gradient method" *First International Petroleum Conference & Exhibition*, Shiraz, Iran, pp. 4 (Proceeding in CD).
- Aghajani, H. Moradzadeh, A. Aydin, A. & Tabatabaei, S.H. (2009c) "Using normalized full gradient method to interpret gravity anomalies on synthetic and field data" *The 9th International Multidisciplinary Geo-Conference & EXPO SGEM*, Bulgaria, pp. 725-733.

- Aghajani, H. Moradzadeh, A. and Zeng, H. (2009d) "Estimation of Depth to Anomalous Body from Normalized Full Gradient of Gravity Anomaly" *Journal of Earth Science*, 20, 6, pp 1012–1016.
- Aghshahi, E. and Zomorrodian, H. (1981) "Gravity study of Qom salt dome in Iran" *J. Earth and Space Physics*, 10, 1 & 2, pp. 21-24.
- Ander, M.E. Summers, T. and Gruchalla, M.E. (1999) "LaCoste & Romberg gravity meter: System analysis and instrumental errors" *Geophysics*, 64, 6, pp. 1708-1719.
- Arfken, G. (1985) "*Mathematical Methods for Physicists, Chapter 14: Fourier series*", 3th edition. Orlando, FL: Academic Press, pp 760-793.
- Aydin, A. (1997), PhD. Thesis, "Evaluation of gravity data in terms of hydrocarbon by normalized full gradient, variation and statistic methods, Model studies and application in Hasankale-Horasan Basin (Erzurum)", Natural and Applied Sciences Institute, Karadeniz Technical university, Trabzon, Turkey.
- Aydin A. (2005) "Evaluation of gravity anomalies by direct interpretation techniques: An application from Hasankale-Horasan region" Pamukkale University, Engineering College, Journal of Engineering Sciences 11, pp 95-102.
- Aydin, A. (2007) "Interpretation of Gravity Anomalies with the Normalized Full Gradient (NFG) Method and an Example" *Pure and Applied Geophysics* 64, pp 2329-2344.
- Aydin, A., Karsli, H. and Kadirov, F. (2002) "Interpretation of the magnetic anomalies on covered fields using normalized full gradient method" *Geophysics News in Azerbaijan*, 1-2, pp 34-38.
- Bates, F.W., Copeland, R.R. and Dixon, K.P. (1959) "Geology of Avery Island salt dome, Iberia Parish, Louisiana", *APG Bulletin* 43, 5, pp. 944-957.
- Berezkin, V.M. (1967) "Application of the Total Vertical Gradient of Gravity for determination of the Depths to the sources of gravity anomalies" *Exploration Geophysics* 18, pp 69–79.
- Berezkin V. M. (1973) "*Application of gravity exploration to reconnaissance of oil and gas reservoirs*" Nerdra Publishing House, Moscow, (in Russian).
- Berezkin, V.M. (1978) "*Application of geophysical exploration to direct reconnaissance of reservoirs*" Nerdra Publishing House, Moscow (in Russian).
- Berezkin, V. M., (1988) "*Full gradient method in geophysical prospecting*", Nerdra Publishing House, Moscow, (in Russian).
- Berezkin, V.M., Kiric, M.A., and Kunarov, A.A. (1978) "*Using Geophysical Methods for Direct Oil Exploration*" Nerdra Publishing House, Moscow, (in Russian).
- Berezkin V.M., and Buketov, A.P. (1965) "Application of the harmonical analysis for the interpretation of gravity data" *Applied Geophysics* 46, pp 161–166 (in Russian).
- Bergeron, C.J., Morris, T.L. and Ioup, J.W. (1990) "Upward and Downward Continuation of Airborne Electromagnetic Data", SEG 60th Annual International Meeting, pp 696–699.
- Bhattacharyya, B.K., (1965) "Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation" *Geophysics*, 30, pp 829-857.

- Bhattacharyya, B.K. (1972) "Design of spatial filter and their application to high resolution aeromagnetic data" *Geophysics*, 37, pp 68-91.
- Blakely, J.R., (1995) "*Potential theory in gravity and magnetic applications*" Cambridge University Press, 441 p.
- Blizkovsky, M. (1979) "Processing and Applications in Microgravity Surveys" *Geophysical Prospecting*, 27(4), pp 848-861.
- Boschetti, F. (2005) "Improved edge detection and noise removal in gravity maps via the use of gravity gradients" *Journal of Applied Geophysics*, 57, pp 213– 225.
- Bott, M.H.P. (1963) "Two methods applicable to computers for evaluating magnetic anomalies due to finite three dimensional bodies" *Geophysical Prospecting*, 11, 1, pp 292-299.
- Bracewell, R. (1984) "*The Fourier Transform and Its Applications*" McGraw-Hill Book Co., New York.
- Butler, D.K. (1984) "Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities" *Geophysics* 49, 7, pp 1084-1096.
- Cady, J.W. (1980) "Calculation of gravity and magnetic anomalies of finite-length right polygonal prisms" *Geophysics* 45 (10), pp. 1507-1512.
- Chakravarthi, V. and Sundararajan, N. (2008) "TODGINV-A code for optimization of gravity anomalies due to anticlinal and synclinal structures with parabolic density contrast" *Computers & Geosciences* 34, pp 955–966
- Chernov A.A., Boldyreva V.A. and Pasteka R. (2001) "Modern interpretation of gravity and magnetic data for hydrocarbon deposits exploration" Comenius University, Bratislava, OeBMG.
- Ciancara, B. and Marcak, H. (1979) "Geophysical anomaly interpretation of potential fields by means of singular points method and filtering" *Geophysical Prospecting* 27, pp 251–260.
- Cooper, G.R.J. (1993-2003) "*Grav2DC software*", School of Geosciences, University of the Witwatersrand, South Africa, ww.wits.ac.za/science/geophysics/gc.htm
- Cooper, G.R.J. (2004) "The stable downward continuation of potential field data" *Exploration Geophysics* 35, 4, pp 260–265.
- Damiata, B.N. and Tien Chang Lee, (2002a) "Gravitational attraction of solids of revolution, Part 1: vertical cylinder with radial variation of density" *Journal of Applied Geophysics* 50, pp 333–349.
- Damiata, B.N. and Tien Chang Lee, (2002b) "Gravitational attraction of solids of revolution, Part 2: General expressions" *Journal of Applied Geophysics* 50, pp 351–373.
- Dehlinger, P. (1978) "*Marine Gravity*" Elsevier scientific publishing company, 321P.
- Dobrin, M.B. and Savit, C.H. (1988) "*Introduction to geophysical prospecting*" 4th edition, McGraw-Hill (New York), pp 867.
- Dondurur D, (2005) "Depth Estimates for Slingram Electromagnetic Anomalies from Dipping Sheet-like Bodies by the Normalized Full Gradient Method" *Pure and applied Geophysics*, 162, 11, pp 2179-2195.

- Draper, N., and Smith, H. (1981) *Applied Regression Analysis*, second edition, Wiley-Interscience, 709 pp.
- Ebrahimzadeh Ardestani, V. (2004) "Detection of near-surface anomalies through 2D normalized full gradient of gravity data" *Journal of Earth and Space Physics* 30, 2, pp 1- 6.
- Eliseeva, I.S. (1987) "Frequency filtration during transformation of normalized gradient of gravity field" *Exploration geophysics* 106, pp. 63-66.
- Eliseeva, I.S. (1988) "Special properties of filtration apparatus of the total gradient of gravity field" *Applied geophysics* 120, pp 121-127 (in Russian Prikladnaya geofizika).
- Eliseeva, I.S. (1995) "Methodical recommendations for the interpretation of gravity and magnetic data by means of the quasi-singular point's method" *Institute for oil and gas exploration, Moscow*, (in Russian with English Abstract).
- Eliseeva, I.S. Berezkin, V.M. Egorova, I.P. (1972) "Utilization of the Filon method for the spectral analysis during the application of the total normalized gradient $G_N(x,z)$ " *Applied geophysics*, 67, pp. 139-145, (in Russian Prikladnaya geofizika).
- Eliseeva, I.S. Giorgadze, I.G. Kodzhebasch, N.N. and Kozhevnikova, E.S. (1997) "Quasi-singular points method as development of the Bereskin's method" *Geofizika*, 4, 53 – 60) (in Russian with English Abstract).
- Eliseeva, I.S. Kodzhebash, N.N. Kozhevnikova, E.S. Bovenko, V.C. Chuval-Sergejev, B.N. and Pasteka, R (1998) "Solution of different geological problems by means of the quasi-singular points method" *Geophysical Bulletin* 4, 4-11, EAGO Moscow (in Russian).
- Eliseeva, I.S. and Pasteka, R. (2001) "Possibilities of the quasi-singular points method in interpretation of 2D gravimetric data" *OeBMG*.
- Eliseeva, I.S., Seiberl, W. Slapansky, P. Pašteka, R. (2002) "Quantitative interpretation of gravity data in the Vienna basin region by means of the Quasi-Singular-Points method" *KBGA*.
- Fedi, M., Rapollam, A. and Russo, G. (1999) "Upward continuation of scattered potential field data" *Geophysics* 64, pp 443-451.
- Ferguson, J.F., Felch, R.N., Aiken, C.L.V., Oldow, J.S. and Dockery, H. (1988) "Models of the Bouguer gravity and geologic structure at Yucca Flat, Nevada" *Geophysics* 53, 2, pp 231-244.
- Filon, L.N.G. (1928) "On a Quadrature Method for Trigonometric Integrals" *Proc. R. Soc. Edinburgh* 49, pp 38-47.
- Flinn, E.A. (1960) A modification of filon's method of numerical integration, *JACM*, 7, pp. 181–184.
- Frazer, L.N. and Guttrust, J.F. (1984) "On a generalization of Filon's method and the computation of the oscillatory integrals of seismology" *Geophysical J. R. astronomy Soc.*, 76, pp. 461-481.
- Gerken, J.C. (1989) "*Foundation of exploration geophysics*" Elsevier science publishers, pp 667

- Grant, F.S., and West, G.F. (1965) “*Interpretation Theory in Applied Geophysics*”, McGraw-Hill Book Company, pp 583
- Grant, F.S. (1972) “Review of Data Processing and Interpretation Methods in Gravity and Magnetic 1964 to 1971” *Geophysics* 37, 4, pp 647-661.
- Griffin, R. (1948) “Residual gravity in theory and practice” *Geophysics* 49, pp 39-57.
- Gupta, V.K., and Ramani, N. (1982) “Optimum second vertical derivatives in geologic mapping and mineral exploration” *Geophysics* 47, 12, pp 1706-1715.
- Hansen, R.O. and Miyazaki, Y. (1984) “Continuation of potential fields between arbitrary surfaces” *Geophysics* 49, pp 787–795.
- Hamming, R. W., (1986), “*Lanczos Factors*” in *Numerical methods for scientists and engineers*” 2nd edition, New York, pp. 534-536.
- Hammer, S. (1939) “Terrain corrections for gravimeter stations” *Geophysics*, 4, 3, pp 184-194.
- Hammer, S., Nettleton, L.L. and Hastings, W.K. (1945) “Gravimeter prospecting for chromite in Cuba” *Geophysics*, 10, 1, pp. 34-49.
- Hassanzadeh Sharif, B. (1985) “Source rock evaluation and sedimentary basin study of Tabas region”, International conference on Petroleum Geochemistry and exploration in Afro-Asian region. India.
- Heiskanen, W.A. and Moritz, H. (1967) “*Physical geodesy*” W.H. Freeman and Co.
- Hilst, R.V.D. (2004) “*Essentials of geophysics, chapter2: The earth’s gravitational field*” MIT university.
- Hinze, W.J. (1990) “The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies” In: Ward(Ed), *Geotechnical and environmental geophysics*. The Society of Exploration Geophysists, P. 75-126.
- Hubbert, M.K. (1948) “A line-integral method of computing metric effects of 2D the Gravi-masses” *Geophysics* 13, 2, pp 215-225.
- Hughes, B. (1999) “*Petroleum geology*”, Baker Hughes INTEQ, pp. 254.
- Hyne, N.J. (2001) “*Non-technical Guide to Petroleum Geology, Exploration, Drilling and Protection*”, Penn Well Corporation, pp. 598.
- Jackson, B.H. (1987) “A case for upward continuation as a standard separation filter for potential field maps” *Geophysics*, 52, 8, pp. 1138-1148.
- Jallouli, C., Chikhaoui, M. Braham, A. Turki, M.M. Mickusd, K. and Benassi, R. (2005) “Evidence for Triassic salt domes in the Tunisian Atlas from gravity and geological data” *Tectonophysics* 396, pp. 209-225.
- Jenkins, A.J.O., Derbew, M. and Moom, W. (1983) "Gravity modeling of Salt Domes and Pinnacle Reefs" *Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysics* 19, 1, pp. 51-55
- Kanasewich, E.R. & Agarwal, R.G. (1970) “Analysis of Combined Gravity and Magnetic Fields in Wave Number Domain” *Journal of Geophysical Research* 75, pp .5702-5712.

- Karsli, H., (2001), PhD. Thesis, “The Usage of Normalized Full Gradient Method in Seismic Data Analysis and a Comparison to Complex Envelope Curves” Natural and Applied Sciences Institute, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.
- Klingelé, E.E., Marson, I. and Kahle, H.G. (1991) “Automatic interpretation of gravity gradiometric data in two dimensions: vertical gradient” *Geophysical Prospecting* 39, pp. 407-434.
- Kreyszig, E. (2006) “*Advanced Engineering Mathematics*”, Textbook, 9th Edition, John Wiley & Sons, pp. 1248.
- Krumbein, W.C. (1959) “Trend surface analysis of contour-type maps with irregular control point spacing” *Journal of Geophysical Research*, 64, pp. 823-834.
- Lacoste, L.J.B. (1973) “Cross correlation method for evaluating and correcting shipboard gravity data” *Geophysics* 38, 4, pp. 701-709.
- Langman, I.M. (1959) “Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun” *Journal of Geophysical Research* 64, pp. 2351-2355.
- Lanz E, Maurer H. and Green A.G. (1998) “Refraction tomography over a buried waste disposal site” *Geophysics* 63, pp. 1414–1433.
- Li, Y.G., and Oldenburg, D.W. (1998) “Separation of regional and residual magnetic field data” *Geophysics* 63, 2, pp. 431-439.
- Li, X., and Gotze, H.J. (2001) “Tutorial: Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics” *Geophysics* 66, 6, pp. 1660-1668.
- Linford, N. (2006) “The application of geophysical methods to archaeological prospecting” *Reports on Progress in Physics* 69, pp. 2205–2257.
- McCulloh, T.H. (1980) “Mass properties of sedimentary rocks and gravimetric effects of petroleum and natural-gas reservoirs” *Society Exploration of Geophysics*.
- Miller, R.L. (1956) “Trend surfaces: their application to analysis and description of environments of sedimentation” *Journal of Geology* 64, pp. 425-446.
- Mohan, N.L., Anandababu, L. and Seshagiri, Roa (1986) “Gravity interpretation using the Melin transform” *Geophysics* 51, 1, pp. 114–122.
- Moritz, H. (1984) “Geodetic reference system 1980” *Bulletin Geodesique*, 58 (3), pp. 388-398.
- Mudretsova, E.A. Varlamov, A.S. Filatov, V.G. and Komarova, G.M. (1979) “*The Interpretation of Detailed Gravity Data over the Nonstructural Oil and Gas Reservoirs*” Nedra, Moscow.
- Nabighian, M.N. (1972) “The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation” *Geophysics* 37, pp. 507-517.
- Nabighian, M.N. (1974) “Additional comments on the analytic signal of 2D Magnetic bodies with polygonal cross-section” *Geophysics* 39, 1, pp. 85-92.
- Nettleton, L.L. (1948) “Geophysical History of Typical Mississippi Piercement Salt Domes” *Geophysics*, 12, 1, pp. 30-42
- Nettleton, L.L. (1954) “Regional, Residual and structures” *Geophysics* 19, 1, pp. 1-22.

- Nettleton, L. L. (1957) "Gravity Survey Over a Gulf Coast Continental Shelf Mound" *Geophysics*, 22, 3, pp. 630-642.
- Nettelton L.L. (1976) "*Gravity and Magnetic in Oil Prospecting*" New York: McGraw-Hill. Pp. 462.
- Nowell, D.A.G. (1999) "Gravity Terrain Corrections-An Overview" *Journal of Applied Geophysics* 42, pp. 117-134.
- Okabe, M. (1979) "Analytic expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies" *Geophysics* 44, pp. 730-744
- Oldham, C.H.G. and Sutherland, D.B. (1955) "Orthogonal polynomials: their use in estimating the regional effect" *Geophysics*, 20, pp. 295-306.
- Oruç, B. and Keskinsezer, A. (2008) "Detection of causative bodies by normalized full gradient of aeromagnetic anomalies from east Marmara region, NW Turkey" *Journal of Applied Geophysics* 65, pp. 39-49.
- Otto, S.R. and Denier, J.P. (2005) "*An Introduction to Programming and Numerical Methods in MATLAB*" Springer-Verlag London Limited, pp. 463.
- Pašteka, R., (1996) "Properties of the total normalized gradient of potential function for the determination of source distributions", The 7th International Meeting on Alpine Gravimetry, Vienna, pp 187-207
- Pašteka R. (2000) "2D Semi-automated Interpretation Methods in Gravimetry and Magnetometry" *ACTA Geologica Universitatis Comenianae* 55, pp 5-50.
- Pašteka, R. (2001) "Importance of inverse problem classes in Gravimetry during application of 2D semi-automated interpretation techniques", The 7th International Meeting on Alpine Gravimetry, Leoben, pp. 95-109
- Peters, L.J. (1949) "The direct approach to magnetic interpretation and its practical application" *Geophysics* 14, pp. 290-320
- Plouff, D. (1976) "Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections" *Geophysics* 41, 4, pp. 727-741.
- Ramsey, A. S. (1940) "*An introduction to the theory of Newtonian Attraction*" Cambridge, Cambridge University Press.
- Rasmussen, R., and Pederson, L.B., (1979) "End Corrections in potential field modeling" *Geophysical Prospecting* 27, pp 749-760.
- Reynolds, J.M. (1997) "*An introduction to applied and environmental geophysics*" John Wiley & Sons, Pp. 796.
- Robinson, E.S. and Coruh, D. (1988) "*Basic Exploration Geophysics*" New York, John Wiley and Sons, pp 562.
- Roy, L. Agarwal, B.N.P. and Shaw, R.K. (1999) "Estimation of shape factor and depth from gravity anomalies due to some simple sources" *Geophysical Prospecting* 47, pp 41-58.
- Roy, A. (1966) "Downward Continuation and Its Application to Electromagnetic Data Interpretation" *Geophysics* 31, pp. 167-184

- Salem A. Elawadi E. and Ushijima K. (2003) "Depth determination from residual gravity anomaly data using a simple formula" *Computers & Geosciences* 29, pp. 801–804.
- Sarma, D.D. and Selvaraj, J.B. (1990) "Two-dimensional orthonormal trend surfaces for prospecting" *Computers and Geosciences* 16, pp. 879-909.
- Seigel, I.H.O. (1957) "Discovery of Mobern Copper Sulfide Deposit, Noranda Mining District, Quebec", 6th Common wealth Mining and Metal Congress Proceeding, Montreal, pp. 237-245.
- Sheriff, R.E. and Geldart, L.P. (1995) "*Exploration Seismology*" Cambridge University Press., Second Edition
- Shaw, R.K., and Agarwal, B.N.P. (1990) "The application of Walsh transforms to interpret gravity anomalies due to some simple geometrically shaped causative sources: A feasibility study" *Geophysics* 55, pp. 843-850.
- Shaw, R.K. and Agarwal, B.N.P. (1997) "A generalized concept of resultant gradient to interpret potential field maps" *Geophysical Prospecting* 45, pp. 1003-1011
- Silva, J.B.C., Teixeira, W.A. and Barbosa, V.C.F. (2009) "Gravity data as a tool for landfill study" *Environmental Geology* 57, pp. 749-757.
- Sindirgi, P. Pamukçu, O. and Özyalın, S. (2008) "Application of Normalized Full Gradient Method to Self Potential (SP) Data" *Pure and Applied Geophysics* 165, 2, pp. 409-427.
- Skeels, D.C. (1947) "Ambiguity in Gravity Interpretation" *Geophysics* 12, 1, pp. 43-56.
- Spiegel, M.R. (1974) "*Theory and problems of Fourier analysis with application to boundary value problems*" McGraw-Hill Book Company, pp. 190.
- Stanley, J.M. (1977) "Simplified gravity interpretation by gradients of the geological contact" *Geophysics* 42, 6, pp. 1230-1235.
- Steven T. Karris (2007) "*Numerical Analysis Using MATLAB and Excel*" 3th Edition, Orchard Publications, pp. 625.
- Talwani, M. (1973) "Computer usage in the computation of gravity anomalies" *Methods in Computational Physics* 13, pp. 343–389.
- Talwani, M. (1965) "Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies cause by bodies of arbitrary shape" *Geophysics* 30, 5, pp. 797-817.
- Talwani, M. Worzel, J.L. and Landisman, M. (1959) "Rapid gravity computation for two dimensional bodies with application to the Mendicino submarine fracture zone" *Geophysical Research* 64, pp. 49-59.
- Talwani, M. and Ewing, M. (1960) "Rapid computation of gravitational attraction of three dimensional bodies of arbitrary shape" *Geophysics* 25, 1, pp. 203-225.
- Telford, W.M. Geldart, L.P. and Sheriff, R.C. (1991) "*Applied geophysics*" 2nd edition, Cambridge University Press, pp. 770.
- Thyssen-Bornemlsza, S. and Stackler, W.F. (1962) "The average horizontal gravity gradient" *Geophysics* 27, pp. 714-715.

- Tiab, Dj. and Donaldson, E.C. (2004) “*Petrophysics, Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*” 2nd edition, Elsevier: Gulf professional publishing, pp. 926.
- Tóth, G., Völgyesi, L. and Cerovsky, I. (2004) “Modeling time variation of gravity gradients due to water level fluctuations” *Reports on Geodesy*, 69, 2, pp. 309-314 (Warsaw University of Technology).
- Tran T.D. (2004) “Two and three dimensional normalized total gradient of gravity anomalies and its application for detecting the oil-gas potential areas in the southeast sedimentary basins of the East Vietnam Sea”, In the 7th SEGJ International Symposium Imaging Technology, 6p, Sendai, Japan.
- Unwin, D.J. (1978) “*An introduction to trend surface analysis, Concepts and Techniques in Modern Geography*”, No. 5, University of East Anglia, Norwich.
- Ulrych, T.J. (1968) “Effect of Wavelength Filtering on the Shape of the Residual Anomaly” *Geophysics* 33, 6, pp. 1015-1018.
- USGS, (2009) “Humble oilfield” *U.S. Geological Survey*, www.usgs.gov
- Van Overmeeren, R.A. (1981) “A combination of electrical resistivity seismic refraction and gravity measurements for groundwater exploration in Sudan” *Geophysics* 46, 9, pp. 1304-1315.
- Van Overmeeren, R.A. (1975) “A combination of gravity and seismic refraction measurements applied to groundwater explorations near Taltal province of Antofagasta Chile” *Geophysical Prospecting*, 23, 2, pp. 248-258.
- Völgyesi, L. and Tóth, G. (2004) “Modelling gravity gradient variation due to water mass fluctuations”, IAG International Symposium, Gravity, Geoid and Space Missions, Porto, Portugal.
- Won, I.J. and Bevis, M. (1987) “Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and FORTRAN subroutines” *Geophysics* 52, 2, pp. 232-238.
- Wren, A.E. (1973) “Trend surface analysis: a review” *Canadian Journal of Exploration Geophysics* 9, pp. 39-44.
- Xiao, Y. (1981) “Normalized full gradient method of gravity anomalies” *Oil Geophysical Prospecting*, 16, 3, pp. 47-57 (in Chinese with English abstract)
- Xiao, Y. and Zhang, L. (1984) “Application of normalized full gradient method of gravity anomalies to oil and gas exploration” *Oil Geophysical Prospecting* **19**, 3, pp. 247-254 (in Chinese with English abstract)
- Yuan, Y. Jin, W. and Jin, H. (1995) “Possibility of hydrocarbon accumulation discovery using high-accuracy gravimetric survey” *Oil Geophysical Prospecting* **30**, 1, pp. 139-144 (in Chinese with English abstract)
- Zeng H., Meng, X., Yao, C., Li, X., Lou, H., Guang, Z. and Li, Z. (2002) “Detection of reservoirs from normalized full gradient of gravity anomalies and its application to Shengli oil field, East China” *Geophysics* 67, pp. 1138-1147.
- Zurflueh, E.G. (1967) “Applications of two dimensional linear wavelength filtering” *Geophysics* 32, pp. 1015-1040.
- <http://mathworld.wolfram.com>
- <http://www.Landsat.org> (2002) “Landsat data - ETM+”.

Abstract:

The gravity method is used for detection of subsurface structures related to hydrocarbon resources in the first stages of exploration. The main purpose of interpretation techniques of the gravity anomaly in hydrocarbon exploration is to find those structures that could deserve the potential to be an oil trap. In this regard, there are varieties of qualitative methods that are able to discover such structures and to estimate their burial depth to some extent. The normalized full gradient (NFG) introduced at 1960, is one of these methods which is applied for the above purposes. It is also used to identify and clarify hydrocarbon bearing structures from dry ones. This method is based on calculating the potential field function in form of some sine and cosine functions by Fourier series.

Despite the ability of NFG method in recognition of potential field anomalies, especially in hydrocarbon resources exploration, there are still some not well defined parameters such as number of Fourier harmonic series (N), power of Lancsoz smoothing function (μ), optimum length of profiles, dimension of exploration grid and spacing of measuring points that need to be determined to calculate NFG precisely. Additionally, this method and its capabilities have not yet tested for two and three dimensional (2D and 3D) salt dome exploration. Therefore, the optimum determination of the above parameters along side to introduce a criteria to identify oil traps related to hydrocarbon bearing salt domes and also providing an algorithm to calculate 2D normalized full gradient together with introducing a new 3D method for NFG calculation were selected as the main objectives of this research work.

To achieve the goals, several different models that resembled an oil trap related to the anticline and salt dome structures were firstly made and their gravity response were then calculated by a sets of computing algorithms and codes prepared in the MATLAB programming environment. Following that with considering the appropriate NFG parameters, the required algorithms and programs to calculate NFG values for 2D and 3D structures were prepared and their capability also tested by some synthetic and real data. Due to natural 3D characteristics of geological structures related to oil traps, it was attempt to use double Fourier series to introduce a new method to calculate 3D normalized full gradient and its ability was tested by different sets of real and synthetic gravity and magnetic data.

The obtained results indicate that the value of normalized full gradient is strongly depending on the optimized number of harmonic series to calculate the Fourier coefficients. This parameter so far was being determined based on the complementary exploration data by trial and error procedure. In this study, a new method named relative maximum values of NFG as a function to the number of harmonic series, was introduced to determine this important parameter (N) without any complementary data. By considering such (N) value in calculating normalized full gradient of each profile and drawing its section, the horizontal position and depth of anomalous bodies could be preciously determined using relative maximum or minimum values of NFG. Another important parameter that influences the value of normalized full gradient value is the power of Lancsoz smoothing function that used to remove noise from data. The modeling done in this study shows that by introducing the values of 2 and/or 3 as the power of Lancsoz smoothing function, the best results would be obtained.

The results show that if the length of the surveying profile is 13 times of the depth of the anomaly, and the space of the measuring points is designed half up to the full width of the expected buried anomalous body, the best accurate result would be obtained. Study on different models in one hand, showed that the value of density contrast does not affect on the number of harmonic series (N) and also the location of the minimum and maximum closed curves on NFG sections. Therefore if the effect of density contrast of an anomalous zone is recorded somehow, this method could adequately define their location. As it was expected, shape of the anomalous bodies has an effect on the number of harmonic series (N) and the location of relative maximum and minimum regions in a NFG section.

The main advantage of the NFG method relative to the other methods of interpretation gravity anomaly is its capability in separation of the hydrocarbon filled traps from dry ones. The results of the present study indicate that the location of a salt dome or anticline structure containing hydrocarbon is manifested by a minimum closed lines that surrounded with two maximum closed lines in sections of the 2D normalized full gradient. In addition, these 3D oil traps filled by hydrocarbon are recognized in 3D normalized full gradient maps that are provided at different depth interval by minimum closed curves that enclosed by maximum lines. Therefore any presence of such minimum closed lines could be used as a criterion for hydrocarbon exploration.

According to 3D nature most of the oil traps, it is attempt to develop the required mathematical relations to introduce a new technique for 3D normalized full gradient calculation by using double Fourier series. To verify the capability and the accuracy of the new introduced NFG methods in 2D and 3D cases, some gravity and magnetic data from different oil and gas field related to anticline or salt dome structures and also related data from mining exploration were then processed by these methods. Application of this method on the aforementioned real data sets proved the ability of this method on defining the horizontal position and depth of oil traps contain hydrocarbon or mineral resources. Additionally the obtained results by this method show good relations with drilling data for 2D and 3D anticlines or salt dome oil traps.

The results of this study also show that 3D normalized full gradient provides more accurate results than 2D normalized full gradient and other pseudo 3D-NFG methods. This is due to simultaneous usage of Fourier series on both x-y directions in 3D normalized full gradient calculation. Therefore this method could be used to separate the oil and gas bearing traps from the other ones, to determine the locations of the exploratory drilling, and also to manage any further exploration activities.

Keywords: Gravity anomaly, oil traps (anticline and salt dome), NFG, number of harmonic series, Fourier series, oil and gas reservoir exploration.



Shahrood

University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

Study on the capability of Normalized Full Gradient method for determining hydrocarbon potential of oil traps using gravity data

Hamid Aghajani

Supervisors:

Dr. Ali Moradzadeh

Prof. Hualin Zeng

Advisor:

Dr. Seyed Hashem Tabatabaee

February 2010