

ارزیابی پارامترهای عملیات لرزه‌ای سه بعدی، به منظور بهبود آنها در چند مدل معین

جواد دلیر^۱، محمدعلی ریاحی^{۲*} و حسام منصورى سیاه‌گلی

^۱ کارشناسی ارشد، شرکت مهندسی و اکتشاف اکسین تهران، ایران

^۲ استاد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ دانشجوی دکترا، شرکت خدمات مهندسی نفت کیش KPE

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹)

چکیده

طراحی پارامترهای عملیات لرزه‌ای، تضمین‌کننده کیفیت ثبت داده‌های زیرسطحی ناشی از اجرای مؤثر این عملیات می‌باشد. از این رو، طراحی رویه‌های آزمایشی، که به تولید مؤثر پارامترهایی منجر شود که کیفیت داده‌های مورد نظر را به حداکثر برساند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف این تحقیق، بررسی تعیین پارامترهای عملیات لرزه‌ای بر روی سه مدل مصنوعی مختلف سرعت-عمق با الگوگیری از مدل‌های واقعی می‌باشد که در تمام این مدل‌ها مراحل تعیین عمق لایه هدف، استفاده از مدل سرعت-عمق، و تعیین پارامترهای اساسی طراحی عملیات لرزه‌ای از جمله Bin Size، maximum offset، و Migration Aperture انجام شد. مدل اول، برگرفته از حوضه کو-لانگ در پوسته قاره جنوب شرقی ویتنام است. این مدل به صورت یک مدل هفت لایه با چندین گسل نسبتاً بزرگ، دارای شیب ملایم و تغییرات افقی سرعت محدود می‌باشد. در این مدل، دستیابی به فولد کافی در منطقه هدف و برآورده کردن انتظارات برداشت داده با توجه به ساختار زمین‌شناسی نسبتاً ساده، محقق گردید. مدل دوم، برگرفته از حوضه جانگار است که دارای افق‌ها و گسل‌های پیچیده و تغییرات افقی سرعت شدید می‌باشد. با وجود اینکه روابط مورد استفاده برای تعیین پارامترهای عملیات لرزه‌ای نتایج مناسبی از لحاظ نسبت سیگنال به نویز ارائه کردند، مشخص شد که حتی با افزایش ابعاد منطقه برداشت و افزایش تراکم گیرنده‌ها و چشمه‌ها، نمی‌توان در تمامی Bin ها، به‌ویژه در مناطق با پیچیدگی زمین‌شناسی، فولد مورد نیاز را تأمین کرد. مدل سوم، برگرفته از گنبد‌های نمکی خلیج مکزیک است. در گنبد‌های نمکی، هدر رفت انرژی به شدت بالا است، به طوری که موج با ورود به گنبد نمکی به ندرت نقطه‌ای برای بازتاب و رسیدن به گیرنده‌ها پیدا می‌کند. در بررسی‌های انجام شده بر روی این مدل، فولد روی مرز گنبد نمکی با دقت مناسبی همواره برابر با نصف فولد یک افق کم‌شیب در عمق هدف به دست آمد.

کلمه‌های کلیدی: مدل سرعت-عمق، پارامترهای طراحی عملیات لرزه‌ای، ردیابی پرتو، عمق لایه هدف

۱ مقدمه

معرفی روش لرزه‌نگاری سه‌بعدی در دهه ۱۹۷۰، نقطه عطفی در پیشرفت این روش در طرح‌های لرزه‌نگاری به شمار می‌رود. امروزه، لرزه‌نگاری سه‌بعدی به طور معمول در اکتشاف نفت انجام می‌شود و اکثر شرکت‌های نفتی قبل از تصمیم‌گیری در خصوص محل چاه‌ها، ملزم به انجام یک بررسی لرزه‌نگاری سه‌بعدی هستند. بنابراین، روش لرزه‌ای بازتابی از یک تکنیک بسیار ساده به یکی از موفق‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی تبدیل شده است. در طول نزدیک به ۸۰ سال بهبود مستمر، این روش تقریباً به یک استاندارد جامع و مانع تبدیل شده است (هریث، ۱۹۹۸).

در سه دهه گذشته، برداشت‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی به تدریج اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند. در این بازه زمانی، برخی از آرایه‌های منع-گیرنده رایج ابداع شده‌اند (استون، ۱۹۹۴ و ورمیر، ۲۰۰۲). اگرچه هندسه طراحی پارامترهای لرزه‌نگاری سه‌بعدی در ۲۰ سال گذشته به طور قابل توجهی تغییر نکرده است، اما فرآیند طراحی پارامترها تنها به روابط نظری متکی نیست و همچنان تجربه کارشناسان برای یک طراحی قابل قبول ضروری است.

یک عملیات لرزه‌ای سه‌بعدی باید برای افق‌های اصلی مورد نظر طراحی شود. تأثیر انتخاب پارامترهای عملیات لرزه‌ای سه‌بعدی به طور مستقیم بر اقتصاد و بودجه پروژه در هر محدوده مورد مطالعه تأثیر می‌گذارد. اهداف ثانویه یا سایر اهداف منطقه‌ای ممکن است تأثیر قابل توجهی بر طراحی پارامترهای لرزه‌نگاری سه‌بعدی داشته باشند. به عنوان مثال، یک هدف ثانویه کم‌عمق ممکن است نیاز به دورافت‌های نزدیک و بسیار کوتاه داشته باشد. برداشت‌های لرزه‌ای از پرهزینه‌ترین روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی به شمار می‌روند، بنابراین همیشه روش‌های مختلف به عنوان روش‌های مکمل مورد توجه قرار گرفته‌اند.

لاینر و همکاران (۱۹۹۹)، موریس و همکاران (۲۰۰۱)،

پگاه و همکاران (۲۰۰۷) و بهنام و همکاران (۲۰۱۱) به طراحی پارامترهای عملیات به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی نگاه کرده‌اند و ورمیر (۲۰۰۳) کار ایشان را ارتقا داده است. برخی از پارامترهای عملیات شامل فاصله بین خطوط چشمه و گیرنده، فاصله بین هر چشمه و گیرنده، اندازه پیچ (مساحت فعال گیرنده‌ها) و نسبت ابعاد آن، دورافت‌های حداکثر و حداقل، اندازه و ابعاد کلی منطقه برداشت هستند که هر کدام به گونه‌ای بر ثبت داده‌های نهایی تأثیر می‌گذارند. ژائو و همکاران (۲۰۲۳) برخی از پارامترهای لرزه‌ای و حساسیت آنها در کیفیت تصویر را در یک مدل پیچیده بررسی کرده‌اند. همچنین، زانگ و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر پارامترهای لرزه‌ای بهینه را در چگالی و سرعت گنبد‌های نمکی تعیین کرده‌اند.

فاصله بین خطوط چشمه و گیرنده، فاصله بین هر چشمه و گیرنده، اندازه پیچ و نسبت ابعاد آن، دورافت‌های حداکثر و حداقل، اندازه و ابعاد کلی منطقه برداشت به طور مستقیم بر پارامترهای ثانویه مانند ابعاد bin و تعداد رد لرزه‌های یک انبارک تأثیر می‌گذارد. پیچیدگی‌های سطحی و زیرسطحی، عوارض طبیعی، شیب غیرمعمول بازتابنده‌های زیرسطحی، گسل‌ها و سرعت‌های بالا در گنبد‌های نمکی و سازندهای مشابه نیز چالش‌هایی هستند که طراح به طور مداوم با آنها مواجه است و می‌تواند به طور محسوسی پارامترهای لرزه‌ای را تغییر دهند.

در عمل، برای طراحی‌های بسیار دقیق سه‌بعدی، ابتدا باید داده‌های مربوط به عملیات‌های دو بعدی و چاه‌نگاری که در منطقه برای شناسایی و ارزیابی اولیه صورت گرفته‌اند، قابل دسترسی باشد. این داده‌ها اطلاعات حیاتی از جمله عمق لایه کم‌سرعت، فرکانس غالب و فرکانس بیشینه داده‌ها و همچنین یک دید کلی از وضعیت و درستی گزارشات زمین‌شناسی را فراهم می‌کنند. با این حال، در یک حوزه کاملاً تنوری، می‌توان بسیاری از این پارامترها را تخمین زد. علاوه بر آن، داده‌های قبلی، جنس لایه‌های

دینامیکی خاک و سنگ دارد و در مدل‌سازی ساختار زیرسطحی، تحلیل پایداری، مطالعات لرزه‌نگاری و برآورد خطر زلزله، نقش اساسی ایفا می‌کند (بورکا و همکاران ۲۰۲۲). سرعت موج برشی (V_s) نشان‌دهنده مقاومت محیط در برابر تغییر شکل برشی است و به عوامل مختلفی نظیر نوع سنگ، تراکم، اشباع، سن رسوبات و تاریخچه زمین‌ساختی وابسته است. دقت در اندازه‌گیری یا برآورد V_s می‌تواند (۱) پاسخ دینامیکی دقیق‌تری از زمین در مقابل تحریکات لرزه‌ای ارائه دهد؛ (۲) در تعیین پارامترهای مهمی چون V_{s30} (میانگین سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متر) که در کدهای لرزه‌ای مهندسی مورد استفاده است، مؤثر باشد (کانو و کاتو کا ۲۰۰۰؛ ۳) در مدل‌سازی ساختار لایه‌های زمین و تحلیل خطر لرزه‌ای منطقه‌ای نقش حیاتی ایفا کند (بوگا و همکاران ۲۰۲۰).

در مورد روش‌های اندازه‌گیری یا برآورد V_s می‌توان به (۱) آزمایشات لرزه‌ای سطحی: مانند MASW، ReMi، SPAC، (۲) پروفیل‌های حفاری با دستگاه‌های SCPT و Downhole، (۳) مدل‌سازی معکوس لرزه‌ای با استفاده از الگوریتم‌های وارون‌سازی چندبعدی و (۴) روش‌های ژئوفیزیک پیشرفته مانند FWI (Full Waveform Inversion) اشاره کرد. در بسیاری از مطالعات، استفاده از داده‌های V_s در کنار سایر پارامترها مانند V_p ، چگالی و مدول برشی باعث افزایش دقت مدل‌های زمین‌شناسی شده است (چلینگرین و همکاران ۲۰۲۰). در این تحقیق ابتدا مدل‌های زمین‌شناسی با توجه به الگوهای واقعی طراحی شده است، این الگوها شامل لایه‌های زمین‌شناسی با سرعت‌های V_p مختلف و همچنین گسل‌ها خواهند بود، گرچه نسبت دادن مقادیر مختلف سرعت موج برشی (V_s) به لایه‌ها و اندازه‌گیری آنها مطالعه را به دنیای واقعی نزدیک تر می‌کند اما با توجه به اینکه اندازه‌گیری سرعت موج برشی V_s و نسبت این دو سرعت اغلب برای تعیین ویژگی‌های سنگ‌شناسی و تخلخل استفاده می‌شود (گالس و

زمین، جهت و شیب ساختارهای زمین‌شناسی را تعیین می‌کنند که اطلاعات مهمی برای محاسبه پارامترها هستند. تغییرات بالا در یک جهت معین به معنای افزایش پیچیدگی‌ها در آن جهت است که برای تصویر کردن آن نیاز به قدرت تفکیک پذیری بالاتری می‌باشد. قدرت تفکیک پذیری افقی به صورت معکوس با ابعاد Bin تناسب دارد که خود بر بسیاری از پارامترهای لرزه‌ای دیگر اثر گذار است. به عنوان مثال در تصویر کردن یک تاقدیس ساده ممکن است در یک جهت تغییرات بالا و در یک جهت تغییرات کم باشد، ایده‌آل است که در جهت تغییرات بالا تفکیک پذیری بالا باشد اما لزوماً نیازی به قدرت تفکیک پذیری بالا در جهت تغییرات کم نیست، با این شرایط در نهایت Bin حاصل به شکل یک مستطیل محاسبه خواهد شد. همچنین داده‌های نقشه‌برداری و شناسایی قبلی نیز می‌تواند بر روند طراحی عملیات تاثیر مثبت بگذارد، عوارض سطحی چه طبیعی و چه مصنوعی محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند که باید در طراحی مورد توجه قرار گیرند.

در بحث هیدروکربن‌ها، بررسی ساختارهایی که ظرفیت تبدیل شدن به تله‌های نفتی را دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد. بسیاری از بزرگترین اکتشافات نفتی جهان در گسل‌ها و یا در نزدیکی ساختارهای نمکی قرار دارند (لاندره و همکاران، ۲۰۱۱). تصویربرداری از این ساختارها با کمترین هزینه ممکن یا به عبارتی دیگر با صرف کمترین تجهیزات، نیروی انسانی و زمان، ایده‌آل است. در این تحقیق به بررسی تعیین پارامترهای عملیات لرزه‌ای بر روی سه مدل مختلف سرعت-عمق پرداخته شده است.

۲ مواد و روش‌ها

یکی از پارامترهای کلیدی در مطالعات ژئوفیزیکی، مهندسی لرزه‌ای، لرزه‌خیزی و تحلیل سایت، سرعت موج برشی (V_s) است. این پارامتر تأثیر مستقیمی بر خواص

راه‌حل‌های بهینه همگرا می‌شود. این بهینه‌ساز دارای مزایا و معایبی می‌باشد که به شرح مختصری از آن می‌پردازیم (دپ و تیواری، ۲۰۰۶). اولین مزیت این بهینه‌ساز تطبیق خود کار می‌باشد. به این معنی که این الگوریتم به طور خود کار به الگوریتم‌های کارآمد برای وظایف بهینه‌سازی ساده‌تر تقلیل یافته و به این ترتیب می‌تواند بدون نیاز به تغییر الگوریتم، به طور مؤثری مسائل مختلف را حل کند. استفاده از یک طرح تخصیص دوسطحی و کارآمدی از نظر محاسبات منجر به حفظ تنوع این الگوریتم شده است. همچنین Omni-optimizer شامل مکانیزم‌هایی برای مدیریت محدودیت‌هاست که آن را برای مسائل بهینه‌سازی مناسب می‌کند. نتایج اثبات مفهوم و بهبود همگرایی از دیگر مزایای این روش می‌باشد. اما محدودیت‌ها و معایبی برای این بهینه‌ساز نیز وجود دارد که شامل پیچیدگی، حساسیت به پارامترها، محدودیت در کاوش نقاط بهینه محلی و غیره می‌باشد. به عنوان مثال این روش مکانیزمی برای پیدا کردن نقاط بهینه نسبی ندارد و فقط به سمت نقاط بهینه مطلق همگرا می‌شود. پارامترها و کمیت‌های مختلفی در یک عملیات لرزه‌ای دخیل هستند ابتدا نیاز است که این پارامترها را تعریف کرده و روابطی که هر کدام از آنها را به یکدیگر مرتبط می‌کند معرفی شود.

همکاران، ۲۰۲۰)، در نظر گرفتن آن تغییری در نتایج این مطالعه ایجاد نمی‌کند.

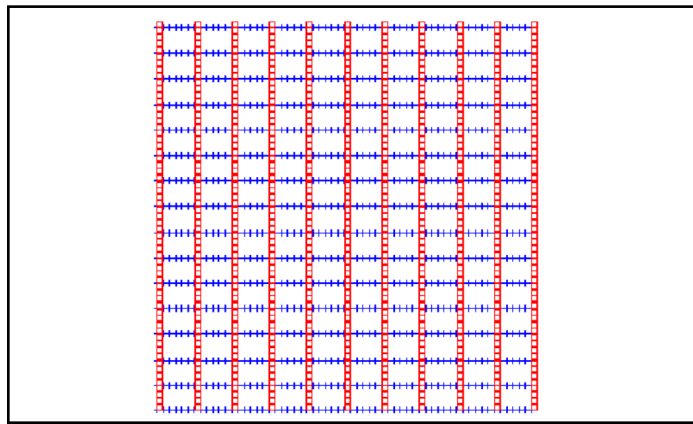
بعد از طراحی کامل مدل زمین‌شناسی، افق هدف و ابعاد آن مشخص می‌شود، ابعاد و عمق تقریبی هدف به صورت مستقیم روی طراحی کلی پارامترهای عملیات و کمیت‌های مختلف تاثیر گذار است. سپس با بررسی مدل، فرکانس‌های بیشینه و غالب تخمین زده می‌شود و اقدام به محاسبه پارامترها برای طراحی اصلی به عمل می‌آید. بعد از طراحی عملیات با پارامترهای مناسب، تاثیر هر پارامتر را مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس بهترین شرایط و کمیت‌ها معرفی می‌شوند.

در بخش بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک به نام "Omni-optimizer" استفاده شده است. این الگوریتم، یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی است که در دسته الگوریتم‌های ژنتیک نسلی (GA) قرار می‌گیرد. این الگوریتم با تقلید از فرآیند طبیعی تکامل، با استفاده از عملگرهای ژنتیکی مانند تقاطع و جهش برای تولید راه‌حل‌های جدید عمل می‌کند. در اصل این الگوریتم بهینه‌ساز از اصول الگوریتم‌های ژنتیک برای کاوش فضای راه‌حل، ارزیابی راه‌حل‌های بالقوه و بهبود مکرر آنها پیروی می‌کند و در نهایت به یک راه‌حل بهینه یا مجموعه‌ای از

جدول ۱. اختصارات و پارامترها.

بزرگترین حداقل Offset	X_{min}	فواصل چشمه	SI	شمار خطوط گیرنده ها	NRL	ابعاد bin	b
حداکثر Offset ضبط شده	X_{max}	فواصل خطوط چشمه	SLI	شمارنده خطوط چشمه	NSL	فرکانس غالب	F_{dom}
عمق تا افق مورد نظر	Z	زمان رسید دو طرفه	t	شمار نقاط چشمه بر واحد مساحت	NS	فرکانس بیشینه	F_{max}
شیب لایه یا افق	θ	سرعت اینتروال بلافاصله بالای افق مورد نظر	V_{int}	فواصل گیرنده ها	RI	دیافراگم مهاجرت	MA
		سرعت میانگین از سطح تا افق مورد نظر	V_{ave}	فواصل خطوط گیرنده	RLI	شمار کانال	NC

خواهد شد. در ایران نیز این روش تنها روش طراحی عملیات سه بعدی تاکنون بوده است. به عنوان مثال خطوط گیرنده می توانند در جهت شرق-غرب و خطوط چشمه در شمال-جنوب قرار بگیرند، یا بالعکس، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، تمام چشمه‌ها بین خطوط گیرنده مجاور شلیک می شوند، پنج یک خط گیرنده جا به جا شده و فرآیند تکرار می شود. (کوردسن و همکاران، ۲۰۰۰).



شکل ۱. الگوی عملیات لرزه‌ای مستطیلی یا خط راست. (کوردسن و همکاران ۲۰۰۰) نقاط قرمز چشمه و نقاط آبی رنگ گیرنده‌ها را نشان می‌دهد.

نوفه دو راه اساسی وجود دارد، افزایش ایستگاه‌ها یا بزرگتر گرفتن ابعاد Bin. واضح است که راه اول هزینه‌ها را افزایش می‌دهد و راه دوم اگر به صورت افراط گونه انجام شود منجر به از بین رفتن جزئیات داده‌ها و در نتیجه تاثیر منفی روی تصویر نهایی که از زیر سطح زمین به دست می آید خواهد شد.

رابطه (۱) برای فولد میانگین صدق می‌کند، واضح است که تنها قسمت مرکزی یک عملیات به حداکثر فولد ممکن می‌رسد (شکل ۲) زیرا گوشه‌ها و نزدیک مرزهای آرایه پنج کامل نیست و باید دقیقاً مشخص شود که چه مکانی از هدف لازم است که حداکثر فولد ثبت شود و در چه مکانی کاهش فولد پذیرفتنی است.

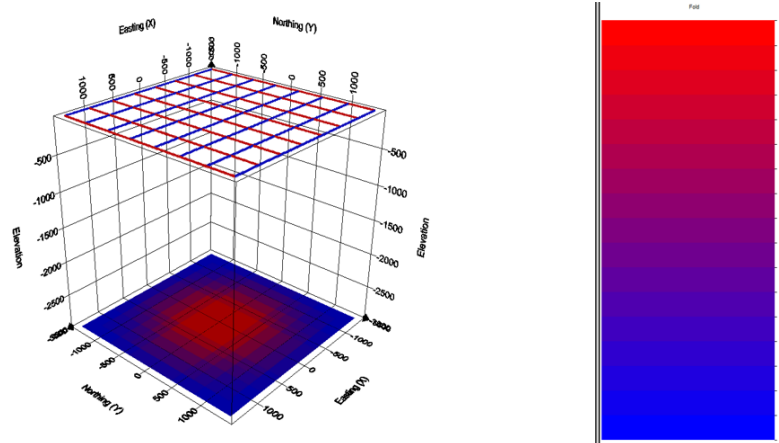
در این مطالعه طراحی به شکل الگوی مستطیلی در نظر گرفته شده است، یعنی خطوط چشمه و گیرنده به صورت متعامد بر روی یکدیگر قرار می‌گیرند. چنین ترتیبی مرسوم ترین روش است و به ویژه برای گروه‌های بررسی و ضبط آسان است. همچنین پیگیری شماره گذاری ایستگاه‌ها بسیار ساده است و در صورت بروز مشکل، یافتن عامل مشکل و برطرف نمودن آن از پیچیدگی کمتری برخوردار است. تمام این موارد در نهایت منجر به صرف بهینه تر بودجه عملیات چه از لحاظ مالی و چه از لحاظ زمانی

در ادامه روابط بین پارامترها، تاثیرپذیری آنها از یکدیگر و چگونگی تعیین مقادیر کمی آنها بیان می‌شود. تعداد فولد در واقع دفعات بازتابش از یک مکان مشخص زیر سطحی را بیان می‌کند، برانباشت کردن این بازتاب‌ها علاوه بر افزایش دامنه بازتاب‌های اصلی، سطح نوفه‌های تصادفی را هم به شکل چشمگیری کاهش می‌دهد. یکی از چالش‌های اصلی طراحی عملیات مخصوصاً در مدل‌های پیچیده، رسیدن به تعداد فولد کافی در افق هدف و همچنین ثابت نگه داشتن آن در طول افق مورد نظر است.

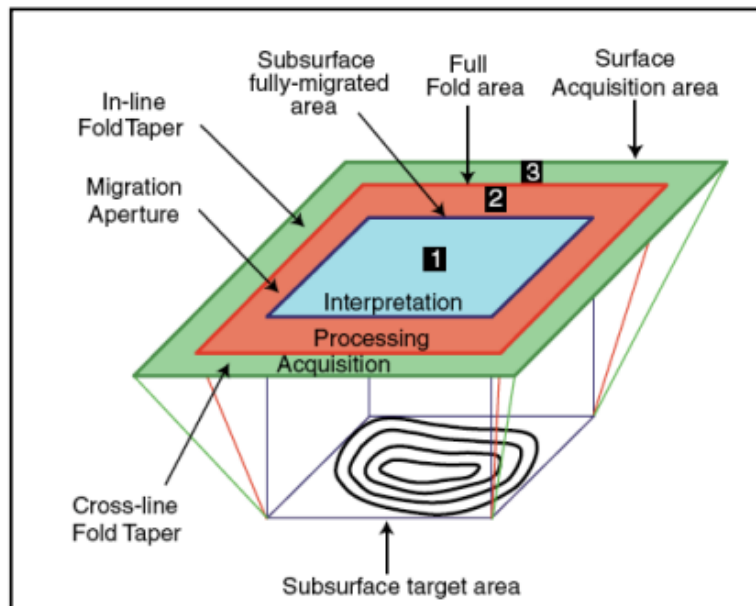
$$Fold = NS \times NC \times b^2 \times U \quad (1)$$

$$U = \text{unit factor} = 10^{-6} \text{ for m/km}$$

رابطه (۱) نشان می‌دهد که فولد با تعداد چشمه و گیرنده‌ها و همچنین ابعاد Bin رابطه مستقیم دارد. این نتیجه مهمی را به ما نشان می‌دهد، برای افزایش تعداد فولد و نتیجتاً کاهش



شکل ۲. تغییرات فولد در نواحی مختلف، تنها مساحتی در مرکز محدوده‌ی عملیات فولد کامل خواهد داشت.



شکل ۳. مدیریت لبه، مناطق مختلف در یک عملیات لرزه‌ای (کاوش و ماری ۲۰۰۶).

(۲۰۰۶)

ترتیب به دست آوردن محاسبات مطابق شکل ۴ است، به گونه‌ای که روابط ۲ تا ۱۱ برخی از مراحل مهم مورد استفاده در شکل مذکور را نشان می‌دهد.

$$MA = Z \times \tan\theta \quad (۲)$$

MA = مهاجرت دیافراگم

Z = عمق و θ = شیب زاویه

$$Bin\ size = Target\ size / 3 \quad (۳)$$

منطقه اول (شکل ۳) مربوط به منطقه هدف زیرسطحی است که باید به طور کامل مهاجرت داده شود که پس از پردازش کامل، تفسیر خواهد شد. این منطقه دارای فولد کامل است و Fully-Migrated area نامیده می‌شود. ناحیه دوم هم باید فولد کامل داشته باشد، انرژی آن برای حل پراش‌ها در ناحیه اول استفاده می‌شود و به آن منطقه فولد کامل می‌گویند. آخرین ناحیه، منطقه کامل عملیاتی است و برای نیازهای عملیاتی مورد نیاز است. (کاوش و ماری

$$RLI = \frac{2 \times X_s}{(NRL - 1)} \quad (9)$$

$$X_{min} = \sqrt[0.5]{SLI^2 + RLI^2} \quad (10)$$

$$\text{Radius of Fresnel Zone} = \frac{1}{2}$$

$$\times \left(\text{target time} \times V_{rms} \times \frac{V_{int}}{F_{dom}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

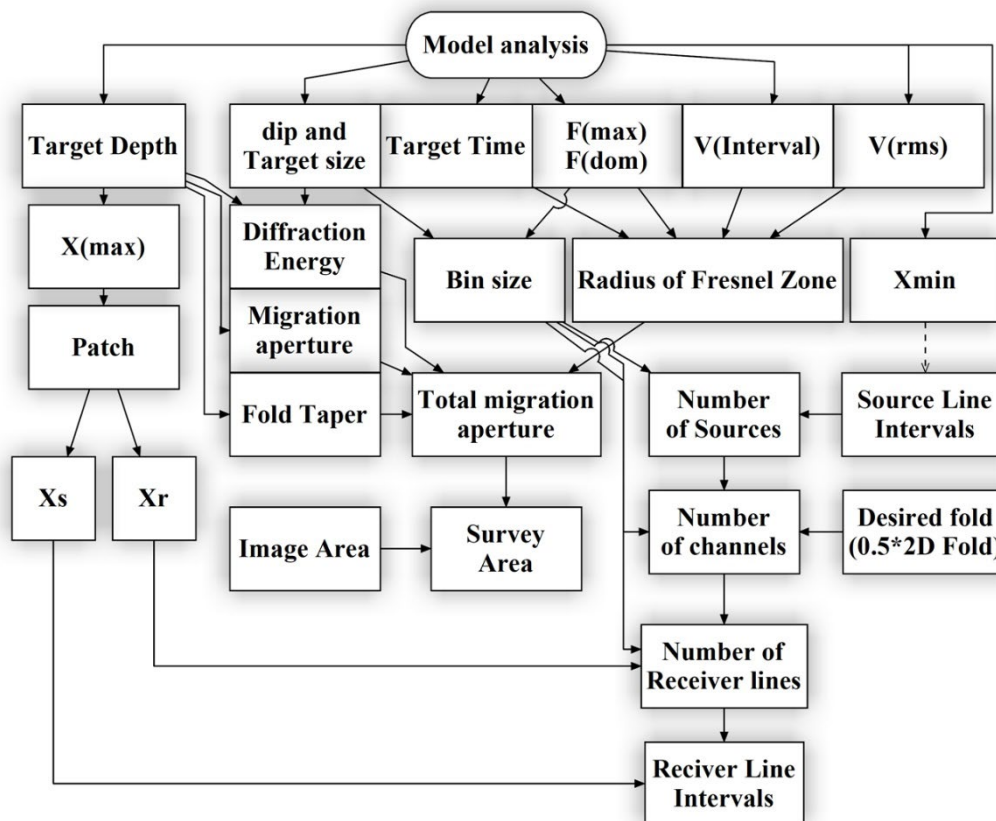
$$\text{bin size} = \frac{V_{int}}{(4 \times F_{max} \times \sin(dip))} \quad (4)$$

$$\text{Bin size} = \frac{V_{Interval}}{1} / (2 * F_{Dominant}) \quad (5)$$

$$NS = \frac{U \times 2 \times b \times SLI}{Fold} \quad (6)$$

$$NC = \frac{U \times NS \times b^2}{NC \times 2 \times b} \quad (7)$$

$$NRL = \frac{2 \times X_r}{2 \times X_r} \quad (8)$$



شکل ۴.

فلوچارت محاسبات پارامترهای عملیات

لرزه‌ای برای مدل هایی که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

ملاک مناسبی برای ارزیابی میزان بهینه بودن پارامترها باشد. انجام هر عملیات لرزه‌ای (دو و یا سه بعدی) با توجه به مدل‌ها طراحی می‌شوند. برای ارزیابی پارامترها از مفهومی تحت عنوان illumination استفاده خواهیم کرد. این کلمه به معنای روشنایی یا شدت روشنایی است، در لرزه شناسی، تعداد دفعات برخورد امواج مکانیکی و بازتاب آنها از یک نقطه معین کمیت ایلومینیشن را تعیین می‌کند. شایان ذکر است که در این مرحله از سه مدل سرعت مرتبط با سه

۳ مدل‌سازی و نتایج

برای هر مدل، برداشت‌های مختلف با پارامترهای نزدیک به کمیت‌های محاسبه شده بررسی شدند. همچنین بهترین پارامترهای محاسبه شده برای مدل‌های ۱، ۲ و ۳ در قالب جدول‌های ۲ تا ۴ ارائه شده‌اند.

پارامترهای زیادی در هزینه‌های برداشت‌های لرزه‌ای دخیل هستند، اما به صورت کلی مقایسه تعداد نقاط چشمه و تغییرات دامنه سیگنال به نوبه بر اساس فولد، می‌تواند

تکتونیکی، دیاپیریسیم نمکی یا برخوردی قاره‌ای ایجاد شده‌اند. درک این تفاوت‌ها برای تحلیل ساختاری، ارزیابی منابع هیدروکربوری و مدلسازی مخازن ضروری است. جدول زیر به‌طور خلاصه تفاوت‌های گسلی سه حوضه رسوبی را نشان می‌دهد (جدول ۱) و بعد از آن به تفصیل درباره هر یک از حوضه‌های رسوبی مطالبی ارائه خواهد شد.

حوضه رسوبی که از نظر تکتونیکی تفاوت‌های فاحش دارند استفاده شده است. حوضه رسوبی کولانگ (Kuqa/Ku Lon Basin)، جانگار (Junggar Basin) در غرب چین، و حوضه‌های گنبد نمکی در خلیج مکزیک می‌باشد. حوضه‌های رسوبی کولانگ، جانگار و خلیج مکزیک از نظر زمین‌ساختی و تکتونیکی ساختارهای متفاوتی دارند و سیستم‌های گسلی آن‌ها در پاسخ به فرآیندهای مختلف

جدول ۱. تفاوت‌های سیستم تکتونیکی سه مدل سرعتی استفاده شده.

ویژگی‌ها	حوضه کولانگ	حوضه جانگار	خلیج مکزیک
نوع اصلی گسل‌ها	تراستی، پوششی	معکوس، امتدادلغز	نرمال، چرخشی، گسل‌های نمکی
عامل اصلی گسل‌زایی	فشار برخوردی و رانش	چندفازه تکتونیکی پالیوزوئیک	حرکت نمک و بارگذاری رسوبی
ساختار کلان تکتونیکی	کمبرند چین‌خورده	حوضه بین‌کوهی	حاشیه قاره‌ای غیرفعال با نمک
نقش نمک در گسل‌زایی	لایه تبخیری دکولمان	کم یا محدود	عامل اصلی در دیاپیریسیم و گسل‌ها
جهت غالب تنش	جنوب‌غربی-شمال‌شرقی	چند جهته	عمودی ناشی از وزن رسوبات

آتش‌فشانی در دوران‌های گذشته، حضور سنگ‌های آذرین را در منطقه به دنبال داشته است. این فعالیت‌ها به‌ویژه در ارتباط با انبساط و فشردگی پوسته زمین رخ داده و نشانه‌هایی از تاریخچه تکتونیکی فعال منطقه به دست می‌دهد. (فم و همکاران، ۲۰۱۸)

این حوضه شامل لایه‌های رسوبی، سنگ‌های آذرین و متامورفیک است که از گذشته‌های دور تا کنون شکل‌گیری و تغییرات زیادی را تجربه کرده است. عمده سنگ‌های این حوضه شامل رسوبات تریاس، ژوراسیک و سنوزوئیک می‌باشد. این رسوبات در شرایط دریایی و آبی با نوسانات سطح دریا و تغییرات محیطی ایجاد شده‌اند. بررسی این رسوبات نشان می‌دهد که منطقه در طول زمان دچار تغییرات عمده‌ای در محیط‌های رسوبی بوده است (نگوین و همکاران، ۲۰۱۲). حضور سنگ‌های آذرین مانند گرانیت‌ها و دیوریت‌ها نشان‌دهنده فعالیت‌های آتش‌فشانی در دوره‌های گذشته است. این سنگ‌ها به‌ویژه

۱-۳ مدل اول

مدل اول: برگرفته از مدل سرعت حوضه کولانگ

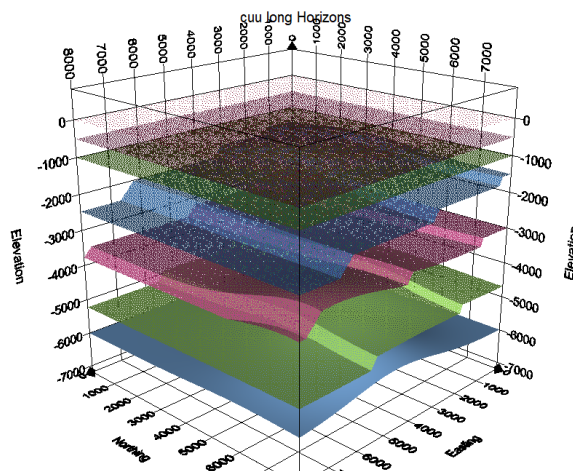
حوضه کولانگ در جنوب شرقی ویتنام، در مرز بین قاره‌ای و دریایی قرار دارد و تحت تأثیر فرایندهای تکتونیکی پیچیده‌ای قرار دارد که تحت تأثیر تعاملات مختلف صفحات زمین‌ساختی قرار دارد. این منطقه از جمله مناطقی است که هم‌زمان با روندهای تکاملی صفحه‌ای و حرکات گسل‌ها، تغییرات عمده‌ای در ساختارهای زمین‌شناسی خود داشته است. فرآیندهای فشاری و کششی: در اثر تعامل میان صفحه‌های اوراسیا و فلیپین، منطقه کولانگ دچار تغییرات فشاری و کششی شده است. این تعاملات موجب ایجاد چین‌خوردگی‌ها، گسل‌ها و سایر ساختارهای تکتونیکی در سطح منطقه شده‌اند که نقش اساسی در شکل‌گیری این حوضه ایفا کرده است. (نگوین و همکاران، ۲۰۱۵) و فرایندهای آتش‌فشانی‌ها و سنگ‌های آذرین: علاوه بر فرآیندهای گسلی، فعالیت‌های

گسل از دوران میان‌زیستی تاکنون فعال بوده و نشان‌دهنده روند فشاری تکتونیک در این منطقه است (فم و همکاران، ۲۰۱۷). و گسل کون سون که این گسل نیز از نوع گسل فشاری است و در بخش جنوب غربی حوضه کو لانگ قرار دارد. گسل کون سون به‌ویژه در ایجاد حرکت‌های عمودی و فعالیت‌های لرزه‌ای در منطقه تأثیرگذار است. (نگوین، ۲۰۱۳) در مطالعه حاضر برای این مدل تنها از مدل سرعت این حوضه استفاده شده است. مدل به دست آمده، یک مدل با هفت افق بازتابنده می‌باشد و دربرگیرنده چندین گسل نسبتاً بزرگ است. مدل مذکور دارای شیب ملایم و به طور کلی تغییرات سرعت افقی زیادی نیست.

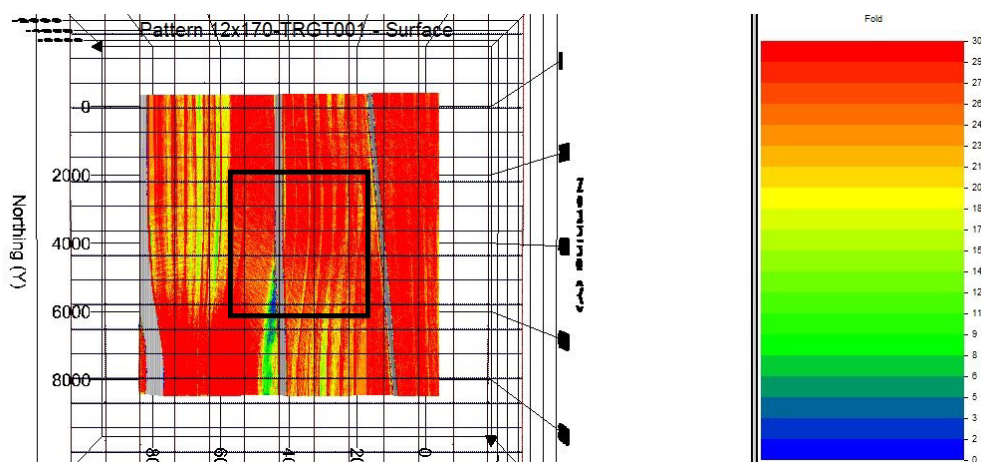
هدف، عمق ۳ تا ۵ کیلومتری و مساحتی 4×4 کیلومتری است، همچنین تعداد فولد بهینه برای تصویر سازی، ۱۵ تا ۳۰ در نظر گرفته شده است. تمام محاسبات به منظور تعیین مناسب ترین پارامترها برای مشخص کردن این لایه‌ها و گسل‌های آن به شرح جدول (۲) انجام شده است.

شکل (۶) نشان می‌دهد که عمده مساحت هدف از مقدار فولد ۱۵ که فولد حداقلی است فولد بالاتری دارد. قسمت آبی رنگ نشان دهنده فولد پایین است. این منطقه نسبتاً کوچک، شیب لایه شدید تری نسبت به سایر مناطق دارد.

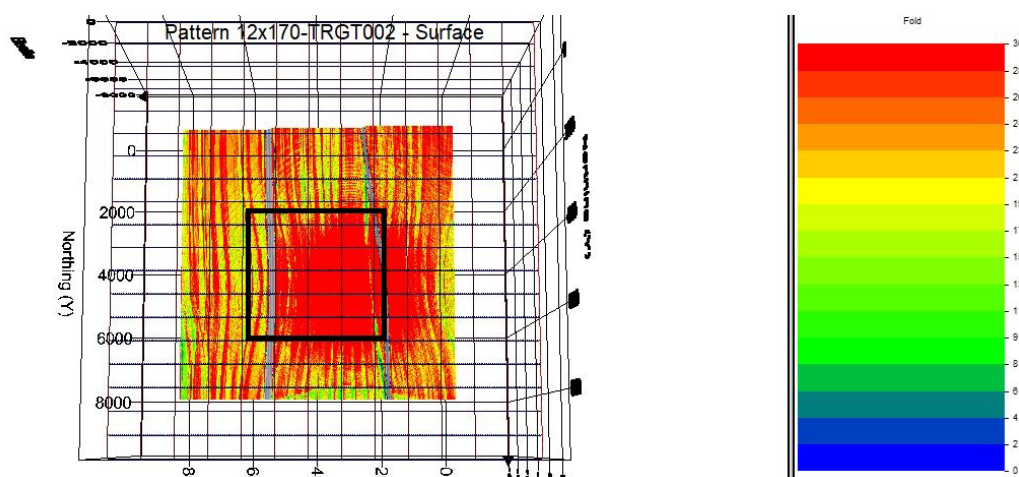
در نواحی مرزی بین گسل‌ها و نواحی تکتونیک جالب توجه می‌کنند و نقش مهمی در درک فرآیندهای تکتونیک و تبلور مواد در سطح پوسته قاره‌ای دارند (فم و همکاران، ۲۰۱۴). و همچنین در بعضی از نواحی، به‌ویژه در امتداد گسل‌ها، سنگ‌های متامورفیک مانند شیست‌ها و گنایس‌ها دیده می‌شوند که نشان‌دهنده تغییرات فشاری و دمایی بالا و همچنین فرایندهای متامورفیسم در گذشته‌های دور هستند (نگوین و همکاران، ۲۰۱۵). گسل‌ها در حوضه کو لانگ نقشی حیاتی در شکل‌گیری ساختارهای زمین‌شناسی و ایجاد تغییرات تکتونیک دارند. این گسل‌ها علاوه بر تأثیرات بر ساختارهای سطحی، در فعالیت‌های لرزه‌ای و زلزله‌های منطقه‌ای نیز نقش دارند. از جمله مهمترین این گسل‌ها می‌توان به سه گسل عمده اشاره داشت. گسل تم کوآن: این گسل یکی از گسل‌های اصلی منطقه است که به‌صورت یک گسل کششی-لغزشی در ناحیه جنوب شرقی ویتنام امتداد دارد. این گسل از دوره‌های دیرینه‌زیستی فعال بوده و نقش مهمی در تشکیل و توسعه حوضه کو لانگ ایفا کرده است. (ترانگ و همکاران ۲۰۱۰) گسل وین هی: گسل وین هی یک گسل فشاری است که عمدتاً موجب ایجاد چین‌ها و فشردگی لایه‌های سنگی در شرق حوضه کو لانگ شده است. این



شکل ۵. مدل اول (حوضه کو لانگ)، هفت لایه، شیب ملایم، و دربرگیرنده گسل‌های بزرگ.



شکل ۶. بازتابنده پنجم، هدف با مستطیل مشکی مشخص شده است (منطقه‌ای که نیاز است به فولد کامل حداقل ۱۵ برسد).



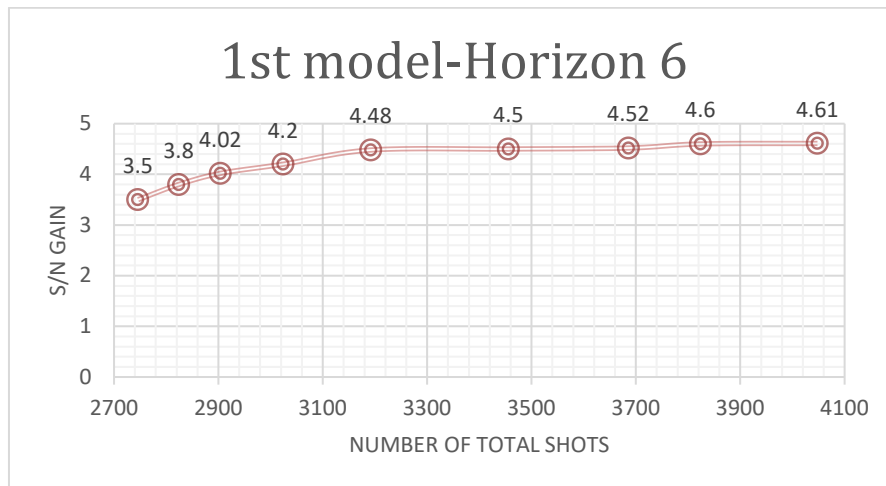
شکل ۷. بازتابنده ششم، هدف با مستطیل مشکی مشخص شده است (منطقه‌ای که نیاز است به فولد کامل حداقل ۱۵ برسد).

نزدیک کردن خطوط چشمه، محل چشمه و یا افزایش وسعت منطقه برداشت داده‌ها باشد، نسبت دامنه سیگنال به نوفه را به صورت محدود افزایش می‌دهد اما این افزایش نسبتاً جزئی، موجب افزایش تعداد چشمه‌ها و در نتیجه افزایش هزینه‌ها را نمی‌تواند توجیه کند.

در جداول (۲)، (۴) و (۶) مقایسه هزینه، افزایش نسبت سیگنال به نوفه و تعداد چشمه، بر اساس تعرفه برای هر انفجار برابر ۷۵۰۰ دلار در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول (۲) و شکل (۸)، مشخص است که در طراحی‌های دارای بیش از ۳۲۰۰ چشمه، نسبت سیگنال به نوفه افزایش‌های جزئی را تجربه می‌کند.

شکل ۶ و ۷ نشان می‌دهد که عمده مساحت هدف از مقدار فولد ۱۵ که فولد مناسب حداقلی است فولد بالاتری دارد. قسمت آبی رنگ نشان دهنده فولد پایین است. این منطقه نسبتاً کوچک، شیب لایه شدید تری نسبت به سایر مناطق دارد. منطقه هدف و مرز گسل‌ها به خوبی با فولد مناسب تصویر شده‌اند.

شکل ۸، نمودار بین طراحی‌ها با پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد. در جدول ۲، مقایسه بین تعداد فولد، چشمه و هزینه آمده است. در جدول ۳، پارامترهای ذکر شده، افزایش سیگنال به نوفه برابر با ۴/۴۸ ارائه شده است. افزایش بیشتر تعداد چشمه‌ها که خود می‌تواند حاصل



شکل ۸. نمودار افزایش نسبت سیگنال به نوفه بر اساس فولد به تعداد کل چشمه‌های لرزه‌ای. شیب خط ۳/۵ تا ۴/۴۸ ، نسبت به ۴/۴۸ تا ۴/۶۱ بزرگتر است، به عبارت دیگر، افزایش نسبت سیگنال به نویز در بازه ۳/۵ تا ۴/۴۸ بسیار بالاتر است. در لازم به ذکر است که این نتایج برای Bin های منطقه هدف در لایه‌های دارای شیب زیاد، به دست آمده است.

جدول ۲) مقایسه هزینه بین افزایش نسبت سیگنال به نوفه و چشمه با توجه به شکل ۸ افزایش تعداد چشمه‌ها بیشتر از ۳۲۰۰، چندان باعث افزایش کیفیت داده‌ها (نسبت سیگنال به نویز) نخواهد شد یا این افزایش اندک افزایش هزینه‌ها را توجیه نمی‌کند.

افزایش نسبت سیگنال به نوفه	تعداد چشمه	هزینه به دلار
۴/۴۸	۳۲۰۰	۲۴۰۰۰۰۰۰
۴/۵۰	۳۴۶۰	۲۵۹۵۰۰۰
۴/۵۲	۳۶۹۰	۲۷۶۷۵۰۰۰
۴/۶۰	۳۸۲۰	۲۸۶۵۰۰۰۰
۴/۶۱	۴۰۵۰	۳۰۳۷۵۰۰۰

جدول ۳. پارامترهای بهینه برای مدل اول. نتایج حاصل از فلوجارت شکل ۴، بازه‌ای برای پارامترها تعیین می‌کند، کمیت‌های مختلفی در این بازه مورد آزمایش قرار می‌گیرند، بهترین کمیت‌هایی که تعادلی مناسب بین هزینه و فولد ایجاد می‌کند، در این جدول معرفی شده‌اند.

فواصل خطوط چشمه‌ها	۸۵۰ متر	۵	فولد در جهت خطوط گیرنده
فواصل چشمه‌ها	۵۰ متر	۶	فولد در جهت خطوط چشمه
نسبت ابعاد پیچ	۸۵	۳۰	فولد کلی
خطوط پیچ	۱۲	۱۰۰۵ متر	حداقل Offset
تعداد ایستگاه‌ها در هر خط	۱۷۰	۵۵۰۰ متر	حداکثر Offset
کانال‌های فعال	۲۰۴۰	۲۵×۲۵ متر	مساحت Bin
طول منطقه برداشت	۱۱۵۰۰ متر	۶۰۰ متر	فواصل خطوط گیرنده‌ها
عرض منطقه برداشت	۱۱۵۰۰ متر	۵۰ متر	فواصل گیرنده‌ها

۲-۳ مدل دوم

مدل دوم: برگرفته از حوضه جانگار

این مدل با الگوگیری از حوضه جانگار واقع در غرب چین ساخته شده است. حوضه رسوبی جانگار یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین حوضه‌های رسوبی در شمال غرب

چین است که در منطقه خودمختار سین‌کیانگ واقع شده است. این حوضه در بخش شمالی رشته‌کوه‌های تیان‌شان، و در جنوب رشته‌کوه آلتائی قرار دارد و از لحاظ زمین‌شناسی، ساختاری پیچیده و چندفازی دارد که بازتاب‌دهنده تاریخچه بلندمدت برخوردی قاره‌ای،

فعالیت‌های تکتونیک و رسوب‌گذاری‌های گسترده در دوران‌های مختلف زمین‌شناسی است. (ویندلی و همکاران، ۱۹۹۰ و کارول و همکاران، ۱۹۹۵) ساختار کلی حوضه جانگار به صورت یک حوضه بین‌کوهی است که از نظر زمین‌ساختی در محل برخورد صفحه قزاقستان با صفحه سبیری و برخوردهای بعدی تیان‌شان قرار دارد. این حوضه بخشی از کمربند تصادمی آسیای میانه محسوب می‌شود. در نتیجه‌ی برخوردهای پالیوژئوئیک، سیستم‌های گسلی متعدد با جهت‌گیری‌های مختلف در این حوضه شکل گرفته‌اند. (آلن و همکاران ۱۹۹۳) سوبات موجود در این حوضه عمدتاً از دوران پالیوژئوئیک تا سنوزوئیک گسترده شده‌اند. بخش اعظم توالی‌های رسوبی شامل نهشته‌های دریایی کم‌ژرفا، دلتایی، رودخانه‌ای و فلاتی است. نهشته‌های دوره تریاس تا کرتاسه اهمیت زیادی در مطالعات نفت و گاز داشته‌اند، زیرا این نهشته‌ها حاوی منابع هیدروکربوری اقتصادی هستند. (گراهام و همکاران، ۱۹۹۰) سیستم‌های گسلی موجود در حوضه جانگار نقش مهمی در شکل‌گیری ساختارهای زیرسطحی و کنترل بر توزیع سنگ‌های مخزن، منشأ و درزگیر دارند. این گسل‌ها را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد: گسل‌های تراستی که عمدتاً مربوط به فازهای فشارشی ناشی از برخورد قاره‌ای بین قزاقستان و سبیری هستند. این گسل‌ها معمولاً با ساختارهای چین‌خورده همراهند و در شمال و جنوب حوضه قابل مشاهده‌اند. (ژائو و همکاران، ۱۹۹۶) و گسل‌های امتدادلغز به‌ویژه در بخش‌های مرکزی و شرقی حوضه دیده می‌شوند و در راستای شمال غرب-جنوب شرق جهت‌گیری دارند. این گسل‌ها اغلب موجب جابجایی بلوک‌ها و پیچیدگی ساختار زیرسطحی شده‌اند. (یانگ و همکاران، ۲۰۰۷)

به دلیل وجود مخازن هیدروکربنی قابل توجه، حوضه جانگار یکی از نواحی کلیدی در صنعت نفت و گاز چین محسوب می‌شود. در طی دهه‌های اخیر، مطالعات لرزه‌ای،

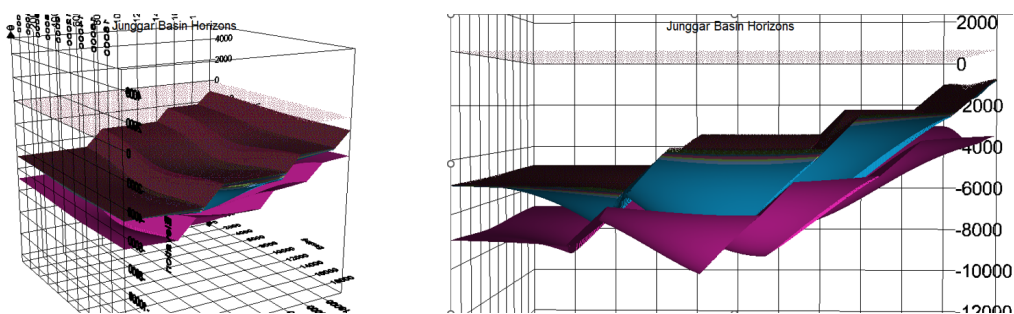
چاه‌نگاری و مدل‌سازی زمین‌شناسی سه‌بعدی جهت شناسایی ساختارهای زیرسطحی انجام شده است که نشان‌دهنده تأثیر عمده گسل‌ها در تمرکز و مهاجرت هیدروکربن‌ها می‌باشد. (ژائو و همکاران، ۲۰۰۵) به دلیل وجود مخازن هیدروکربنی قابل توجه، حوضه جانگار یکی از نواحی کلیدی در صنعت نفت و گاز چین محسوب می‌شود. در طی دهه‌های اخیر، مطالعات لرزه‌ای، چاه‌نگاری و مدل‌سازی زمین‌شناسی سه‌بعدی جهت شناسایی ساختارهای زیرسطحی انجام شده است که نشان‌دهنده تأثیر عمده گسل‌ها در تمرکز و مهاجرت هیدروکربن‌ها می‌باشد. (ژائو و همکاران، ۲۰۰۵)

این مدل شامل چالش‌های اصلی مانند شیب بسیار زیاد لایه‌ها و همچنین گسل‌های بزرگ می‌باشد. هدف، عمق ۳ تا ۶ کیلومتری و مساحتی 6×6 کیلومتری در نظر گرفته شده است.

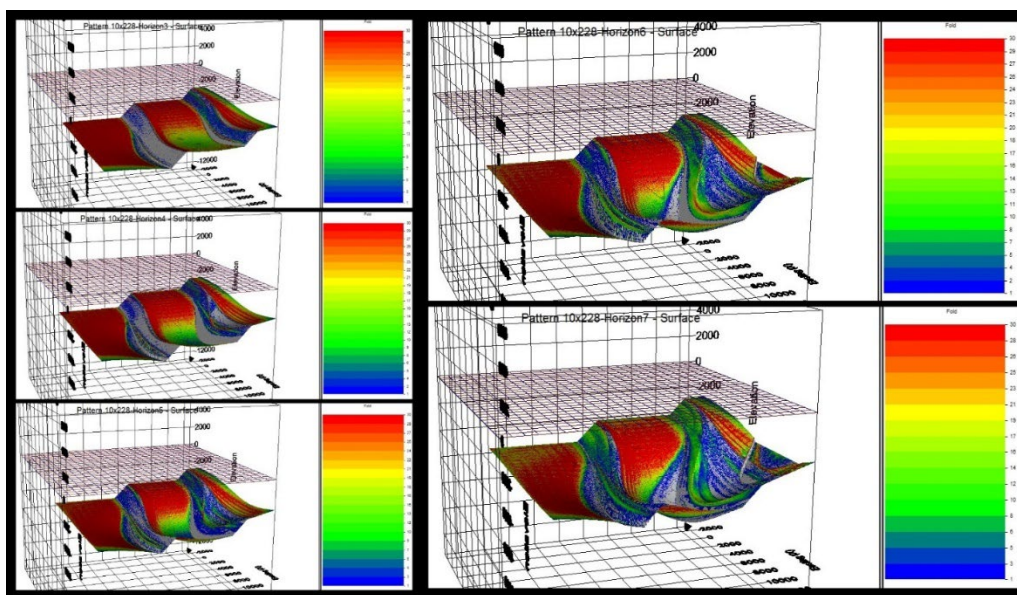
مدل نشان داده شده در شکل (۹) بسیار پیچیده تر از مدل اول است، شیب‌های زیاد و گسل‌ها محدودیت‌های بیشتری به عملیات تحمیل می‌کند، در نتیجه در مقایسه با مدل اول، فولدهای بسیار کم با وجود تعداد گیرنده‌های بالا، فاصله خطوط چشمه کم و ابعاد منطقه برداشت بسیار بزرگ قابل انتظار است.

در شکل (۱۰) افق‌های بازتابنده برای مدل دوم تصویر شده‌اند. با افزایش عمق، شیب لایه‌ها و پیچیدگی گسل‌ها افزایش یافته و چالش‌ها برای رسیدن به فولد مناسب افزایش می‌یابد. در افق‌های ۶ و ۷ تعداد Bin‌هایی که فولد کمتر از ۱۵ دارند، نسبت به سه افق بالایی به شدت افزایش یافته است.

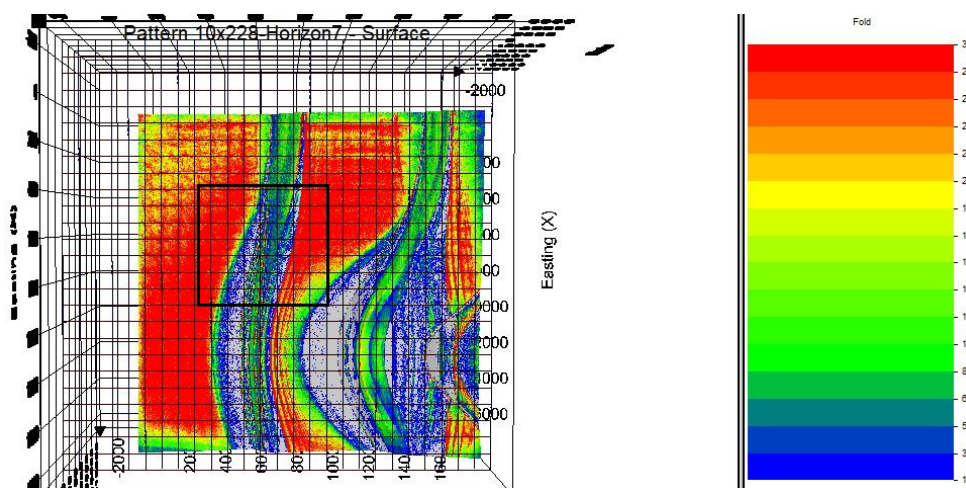
شکل (۱۱) لایه هفتم را نشان می‌دهد که ضعیف‌ترین فولد را داشته است، با این وجود بازتاب‌های خوبی در نواحی اطراف گسل مشاهده می‌شود، مرزهای گسل نیز (خط نازک با فولد سبز) تصویر شده‌اند.



شکل ۹. مدل دوم، حوضه جانگار.



شکل ۱۰. نتایج مربوط به مدل دوم، بازتابنده های ۳ تا ۷. با افزایش عمق پیچیدگی لایه ها افزایش می یابد به طوری که در بسیاری از نقاط لایه های پایینی، فولد زیر ۱۵ مشاهده می شود.

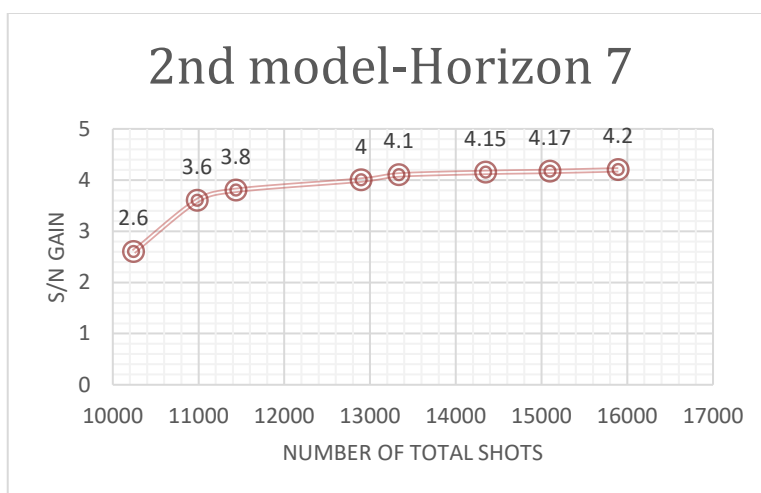


شکل ۱۱. زاویه دید از بالا، منطقه هدف، لایه هفتم (منطقه‌ای که نیاز است به فولد کامل حداقل ۱۵ برسد).

به صورت محدود افزایش می‌دهد اما این افزایش نسبتاً جزئی، موجب افزایش تعداد چشمه‌ها و در نتیجه افزایش هزینه‌ها را نمی‌تواند توجیه کند.

با توجه به شکل (۱۲) و جدول (۴)، افزایش نسبت سیگنال به نوفه بیشتر از $4/10$ بسیار محدود است و افزایش هزینه را توجیه نمی‌کند.

شکل ۱۲، نمودار بین طراحی‌ها با پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد. در جدول ۴، مقایسه بین تعداد فولد، چشمه و هزینه آمده است. در جدول ۵، استفاده پارامترهای ذکر شده افزایش سیگنال به نوفه را به $4/41$ می‌رساند. افزایش بیشتر تعداد چشمه‌ها که خود می‌تواند حاصل نزدیک کردن خطوط چشمه، محل چشمه و یا افزایش وسعت منطقه برداشت داده‌ها باشد، نسبت دامنه سیگنال به نوفه را



شکل ۱۲. نمودار افزایش نسبت سیگنال به نوفه بر اساس فولد به تعداد کل چشمه‌های لرزه‌ای برای مدل دوم، پارامترهای بهینه ذکر شده در جدول ۵، افزایش سیگنال به نوفه برابر با $4/1$ به دست آمده است.

جدول ۴. مقایسه هزینه بین افزایش نسبت سیگنال به نوفه و چشمه با توجه به شکل ۱۲. افزایش تعداد چشمه‌ها بیشتر از ۱۳۲۸۰، چندان باعث افزایش کیفیت داده‌ها (نسبت سیگنال به نویز) نخواهد شد یا این افزایش اندک افزایش هزینه‌ها را توجیه نمی‌کند.

هزینه به دلار	تعداد چشمه	افزایش نسبت سیگنال به نوفه
۹۹۶۰۰۰۰۰	۱۳۲۸۰	$4/10$
۱۰۷۱۰۰۰۰۰	۱۴۲۸۰	$4/15$
۱۱۳۲۵۰۰۰۰	۱۵۱۰۰	$4/17$
۱۱۶۸۵۰۰۰۰	۱۵۵۸۰	$4/20$

جدول ۵. پارامترهای بهینه برای مدل دوم. نتایج حاصل از فلوچارت شکل ۴، بازه‌ای برای پارامترها تعیین می‌کند، کمیت‌های مختلفی در این بازه مورد آزمایش قرار می‌گیرند، بهترین کمیت‌هایی که تعادلی مناسب بین هزینه و فولد ایجاد می‌کند، در این جدول معرفی شده‌اند.

۷۶۰ متر	فواصل خطوط چشمه‌ها	۶	فولد در جهت خطوط گیرنده
۴۰ متر	فواصل چشمه‌ها	۵	فولد در جهت خطوط چشمه
۸۵	نسبت ابعاد پیچ	۳۰	فولد کلی
۱۰	خطوط پیچ	حد اقل Offset ۱۰۴۶ متر	
۲۲۸	تعداد ایستگاه‌ها در هر خط	حد اکثر Offset ۶۰۰۰ متر	
۲۲۸۰	کانال‌های فعال	مساحت Bin 20×20 متر مربع	
۲۰۰۰۰ متر	طول منطقه برداشت	۷۶۰ متر	فواصل خطوط گیرنده‌ها
۲۰۰۰۰ متر	عرض منطقه برداشت	۴۰ متر	فواصل گیرنده‌ها

۳-۳ مدل سوم

مدل سوم: برگرفته از مدل سرعت گنبد نمکی در خلیج مکزیک

هدف از این مدل بررسی تاثیرات سرعت های نامعمول موج در برخی ساختارها مانند گنبد نمکی، بر روی پارامترهای عملیات لرزه‌ای است.

خلیج مکزیک یکی از حوضه‌های رسوبی کلاسیک جهان است که به دلیل وجود ساختارهای نمکی پیچیده، پتانسیل بالایی برای ذخایر نفت و گاز دارد. در این حوضه، گنبد‌های نمکی و دیگر اشکال دی‌پایریسم نمکی (مانند دیوارهای نمکی، بالشتک‌ها و صفحات نمکی) نقش اساسی در تکامل ساختاری و چینه‌نگاری دارند. (جکسون و تابلوت ۱۹۸۶) این گنبد‌ها موجب پیدایش سیستم‌های گسلی پیچیده و مؤثر در مهاجرت و تمرکز هیدروکربن شده‌اند. حوضه رسوبی خلیج مکزیک در دوران مزوزوئیک در نتیجه بازشدگی اقیانوس اطلس و جدایش قاره‌ها شکل گرفت. لایه‌های ضخیم نمک ژوراسیک، که در مراحل ابتدایی حوضه نهشته شدند، امروزه پایه بسیاری از ساختارهای نمکی هستند. (سالوادور، ۱۹۸۷) رسوبات بعدی از کرتاسه تا کواترنر به صورت متوالی بر روی این لایه‌های نمکی انباشته شده‌اند.

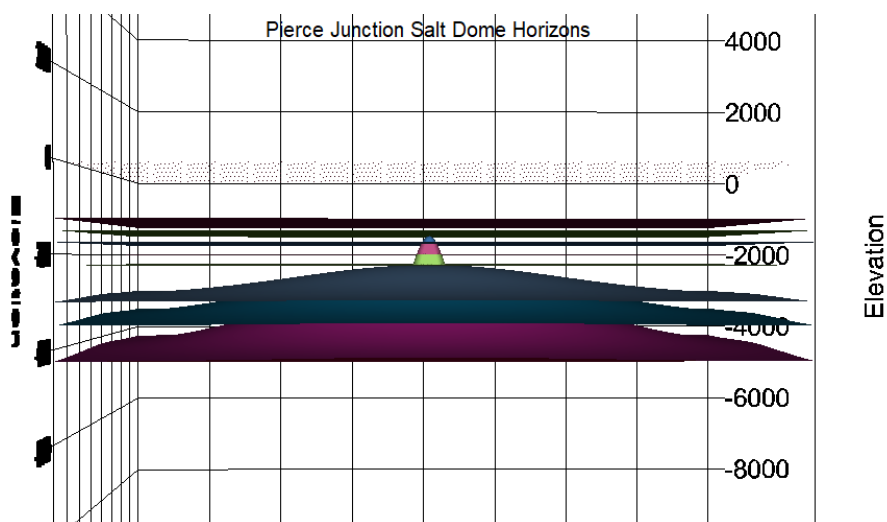
دی‌پایریسم نمکی و سازوکار گنبد‌های نمکی

نمک یک سنگ داکتیل و با چگالی کم است که می‌تواند تحت فشارهای لایه‌های بالایی بالا آمده و ساختارهای دی‌پایری ایجاد کند. در خلیج مکزیک، این حرکت نمک به دلیل بارگذاری رسوبات جوان‌تر و تراکم آنها آغاز شده و منجر به تشکیل اشکال متنوع نمکی شده است، از جمله: گنبد‌های نمکی، دیوارهای نمکی، بالشتک‌های نمکی و صفحات افقی نمک. این ساختارها باعث خم‌شدگی لایه‌های اطراف، گسل‌زایی و تشکیل تله‌های چینه‌ای و ساختمانی برای نفت و گاز می‌شوند. (هودک و جکسون،

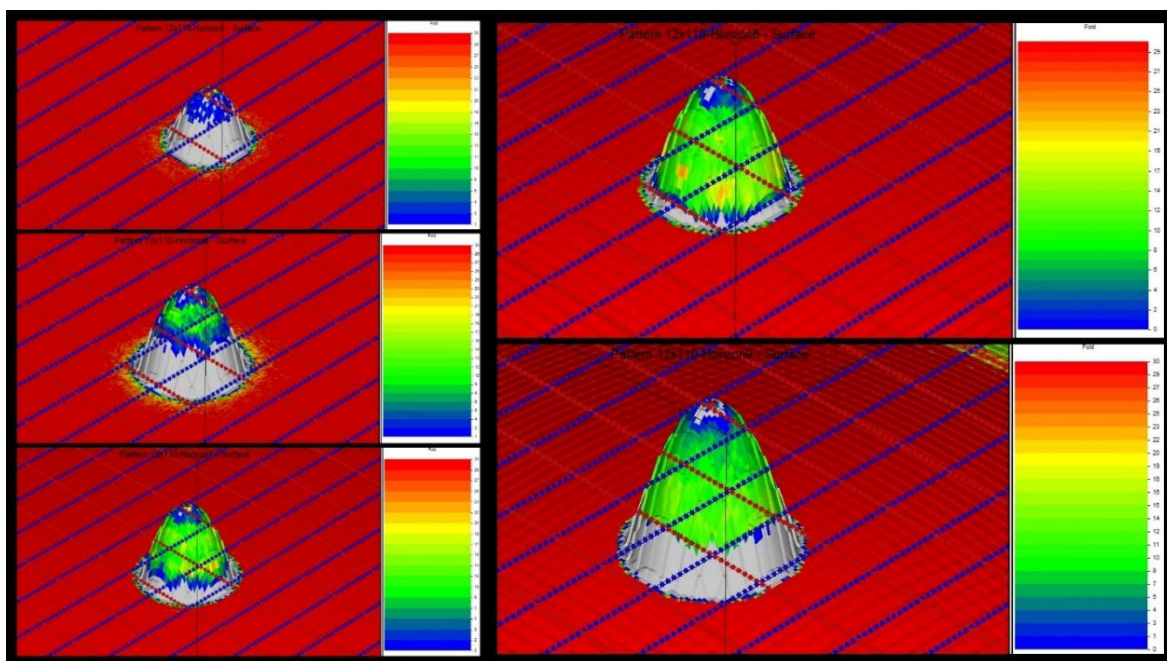
۲۰۰۷) سیستم‌های گسلی مرتبط با نمک: حرکت نمک موجب گسترش گسل‌های نرمال، معکوس و گسل‌های صفحه‌ای می‌شود. این گسل‌ها در چندین سیستم دسته‌بندی می‌شوند: گسل‌های رشد که هم‌زمان با رسوب‌گذاری ایجاد شده و معمولاً در حاشیه گنبد‌ها یا دیوارهای نمکی رخ می‌دهند. گسل‌های حلقوی گسل‌هایی که در اطراف گنبد‌ها و به صورت دایره‌ای ایجاد می‌شوند، معمولاً نرمال یا امتدادلغز هستند. گسل‌های حرکتی یا واکنش به مهاجرت نمک که ناشی از حرکت نمک به سمت بالا و عکس‌العمل سنگ‌های پوششی است. و گسل‌های کنده‌شده در لایه‌های پوششی در اثر جداشدگی در لایه‌های رسوبی نرم‌تر یا در تماس با نمک ایجاد می‌شوند. (روون و همکاران، ۲۰۰۴) گنبد‌های نمکی و گسل‌های اطراف آن محیط بسیار مناسبی برای تشکیل تله‌های نفتی و گازی هستند. سنگ مخزن معمولاً در لایه‌های ماسه‌ای اطراف گنبد‌های نمکی قرار گرفته و گسل‌ها مسیر مناسبی برای مهاجرت نفت از سنگ منشأ به درون تله‌ها فراهم می‌کنند. بسیاری از میدان‌های نفتی بزرگ مانند میدان تبرزک و میدان بولت در اطراف ساختارهای نمکی قرار دارند (ویمر و همکاران، ۱۹۹۸)

این مدل با الگوگیری از گنبد‌های نمکی در خلیج مکزیک ساخته شده است. لایه‌های شکاف خورده توسط گنبد‌های نمکی و مدل سرعت قابل پیش‌بینی و ساده. هدف مورد مطالعه، عمق ۲ تا ۳ کیلومتری و مساحتی برابر با ۴×۴ کیلومتری با مرکزیت گنبد نمکی در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱۴، افق‌های کم شیب و دارای شیب ملایم در هدف فولد کامل را دارند (در برخی قسمت‌ها بالای ۳۰ فولد). مرز گنبد نمکی با افق‌های مختلف تصویر شده‌اند و به طور متوسط فولد بین ۱۲ تا ۱۶ دارند. اگر حداقل تعداد فولد ۱۵ در نظر گرفته شود، این طراحی برای این مدل کافی است.



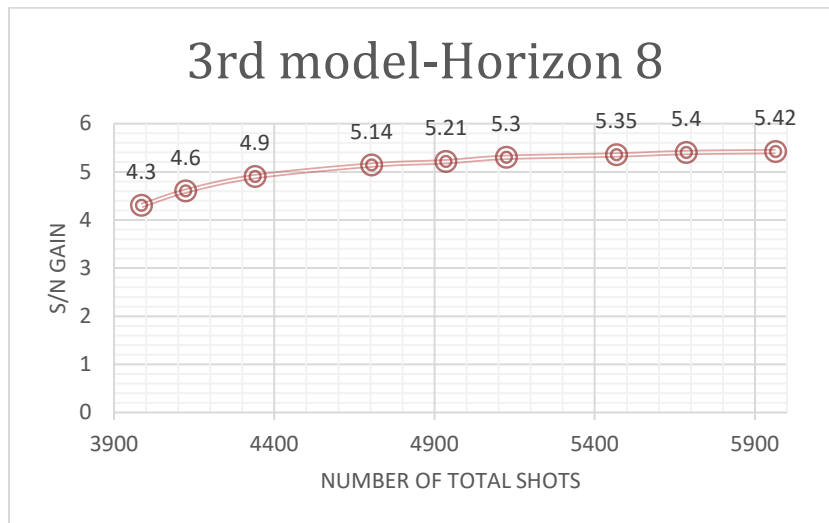
شکل ۱۳. مدل سوم، گنبد نمکی پیرس جانکشن.



شکل ۱۴. نتایج مربوط به مدل سوم، بازتابنده های ۵ تا ۹. مرز گنبد نمکی در بازتاب پرتو از لایه های پایینی، با فولد حداقل ۱۵ تصویر شده است. در بازتابنده های بالایی، نقاط کم عمق تر گنبد نمکی تصویر نشده است، که این نتیجه ای قابل انتظار است زیرا طراحی عملیات برداشت لرزه ای برای اعماق زمین (۲ تا ۳ کیلومتری) انجام شده است.

افزایش سیگنال به نوفه برابر با ۵/۱۴ ارائه می دهد. در نتیجه ی افزایش بیشتر تعداد چشمه ها، مقادیر داده های جدید، بسیار اندک خواهد بود.

شکل (۱۵)، مقایسه ای بین طراحی ها با پارامترهای را نشان می دهد. در جدول ۶، مقایسه بین تعداد فولد، چشمه و هزینه آمده است. در جدول (۷)، پارامترهای ذکر شده،



شکل ۱۵. نمودار افزایش نسبت دامنه سیگنال به نوفه بر اساس شماره فولد به تعداد کل چشمه‌های لرزهای برای مدل سوم. پارامترهای بهینه ذکر شده در جدول ۷، افزایش نسبت دامنه سیگنال به نوفه برابر با ۵/۱۴ به دست می‌دهد.

جدول ۶. مقایسه هزینه بین افزایش نسبت سیگنال به نوفه و چشمه. افزایش تعداد چشمه‌ها بیشتر از ۴۷۰۰، چندان باعث افزایش کیفیت داده‌ها (نسبت سیگنال به نویز) نخواهد شد یا این افزایش اندک افزایش هزینه‌ها را توجیه نمی‌کند.

افزایش نسبت سیگنال به نوفه	تعداد چشمه	هزینه به دلار
۵/۱۴	۴۷۰۰	۳۵۲۵۰۰۰۰
۵/۲۱	۴۹۲۰	۳۶۹۰۰۰۰۰
۵/۳۰	۵۱۲۰	۳۸۴۰۰۰۰۰
۵/۳۵	۵۴۸۰	۴۱۱۰۰۰۰۰
۵/۴۰	۵۶۸۰	۴۲۶۰۰۰۰۰
۵/۴۲	۵۹۸۰	۴۴۸۵۰۰۰۰

جدول ۷. پارامترهای بهینه برای مدل سوم. نتایج حاصل از فلوچارت شکل ۴، بازه‌ای برای پارامترها تعیین می‌کند، کمیت‌های مختلفی در این بازه مورد آزمایش قرار می‌گیرند، بهترین کمیت‌هایی که تعادلی مناسب بین هزینه و فولد ایجاد می‌کند، در این جدول معرفی شده‌اند.

۴۴۰ متر	فواصل خطوط چشمه‌ها	۵	فولد در جهت خطوط گیرنده
۴۰ متر	فواصل چشمه‌ها	۶	فولد در جهت خطوط چشمه
۸۵	نسبت ابعاد پیچ	۳۰	فولد کلی
۱۲	خطوط پیچ	۵۱۶ متر	حداقل Offset
۱۱۰	تعداد ایستگاه‌ها در هر خط	۳۰۰۰ متر	حداکثر Offset
۱۳۲۰	کانال‌های فعال	۲۰×۲۰ متر	مساحت Bin
۹۰۰۰ متر	طول منطقه برداشت	۳۲۰ متر	فواصل خطوط گیرنده‌ها
۹۰۰۰ متر	عرض منطقه برداشت	۴۰ متر	فواصل گیرنده‌ها

۴ بحث

است که ضروری است که پارامترهای عملیات با حساسیت

بالایی تعیین شود. در حال حاضر در ایران به طور معمول

با توجه به هزینه‌های بالای روش لرزهای-بازتابی، واضح

در عمق، بزرگتر کردن ابعاد منطقه برداشت ممکن است مناسب ترین روش ممکن نباشد.

• با بررسی نتایج برداشت های مختلف با ابعاد مختلف مشخص شد که یکی از بزرگترین عوامل در تعیین ابعاد برداشت، نه اندازه هدف بلکه شیب رویداد هاست. در مقایسه دو مدل اول و دوم که عمق هدف مشابهی دارند، مدل اول که در آن شیب افقها ملایم است، مساحت برداشت تقریباً $8/2$ برابر مساحت هدف می باشد، اما در مدل دوم که شیب لایه ها شدید است این عدد به $11/1$ برابر مساحت هدف رسیده است، ابعاد برداشت متناسب با اندازه هدف افزایش می یابد، اما شیب رویداد ابعاد برداشت را به صورت تصاعدی افزایش می دهد. در مدل اول مساحت هدف برابر با 16 کیلومتر مربع و مساحت برداشت $132/25$ کیلومتر مربع است، در مدل دوم مساحت هدف 36 کیلومتر مربع می باشد اما مساحت برداشت به 400 کیلومتر مربع رسیده است، عمق اهداف مشابه است و هدف مدل دوم افزایش 20 کیلومتر مربعی نسبت به مدل اول دارد اما مساحت برداشت به دلیل شیب بالا در مدل دوم $267/5$ کیلومتر مربع نسبت به مدل اول افزایش یافته است. دلیل آنها واضح است، شیب به صورت ذاتی، عمده انرژی امواج را به نقاط با Offset بیشتر میفرستد، این مسئله در مورد گسل ها و نقاط "تیز" نیز صدق می کند، پدیده پراش انرژی را به هر طرف میفرستد از جمله نقاط دور دست، بنابراین تعداد بالای گسل و یا شیب های شدید، نیاز به این دارد که گیرنده ها طوری چیده شوند که حداقل درصد بالایی از انرژی دریافت شود.

• Bin ها با فولد پایین به صورت نواحی آبی رنگ در شکل ۱۰ قابل مشاهده است این نقاط با شیب نسبتاً بالا، فولد کمتری نسبت به فولد "کافی" (15 تا 30) دارند، دلیل آن زوایای بازتاب بسیار بزرگ نسبت به خط افق است. بسیاری از بازتاب ها دورتر از بیشینه Offset به سطح زمین می رسند و در شیب های شدیدتر اصلاً به سطح زمین نمی رسند. برای

طراحی پارامترها بر پایه الگوی orthogonal (مستطیلی) و با توجه به داده های برداشت های دو بعدی لرزه ای قبلی، چاه پیمایی انجام شده در قبل و همچنین بر اساس گزارش زمین شناسی منطقه تعیین می شود. چنین اطلاعاتی تنها محدودیت هایی تقریبی بر مسئله اعمال می کند، با اینکه انجام عملیات روش لرزه نگاری مرسوم معمولاً نتایج نسبتاً رضایت بخشی دارد اما لزوماً بهترین پارامترها را به لحاظ هزینه و زمان مورد توجه قرار نمی دهد. در این میان روابط ریاضی تنها بازه ای از مقادیر برای پارامترهای عملیات لرزه ای را تعیین می کنند. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق برای تعیین بهینه و دقیق تر پارامترهای طراحی، پیشنهاد می شود که ابتدا مدل زمین شناسی محدوده مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات موجود ساخته شود. نوفه های محیطی منطقه شناخته شده و داده های مصنوعی بازتابی بر اساس مدل اولیه تهیه شود. این داده ها مانند داده های واقعی پردازش شده و در نهایت تفسیر شوند. تعیین پارامترهای عملیات لرزه ای مطابق با داده های حاصل از بررسی نتیجه نهایی این روش، کمک می کند که دقت طراحی پارامترهای عملیات به شکل محسوسی افزایش یابد، انتظارات برای برداشت داده های واقعی تنظیم شده و در نهایت به کاهش هزینه ها منجر شود.

۵ نتیجه گیری و پیشنهادات

• رابطه ها یک بازه برای پارامترها تعیین می کنند، ولی همبستگی و رابطه تنگاتنگ افق های لرزه ای را در نظر نمی گیرند. در این تحقیق، موضوع مورد اشاره در بالا هنگام بررسی مدل دوم که افقها و گسل ها پیچیده بودند و تغییرات افقی سرعت بسیار شدید بود نمایان شد. برای بهتر مشخص شدن مرز گسل ها افزایش تراکم خطوط گیرنده ها و افزایش نسبتاً جزئی ابعاد منطقه برداشت توصیه می شود اما با در نظر گرفتن اندازه بسیار بزرگ عملیات حدود 400 کیلومتر مربع برای به تصویر در آوردن یک مساحت 36 کیلومتر مربعی

بازتاب موج را فراهم نمی‌کند، مخصوصاً اگر گیرنده و چشمه موج هر کدام در یک طرف گنبد نمکی قرار داشته باشند، به عبارت دیگر از مرزهای گنبد نمکی با وجود شیب زیاد، بازتاب کافی وجود دارد اما به محض ورود موج به داخل گنبد نمکی، اکثر انرژی موج تلف خواهد شد (به گیرنده نخواهد رسید) یا به عبارتی موج نقطه مناسب برای بازتاب پیدا نمی‌کند.

افزایش فولد به طور کلی افزایش تراکم خطوط گیرنده و چشمه، افزایش اندازه پیچ و یا ابعاد کلی منطقه برداشت توصیه می‌شود گرچه در مدل‌های پیچیده، مانند مدل دوم افزایش فولد در نقاطی، نزدیک به ناممکن است، یا حداقل منجر به داده جدیدی از نقطه مورد نظر نمی‌شود.

• در مدل سوم فولد روی مرز گنبد نمکی به طور پیوسته حداکثر به نصف فولد افقی‌های دیگر می‌رسد. گنبد نمکی به دلیل تباین بالای سرعت نسبت به افقی‌های همجوار، مسیر

منابع

- Allen, M. B., Windley, B. F., & Zhang, C. (1993). Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan. Geological Society, London, Special Publications, 210, 163–172.
- Behnam, H., Mokhtari, M., & Riahi, M. A., 2012. Designing 3D seismic operations in complex geological regions, illustrated by an example from an oil field in southern Iran. The 6th National Geology Conference was held at the Payam Noor University.
- Chaouch, A., & Mari, J. (2006). 3-D Land Seismic Surveys: Definition of Geophysical Parameters. Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 61, No. 5, 611–630.
- Cordsen, A., Galbraith, M., Bob Adrian Hardage, & Peirce, J. (2000). Planning land 3-D seismic surveys. Tulsa, Ok Society of Exploration Geophysicists.
- Carroll, A. R., Graham, S. A., Hendrix, M. S., Ying, D., & Zhou, D. (1995). Late Paleozoic tectonic amalgamation of northwestern China: Sedimentary record of the northern Tarim, northwestern Turpan, and southern Junggar basins. Geological Society of America Bulletin, 107, 571–594.
- Deb, K., & Tiwari, S. (2008). Omni-optimizer: A generic evolutionary algorithm for single and multi-objective optimization. European Journal of Operational Research, 185(3), 1062–1087. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.042>.
- Golos, E. M., Fang, H., & Van Der Hilst, R. D. (2020). Variations in seismic wave speed and VP/VS ratio in the North American Lithosphere. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 125(12). <https://doi.org/10.1029/2020jb020574>
- Graham, S. A., Hendrix, M. S., Johnson, C. L., Badarch, G., & Webb, L. E. (1990). Sedimentary record and tectonic implications of Mesozoic rifting in the southeastern Junggar Basin, northwestern China. Geological Society of America Bulletin, 102, 1179–1192.
- Harith, T. (1998). New Methods in Shallow Seismic Reflection - Enlighten Theses. Gla.ac.uk. <https://theses.gla.ac.uk/75382/1/13815565>
- Hudec, M. R., & Jackson, M. P. A. (2007). Terra infirma: Understanding salt tectonics. Earth-Science Reviews, 82, 1–28.
- Jackson, M. P. A., & Talbot, C. J. (1986). External shapes, strain rates, and dynamics of salt structures. Geological Society of America Bulletin, 97, 305–323.
- Landrø, M., Puigdefabregas, C., & Arntsen, B. (2011). Anisotropy in the salt outcrop at Cardona, Catalonia – implications for seismic imaging. First Break, 29(8). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2011022>
- Liner, C. L., Underwood, W. D., & Gobeli, R. (1999). 3-D seismic survey design as an optimization problem. The Leading Edge, 18(9), 1054–1060. <https://doi.org/10.1190/1.1438430>
- Morrice, D. J., Kenyon, A. S., & Beckett, C. J. (2001). Optimizing operations in 3-D land seismic surveys. Geophysics, 66(6), 1818–1826. <https://doi.org/10.1190/1.1487124>
- Nguyen, T. M., et al. (2012). Tectonic Evolution of Southeast Vietnam: A Review of Geological Studies. Journal of Southeast Asian Geology, 45(3), 134–148.
- Nguyen, L. T. (2013). Faulting and Seismicity in

- Southeast Vietnam: Implications for Earthquake Hazard Assessment. Geological Society of Vietnam, 28(1), 88-105.
- Pegah, E., Baban M. Y., & Riahi, M. A., 2007. Design of the stacking receiver array and its impact on data quality presented at the Second Iranian Petroleum Engineering Congress.
- Pham, T. K., et al. (2014). Metamorphic and Magmatic Rocks of the Co Lang Basin: Implications for Regional Tectonics. *Earth and Planetary Science Letters*, 78(2), 210-223.
- Pham, H. T., et al. (2017). The Vinh Hy Fault and Its Contribution to the Structural Development of the Co Lang Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61, 53-62.
- Pham, M. T., et al. (2018). Seismic Activity in the Co Lang Basin: Regional Seismic Hazard Analysis. *International Journal of Earth Sciences*, 35(4), 205-219.
- Rowan, M. G., Jackson, M. P. A., & Trudgill, B. D. (2004). Salt-related fault families and fault welds in the northern Gulf of Mexico. *AAPG Bulletin*, 88, 1411-1432.
- Tan, M. T., Ha, M. T., Marfurt, K. J., Hieu, N. T., & Hanh, N. T. M. (2016). Enhancement of seismic data processing and interpretation of fracture zones on the upper part of granitic basement in Cuu Long Basin, Vietnam. *Acta Geophysica*, 64(6), 2214-2231. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0082>
- Truong, D. T., et al. (2010). The Tam Quan Fault Zone and Its Role in the Tectonic Evolution of Southeast Vietnam. *Tectonics*, 29(5), 22-30.
- Salvador, A. (1987). Late Triassic-Jurassic paleogeography and origin of Gulf of Mexico Basin. *AAPG Bulletin*, 71, 419-451.
- Vermeer, G. J. O. (2003). 3D seismic survey design optimization. *The Leading Edge*, 22(10), 934-941. <https://doi.org/10.1190/1.1623633>
- Windley, B. F., Allen, M. B., Zhang, C., Zhao, Z. Y., & Wang, G. R. (1990). Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan: A continental example of the tectonics of accretion and growth of Asia. *Tectonophysics*, 181, 121-146.
- Weimer, P., Bouroulllec, R., Fillon, R. H., & Lowrie, A. (1998). Structural styles and reservoir characteristics of deep-water foldbelts in the Gulf of Mexico: Examples from the Green Canyon and Atwater Valley areas. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 48, 105-120.
- Yang, S., Wang, Q., Lü, Z., & Zhao, Y. (2007). Strike-slip faulting and petroleum accumulation in the Junggar Basin, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29, 419-430.
- Zhao, X., Coe, R. S., Gilder, S. A., & Frost, G. M. (1996). Palaeomagnetic constraints on the tectonic history of the major blocks of China from the Permian to the Present. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101, 1797-1809.
- Zhao, H., Li, W., Wu, Y., Di, Z., Zhao, R., Chen, W., & Li, M. (2023). Acquisition parameters and sensitivity analysis affecting the seismic imaging quality of the complex piedmont zone. *Applied Geophysics*, 20(4), 351-363. <https://doi.org/10.1007/s11770-023-1004-4>
- Zhou, D., Carroll, A. R., Graham, S. A., & McKnight, C. L. (2005). Structure and petroleum systems of the Junggar Basin, Xinjiang, China. *AAPG Bulletin*, 89, 435-460.

Evaluation of 3D seismic operation parameters, to improve them in several specific models

Javad Dalir¹ and Mohammadali Riahi^{2*} and ³Hesam Mansouri Siyah Goli

¹Assistant Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 26 April 2025, Accepted: 11 October 2025)

Summary

The design of seismic data acquisition parameters is crucial for ensuring the quality of subsurface data recording, which is a direct result of effective operational implementation. This study emphasizes the importance of developing experimental procedures that facilitate the generation of parameters aimed at maximizing the quality of the desired seismic data. The primary objective of this research is to investigate the determination of seismic data acquisition parameters across three distinct synthetic velocity-depth models. Each model encompasses essential steps, including the identification of the target layer's depth, utilization of the velocity-depth model, and the establishment of fundamental seismic operation design parameters such as Bin Size, maximum offset, and Migration Aperture.

The first model is based on the velocity model of the Cu Long Basin in the continental crust of southeastern Vietnam. The Co Lang Basin in southeastern Vietnam is located at the continental-oceanic boundary and is affected by complex tectonic processes influenced by the interactions of various tectonic plates. This region is one of the regions that has undergone major changes in its geological structures in conjunction with plate evolution and fault movements.

This model features a unique configuration and fault types that differ from the actual geological conditions, resulting in a seven-layer structure with several relatively large faults. It exhibits a gentle slope and limited horizontal velocity variations, allowing for the achievement of adequate fold in the target area while meeting data collection expectations, given the relatively straightforward geological structure.

The second model is derived from the Jangar Basin, characterized by complex horizons and faults alongside significant horizontal velocity variations. Although the relationships employed to determine the seismic operation parameters yielded favorable results regarding the signal-to-noise ratio, it was observed that increasing the dimensions of the collection area and the density of receivers and sources did not guarantee the required fold in all bins, particularly in geologically complex regions.

The third model is based on the velocity and salt dome characteristics in the Gulf of Mexico. The presence of layers disrupted by salt domes allows for a predictable velocity model. In designing this model, the velocity and slope of the layers were derived from these regions. Energy loss within salt domes is notably high, resulting in waves entering the dome rarely finding a reflection point to reach the receivers, or the return point to the surface occurring at considerable distances. Studies on this model indicated that the fold at the boundary of the salt dome consistently equated to half the fold of a shallow horizon at the target depth, demonstrating reasonable accuracy.

Keywords: Velocity-depth model, seismic data acquisition design parameters, ray tracing, target layer depth.