

بررسی ساختار گنبد نمکی گورزین در جزیره قشم بوسیله توموگرافی سه بعدی امواج ریلی، با استفاده از پس‌لرزه‌های زلزله ۶ آذر ۱۳۸۴

راضیه حیدری مهارلویی^۱، عباس غلام زاده^{۲*}، محسن فرخی^۳ و سارا عباسی^۴

^۱ کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۳ استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۴ دکتر، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹)

چکیده

این پژوهش با استفاده از توموگرافی سه بعدی سرعت گروه موج ریلی به بررسی ساختار سرعت پوسته کم عمق در جزیره قشم، واقع در انتهای شرقی رشته کوه زاگرس در زیر پهنه بندرعباس، می‌پردازد. جزیره قشم با ساختارهای زمین‌شناسی خاص خود، میزبان یک گنبد نمکی قابل توجه به نام گورزین است که به عنوان یک تله هیدروکربنی شناخته می‌شود و برای ذخیره سازی زیر زمینی نفت و گاز بسیار مهم است. بنابراین، این مطالعه، بر ضرورت انجام تحقیقات جامع در رابطه با این گونه ساختارهای زمین‌شناسی با توجه به پیامدهای اقتصادی و زیست محیطی آن‌ها تاکید می‌کند. برای انجام توموگرافی سه بعدی امواج ریلی و تصویرسازی ساختار سرعت در این مطالعه، از روش الگوریتم همسایگی که به عنوان یک تکنیک جستجوی مستقیم برای وارون سازی داده‌ها به‌ویژه در مطالعات ژئوفیزیکی در دهه‌های اخیر ظهور کرده، استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، شامل پس‌لرزه‌های زمین لرزه ۶ آذر ماه ۱۳۸۴ جزیره قشم می‌باشند که توسط شبکه‌ای متشکل از ۱۷ ایستگاه لرزه‌نگاری کوتاه دوره ثبت گردیده‌اند. نتایج این مطالعه، یک گنبد نمکی را نشان می‌دهد که در مجاورت گسل قشم قرار گرفته است و به سمت غرب پیشروی می‌کند. عمق اولیه این گنبد نمکی، حدود ۱۵ کیلومتر است و با کاهش عمق، ابعاد آن افزایش می‌یابد. یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که گسل قشم نقش مهمی در شکل‌گیری و جابجایی گنبد نمکی گورزین ایفا می‌کند. این نتایج، به درک بهتر زمین‌شناسی زیرسطحی در منطقه کمک می‌کند و پیامدهایی برای اکتشاف و مدیریت منابع زیرزمینی دارد.

کلمه‌های کلیدی: امواج ریلی، الگوریتم همسایگی، توموگرافی سه بعدی، جزیره قشم، زاگرس.

۱ مقدمه

فلات ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی منحصر به فرد خود در کمربند آلپ-همالیا، تحت تأثیر همگرایی صفحات عربی و اوراسیا قرار دارد که منجر به تشکیل ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده‌ای مانند کمربند چین‌خورده زاگرس شده است (جکسون و مک‌کنزی، ۱۹۸۴). آقانباتی (۱۳۸۳)، قشم را بخشی از زاگرس چین‌خورده توصیف کرد و گنبد گورزین را به دلیل ارتباط با گسل قشم، ساختاری کلیدی دانست. جزیره قشم، واقع در انتهای شرقی این کمربند، به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی، اقتصادی و لرزه‌خیزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (شکل ۱). این جزیره به دلیل وجود گنبد‌های نمکی متعدد، از جمله گنبد نمکی گورزین، به‌عنوان یک منطقه کلیدی برای اکتشاف منابع هیدروکربنی و ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای شناخته می‌شود (جهانی و همکاران، ۲۰۰۹). گنبد‌های نمکی به‌عنوان تله‌های هیدروکربنی برای ذخیره‌سازی نفت و گاز عمل کرده و نقش مهمی در تکتونیک منطقه و فعالیت‌های لرزه‌ای ایفا می‌کنند. اهمیت جزیره قشم نه تنها به موقعیت زمین‌شناسی آن در زاگرس، بلکه به لرزه‌خیزی بالای منطقه نیز مرتبط است. زاگرس شرقی، به‌ویژه قشم، به دلیل تعامل پیچیده گسل‌های فعال و جریان نمک عمیق، نرخ بالایی از زمین‌لرزه‌های کم‌عمق را تجربه می‌کند (نیسن و همکاران، ۲۰۱۴). زلزله ۶ آذر ۱۳۸۴ قشم (بزرگای ۶) نمونه‌ای از این فعالیت‌ها است که احتمالاً تحت تأثیر بازتوزیع تنش ناشی از هالوکینیزس (حرکت رو به بالای نمک) رخ داده است. گنبد‌های نمکی متعدد در شرق زاگرس، که از سازند هرمز (پرکامبرین بالایی-کامبرین پایین) منشأ می‌گیرند، با ایجاد ناهمگنی‌های ساختاری و تعامل با گسل‌های فعال مانند گسل قشم، به تشدید لرزه‌خیزی کمک می‌کنند (بهرودی و کوی، ۲۰۰۳). این گنبد‌ها، با تغییر شکل لایه‌های رسوبی و ایجاد شکستگی‌ها، تنش‌های محلی را بازتوزیع کرده و می‌توانند زمین‌لرزه‌های القایی را تحریک نمایند (نیسن و

همکاران، ۲۰۱۴).

مطالعات پیشین جنبه‌های مختلفی از زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و لرزه‌خیزی قشم را بررسی کرده‌اند. جهانی و همکاران (۲۰۰۹)، گنبد‌های نمکی قشم را به‌عنوان تله‌های هیدروکربنی کلاسیک معرفی کردند و با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی سطحی و لرزه‌نگاری بازتابی، ریشه این گنبد‌ها را تا اعماق ۱۱-۱۰ کیلومتری تخمین زدند. معتمدی و همکاران (۲۰۱۲)، به تأثیر دیاپیرسم نمکی بر تغییر شکل توالی‌های رسوبی اشاره کردند و سازند هرمز را منشأ اصلی گنبد‌های نمکی دانستند. نیسن و همکاران (۲۰۱۴)، ارتباط بین جریان نمک و زمین‌لرزه‌های کم‌عمق را بررسی کردند، اما مدل‌های آنها فاقد تصویرسازی مستقیم ساختارهای نمکی بود. حیدرپور و غلامزاده (۱۳۹۷)، با توموگرافی دوبعدی امواج ریلی، نواحی کم‌سرعت را به حضور رسوبات یا نمک نسبت دادند، اما محدودیت‌های روش دوبعدی مانع ارائه جزئیات عمقی شد. شیرزاد و یمینی‌فرد (۲۰۲۰) با روش توموگرافی امواج پیکری و سطحی، مدل‌های سرعت با وضوح بالا ارائه کردند که ناهنجاری‌های کم‌سرعت مرتبط با گنبد‌های نمکی را تأیید کرد. یمینی‌فرد و همکاران (۲۰۱۲)، مدلی یک‌بعدی از پوسته قشم ارائه کردند که شامل لایه رسوبی ۸ کیلومتری بود، اما تغییرات جانبی را نشان نداد. در زمینه کاهندگی امواج لرزه‌ای، برخی مطالعات با استفاده از داده‌های زلزله به بررسی ویژگی‌های کاهندگی در قشم و مناطق زاگرس پرداخته‌اند که برای درک ساختار پوسته مرتبط هستند. به‌عنوان مثال، رحیمی و غلامزاده (۲۰۱۷) با تحلیل داده‌های پس‌لرزه‌ای زلزله ۶ آذر ۱۳۸۴ قشم، فاکتور کیفیت موج کدا (Coda Q) را بررسی کردند و نشان دادند که نواحی با گنبد‌های نمکی و رسوبات نرم کاهندگی بالاتری دارند، که به ناهمگنی‌های ساختاری مانند ساختارهای نمکی مرتبط است این مطالعه بر نقش گنبد‌های نمکی در جذب انرژی لرزه‌ای تأکید کرد. به‌طور مشابه،

می‌شوند، بسیار مناسب است (هرمن، ۲۰۱۳). در مقابل، امواج حجمی به دلیل طول موج بلندتر و وابستگی به پوشش آزیموتی گسترده، بدلیل کراسینگ کم در اعماق کم، رزولوشن کمتری در این اعماق ارائه می‌دهند. روش توموگرافی سه‌بعدی امواج ریلی، با بهره‌گیری از الگوریتم همسایگی (سامبریج، ۱۹۹۹)، امکان وارون‌سازی داده‌های پس‌لرزه‌ای زلزله ۶ آذر ۱۳۸۴ را فراهم کرده و مدل‌های سرعتی با وضوح بالا تولید می‌کند. این روش به دلیل عدم وابستگی به پوشش آزیموتی گسترده، کراسینگ در عمق و توانایی استخراج منحنی‌های پاشندگی از داده‌های محدود، نسبت به توموگرافی امواج حجمی برتری دارد و مشابه رویکردهای موفق در حوضه پارادوکس است. داده‌های اولیه این مطالعه از بررسی ۸۵۸ پس‌لرزه با کیفیت بالا (خطای مکان‌یابی افقی کمتر از ۲ کیلومتر و عمقی کمتر از ۳ کیلومتر) ثبت شده توسط شبکه‌ای موقت متشکل از ۱۷ ایستگاه لرزه‌نگاری کوتاه‌دوره تأمین شد. سپس از خروجی اولیه توموگرافی دوبعدی امواج ریلی (حیدرپور و غلامزاده، ۱۳۹۷) جهت بدست آوردن ساختار عمقی سرعت در ناحیه مورد مطالعه استفاده شد. این داده‌ها، اگرچه برای توموگرافی امواج حجمی به دلیل محدودیت‌های پوشش آزیموتی و کراسینگ ضعیف در اعماق کم چالش‌برانگیز بودند، برای توموگرافی امواج سطحی به دلیل استخراج منحنی‌های پاشندگی مناسب بودند. هدف این پژوهش، تصویرسازی سه‌بعدی ساختار سرعت پوسته کم‌عمق جزیره قشم، شناسایی ناهنجاری‌های سرعتی مرتبط با گنبد نمکی گورزین، بررسی نقش گسل قشم در شکل‌گیری و جابجایی این گنبد و ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای است. در این تحقیق از خروجی توموگرافی دو بعدی حیدرپور و غلامزاده، (۱۳۹۷) جهت مش‌بندی (سلول بندی) منطقه و همچنین بدست آوردن منحنی پاشش در هر سلول استفاده شد. این مطالعه با شناسایی ناهنجاری‌های کم‌سرعت و تحلیل تعامل گنبد

غلامزاده (۲۰۲۱) با مطالعه تغییرات مکانی کاهندگی امواج کدا در منطقه خورگو، جنوب شرق زاگرس، نشان دادند که نواحی با حضور گنبد‌های نمکی و ساختارهای شکسته‌شده کاهندگی بیشتری دارند، که با ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه از جمله گنبد‌های نمکی سازند هرمز همخوانی دارد. زارعان و همکاران (۲۰۰۸) کاهندگی بالای امواج پیکری را به رسوبات نرم، شکستگی ناشی از نیروهای تکتونیک و وجود گنبد‌های نمکی مرتبط دانستند. این یافته‌ها برای شناسایی ناهنجاری‌های مرتبط با گنبد‌های نمکی در قشم مفید هستند، اما به دلیل تمرکز بر تحلیل‌های کلی یا دوبعدی، تصویرسازی سه‌بعدی دقیقی از ساختارهای زیرسطحی ارائه نکردند. اهمیت این پژوهش در ارائه تصویرسازی سه‌بعدی دقیق از ساختار سرعت پوسته کم‌عمق جزیره قشم با استفاده از توموگرافی امواج ریلی است که محدودیت‌های مطالعات پیشین، چه در منطقه و چه در سطح جهانی، را برطرف می‌کند. مطالعه ساختارهای زمین‌شناسی با امواج سطحی، به‌ویژه امواج ریلی با فرکانس بالا، مزایای قابل توجهی دارد. این امواج به دلیل سرعت و طول موج کمتر نسبت به امواج حجمی (P و S)، توانایی بالاتری در تشخیص ناهنجاری‌ها و ناهمگنی‌های کوچک‌مقیاس، مانند گنبد‌های نمکی، دارند (آکی و ریچاردز، ۲۰۰۲؛ ریتزولر و لووشین، ۱۹۹۸). امواج سطحی با فرکانس بالا به لایه‌های کم‌عمق حساس‌تر بوده و امکان شناسایی تغییرات جانبی و عمقی سرعت موج برشی را با وضوح بیشتری فراهم می‌کنند (لووشین و همکاران، ۱۹۷۲). با استفاده از استخراج امواج سطحی از نوفه محیطی، در مطالعات ژئوتکنیکی ساختارهای کم‌عمق و سطحی مورد بررسی قرار می‌گیرند و نتایج حاصله با نتایج حاصله از روش‌های دیگر ژئوفیزیک (روش درون چاهی) قابل مقایسه است (سلطانی و همکاران، ۲۰۱۶). این ویژگی، برای مطالعه گنبد‌های نمکی که با ناهنجاری‌های کم‌سرعت (سرعت موج برشی حدود ۳-۲/۵ کیلومتر بر ثانیه) مشخص

منطقه تحت تأثیر فازهای زمین ساخت آلپ در اواخر ترشیری، ساختارهای چین خورده متعدد و گسل های امتداد لغز را توسعه داده است. گسل اصلی قشم با راستای شرقی-غربی، به عنوان یکی از مهم ترین ساختارهای فعال منطقه، نقش کلیدی در تحول زمین شناسی جزیره ایفا می کند (شکل های ۱ و ۲).

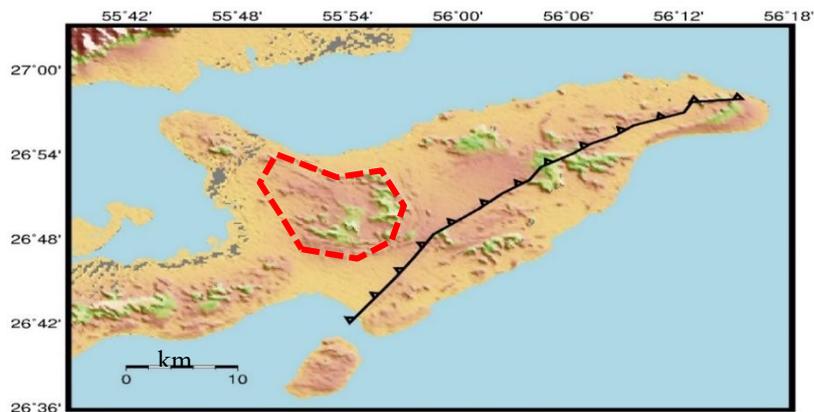
۱. سازندهای کلیدی

با توجه به شکل ۲، قدیمی ترین سنگ های رخنمون یافته در جزیره متعلق به سازند هرمز (پرکامبرین بالایی-کامبرین پایین) است که عمدتاً از تبخیری های کم چگال (هالیت،

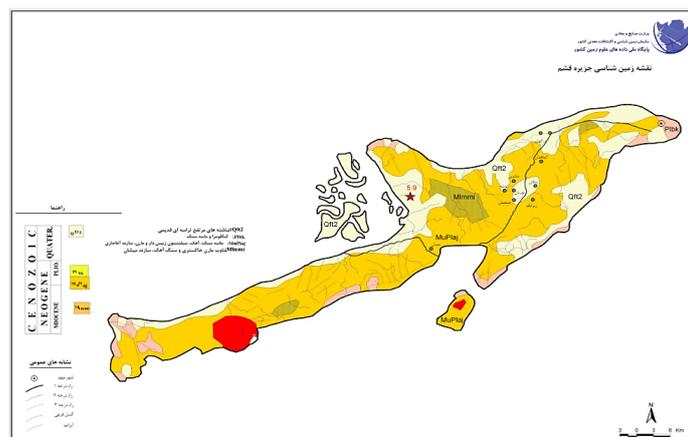
گورزین با گسل قشم، درک عمیق تری از دینامیک تکتونیک نمک در زاگرس ارائه می دهد. نتایج این پژوهش جهت پیش بینی رفتار گنبد های نمکی در برابر تغییرات محیطی و انسانی و تحلیل ساختار زیر سطحی نقش مهمی ایفا می کند.

۲ زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

جزیره قشم در انتهای شرقی کمربند چین خورده-رانندگی زاگرس قرار دارد که حاصل همگرایی نسبتاً شمالی جنوبی بین صفحات عربستان و اوراسیا با نرخ حدود 2 ± 22 میلی متر بر سال است (ورنات و همکاران، ۲۰۰۴). این



شکل ۱. نقشه توپوگرافی جزیره قشم، خط چین قرمز محدوده گنبد نمکی گورزین را نشان می دهد.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی جزیره قشم با تأکید بر سازند هرمز و گسل های اصلی (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور؛ اصلاح شده از آقائاتی، ۱۳۸۳).

گنبد نمکی به دلیل نزدیکی به تنگه هرمز، شرایط زمین‌شناسی پیچیده و قرارگیری در حوضه رسوبی خلیج فارس-زاگرس، از نظر اکتشاف و تولید گاز مورد توجه قرار گرفته است (جهانی و همکاران، ۲۰۰۹؛ نیسن و همکاران، ۲۰۱۴). این گنبد نمکی از رسوبات تبخیری مربوط به دوره‌های زمین‌شناسی قدیمی، به ویژه دوره‌های پرمین و تریاس، تشکیل شده است. نمک موجود در این گنبدها معمولاً از نوع هالیت (نمک طعام) است و همراه با آن، مقادیری از مواد معدنی دیگر مانند گچ و انیدریت نیز یافت می‌شود. حرکت نمک به سمت سطح زمین باعث ایجاد ساختارهای چینه‌ای و گسل‌های متعدد در اطراف گنبد شده است. این گنبد با جهت‌گیری شمال غربی-جنوب شرقی، به عنوان یکی از فعال‌ترین دیاپیرهای منطقه شناخته می‌شود. رخنمون سطحی آن شامل یک هسته نمکی به قطر حدود ۳ کیلومتر است که توسط ناودیس‌های حاشیه‌ای احاطه شده است (شکل ۲). بر اساس داده‌های لرزه‌شناسی، ریشه این گنبد تا عمق حدود ۱۵ کیلومتری امتداد دارد و با سیستم گسل قشم در شرق مرتبط می‌باشد (نیسن و همکاران، ۲۰۱۴).

۴. ارتباط بین لرزه‌خیزی و زمین‌ساخت گنبد‌های نمکی مطالعات لرزه‌نگاری نشان می‌دهند که فعالیت گسل‌های سطحی (مانند گسل قشم) و حرکت نمک‌های عمقی در تعامل دینامیکی با یکدیگر می‌باشند. زمین لرزه‌های کم عمق ثبت شده در منطقه (مانند رویداد ۱۳۸۴ قشم با بزرگای ۶) احتمالاً تحت تأثیر باز توزیع تنش ناشی از جریان نمک رخ داده‌اند (نیسن و همکاران، ۲۰۱۴). این پدیده، لزوم ادغام داده‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی را در ارزیابی خطر لرزه‌ای در منطقه آشکار می‌سازد. نیسن و همکاران (۲۰۱۴) نشان داده‌اند که رویدادهای لرزه‌ای به وضوح با سیستم‌های گسلی شناخته شده مرتبط نیستند. آن‌ها پیشنهاد کرده‌اند که این زمین‌لرزه‌ها ممکن است تحت تأثیر جریان لایه‌های عمیق نمک قرار گیرند، که می‌تواند تنش را

انیدریت، و ژپیس) همراه با سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی تشکیل شده است (علوی، ۱۹۹۴). این سازند به عنوان منشأ اصلی گنبد‌های نمکی منطقه شناخته می‌شود. بر روی سازند هرمز، توالی‌های ضخیم از سنگ‌های کربناته و تخریبی مزوزوئیک تا سنوزوئیک (شامل سازندهای دالان، آسماری، و گچساران) قرار گرفته‌اند که تحت تأثیر دیاپیرسم نمکی دچار تغییر شکل شدید شده‌اند (معمدی و همکاران، ۲۰۱۲).

۲. فرآیندهای هالوکینزیس

حرکت رو به بالای نمک‌های سازند هرمز از طریق مکانیسم‌های شناوری و تنش‌های تکتونیکی فشاری صورت می‌گیرد. این فرآیند، منجر به تشکیل گنبد‌های نمکی بالغ با هندسه پیچیده، ناودیس‌های حاشیه‌ای و سیستم‌های گسلی شعاعی شده است. مطالعات میکروسکوپی نمونه‌های نمک، حضور کانی‌های تبخیری ثانویه مانند پلی‌هالیت را نشان می‌دهد که حاکم از تأثیر متناوب چرخه‌های انحلال و تبلور در طول فرآیند هالوکینزیس است.

۳. گنبد نمکی گورزین

گنبد‌های نمکی ساختارهایی هستند که از حرکت نمک به سمت سطح زمین تشکیل می‌شوند. این پدیده معمولاً در نتیجه فشارهای تکتونیکی و ناپایداری چگالی بین لایه‌های نمک و سنگ‌های اطراف رخ می‌دهد. گنبد‌های نمکی مانند گنبد نمکی گورزین ممکن است با ایجاد ساختارهای گسلی و چین خوردگی، شرایط مناسبی برای تجمع نفت و گاز فراهم آورند. مطالعات متعددی در مورد گنبد‌های نمکی جزیره قشم، از جمله گنبد نمکی گورزین، انجام شده است. این مطالعات شامل بررسی‌های ژئوفیزیکی، حفاری‌های اکتشافی و نمونه برداری از رسوبات هستند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که گنبد نمکی گورزین به دلیل موقعیت تکتونیکی خاص خود، به عنوان یک ساختار کلیدی در منطقه شناخته می‌شود. همچنین، این

تعیین مناطق امید بخش برای حفاری‌های اکتشافی کمک کند، در حالی که تحلیل ارتباط بین گسلش و حرکت نمک، ابزاری برای ارزیابی خطر زمین‌لرزه‌های القا شده فراهم می‌سازد.

۲ روش تحقیق

۲-۱ جمع‌آوری داده‌ها

برای بررسی پس‌لرزه‌های زلزله ۲۷ نوامبر ۲۰۰۵ جزیره قشم، شبکه لرزه‌نگاری موقت محلی توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES) راه اندازی شد. این شبکه چهار روز پس از زلزله اصلی با ۱۳ ایستگاه لرزه‌نگاری سه مؤلفه‌ای آغاز به کار کرد و یک ماه بعد با افزودن چهار ایستگاه دیگر تقویت شد (شکل ۳). لرزه‌سنج‌های استفاده‌شده از نوع CMG-6TD و متصل به ثبت‌کننده‌های CMG-DM24، ساخت شرکت گورالپ، بودند. مجموعه داده‌ای شامل ۸۵۸ زلزله محلی با دقت تعیین مکان کمتر از ۳ کیلومتر، ثبت‌شده توسط حداقل هشت ایستگاه و با گپ آزیموتی کمتر از ۱۸۰ درجه، به‌عنوان بانک اطلاعاتی برای تحلیل توموگرافی دو بعدی (2D) استفاده شد (حیدرپور، ۱۳۹۴).

۲-۲ توموگرافی دو بعدی

داده‌های لرزه‌ای ابتدا تحت تصحیحات اولیه قرار گرفتند. حالت‌های پایه امواج سطحی برای ۸۵۸ زلزله با استفاده از روش تک‌ایستگاهی و نرم‌افزار تحلیل فرکانس-زمان هرمن از لرزه‌نگاشت‌ها استخراج شدند. منحنی‌های پاشندگی سرعت گروه به‌دست‌آمده از این تحلیل، با استفاده از کد نوشته‌شده و روش وارون‌سازی خطی یانوسکایا و دیتمار (۱۹۸۷) برای تولید نقشه‌های توموگرافی دو بعدی به کار رفتند. در نتیجه، مدلی دو بعدی از تغییرات سرعت گروه امواج ریلی در جزیره قشم ایجاد شد (حیدرپور، ۱۳۹۴). نقشه‌های توموگرافی برای پریودهای ۱، ۲/۰۸، ۲/۹۴، ۴، ۵،

مجدداً توزیع کند و شرایطی را برای فعالیت لرزه‌ای ایجاد کند. با ادغام داده‌های لرزه‌ای، مشاهدات زمین‌شناسی و مدل‌سازی عددی، این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه تکتونیک نمک می‌تواند نقش مهمی در تعدیل لرزه‌خیزی در منطقه داشته باشد اگرچه مطالعات متعدد در زاگرس عمق پی سنگ را بین ۸ تا ۱۲ کیلومتر تخمین زده‌اند و سازند نمکی هرمز به عنوان اولین لایه روی آن دانسته شده است، اما در این مورد احتمال داده می‌شود که سازند نمک هرمز در برخی از نقاط دارای منشأ عمیق‌تری باشد. تأثیر متقابل بین جریان نمک و گسلش، می‌تواند بینش جدیدی در مورد خطرات لرزه‌ای و فرآیندهای زمین‌ساختی در رشته کوه‌های زاگرس ارائه دهد.

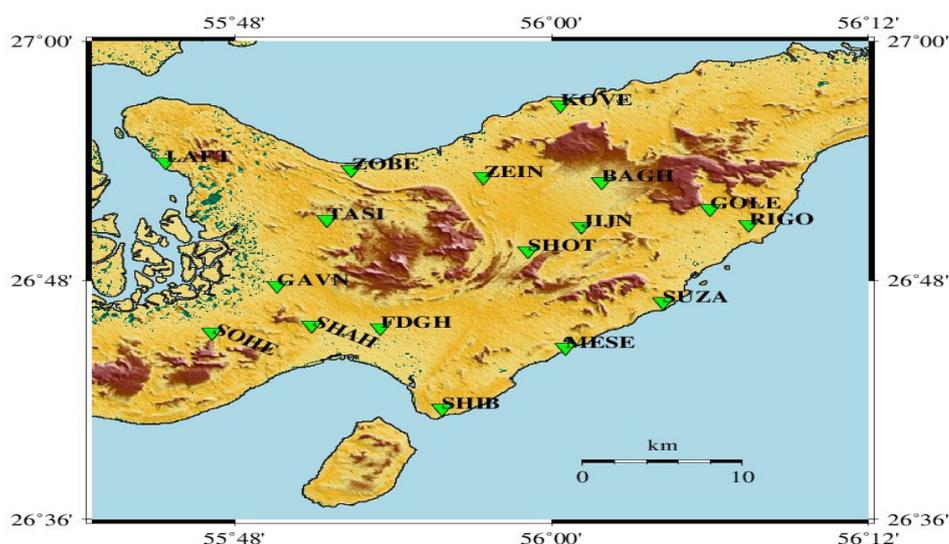
۵. اهمیت اقتصادی مطالعه گنبد‌های نمکی

گنبد‌های نمکی جزیره قشم به عنوان تله‌های هیدروکربنی کلاسیک عمل می‌کنند. ساختارهای چین‌خورده و گسلی مرتبط با دیاپیرها، شرایط مطلوبی برای تجمع نفت و گاز در سازندهای مخزنی مانند آسماری فراهم کرده‌اند (جهانی و همکاران، ۲۰۰۹). با این وجود، حرکت فعال نمک می‌تواند چالش‌هایی در استخراج منابع ایجاد کند. گنبد نمکی گورزین نه تنها از نظر زمین‌شناسی جالب توجه است، بلکه به عنوان یک حوزه گازی نیز اهمیت اقتصادی دارد. در اطراف گنبد‌های نمکی، به دلیل حرکت نمک و ایجاد ساختارهای تله‌گذاری (Traps) مناسب و ایجاد گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها، امکان تجمع هیدروکربن‌ها وجود دارد. بنابراین، این ساختارها، به عنوان مخازن طبیعی گاز و نفت عمل می‌کنند و در مورد گنبد نمکی گورزین، احتمالاً دارای پتانسیل قابل توجهی برای ذخایر گازی است (جهانی و همکاران، ۲۰۰۹). یافته‌های این مطالعه نه تنها درک ما از زمین‌شناسی زیرسطحی منطقه را بهبود می‌بخشد، بلکه پیامدهای علمی مهمی در ارتباط با اکتشاف منابع هیدروکربنی و مدیریت مخاطرات لرزه‌ای دارد. به ویژه، شناسایی ناهنجاریهای کم سرعت با نمک می‌تواند به

احتمالاً قدرت تفکیک پایین است (یانوسکایا، ۱۹۹۷).
 • آزیموت محور بزرگ تر (AZ).
 • خطای استاندارد (rms).
 منطقه مورد مطالعه با مساحت ۷۰۴ کیلومتر مربع، به ۷۸۲ سلول ۱ کیلومتر مربعی تقسیم گردید. نقاطی با $ex > 1$ حذف شدند و ۵۲۴ نقطه برای تحلیل بیشتر باقی ماندند. برای این نقاط، سرعت‌های گروه در بازه پریود ۱ تا ۱۰ ثانیه از نتایج توموگرافی استخراج و منحنی‌های پاشندگی (V-T) برای هر نقطه ترسیم شدند. این منحنی‌ها به‌عنوان داده‌های اولیه برای وارون‌سازی بعدی استفاده شدند (حیدرپور، ۱۳۹۴).

۶/۲۵، ۷/۱۴، ۸/۳۳ و ۱۰ ثانیه تولید شدند. هر نقشه با سلول‌هایی به ابعاد ۰/۰۰۹ درجه عرض جغرافیایی و ۰/۰۰۹ درجه طول جغرافیایی (تقریباً ۱ کیلومتر \times ۱ کیلومتر) مش‌بندی شد. برای هر پریود، توموگرافی دوبعدی امواج ریلی پارامترهای زیر را ارائه داد:

- مختصات جغرافیایی (x, y) هر نقطه شبکه.
- سرعت گروه در هر نقطه.
- ناحیه میانگین‌گیری (L)، که بصورت تقریبی با استفاده از بیضی با نیم‌محورهای a و b بصورت $L = (a + b)/2$ محاسبه شد.
- پارامتر کشیدگی $(ex = (a - b)/L)$ که مقادیر $ex > 1$ نشان‌دهنده جهت‌گیری خاص مسیرهای پرتو و



شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های شبکه موقت محلی نصب شده جهت ثبت پس‌لرزه‌های زلزله ۲۷ نوامبر ۲۰۰۵ جزیره قشم.

ب) سرعت امواج به دست آمده در پریودهای مختلف، گزارش شده توسط حیدرپور و غلامزاده (۱۳۹۷)، برای هر بلوک (سلول) استخراج گردید.
 ج) در ادامه، سرعت امواج سطحی استخراج شده در پریودهای مختلف برای یک نقطه (تقریباً در مرکز هر بلوک)، در یک فایل ذخیره شد. این عمل باعث تجمع سرعت امواج سطحی در پریودهای مختلف در هر بلوک گردید و منحنی حاصل، منحنی پاشش امواج سطحی در آن

۲-۳ توموگرافی سه بعدی امواج سطحی

به منظور تهیه ساختار سه بعدی سرعت امواج، از خروجی توموگرافی دوبعدی امواج سطحی استفاده شد که پیش‌تر توسط حیدرپور (۱۳۹۴) انجام شده بود. مراحل پردازش و تحلیل داده‌ها به شرح زیر است:
 الف) از بلوک‌بندی یا مش‌بندی منطقه مورد مطالعه بر اساس خروجی کار حیدرپور و غلامزاده (۱۳۹۷) استفاده شد.

بلوک (سلول) نامیده شد.

د) پس از تهیه منحنی پاشش امواج سطحی برای هر نقطه، از نرم افزار *Geopsy* برای تبدیل منحنی پاشش امواج سطحی به پروفیل سرعت عمقی استفاده شد. در نهایت، با کنار هم قرار دادن پروفیل‌های سرعت عمقی به دست آمده برای تمام بلوک‌ها، ساختار سه بعدی سرعت امواج تعیین شد.

۲-۳-۱ واریون سازی برای سرعت موج برشی

برای به دست آوردن پروفیل‌های یک بعدی سرعت موج برشی و تبدیل پریرود امواج سطحی به صورت تابعی از عمق، منحنی‌های پاشندگی با استفاده از نرم افزار *dinver* که در بسته نرم افزاری *Geopsy* قرار دارد، واریون سازی شدند. این نرم افزار از الگوریتم همسایگی (*NA*) برای واریون سازی منحنی‌های پاشندگی سرعت گروه و فاز امواج سطحی (امواج ریلی و لاو) و محاسبه زمان سیر انکساری امواج حجمی استفاده می کند. برای هر نقطه شبکه، منحنی‌های پاشندگی سرعت گروه امواج ریلی به عنوان ورودی به نرم افزار ارائه شدند و واریون سازی با استفاده از الگوریتم همسایگی انجام شد تا پروفیل سرعت موج برشی با عمق تولید شود. الگوریتم همسایگی یک روش جستجوی مستقیم تصادفی است که نمونه‌های جدید را با هدایت نتایج نمونه‌های قبلی تولید می کند (سامبریج، ۱۹۹۹). این الگوریتم، از ویژگی‌های سلول‌های ورنوی استفاده می کند و در چهار مرحله اجرا می شود:

۱. تولید مجموعه‌ای از *ns* مدل اولیه به صورت یکسان در فضای پارامتری.

۲. محاسبه تابع عدم تجانس برای این مدل‌ها و انتخاب *nr* مدل با کمترین عدم تجانس.

۳. تولید *ns* مدل جدید با انجام گام‌های تصادفی در سلول‌های ورنوی مدل‌های انتخاب شده (*ns/nr*) نمونه در هر سلول).

۴. بازگشت به مرحله دوم و تکرار تا t_{max} بار برای دستیابی به راه حل قابل قبول.

هدف واریون سازی، تولید پروفیل‌های سرعت موج برشی بود که با استفاده از قانون نمایی زیر مدل سازی شدند (شرباوم و همکاران، ۲۰۰۳):

$$v_i = v_0((z_i + 1)^\alpha - (z_0 + 1)^\alpha + 1) \quad (1)$$

که در آن z عمق، v_0 سرعت در سطح و α پارامتر نمایی بین ۰ و ۱ است. مقادیر عدم تجانس، که نشان دهنده تطابق بین مدل‌های محاسبه شده و داده‌های مشاهده‌ای هستند، با فرمول زیر محاسبه شدند:

$$misfit = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_f} \frac{(x_{di} - x_{ci})^2}{\sigma_i^2 n_f}} \quad (2)$$

که در آن x_{di} و x_{ci} به ترتیب، سرعت‌های مشاهده شده و محاسبه شده در فرکانس f_i ، σ_i انحراف معیار و n_f تعداد نمونه‌های فرکانسی است (واتلیت و همکاران، ۲۰۰۴، ۲۰۰۸). اطلاعات اولیه از مدل یک بعدی منطقه (یمینی فرد و همکاران، ۲۰۱۲) برای پارامتر گذاری استفاده شد. این مدل، ساختار بالایی پوسته در جزیره قشم را شامل لایه رسوبی به ضخامت ۸ کیلومتر با سرعت موج P برابر ۵/۵ کیلومتر بر ثانیه، لایه‌ای ۴ کیلومتری با سرعت ۵/۹ کیلومتر بر ثانیه و لایه‌ای با سرعت ۶/۲ کیلومتر بر ثانیه توصیف کرد. نسبت Vp/Vs برابر ۱/۸۵ بود که سرعت‌های موج برشی ۲/۹۷، ۳/۱۸۹ و ۳/۳۵۱ کیلومتر بر ثانیه را برای لایه‌ها به دست داد. این مقادیر به عنوان مدل اولیه واریون سازی استفاده شدند.

۲-۴ مدل سرعتی سه بعدی

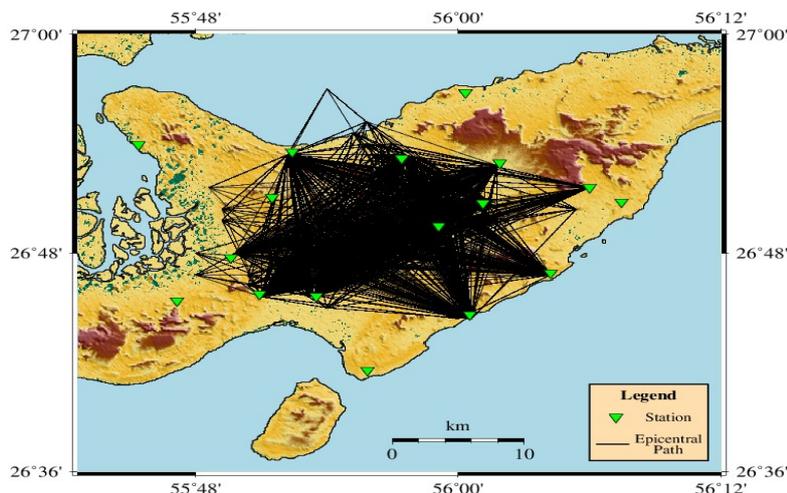
با ترکیب پروفیل‌های یک بعدی سرعت موج برشی در تمام نقاط شبکه، مدل سرعتی سه بعدی منطقه تولید شد. مسیرهای پرتو امواج ریلی، که با روش تک ایستگاهی

نهایی انتخاب شد.

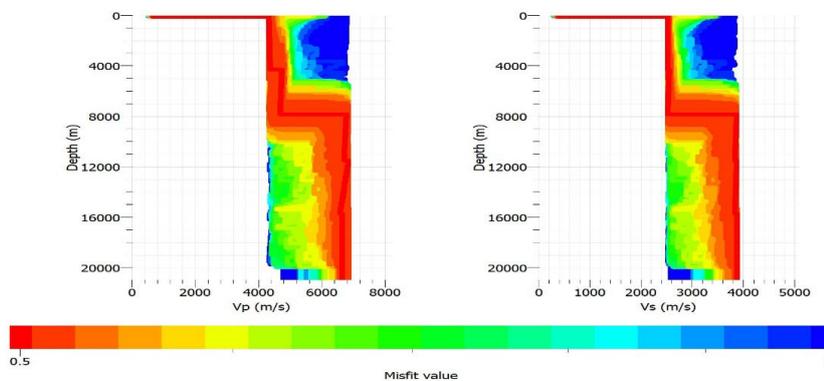
محاسبه شدند، برای ارزیابی قدرت تفکیک تحلیل شدند (شکل ۴). کمترین طول تفکیک در مرکز منطقه به دلیل پوشش متراکم مسیرهای پرتو مشاهده شد، در حالی که در حاشیه‌های شرقی و غربی به دلیل کاهش تقاطع مسیرها، قدرت تفکیک تا ۸ کیلومتر کاهش یافت.

۲-۵ تحلیل قدرت تفکیک و مسیرهای پرتو
پوشش مسیرهای پرتو امواج ریلی نشان داده شده در شکل ۴، بر طول قدرت تفکیک تأثیر گذاشت، با بهترین تفکیک در مرکز منطقه و کاهش آن در حاشیه‌ها. شکل ۶، نقاط مورد استفاده برای محاسبه ساختار سه‌بعدی پوسته بالایی جزیره قشم را نشان می‌دهد. ترکیب پوشش متراکم ایستگاه‌ها، داده‌های باکیفیت و تکنیک‌های وارون‌سازی قوی، مدل‌های سرعتی قابل‌اعتمادی را برای منطقه فراهم نمود.

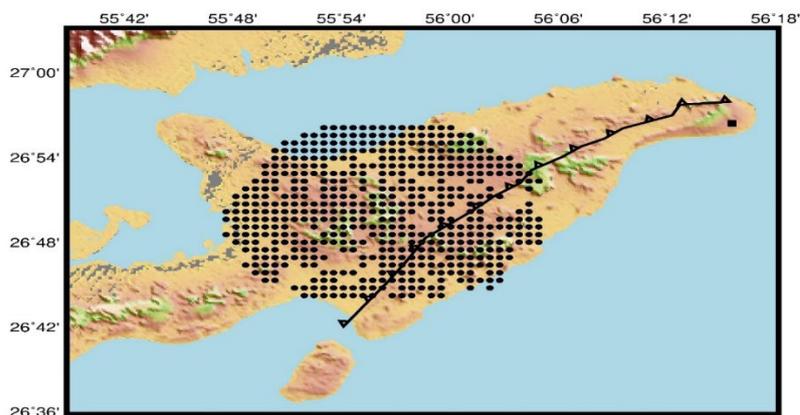
برای نقطه‌ای با مختصات $55^{\circ}18'30''$ شرقی و $26^{\circ}48'00''$ شمالی، خروجی وارون‌سازی (شکل ۵) سرعت‌های موج برشی بین 0.5 تا 2.5 کیلومتر بر ثانیه را تا عمق ۸ کیلومتر و سرعت‌های بین 2.5 تا 3.8 کیلومتر بر ثانیه را در اعماق بیشتر را نشان داد. وارون‌سازی با اجرای ۲۵۰۰ تا ۴۰۰۰۰ مدل تصادفی اولیه انجام شد و مدلی با کمترین عدم تجانس (مشخص شده با خط قرمز در شکل ۵) به‌عنوان خروجی



شکل ۴. مسیر پرتو امواج ریلی در منطقه مورد مطالعه.



شکل ۵. پروفیل سرعتی زمین در نقطه‌ای به مختصات $55^{\circ}18'30''$ درجه طول شرقی و $26^{\circ}48'00''$ درجه عرض شمالی.



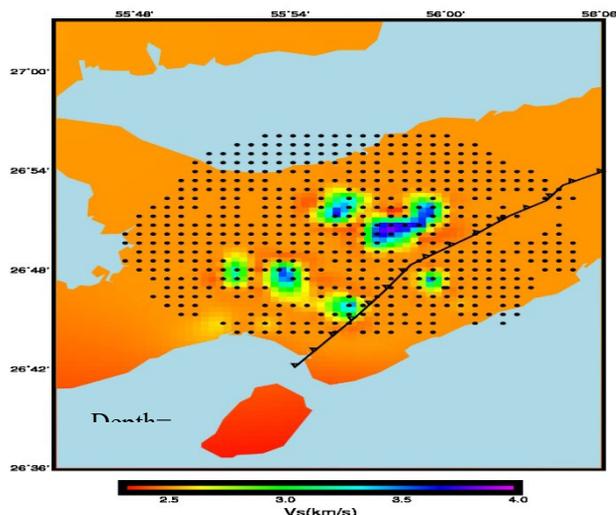
شکل ۶. نقاط مورد استفاده برای محاسبه ساختار سه بعدی پوسته فوقانی جزیره قشم.

۳ نتایج

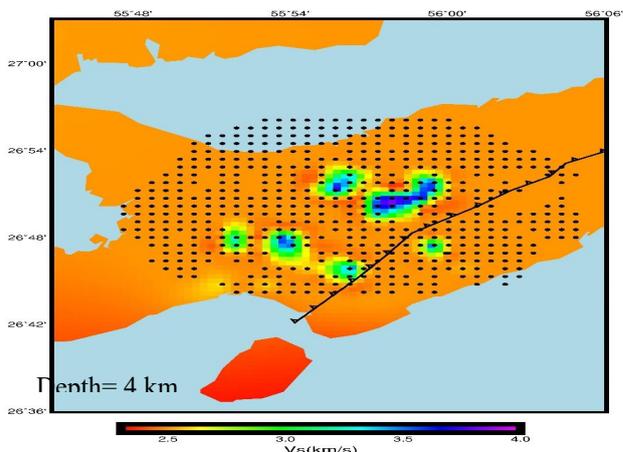
۱-۳ نتایج مقاطع افقی

با توجه به اینکه مولفه عمودی سرعت موج برشی بر حسب عمق در هر نقطه به دست آمده است، می توان با قرار دادن سرعت تمامی نقاط در کنار هم، روند تغییرات سرعت در منطقه مورد مطالعه را برای عمق های مختلف به دست آورد. در این مطالعه، مقاطع افقی از سطح تا عمق ۲۰ کیلومتری با فاصله دو کیلومتری ترسیم گردیده اند. شکل ۷، نشان دهنده مقطع افقی ترسیم شده در منطقه برای عمق ۲ کیلومتری می باشد. با توجه به مقیاس گذاری که در قسمت پایین شکل مشخص است، برای این اعماق سرعت

مولفه عمودی موج برشی از ۲/۳ تا ۲/۷ کیلومتر بر ثانیه متغیر می باشد. در این شکل نواحی کوچک پرسرعتی (نواحی به رنگ سبز و زرد) دیده می شوند که احتمالاً از عوامل سطحی پیروی می کنند. مقطع افقی ترسیم شده در منطقه در عمق ۴ کیلومتر، در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در عمق ۴ کیلومتری، سرعت مولفه عمودی موج برشی در منطقه، همانند سرعت در عمق ۲ کیلومتری می باشد. اما در این عمق نواحی پرسرعتی (نواحی به رنگ زرد تا آبی) نیز مشاهده می شوند. با نگاهی به نقشه توپوگرافی منطقه، مشاهده می شود که نواحی پرسرعت در کناره های گنبد نمکی قرار دارند.



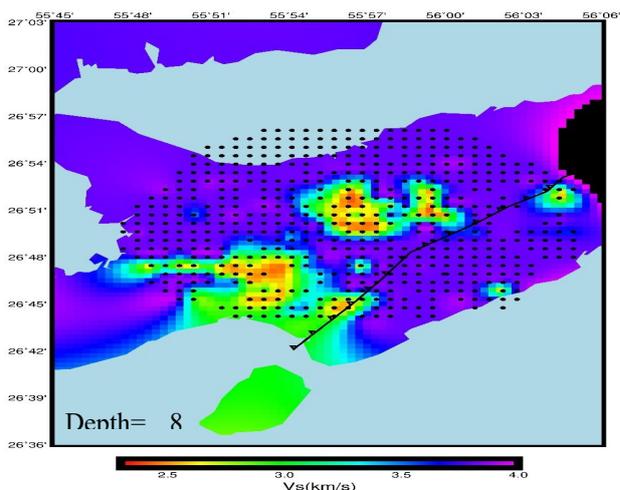
شکل ۷. مقطع افقی ترسیم شده در منطقه در عمق ۲ کیلومتر. نقاط مشکی نقاطی می باشند که با استفاده از معکوس سازی، سرعت امواج برشی در آنها محاسبه شده است.



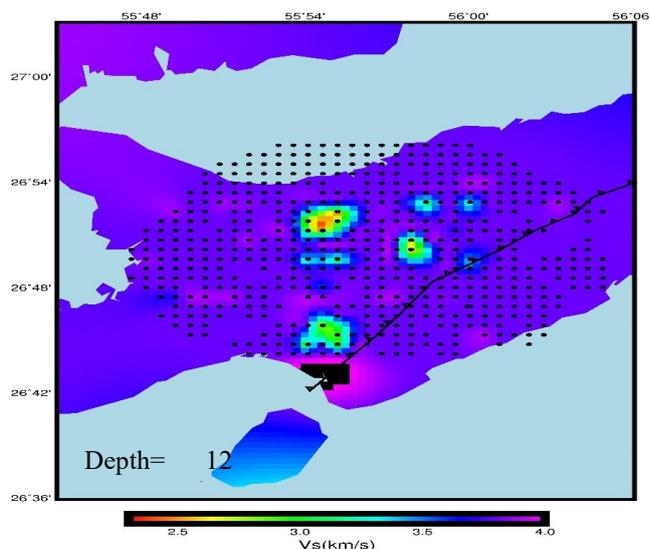
شکل ۸. مقطع افقی ترسیم شده در منطقه در عمق ۴ کیلومتر. نقاط مشکی نقاطی می‌باشند که با استفاده از معکوس‌سازی، سرعت امواج برشی در آن‌ها محاسبه شده است.

عمق‌هایی که بطور معمول سرعت امواج بیشتر است، را می‌توان به حضور گنبد نمکی ارتباط داد. شکل ۱۰، مقطع افقی ترسیم شده در منطقه برای عمق ۱۲ کیلومتری را نشان می‌دهد. در این عمق و همچنین، اعماق پایین‌تر، سرعت مولفه عمودی موج برشی در حدود $3/8 \pm 0/5$ کیلومتر بر ثانیه می‌باشد. در این اعماق، شاهد حضور نواحی کم سرعت نیز می‌باشیم، اما با افزایش عمق، این نواحی کوچک‌تر می‌گردند.

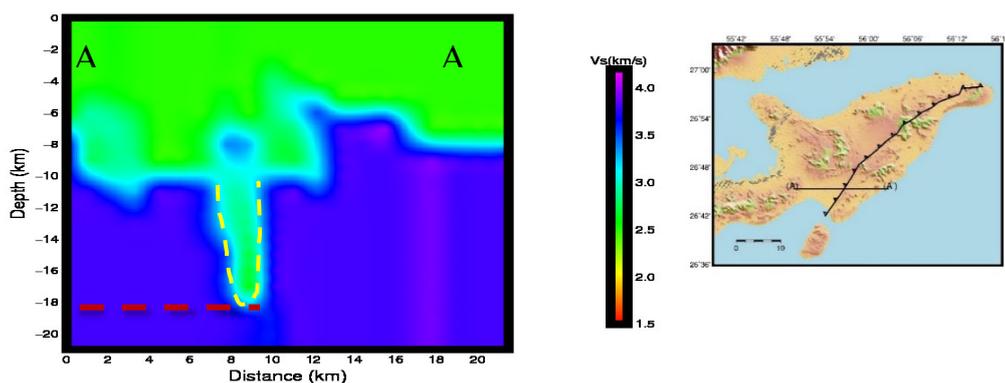
در عمق ۸ کیلومتری، نحوه تغییرات سرعت در منطقه کاملاً دگرگون شده است (رنگ بنفش در منطقه) و سرعت غالب در این عمق، $3/6$ تا $3/8$ کیلومتر بر ثانیه می‌باشد (شکل ۹). با مشاهده این تفاوت سرعت، احتمال دارد که لایه‌بندی منطقه در این عمق تغییر کرده باشد. در این عمق، نواحی کم‌سرعتی (نواحی با رنگ سبز و زرد) نیز مشاهده می‌شوند، وجود گنبد‌های نمکی در یک ناحیه، می‌تواند موجب کاهش سرعت امواج برشی و افزایش نسبت V_p/V_s شود. بنابراین آنومالی کم سرعت موجود در



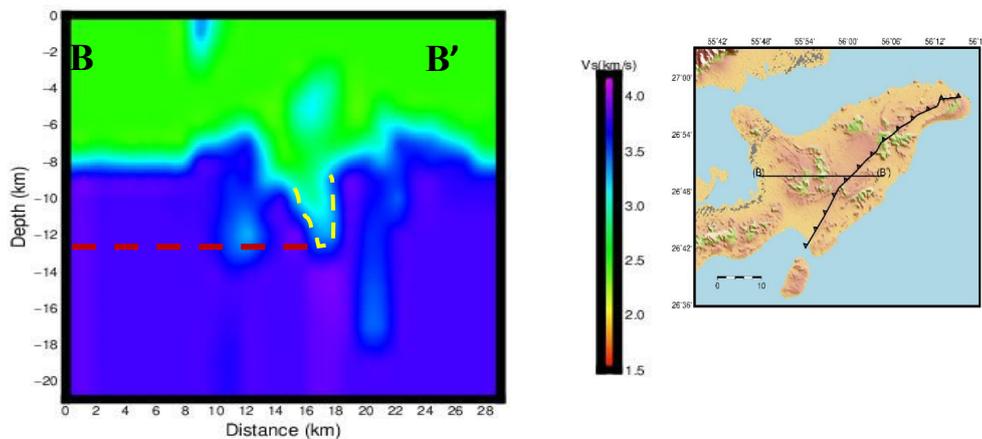
شکل ۹. مقطع افقی ترسیم شده در منطقه در عمق ۸ کیلومتر. نقاط مشکی نقاطی می‌باشند که با استفاده از معکوس‌سازی، سرعت امواج برشی در آن‌ها محاسبه شده است.



شکل ۱۰. مقطع افقی ترسیم شده در منطقه در عمق ۱۲ کیلومتر. نقاط مشکئی نقاطی می‌باشند که با استفاده از معکوس سازی، سرعت امواج برشی در آن‌ها محاسبه شده است.



شکل ۱۱. موقعیت مقطع عمودی AA' رسم شده در منطقه برای بررسی گنبد نمکی (سمت راست) و مقطع عمودی AA' (سمت چپ). خط چین زرد رنگ، مشخص کننده محدوده عمقی گنبد نمکی و خط چین قرمز، نشان دهنده نقطه شروع گنبد نمکی در پروفیل می‌باشند.

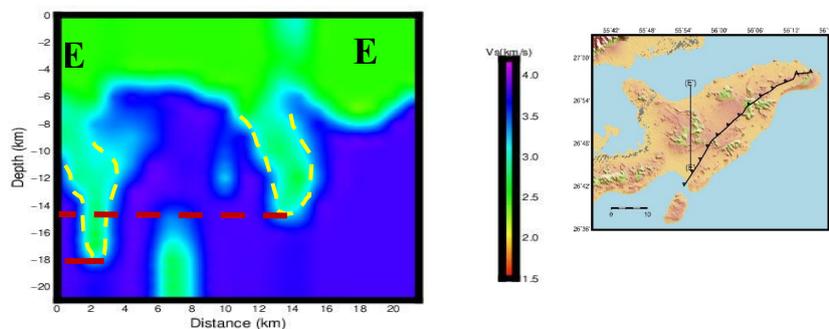


شکل ۱۲. موقعیت مقطع عمودی BB' رسم شده در منطقه برای بررسی گنبد نمکی (سمت راست) و مقطع عمودی BB' (سمت چپ). خط چین زرد رنگ، مشخص کننده محدوده عمقی گنبد نمکی و خط چین قرمز، نشان دهنده نقطه شروع گنبد نمکی در پروفیل می‌باشند.

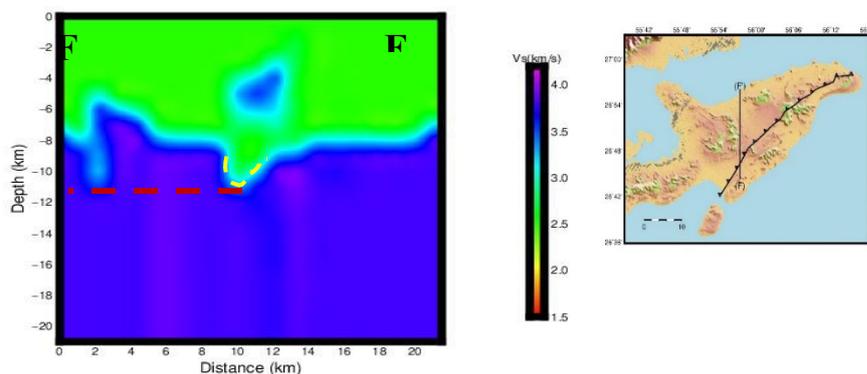
۲-۳ نتایج مقاطع عمودی

با توجه به نتایج مشاهده شده در مقاطع افقی و به منظور بررسی بهتر گنبد نمکی، مقاطعی عمودی در جهات مختلف را ترسیم نمودیم. در مقطع عمقی 'AA' (شکل ۱۱)، پروفیلی به طول ۲۲ کیلومتر رسم شده است. ضخامت لایه کم سرعت با سرعت ۲/۵ کیلومتر بر ثانیه در فاصله ۷ کیلومتری از ابتدای پروفیل، در حدود ۱۰ کیلومتر می‌باشد. در فواصل ۷ تا ۱۰ کیلومتری از پروفیل، این لایه کم سرعت که احتمالاً مرتبط با گنبد نمکی است، به عمق حدود ۱۸ کیلومتر می‌رسد. در دو کیلومتر بعدی، مجدداً عمق لایه کم سرعت در حدود ۱۰ کیلومتری قرار دارد. پس از آن، عمق این لایه، به ۶ کیلومتر و در نهایت در انتهای پروفیل، به عمق حدود ۸ کیلومتر می‌رسد. بنابراین، این مقطع عمقی می‌تواند نشان دهنده شیب تند گنبد نمکی در شرق (نزدیک گسل قشم) و کاهش شیب آن به سمت غرب باشد. در مقطع 'BB' (شکل ۱۲)، پروفیلی به طول ۳۰ کیلومتر رسم شده است. در ۸ کیلومتر ابتدای پروفیل، سطح جداکننده دو لایه در عمق حدود ۸ کیلومتری قرار دارد. پس از آن، این سطح با یک بالا آمدگی همراه می‌باشد و سپس، لایه دارای فروافتادگی‌هایی در فواصل ۱۰ تا ۱۲ و ۱۵ تا ۱۸ کیلومتری است و به عمق حدود ۱۳ کیلومتری می‌رسد. با توجه به این مقطع، عمق ریشه گنبد نمکی به حدود ۱۸ کیلومتر می‌رسد که می‌تواند بیانگر منشأ عمیق سازند هرمز در این منطقه باشد.

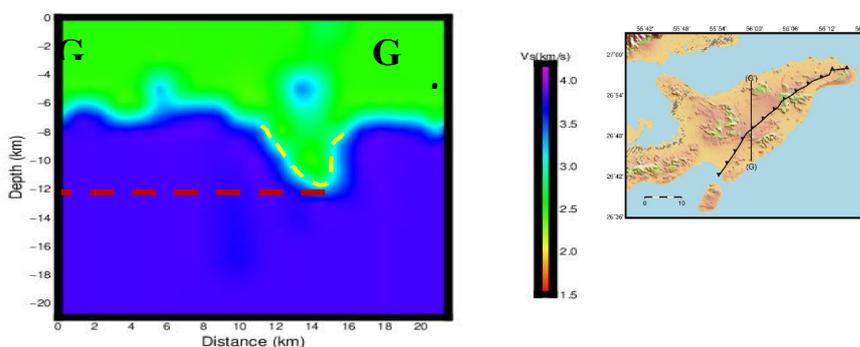
با توجه به شکل ۱۳، مقطع عمقی 'EE' دارای فراز و نشیب‌های بسیاری می‌باشد. در این مقطع، پروفیل رسم شده دارای طول ۲۲ کیلومتر است. در ۳ کیلومتر ابتدایی پروفیل، سطحی که بین دو لایه قرار دارد به عمق حدود ۱۸ کیلومتری رسیده است. به عبارتی، آنومالی کم سرعت ۲/۵ کیلومتر بر ثانیه، تا عمق حدود ۱۸ کیلومتر گسترش یافته است. در فواصل ۴ تا ۱۱ کیلومتری از پروفیل، سطح بین دو لایه در عمق حدود ۶ کیلومتر قرار گرفته است، ولی در اعماق بیشتر از حدود ۱۴ کیلومتر، شاهد یک توده کم سرعت هستیم. در فواصل ۱۲ تا ۱۶ کیلومتری از پروفیل، سطح بین دو لایه به عمق حدود ۱۴ کیلومتر و پس از آن، به عمق حدود ۸ کیلومتر می‌رسد. با توجه به مقطع عمقی 'FF' (شکل ۱۴)، در فواصل ۲ تا ۴ کیلومتری از پروفیل که محل برخورد با گسل می‌باشد، سطح بین دو لایه دارای یک بالا آمدگی تا عمق حدود ۶ کیلومتر است. پس از این فاصله، سطح بین دو لایه در عمق حدود ۸ کیلومتر قرار دارد. در فواصل ۹ تا ۱۲ کیلومتری از پروفیل، این سطح به عمق حدود ۱۲ کیلومتری می‌رسد. در مقطع عمقی 'GG' (شکل ۱۵)، پروفیلی به طول ۲۶ کیلومتر رسم شده است. در فاصله ۱۰ کیلومتر اول پروفیل، ضخامت لایه اول در حدود ۷ کیلومتر است. این لایه در فواصل بین ۱۰ تا ۱۶ کیلومتری از پروفیل، در عمق حدود ۱۲ کیلومتری قرار گرفته است. در فواصل پس از ۱۶ کیلومتری، ضخامت لایه کم سرعت بالایی، در حدود ۸ کیلومتر است.



شکل ۱۳. موقعیت مقطع عمودی 'EE' رسم شده در منطقه برای بررسی گنبد نمکی (سمت راست) و مقطع عمودی 'EE' (سمت چپ). خط چین‌های زرد رنگ، مشخص کننده محدوده عمقی گنبد نمکی و خط چین قرمز، نشان‌دهنده نقطه شروع گنبد نمکی در پروفیل می‌باشند.



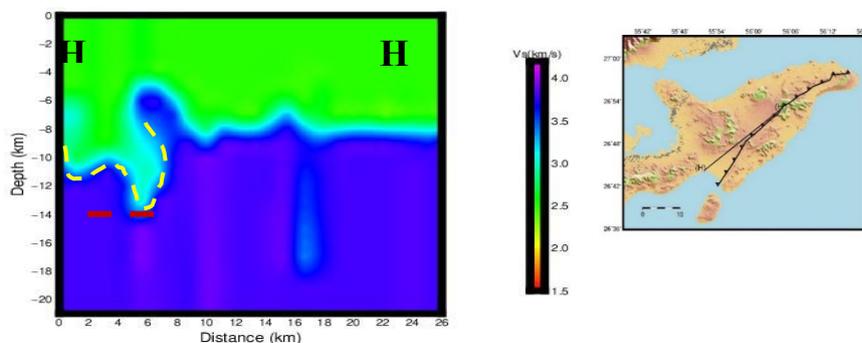
شکل ۱۴. موقعیت مقطع عمودی FF رسم شده در منطقه برای بررسی گنبد نمکی (سمت راست)، و مقطع عمودی FF (سمت چپ). خط چین زرد رنگ، مشخص کننده محدوده عمقی گنبد نمکی و خط چین قرمز، نشاندهنده نقطه شروع گنبد نمکی در پروفیل می‌باشند.



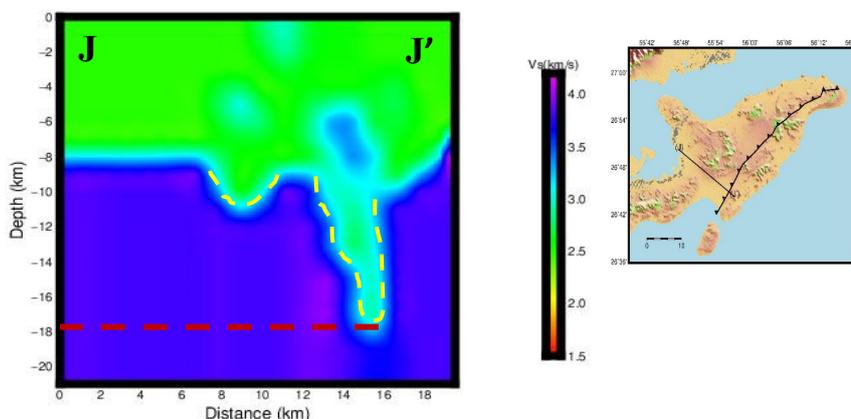
شکل ۱۵. موقعیت مقطع عمودی GG رسم شده در منطقه برای بررسی گنبد نمکی (سمت راست)، و مقطع عمودی GG (سمت چپ). خط چین زرد رنگ، مشخص کننده محدوده عمقی گنبد نمکی و خط چین قرمز، نشاندهنده نقطه شروع گنبد نمکی در پروفیل می‌باشند.

از یک بالا آمدگی، در عمق حدود ۸ کیلومتر قرار گرفته است. طول مقطع عمقی JJ، ۲۰ کیلومتر می‌باشد (شکل ۱۷). در این مقطع، در فواصل حدود ۷ تا ۱۰ کیلومتری از پروفیل، سطح بین دو لایه در عمق حدود ۱۱ کیلومتر و در فواصل ۱۳ تا ۱۶ کیلومتری از پروفیل، در عمق حدود ۱۸ کیلومتر است.

طول مقطع عمقی HH، ۲۶ کیلومتر و به موازات گسل قشم است (شکل ۱۶). در این مقطع مشاهده می‌کنیم که سطح بین دو لایه در ابتدا به عمق حدود ۱۰ کیلومتر و سپس، به عمق حدود ۱۴ کیلومتر می‌رسد. با توجه به شکل ۱۶، نقاط نزدیک به ابتدای پروفیل HH، در مجاورت گنبد نمکی قرار دارند. در این مقطع، ضخامت لایه اول بعد



شکل ۱۶. موقعیت مقطع عمودی HH رسم شده در منطقه برای بررسی گنبد نمکی (سمت راست)، و مقطع عمودی HH (سمت چپ). خط چین زرد رنگ، مشخص کننده محدوده عمقی گنبد نمکی و خط چین قرمز، نشاندهنده نقطه شروع گنبد نمکی در پروفیل می‌باشند.



شکل ۱۷. موقعیت مقطع عمودی JJ' رسم شده در منطقه برای بررسی گنبد نمکی (سمت راست)، و مقطع عمودی JJ' (سمت چپ). خط چین‌های زرد رنگ، مشخص کننده محدوده عمقی گنبد نمکی و خط چین قرمز، نشان‌دهنده نقطه شروع گنبد نمکی در پروفیل می‌باشند.

دارد و به سمت غرب پیشروی می‌کند. این یافته‌ها فرضیه نیسن و همکاران را تأیید می‌کنند که گسل‌های فعال (مانند گسل قشم) می‌توانند با حرکت نمک در تعامل باشند، اما این مطالعه با ارائه مدل سه‌بعدی، جزئیات بیشتری از هندسه و موقعیت گنبد فراهم می‌کند.

۲. مقایسه با مطالعات زمین‌شناسی و هالوکینزیس:

جهانی و همکاران (۲۰۰۹)، گنبد‌های نمکی جزیره قشم را به‌عنوان تله‌های هیدروکربنی کلاسیک معرفی کردند و بر نقش سازند هرمز در تشکیل این ساختارها تأکید داشتند. آن‌ها بر اساس داده‌های زمین‌شناسی سطحی و لرزه‌نگاری، ریشه گنبد‌های نمکی را تا اعماق ۱۲-۱۰ کیلومتری تخمین زدند. نتایج این مطالعه عمق اولیه گنبد گورزین را حدود ۱۵ کیلومتر گزارش می‌کند، که عمیق‌تر از تخمین‌های جهانی و همکاران (۲۰۰۹) است. این اختلاف می‌تواند به دلیل استفاده از روش توموگرافی امواج ریلی باشد که حساسیت بالاتری به ناهنجاری‌های کم‌سرعت (مانند نمک) در اعماق بیشتر دارد. علاوه بر این، این مطالعه با شناسایی جهت‌گیری شمال‌غربی-جنوب‌شرقی گنبد و ارتباط آن با گسل قشم، درک دقیق‌تری از دینامیک هالوکینزیس در این منطقه ارائه می‌دهد.

۳. مقایسه با مطالعات توموگرافی دوبعدی:

۴ مقایسه نتایج با مطالعات پیشین

این مطالعه با استفاده از توموگرافی سه‌بعدی سرعت گروه امواج ریلی، ساختار گنبد نمکی گورزین در جزیره قشم را بررسی نمود و نتایج آن را می‌توان با تحقیقات پیشین در زمینه زمین‌شناسی و ژئوفیزیک در این منطقه، مقایسه کرد. مطالعات پیشین عمدتاً بر تحلیل‌های لرزه‌نگاری، بررسی‌های زمین‌شناسی سطحی، و مدل‌سازی دوبعدی متمرکز بوده‌اند، در حالی که این پژوهش برای اولین بار تصویرسازی سه‌بعدی دقیقی از ساختار زیرسطحی گنبد نمکی گورزین ارائه می‌دهد.

۱. مقایسه با مطالعات لرزه‌نگاری و تکتونیک نمک:

نیسن و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی زمین‌لرزه‌های کم‌عمق جزیره قشم، به ارتباط بین جریان نمک عمیق و فعالیت لرزه‌ای اشاره کردند. آن‌ها پیشنهاد کردند که زمین‌لرزه‌های منطقه ممکن است تحت تأثیر بازتوزیع تنش ناشی از هالوکینزیس باشند، اما مدل‌های آن‌ها عمدتاً بر اساس داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی و بدون تصویرسازی مستقیم ساختارهای نمکی بودند. در مقابل، این مطالعه با استفاده از توموگرافی امواج ریلی، ناهنجاری کم‌سرعت مرتبط با گنبد نمکی گورزین را در عمق حدود ۱۵ کیلومتر شناسایی کرد و نشان داد که این گنبد در مجاورت گسل قشم قرار

ریلی (که برای شناسایی ناهنجاری‌های کم‌سرعت مانند نمک مناسب‌تر هستند) برمی‌گردد. همچنین، استفاده از الگوریتم همسایگی برای وارون‌سازی داده‌ها، امکان تولید پروفیل‌های سرعت با وضوح بالاتر را فراهم کرد. برخلاف مطالعات قبلی که عمدتاً بر ویژگی‌های سطحی یا لرزه‌خیزی کلی منطقه متمرکز بودند، این پژوهش با ارائه تصویر سه‌بعدی از گنبد نمکی گورزین، نقش گسل قشم در کنترل هالوکینزیس را با دقت بیشتری نشان داد. این نوآوری‌ها، نه تنها درک بهتری از تکنونیک نمک در زاگرس ارائه می‌دهند، بلکه مناطق امیدبخش برای اکتشاف هیدروکربنی و ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای را مشخص می‌کنند.

۵ بحث و تفسیر نتایج

بر اساس نتایج حاصل از ترسیم مقاطع افقی و قائم سرعت امواج ریلی در این مطالعه، در مجاورت گسل قشم یک لایه کم سرعت در محدوده ۱۲ تا ۱۵ کیلومتری وجود دارد. این لایه، تا محدوده طول جغرافیایی ۵۵/۸ درجه شرقی امتداد می‌یابد و با حرکت به سمت غرب، کاهش عمق پیدا می‌کند. تمرکز ناهنجاریهای کم سرعت در غرب جزیره که احتمال دارد مرتبط با وجود یک گنبد نمکی قابل توجه در منطقه باشند، نواحی امید بخش برای اکتشاف ذخایر هیدروکربنی را مشخص می‌کند. اگر چه احتمال دارد که مدل اولیه استفاده شده برای وارون‌سازی در این مطالعه که بر پایه مطالعات پیشین (یمینی فرد و همکاران، ۲۰۱۲) انتخاب شده است بر نتایج تأثیر گذاشته باشد، اما نتایج مدل‌های خروجی تفاوت بسیاری با یافته‌های پیشین دارند. بنابراین، مدل اولیه استفاده شده در این مطالعه، تأثیری بر روی نتایج ندارد. ناهنجاری کم سرعت شناسایی شده در عمق حدود ۸-۱۲ کیلومتر (حدود ۳۰٪ کاهش سرعت نسبت به محیط اطراف) با مدل‌های دیپیری نمک سازگار است. در اطراف نقطه‌ای با عرض جغرافیایی ۲۶/۷۵ درجه

حیدرپور و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از توموگرافی دوبعدی امواج ریلی و داده‌های پس‌لرزه‌های زلزله ۱۳۸۴ قشم، ساختارهای سطحی جزیره را بررسی کردند. آن‌ها تغییرات سرعت گروه امواج ریلی را در پریودهای ۱ تا ۱۰ ثانیه تحلیل کردند و نواحی کم‌سرعت را به حضور رسوبات یا ساختارهای نمکی نسبت دادند. این مطالعه با گسترش روش به توموگرافی سه‌بعدی و وارون‌سازی پروفیل‌های سرعت موج برشی، تصویر دقیق‌تری از ساختار گنبد نمکی گورزین ارائه می‌دهد. برای مثال، در حالی که حیدرپور و همکاران (۱۳۹۷) تغییرات سرعت را در مقیاس افقی بررسی کردند، این پژوهش مقاطع عمودی و افقی متعددی را تا عمق ۲۰ کیلومتری تولید کرد که نشان‌دهنده شیب تند گنبد در شرق (نزدیک گسل قشم) و کاهش شیب آن به سمت غرب است. این جزئیات سه‌بعدی، محدودیت‌های مدل‌های دوبعدی را برطرف کرده و درک بهتری از هندسه گنبد فراهم می‌کند.

۴. مقایسه با مدل‌های پوسته‌ای منطقه:

یمینی فرد و همکاران (۲۰۱۲)، مدل یک‌بعدی سرعت پوسته بالایی قشم را ارائه کردند که شامل لایه رسوبی ۸ کیلومتری با سرعت موج P حدود ۵/۵ کیلومتر بر ثانیه و لایه‌های عمیق‌تر با سرعت بالاتر بود. این مطالعه با تولید مدل سه‌بعدی، تغییرات جانبی سرعت موج برشی را نشان داد و ناهنجاری‌های کم‌سرعت (۲/۳ تا ۲/۷ کیلومتر بر ثانیه) را در اعماق ۸-۱۲ کیلومتری شناسایی کرد که با حضور نمک سازگار است. این نتایج با مدل کلی یمینی فرد و همکاران (۲۰۱۲) همخوانی دارد، اما جزئیات بیشتری از ساختارهای محلی (مانند گنبد گورزین) ارائه می‌دهد که در مدل‌های یک‌بعدی قابل مشاهده نبود.

۵. تحلیل اختلافات و نوآوری‌ها:

اختلافات مشاهده شده بین این مطالعه و تحقیقات پیشین، عمدتاً به روش‌شناسی پیشرفته‌تر (توموگرافی سه‌بعدی در مقابل دوبعدی یا لرزه‌نگاری بازتابی) و تمرکز بر امواج

اولیه این گنبد نمکی حدود ۱۵ کیلومتر است و با کاهش عمق، ابعاد آن افزایش می‌یابد. یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که گسل قشم نقش مهمی در شکل‌گیری و جابجایی گنبد نمکی گورزین ایفا کرده است. همچنین، احتمال دارد که تکتونیک گنبد نمکی موجب تعدیل لرزه‌خیزی در جزیره قشم شده باشد. با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان رفتار گنبد نمکی را در برابر تغییرات محیطی پیش بینی نمود که می‌تواند منجر به مدیریت منابع طبیعی و همچنین، ارزیابی خطر لرزه‌ای در منطقه گردد. توجه ویژه به مطالعات چندجانبه در زمینه گنبد‌های نمکی، نه تنها برای مدیریت و اکتشافات ذخایر هیدروکربنی در منطقه، بلکه برای حفاظت از محیط زیست نیز حائز اهمیت می‌باشد.

منابع

آقاناتی، ع. (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه.
حیدرپور، ن. (۱۳۹۴). بررسی ساختار لایه رسوبی جزیره قشم با استفاده از توموگرافی دو بعدی امواج سطحی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان.
حیدرپور، ن.، و غلامزاده، ع. (۱۳۹۷). بررسی ساختارهای سطحی جزیره قشم به وسیله توموگرافی دوبعدی امواج ریلی با استفاده از پس‌لرزه‌های زلزله ۴ آذر ۱۳۸۴، فصلنامه علوم زمین، دوره ۲۸، شماره ۱۱۰، صفحه ۱۰۹-۱۱۸.

Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative Seismology* (2nd ed., pp. 233-252). University Science Books.
Alavi, M. 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations, *Tectono-physics*, 229: 211-238.
Bahroudi, A., & Koyi, H. A. (2003). Effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold and

شمالی، عمق لایه کم سرعت نمک به حدود ۱۸ کیلومتر افزایش می‌یابد، اما به دلیل اینکه وضوح عمودی به دلیل کاهش حساسیت امواج سطحی کاهش می‌یابد، می‌توان عمق تقریبی بیشتر از ۱۵ کیلومتری را به عنوان نقطه آغازین شکل‌گیری گنبد نمکی در نظر گرفت. علاوه بر این، به نظر می‌رسد که بالا آمدن گنبد نمکی در نزدیکی گسل قشم، نشان دهنده نقش گسلش در ایجاد شکستگی‌ها و حرکت گنبد نمکی به سمت بالا باشد. این یافته‌ها، احتمالاً تأییدکننده تأثیر مستقیم فعالیت‌های گسلی در شکل‌گیری و جابجایی گنبد‌های نمکی در منطقه است. ارتباط مکانی بین موقعیت گسل قشم و گنبد نمکی، می‌تواند نشان‌دهنده نقش گسلش در مسیر حرکت رو به بالای نمک باشد.

۶ نتیجه‌گیری

شناخت ساختارهای کم عمق پوسته، نقش مهمی در درک ما از نحوه دگرشکلی در یک ناحیه دارد. در این پژوهش، با استفاده از توموگرافی سه‌بعدی سرعت گروه موج ریلی به بررسی ساختار سرعت پوسته کم عمق در جزیره قشم واقع در انتهای شرقی رشته‌کوه زاگرس، پرداختیم. جزیره قشم که بخشی از زاگرس چین خورده محسوب می‌شود، دارای ساختارهای زمین‌شناسی خاص از جمله، یک گنبد نمکی قابل توجه است که به عنوان یک تله هیدروکربنی شناخته می‌شود. بنابراین، مطالعه ساختار گنبد نمکی گورزین پیامدهایی برای اکتشاف و مدیریت منابع مهم زیرزمینی دارد. برای انجام توموگرافی سه بعدی امواج ریلی در این مطالعه، از روش الگوریتم همسایگی استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، شامل پس‌لرزه‌های زمین لرزه ۶ آذر ماه ۱۳۸۴ جزیره قشم می‌باشند که توسط شبکه‌ای متشکل از ۱۷ ایستگاه لرزه‌نگاری کوتاه دوره ثبت گردیده‌اند. نتایج این مطالعه، یک گنبد نمکی را نشان می‌دهد که در مجاورت گسل قشم قرار گرفته است و به سمت غرب پیشروی می‌کند. عمق

- thrust belt: an analogue modelling approach. *Journal of the Geological Society*, 160(5), 719-733.
- Ditmar, P.G. and Yanovskya, T.B. (1987). Generalization of Backus-Gilbert Method for Estimation of Lateral Variations of Surface Wave Velocities, *Phys. Solid Earth*, *Izvestia Acad. Sci. USSR*, 23:470-477.
- Gholamzadeh, A. (2021). Spatial variations of coda-wave attenuation in the Khurgu region, southeast of Zagros, Iran. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 123,103004.<https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103004>
- Herrmann, R. B. (2013). Computer Programs in Seismology: An evolving tool for instruction and research, *Seismological research letters*, 84(6), 1081-1088.
- Herrmann, R.B. and Ammon, C.J. (2002). Computer Programs in Seismology, Surface Waves, Receiver Functions and Crustal Structure, *Department of Earth and Atmospheric Sciences, Saint Louis University*, St Louis.
- Jackson, J., & McKenzie, D. P. (1984). Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 77, 185-264.
- Jahani, S., Callot, J. P., Letouzey, J., & Frizon de Lamotte, D. (2009). The eastern termination of the Zagros Fold-and-Thrust Belt, Iran: Structures, evolution, and relationships between salt plugs, folding, and faulting. *Tectonics*, 28(6).
- Levshin, A. L., Pisarenko, V.F. and Pogrebinsky, G.A., 1972. On a Frequency-Time Analysis of Oscillations, *Ann. Geophys.*, 28: 211-218.
- Motamedi, H., Sherkat, S., & Sepehr, M. (2012). Structural style variation and its impact on hydrocarbon traps in central Fars, southern Zagros folded belt, Iran. *Journal of Structural Geology*, 37, 124-133.
- Nissen, E., Jackson, J., Jahani, S., & Tatar, M. (2014). Zagros "phantom earthquakes" reassessed—The interplay of seismicity and deep salt flow in the Simply Folded Belt? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(4), 3561-3583.
- Rahimi, H., & Gholamzadeh, A. (2017). Coda Q in Qeshm Island, south of Iran, using aftershocks of the Qeshm earthquake of November 27, 2005. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1-12.
- Ritzwoller, M. H., & Levshin, A. L. (1998). Eurasian Surface Wave Tomography: Group Velocities. *Journal of Geophysical Research*, 103(B3), 4839-4878.
- Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm – I. Searching a parameter space. *Geophysical Journal International*, 138, 479-494.
- Scherbaum, F., Hinzen, K. G. and Ohrnberger, M. (2003). Determination of shallow shear wave velocity profiles in the cologne, Germany area using ambient vibration, *Geophys. J. Int.*, 152, pp.597-612.
- Shirzad, T., & Yaminifard, F. (2020). High resolution upper crustal velocity structure beneath Qeshm Island (SE Zagros) from surface wave, first arrival, and interevent interferometry tomography methods. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 308, 106569.
- Soltani, S., Haghshenas, E., & Fazlavi, M. (2016). Shear wave velocity estimation with microtremor and earthquake data using ellipticity of Rayleigh waves. In *17th Iranian Geophysics Conference*.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chery, J. (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman. *Geophys. J. Int.*, 157: 381-398.
- Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*. 35: 1-5.
- Wathelet, M., Jongmans, D. and Ohrnberger, M. (2004). Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *European Association of Geoscientists & Engineers, Near Surface Geophysics*. 2:

- 211-221.
Yaminifard, F., Tatar, M., Hessami, K. and Gholamzadeh, A. (2012). Aftershock analysis of the 2005 November 27 (Mw 5.8) Qeshm Island earthquake (Zagros-Iran): Triggering of strike-slip faults at the basement. *Journal of Geodynamics*. 61: 138-147.
- Zarean, A., Farrokhi, M., & Chaychizadeh, S. (2008, October). Attenuation of high frequency P and S waves in Qeshm Island, Iran. In 14th World Conference on Earthquake Engineering.

Three-dimensional rayleigh wave tomography of the Gavazhin salt dome, Qeshm island: structural insights from aftershocks of the 2005 M 6.0 Qeshm earthquake

Razieh Heydari Moharloi¹, Abbas Gholamzadeh^{2*}, Mohsen Farrokhi³ and Sara Abbasi⁴

¹ M.Sc., University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

² Associate Professor, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

³ Assistant Professor, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

⁴ Ph.D. Iran University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

(Received: 16 March 2025, Accepted: 19 May 2025)

Summary

This study utilizes three-dimensional Rayleigh wave group velocity tomography to investigate the shallow crustal velocity structure of Qeshm Island, located at the eastern end of the Zagros Mountain Range beneath the Bandar Abbas region. Qeshm Island, with its unique geological features, hosts a prominent salt dome known as Gavazhin, recognized as a hydrocarbon trap critical for underground oil and gas storage. Thus, this research emphasizes the necessity of comprehensive investigations into such geological structures due to their economic and environmental implications. For the three-dimensional Rayleigh wave tomography and velocity structure imaging, the study employs the Neighborhood Algorithm, a direct search technique that has emerged in recent decades for geophysical data inversion. The data used include aftershocks from the December 27, 2005 (6 Azar 1384), Qeshm Island earthquake, recorded by a network of 17 short-period seismic stations. The results reveal a salt dome situated near the Qeshm Fault, migrating westward. The initial depth of this salt dome is approximately 15 km, with its dimensions increasing as the depth decreases. The findings indicate that the Qeshm Fault plays a significant role in the formation and displacement of the Gavazhin salt dome. These results enhance the understanding of subsurface geology in the region and carry implications for the exploration and management of subsurface resources.

Keywords: Rayleigh waves, neighborhood algorithm, 3D tomography, Qeshm island, Zagros