

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت

تصویرسازی الگوی گسلی در داده‌های دشت گرگان

با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای

نگارنده:

میثم حقانی

اساتید راهنما:

دکتر محمد رداد

دکتر علی نجاتی کلاته

استاد مشاور:

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

بهمن ماه ۱۳۹۹

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقدیم بہ :

پدرم کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونه در عرصہ زندگی، ایستادگی را تجربہ نمایم

مادرم، دریای نبی کران فداکاری و عشق کہ وجودم برایش ہمہ رنج بوده و وجودش برایم ہمہ مہر

تقدیر و تشکر:

باسپاس و تقدیر ویژه از اساتید گرامتدر جناب آقای دکتر محمد رداد و دکتر علی نجابی که در مراحل مختلف این پایان نامه، راهنمایی‌های ارزنده و سازنده خود را بر من ارزانی داشته‌اند و از بیچ کوششی در این زمینه درینج نمودند

؛ همچنین بر خود لازم می‌دانم که از زحمات بی‌درینج جناب آقای دکتر مهرداد سلیمانی، که به عنوان مشاور و راهنما، اینجانب را یاری نمودند، تقدیر و تشکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب میثم حقانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی اکتشاف نفت دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان **تصویرسازی الگوی گسلی در داده‌های دشت گرگان با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای** تحت راهنمایی دکتر محمد رداد و دکتر علی نجاتی کلاته متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

از آنجایی که گسل تاثیر قابل ملاحظه‌ای در مهاجرت و ایجاد تله هیدروکربنی دارد، تشخیص آن یکی از مهم‌ترین مولفه‌های تفسیر لرزه‌ای در اکتشافات نفت می‌باشد. به طور مرسوم، تفسیر گسل با بررسی مقاطع و برش‌های زمانی لرزه‌ای توسط مفسر انجام می‌شود. این روش سلیقه‌ای و همچنین زمان‌بر است. بعلاوه، به دلیل اثر نویز و همچنین بازتاب ضعیف، تصویرسازی و شناسایی الگوی گسل بر روی داده‌های لرزه‌ای یک کار حساس و مسئله‌ای چالش برانگیز است. بنابراین، استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای برای این مشکل در دهه‌های اخیر به طور گسترده‌ای توسعه یافته است. دشت گرگان در شمال ایران منطقه‌ای ناشناخته از نظر اکتشاف هیدروکربن است که تحقیقات کمی در این زمینه انجام شده است. در این پایان‌نامه، پژوهشی در مورد به تصویر کشیدن الگوی گسلی در داده‌های لرزه‌ای به دست آمده در این منطقه انجام شده است. روش تحقیق بر مبنای استفاده از برخی نشانگرهای لرزه‌ای مناسب در تشخیص گسل می‌باشد. بیشتر نشانگرهای مناسب برای تشخیص گسل بر اساس ناپیوستگی و عدم تشابه در امتداد بازتابنده‌های داده‌های لرزه‌ای است. چندین نشانگر مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت چهار نشانگر به منظور تحقیق انتخاب شدند. این نشانگرها عبارتند از واریانس، تباین‌دامنه، آشفستگی و شباهت. تجزیه و تحلیل نشانگرها در پنج مقطع لرزه‌ای دوبعدی انجام شده است. نتایج نشان داد که نشانگر واریانس از کارایی بالاتری در تصویرسازی الگوی گسلی برخوردار است و ضعیف‌ترین نتایج توسط نشانگر آشفستگی به دست آمده است. در این تحقیق، یک مدل ساختاری با استفاده از اطلاعات موجود در مورد سازندهای زیرسطحی و همچنین انتخاب بازتابنده‌ها روی داده‌های لرزه‌ای، ارائه شده است که الگوهای گسلی شناسایی شده توسط نشانگرهای لرزه‌ای در این مدل نشان داده می‌شود.

کلمات کلیدی: نشانگرهای لرزه‌ای، دشت گرگان، الگوی گسل خوردگی، مدل ساختاری

فهرست مطالب

۱	فصل اول : مقدمه.....
۲	۱-۱ پیش گفتار.....
۳	۱-۲ بیان مسئله پژوهش.....
۵	۱-۳ تاریخچه موضوع پژوهش.....
۷	۱-۴ روش پژوهش.....
۸	۱-۵ ساختار پایان نامه.....
۹	فصل دوم : زمین شناسی و اطلاعات اکتشافی منطقه مورد مطالعه.....
۱۰	۲-۱ مقدمه.....
۱۲	۲-۲ موقعیت جغرافیایی دشت گرگان.....
۱۲	۲-۳ فعالیت‌های اکتشافی در دشت گرگان.....
۱۲	۲-۳-۱ عملیات گرانی‌سنجی.....
۱۳	۲-۳-۲ عملیات لرزه‌ای.....
۱۴	۲-۴-۱ ساختمان‌های موجود در پهنه دشت گرگان.....
۱۴	۱-۴-۲ ساختمان گرگان.....
۱۵	۲-۴-۲ ساختمان ایمر.....
۱۵	۲-۴-۳ ساختمان پهلوی دژ.....
۱۵	۲-۴-۴ ساختمان اینچه.....
۱۶	۲-۴-۵ ساختمان قزل‌تپه.....

۱۶	..... ۲-۴-۶ ساختمان میثم
۱۶	..... ۲-۴-۷ ساختمان مقدار
۱۷	..... ۲-۵ چین‌شناسی منطقه
۲۲	..... ۲-۶ تعریف گسل
۲۳	..... ۲-۶-۱ بلوک گسل
۲۳	..... ۲-۷ تقسیم‌بندی گسل‌ها
۲۳	..... ۲-۷-۱ گسل‌های شیب‌لغز
۲۵	..... ۲-۷-۲ گسل‌های امتدادلغز
۲۶	..... ۲-۷-۳ گسل‌های مورب‌لغز
۲۶	..... ۲-۸ رژیم تکتونیکی و زمین‌ساختی دشت گرگان
۲۷	..... ۲-۹ وضعیت گسلش دشت گرگان
۲۹	..... فصل سوم : نشانگرهای لرزه‌ای کاربردی در آشکار سازی گسل
۳۰	..... ۱-۳ مقدمه
۳۱	..... ۲-۳ تعریف نشانگرهای لرزه‌ای
۳۲	..... ۳-۳ نشانگرهای مناسب برای آشکار سازی الگوی گسلی
۳۳	..... ۳-۳-۱ نشانگر انحنا
۴۱	..... ۳-۳-۲ نشانگر همدوسی
۴۳	..... ۳-۳-۲-۱ همدوسی بر مبنای همبستگی
۴۵	..... ۳-۳-۲-۲ همدوسی بر مبنای شباهت
۴۸	..... ۳-۳-۲-۳ همدوسی بر مبنای واریانس

۵۰	..... ۳-۳-۲-۴ هم‌دوسی بر مبنای مقادیر ویژه
۵۳	..... ۳-۳-۳ نشانگر واریانس
۵۵	..... ۳-۳-۴ نشانگر شباهت
۵۶	..... ۳-۳-۵ نشانگر تباین دامنه
۵۷	..... ۳-۳-۶ نشانگر آشفستگی
۵۹	فصل چهارم : تفسیر داده‌های لرزه‌ای با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای
۶۰	..... ۱-۴ مقدمه
۶۲	..... ۲-۴ تفسیر خطوط لرزه‌ای
۶۴	..... ۱-۲-۴ خط لرزه‌ای X۰۶
۶۶	..... ۱-۱-۲-۴ زیر مقطع AX۰۶
۶۹	..... ۲-۱-۲-۴ زیر مقطع BX۰۶
۷۱	..... ۳-۱-۲-۴ زیر مقطع CX۰۶
۷۳	..... ۲-۲-۴ خط لرزه‌ای X۰۷
۷۵	..... ۱-۲-۲-۴ زیر مقطع AX۰۷
۷۷	..... ۲-۲-۲-۴ زیر مقطع BX۰۷
۷۹	..... ۳-۲-۲-۴ زیر مقطع CX۰۷
۸۱	..... ۳-۲-۴ خط لرزه‌ای X۰۹
۸۳	..... ۱-۳-۲-۴ زیر مقطع AX۰۹
۸۵	..... ۴-۲-۴ خط لرزه‌ای X۱۶
۸۷	..... ۱-۴-۲-۴ زیر مقطع AX۱۶

۸۹.....	BX۱۶	زیر مقطع	۲-۴-۲-۴
۹۱.....	CX۱۶	زیر مقطع	۳-۴-۲-۴
۹۳.....	X۲۵	خط لرزه‌ای	۵-۲-۴
۹۵.....	AX۲۵	زیر مقطع	۱-۵-۲-۴
۹۷.....		درون یابی و مدل‌سازی ساختاری	۳-۴
۱۰۱.....		فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادها	
۱۰۲.....		نتیجه‌گیری	۵-۱
۱۰۳.....		پیشنهادها	۵-۲
۱۰۴.....		منابع	

فهرست اشکال

- شکل (۲-۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، موقعیتی از ایران در خاورمیانه، استان گلستان در مرز جنوب شرقی دریای خزر و خطوط لرزه‌ای بدست آمده از دشت گرگان، که خطوط قرمز مقاطع مورد نظر در این مطالعه می‌باشد..... ۱۱
- شکل (۲-۲): ستون چینه شناسی منطقه مورد مطالعه..... ۱۷
- شکل (۲-۳): ارتباط و همبستگی چینه شناسی بین چهار حلقه چاه در منطقه مورد مطالعه..... ۱۸
- شکل (۲-۴): نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه در دشت گرگان و محل پروفیل‌های لرزه‌ای به همراه مختصات چاه‌های حفاری شده..... ۱۹
- شکل (۲-۵): گسل نرمال..... ۲۴
- شکل (۲-۶): گسل معکوس..... ۲۵
- شکل (۲-۷): گسل امتدادلغز..... ۲۵
- شکل (۲-۸): گسل مورب لغز..... ۲۶
- شکل (۳-۱): گردش کار مربوط به پردازش داده‌ها و تجزیه و تحلیل نشانگرهای لرزه‌ای برای تفسیر گسل..... ۳۲
- شکل (۳-۲): شبکه‌ای از نه نقطه برای برآورد انحنای یک افق، با زمان یا عمق Z_1 تا Z_n و نقاط مجاور با فاصله Δ_x در جهت x و Δ_y در جهت y از هم جدا می‌شوند، که انحنای تعیین شده به نقطه مرکزی شبکه اختصاص داده می‌شود..... ۳۵
- شکل (۳-۳): مقادیر و علامت‌های انحنای بر مبنای تغییرات شیب..... ۳۸
- شکل (۳-۴): انحنای یک سطح زمین شناسی..... ۳۹
- شکل (۵-۳): (a) داده‌های اصلی، (b) مثبت‌ترین انحنای در 1215 inline که مقادیر بالای مثبت در رنگ قرمز نشان دهنده بلوک بالارونده گسل می‌باشد..... ۴۰
- شکل (۶-۳): (a) داده‌های اصلی، (b) منفی‌ترین انحنای در 1215 inline که مقادیر بالای منفی در رنگ آبی نشان دهنده بلوک پایین‌رونده گسل می‌باشد..... ۴۱
- شکل (۳-۷): برش عمودی هم‌دوسی در مقطع زمانی $t =$ ۴۲

شکل (۳-۸) : یک نمودار شماتیکی که همبستگی بین دو ردلرزه را نشان می‌دهد..... ۴۴

شکل (۳-۹) : (a) پنجره تحلیل بیضوی و (b) پنجره تحلیل مستطیل، مرکز هر نقطه تحلیل با طول محور اصلی a ، طول محور فرعی b ، و آزیموت محور اصلی φ_a ، تعریف می‌شود. اصطلاح φ نشان دهنده آزیموت محور لرزه‌ای inline از شمال است..... ۴۵

شکل (۳-۱۰) : یک نمودار شماتیکی که مراحل بکار رفته شده در تخمین و برآورد شباهت از همدوسی را نشان می‌دهد..... ۴۷

شکل (۳-۱۱) : مقاطع لرزه‌ای عمودی، (الف) مقطع لرزه‌ای اصلی، (ب) مقطع عمودی در حجم همدوسی مبتنی بر شباهت به دست آمده با استفاده از داده‌های لرزه‌ای اصلی به عنوان ورودی..... ۴۷

شکل (۳-۱۲) : نشانگر همدوسی مبتنی بر واریانس..... ۵۰

شکل (۳-۱۳) : (a) حجم مصنوعی سه بعدی، شامل چندین گسل مجزا، خطوط آبی افقی برش زمانی را در ۷۰ ms نشان می‌دهد. (b) برش همدوسی مبتنی بر مقادیر ویژه در ۷۰ ms در شکل (a) می‌باشد که فلش‌های قرمز مناطق گسل خوردگی بزرگ و فلش‌های آبی گسل‌های ظریف و کوچک را نشان می‌دهند..... ۵۳

شکل (۳-۱۴) : (a) مقطع لرزه‌ای اصلی، (b) نشانگر واریانس برای شکل a را نشان می‌دهد که فلش قرمز به مناطق گسل اشاره دارد..... ۵۴

شکل (۳-۱۵) : (a) داده لرزه‌ای اصلی نرم شده در ۶۶۵ inline، (b) مقطع نشانگر واریانس..... ۵۵

شکل (۳-۱۶) : (a) مقطع لرزه‌ای اصلی، (b) مقطع نشانگر شباهت که فلش‌های آبی نواحی گسل-خوردگی را نشان می‌دهند..... ۵۶

شکل (۳-۱۷) : مقایسه عملکرد دو نشانگر واریانس (سمت راست) و تباین دامنه (سمت چپ) در شناسایی الگوی گسلی..... ۵۷

شکل (۳-۱۸) : (a) مقطع لرزه‌ای اصلی، (b) نشانگر آشفستگی برای شکل a را نشان می‌دهد که فلش‌ها به مناطق گسل خورده اشاره دارند..... ۵۸

شکل (۴-۱) : نمای کلی از خطوط لرزه‌ای دو بعدی در منطقه مورد مطالعه..... ۶۱

شکل (۴-۲) : موقعیت خطوط لرزه‌ای دو بعدی و چاه‌های حفاری شده در پنجره سه بعدی..... ۶۲

شکل (۴-۳) : نمای کلی از خطوط لرزه‌ای دوبعدی و زیر مقطع‌های استخراج شده..... ۶۳

شکل (۴-۴) : مقطع لرزه‌ای اصلی X۰۶ به همراه موقعیت زیر مقطع‌های استخراج شده روی آن..... ۶۴

شکل (۴-۵) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۶۶

شکل (۴-۶) : (الف) زیر مقطع خام AX۰۶، (ب) زیر مقطع AX۰۶ به همراه تفسیر گسل..... ۶۷

شکل (۴-۷) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۶۸

شکل (۴-۸) : (الف) زیر مقطع خام BX۰۶، (ب) زیر مقطع BX۰۶ به همراه تفسیر گسل..... ۶۹

شکل (۴-۹) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۷۰

شکل (۴-۱۰) : (الف) زیر مقطع خام CX۰۶، (ب) زیر مقطع CX۰۶ به همراه تفسیر گسل..... ۷۱

شکل (۴-۱۱) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۷۲

شکل (۴-۱۲) : مقطع لرزه‌ای اصلی X۰۷ به همراه موقعیت زیر مقطع‌های استخراج شده روی آن..... ۷۳

شکل (۴-۱۳) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۷۴

شکل (۴-۱۴) : (الف) زیر مقطع خام AX۰۷، (ب) زیر مقطع AX۰۷ به همراه تفسیر گسل..... ۷۵

شکل (۴-۱۵) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۷۶

شکل (۴-۱۶) : (الف) زیر مقطع خام BX۰۷، (ب) زیر مقطع BX۰۷ به همراه تفسیر گسل..... ۷۷

شکل (۴-۱۷) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۷۸

شکل (۴-۱۸) : (الف) زیر مقطع خام CX۰۷، (ب) زیر مقطع CX۰۷ به همراه تفسیر گسل..... ۷۹

شکل (۴-۱۹) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۸۰

شکل (۴-۲۰) : مقطع لرزه‌ای اصلی X۰۹ که موقعیت زیر مقطع دارای گسل روی آن مشخص شده..... ۸۱

شکل (۴-۲۱) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۸۲

شکل (۴-۲۲) : (الف) زیر مقطع خام AX۰۹، (ب) زیر مقطع AX۰۹ به همراه تفسیر گسل..... ۸۳

شکل (۴-۲۳) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۸۴

شکل (۴-۲۴) : مقطع لرزه‌ای اصلی X۱۶ که موقعیت زیر مقطع دارای گسل روی آن مشخص شده..... ۸۵

شکل (۴-۲۵) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفستگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۸۶

شکل (۴-۲۶) : (الف) زیر مقطع خام AX۱۶، (ب) زیر مقطع AX۱۶ به همراه تفسیر گسل..... ۸۷

شکل (۴-۲۷) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفستگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۸۸

شکل (۴-۲۸) : (الف) زیر مقطع خام BX۱۶، (ب) زیر مقطع BX۱۶ به همراه تفسیر گسل..... ۸۹

شکل (۴-۲۹) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفستگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۹۰

شکل (۴-۳۰) : (الف) زیر مقطع خام CX۱۶، (ب) زیر مقطع CX۱۶ به همراه تفسیر گسل..... ۹۱

شکل (۴-۳۱) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفستگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۹۲

شکل (۴-۳۲) : مقطع لرزه‌ای اصلی X۲۵ که موقعیت زیر مقطع دارای گسل روی آن مشخص شده..... ۹۳

شکل (۴-۳۳) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفستگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۹۴

شکل (۴-۳۴) : (الف) زیر مقطع خام AX۲۵، (ب) زیر مقطع AX۲۵ به همراه تفسیر گسل..... ۹۵

شکل (۴-۳۵) : (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفستگی، (د) مقطع نشانگری شباهت..... ۹۶

شکل (۴-۳۶) : (الف) نمای کلی از سرسازندهای پیک شده روی مقاطع لرزه‌ای، (ب) مدل ساختاری سرسازندهای پیک شده در مقطع لرزه‌ای X۱۶، (ب) مقطع لرزه‌ای X۱۶ که در آن سر سازندها تفسیر شده‌اند،..... ۹۸

شکل (۴-۳۷) : (الف) نمایش سه بعدی Surface سرسازند سرچشمه و سنگانه بر روی خطوط لرزه‌ای، (ب) نمایش سه بعدی Surface سرسازند تیرگان بر روی زیر مقاطع استخراج شده..... ۹۹

شکل (۴-۳۸) : (الف) موقعیت گسل‌ها روی خطوط لرزه‌ای، (ب) موقعیت گسل‌ها روی زیر مقاطع استخراج شده، (ج) نمایش موقعیت گسل‌ها در مدل ساختاری تولید شده از اطلاعات مربوط به سرسازندها، (د) موقعیت گسل‌ها روی Surface کمکی..... ۱۰۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیش گفتار

در اکتشاف منابع هیدروکربنی اطلاع از خصوصیات زیر سطحی زمین‌شناسی از جمله وضعیت ساختاری، شرایط چینه‌ای^۱ و چگونگی لایه‌بندی از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از پدیده‌های مهم زمین‌شناسی در اکتشاف نفت که نیاز است اطلاعات مناسبی از آن حاصل شود، الگوی گسلی^۲ می‌باشد. گسل‌ها یکی از رخداد‌های زمین‌شناسی هستند که در تجمع یا عدم تجمع منابع هیدروکربنی نقش مهمی ایفا می‌کنند. در اختیار داشتن اطلاعات هر چه دقیق‌تر از الگوی گسل‌خوردگی هم در زمینه اکتشاف و هم در مرحله حفاری چاه (جهت تعیین موقعیت بهینه برای حفاری و نیز در نظر گرفتن مخاطرات احتمالی حفاری) ضرورت دارد. به منظور دستیابی به وضعیت گسل‌خوردگی در لایه‌های زیرسطحی زمین، روش‌های ژئوفیزیکی^۳ متعددی کارایی دارند که می‌توان به روش‌های گرانی‌سنجی^۴، مغناطیس‌سنجی^۵ و لرزه‌شناسی^۶ اشاره کرد. اما بهترین روش در این زمینه، روش لرزه‌شناسی می‌باشد که قادر است تصاویر زیرسطحی خیلی خوب و نزدیک به واقعیت را ارائه دهد. یکی از مهمترین روش‌های ژئوفیزیکی اکتشاف نفت لرزه‌نگاری می‌باشد که در ابتدای دهه ۱۹۶۰ با پیشرفت تکنولوژی و استفاده گسترده از رایانه در پردازش و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی، تحول عظیمی در این شاخه از دانش ایجاد شد. لرزه‌نگاری به صورت دوبعدی یا سه‌بعدی انجام می‌شود که حالت سه‌بعدی از دقت بالاتری برخوردار است و در نتیجه تصاویر واضح‌تری ارائه می‌کند. از روش لرزه‌نگاری برای تعیین عمق لایه‌ها، محل گسل‌ها و گنبد‌های نمکی و همچنین برای اندازه‌گیری سرعت امواج در لایه‌های مختلف استفاده می‌شود.

^۱ Stratigraphy

^۲ Fault model

^۳ Geophysics

^۴ Gravimetry

^۵ Magnetometry

^۶ Seismology

۱-۲ بیان مسئله پژوهش

در این پایان‌نامه هدف آشکارسازی الگوی گسلی در داده‌های لرزه‌ای مربوط به دشت گرگان با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای^۱ می‌باشد. با توجه به تحقیقاتی که در رابطه با دریافت جزئیات زمین‌شناسی زیرسطحی دشت گرگان بر مبنای داده‌های لرزه‌ای موجود انجام شده است، هر پژوهش جدیدی در مورد این منطقه می‌تواند به رفع ابهامات موجود کمک کند. تاکنون مطالعات گسترده در مورد اکتشاف و تولید هیدروکربن در بخش جنوبی حوضه خزر (SCB^۲) ایران انجام نشده است. اکتشاف و استخراج مواد هیدروکربنی از SCB و کوه‌های کپه‌داغ (KDM^۳) هر دو نشان داده که دشت گرگان نیز از پتانسیل تولید هیدروکربن برخوردار است. از این رو دشت گرگان به عنوان یک منطقه دارای ذخایر هیدروکربنی و تله‌های نفتی از جمله گسل، مورد مطالعه وسیعی توسط محققان ژئوفیزیکی قرار گرفته است (Radfar et al, ۲۰۱۸). با این وجود هیچ میدان تجاری نفت و گازی در دشت گرگان کشف نشده است، به جز اکتشافات گاز در قسمت شرقی دشت که غیر تجاری محسوب می‌شود (Soleimani et al, ۲۰۱۸). دشت گرگان با مساحت حدود ۴۷۲۷ کیلومتر مربع در قسمت شمالی ایران واقع شده است که از غرب به دریای خزر، از جنوب به کوه‌های البرز و از شمال به مرز ایران و ترکمنستان^۴ محدود می‌شود و از یک توالی ضخیم رسوبات کواترنری^۵ (رس، شن و ماسه) تشکیل شده است که دارای شیب ملایمی می‌باشد (Rezaei et al, ۲۰۱۹). دشت گرگان سرزمین فرو افتاده با پوشش کواترنری که هیچ‌گونه رخنمونی^۶ در آن مشاهده نمی‌شود و از کپه‌داغ در شرق و البرز در جنوب متمایز می‌گردد و رژیم تکتونیکی به صورت کششی و فشارشی باعث ایجاد گسل و ناهنجاری^۷ در این منطقه شده است (Rezvandehy et al, ۲۰۱۱; Radfar et al, ۲۰۱۸). دشت گرگان توسط گسل

^۱ Seismic Attributes

^۲ South Caspian Basin

^۳ Kopeh-Dagh mountains

^۴ Turkmenistan

^۵ Quaternary

^۶ Outcrop

^۷ Anomalie

خزر از رشته کوه‌های البرز در موقعیت جنوبی جدا شده و در نواحی شمالی در راستای گسل کپه‌داغ، در مجاورت و همسایگی صحرای غرب ترکمنستان و فرونشستگی قره‌بغاز قرار گرفته است. بین طول‌های جغرافیایی ۵۳ درجه تا ۵۵ درجه، قسمتی از سیستم گسلی خزر جنوبی قرار گرفته و شامل چندین الگوی گسلی با راستای خمیده است که مرز میان رشته کوه‌های البرز و خزر جنوبی می‌باشد (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶). در ناحیه دشت گرگان توالی‌های پیشرونده بالای ناپیوستگی^۱ کرتاسه^۲ و در بعضی قسمت‌های بالاتر از ناپیوستگی ائوسن^۳ - پالتوسن^۴، به علت حرکت گل^۵ به سمت بالا دچار گسل خوردگی شده‌اند (Feyzullayev, ۲۰۱۲; Soleimani and Rafiei, ۲۰۱۶). در این مطالعه، از پنج خط لرزه‌ای (X.۰۶, X.۰۷, X.۰۹, X.۱۶, X.۲۵) برداشت شده از منطقه دشت گرگان استفاده شده است. بکارگیری نشانگرهای لرزه‌ای برای آشکارسازی الگوی گسلی در منطقه دشت گرگان که موضوع این پژوهش می‌باشد، گام مهمی در این زمینه به حساب می‌آید. در این پژوهش از نشانگرهای لرزه‌ای مختلف برای آشکارسازی الگوی گسلی در داده‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود. یکی از ابزارهای موفق در شناسایی الگوی گسلی بر روی داده‌های لرزه‌ای، نشانگرهای لرزه‌ای هستند. از میان نشانگرهای لرزه‌ای که در زمینه به تصویر کشیدن الگوی گسل خوردگی استفاده می‌شوند، می‌توان به نشانگرهای واریانس^۶، شباهت^۷، همدوسی^۸ و انحنا^۹ اشاره کرد (Dewett et al, ۲۰۱۹; Hamidi et al, ۲۰۱۸; Zheng et al, ۲۰۱۷; Abdelnabi et al, ۲۰۱۶; al) که در این پایان‌نامه برخی از این نشانگرها برای شناسایی بهتر ناپیوستگی‌های گسلی مورد استفاده قرار گرفته است.

^۱ Unconformity

^۲ Cretaceous

^۳ Eocene

^۴ Paleocene

^۵ mud

^۶ Variance

^۷ Similarity

^۸ Coherence

^۹ Curvature

۳-۱ تاریخچه موضوع پژوهش

تحقیقات گوناگونی در زمینه آشکارسازی الگوی گسلی بر روی داده‌های لرزه‌ای با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای انجام شده است. حمیدی و همکاران (۲۰۱۹) از نشانگرهای واریانس و انحنا برای آشکارسازی شکستگی‌ها و گسل‌ها در داده‌های لرزه‌ای استفاده کردند و عملکرد هر کدام را مورد ارزیابی قرار دادند که ثابت شد این نشانگرها در تشخیص شکستگی‌ها و گسل‌ها مفید هستند. با این حال، به دلیل محدودیت داده‌های لرزه‌ای مثل وضوح پایین مخصوصاً در قسمت‌های عمیق‌تر، الگوریتم تجزیه طیفی^۱ داده‌های لرزه‌ای را برای نتایج دقیق‌تر پیشنهاد کرده و مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که تلفیق این روش با نشانگرهای واریانس و انحنا، نتایج حاصل از تحلیل گسل و شکستگی در ناحیه مورد مطالعه را بسیار بهبود می‌بخشد. ژنگ^۲ و همکاران (۲۰۱۸) برای فرآیند برجسته‌سازی گسل از نشانگر همدوسی استفاده کردند، اما با اشاره به اینکه اندازه پنجره تجزیه و تحلیل اغلب بر مقدار نشانگر همدوسی تأثیر می‌گذارد و بین رزولوشن^۳ عمودی و رزولوشن جانبی یک جابجایی به وجود می‌آورد، لذا برای رفع این مشکل یک نوع جدید از همدوسی را به همراه یک پنجره تجزیه و تحلیل با مقیاس مناسب و موثر برای تعیین خطوط گسل ارائه دادند. عبدالنبی^۴ و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که در بین صدها نشانگر لرزه‌ای ایجاد شده، همدوسی و انحنا مؤثرترین نشانگر در تفسیر ناپیوستگی‌های ساختاری همچون گسل می‌باشند. دویت^۵ و همکاران (۲۰۱۶) یک روش جدید برای ارتقاء نشانگر شباهت ارائه دادند که حجمی (۳D) را تولید می‌کند و باعث افزایش کارایی تفسیر گسل چند برابر بیشتر از تفسیر گسل مبتنی بر انسان و تکنیک‌های آشکارسازی گسل مبتنی بر رایانه می‌شود. کوسن^۶ و همکاران (۲۰۱۴) ثابت کردند که نشانگر واریانس در آشکارسازی

^۱ Spectral Decomposition

^۲ Zheng

^۳ Resolution

^۴ Abdelnabi

^۵ Dewett

^۶ Koson

گسل‌ها و کانال‌های^۱ مدفون کمک شایانی به مفسر می‌کند. تینگدال^۲ و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند نشانگرهای مختلف از جمله شباهت، فرکانس^۳ و انحنای همه به طور بالقوه باعث افزایش شناسایی گسل‌ها می‌شوند و می‌توانند با موفقیت توسط یک شبکه عصبی^۴ مصنوعی ترکیب شوند.

در مورد پژوهش‌های انجام شده در ناحیه دشت گرگان می‌توان به این موارد اشاره کرد. رادفر^۵ و همکاران (۲۰۱۸) جزئیات تازه‌ای از ساختار حوضه خزر جنوبی را با استفاده از داده‌های لرزه‌ای بازتابی دشت گرگان ارائه کردند و با بررسی‌هایی که بر روی داده‌های لرزه‌ای دو بعدی منطقه دشت گرگان انجام دادند، بحث تله‌های ساختاری را اساس کار خود قرار دادند، همچنین بر اساس تفسیر صورت گرفته در سازندهای قدیمی ویژگی‌های ساختاری مثل گسل‌های امتداد لغز^۶ و بعضی گسل‌های قاشقی معکوس^۷ و برای توالی‌های جوانتر گسل‌های نرمال^۸ و برای قسمت فوقانی همه سازندها، گنبد^۹ و الگوی تداخلی حوضه از چین‌ها معرفی کردند. روبرت^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۴) بر اساس داده‌های لرزه‌ای دوبعدی و سه‌بعدی برداشت شده از منطقه، ساختار و چینه‌نگاری کپه‌داغ و حوضه جنوبی خزر را مورد بررسی قرار دادند و نظریه‌ای را ارائه کردند که رسوبات حوضه خزر به سن الیگوسن^{۱۱} و جوانتر هستند، که ممکن است به خاطر رخدادهای آلپین^{۱۲} بخش شرقی کپه‌داغ باشد، و به این نتیجه رسیدند که به واسطه فعالیت کوه‌زایی سیمیرین^{۱۳} در

^۱ Channels

^۲ Tingdahl

^۳ Frequency

^۴ Neural Network

^۵ Radfar

^۶ Strike-slip faults

^۷ Reverse listric faults

^۸ Normal faults

^۹ Dome

^{۱۰} Robert

^{۱۱} Oligocene

^{۱۲} Alpine

^{۱۳} Cimmerian

زمان تریاس پایانی^۱ و ژوراسیک ابتدایی^۲، اقیانوس پالئوتتیس^۳ بسته شده است، و اما در زمان ژوراسیک میانی^۴ به علت رژیم تکتونیکی، ریفت قاره‌ای به همراه رسوبات ته‌نشین شده در آن (شامل سازند کشف رود^۵) به صورت مشترک در دو حوضه آمودریا^۶ و کپه‌داغ تشکیل شده است.

۴-۱ روش پژوهش

هدف از این پژوهش، استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای برای تعیین گسل‌ها و شکستگی‌ها در داده‌های لرزه‌ای دوبعدی حاصل شده از منطقه دشت گرگان می‌باشد. در همین راستا ابتدا داده‌ها در نرم افزار Petrel وارد گشته و تفسیر ساختاری داده‌های لرزه‌ای انجام شده است تا یک دید کلی از وضعیت ساختاری زیرسطحی منطقه حاصل شود. سپس با وارد کردن داده‌های لرزه‌ای به دو نرم‌افزار OpendTect و Petrel، آنالیز نشانگری بر مبنای نشانگرهایی که در آشکارسازی گسل کاربرد دارند انجام شد، که در نهایت بر اساس تفسیر گسلی انجام شده، یک مدل ساختاری ارائه شده است.

^۱ Upper Triassic

^۲ Early Jurassic

^۳ Paleo-Tethys Ocean

^۴ Middle Jurassic

^۵ Kashafrud Formation

^۶ Amu Darya

۵-۱ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در پنج فصل تنظیم گردیده است، که در فصل اول به بیان مسئله، پیشینه، روش و هدف پژوهش در زمینه مورد مطالعه اشاره شده است. در فصل دوم به موقعیت و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه، چاهای حفر شده و همچنین فعالیت های اکتشافی در منطقه از جمله عملیات گرانی سنجی، ژئوفیزیکی و در نهایت به تعریف و طبقه بندی انواع گسل و رژیم تکتونیکی و گسلش منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است. در فصل سوم نشانگرهای لرزه ای شرح داده شده و چگونگی عملکرد هر کدام در شناسایی گسل به صورت مجزا به همراه تئوری مربوطه مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم به ارائه تفسیر داده های لرزه ای دو بعدی با استفاده از نشانگرهای لرزه ای پرداخته و یک مدل ساختاری ارائه شده است. نتایج و پیشنهادهای حاصل از این مطالعه در فصل پنجم ارائه گردیده است.

فصل دوم

زمین‌شناسی و اطلاعات اکتشافی منطقه
مورد مطالعه

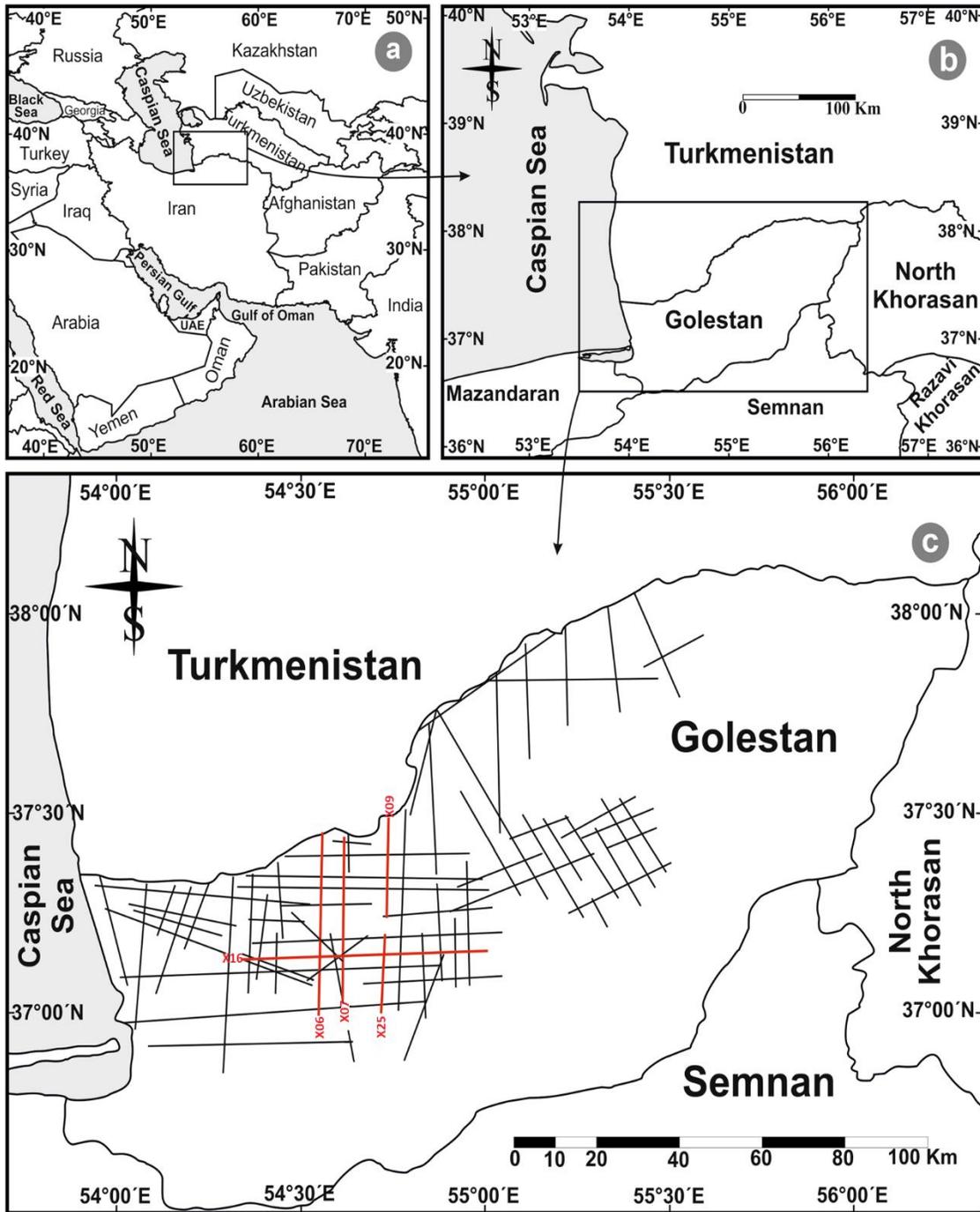
۲-۱ مقدمه

دشت گرگان در استان گلستان^۱ در سواحل جنوب-شرقی دریای خزر (N-NE ایران) واقع شده است که در شکل (۲-۱) می‌توان موقعیت جغرافیایی آن را مشاهده کرد. مهم‌ترین سازند در منطقه به نام چلکن^۲، متعلق به دوره پالئوسن است که بیشتر از رسوبات حاوی ماسه قرمز یا سبز تیره به همراه لایه‌های ضخیم ماسه‌سنگ و کنگلومرا تشکیل شده است. از دیدگاه زمین‌شناسی، استان گلستان با سه منطقه مختلف زمین‌شناسی هم‌مرز است. این ناحیه عمدتاً در بخش جنوبی حوضه خزر (SCB) می‌باشد که از جنوب توسط دامنه‌های البرز و از شرق توسط کوه‌های کپه‌داغ (KDM) محدود شده است. دشت گرگان توسط یک توالی ضخیم از رسوبات کواترنری پوشیده شده و در معرض هیچ‌گونه سنگ بستری قرار نگرفته است. پژوهشگران سال‌ها استدلال‌هایی در مورد پیوستگی این منطقه با SCB یا KDM داشتند که به دلیل عدم وجود داده‌های ساختاری زیرسطحی در دشت گرگان، سعی در جمع‌آوری داده‌ها از روش‌های ژئوفیزیکی (خصوصاً لرزه‌نگاری بازتابی) و چاه‌پیمایی^۳ برای مدل‌سازی ساختارهای زیرسطحی داشتند. مدل‌سازی ساختاری منطقه یک گام اساسی برای تعیین تاریخ زمین‌شناسی دشت گرگان است. موقعیت پنج خط لرزه‌ای دو بعدی حاصل شده در منطقه دشت گرگان با استفاده از لرزه‌نگاری بازتابی را می‌توان در شکل (۲-۱ خطوط قرمز) مشاهده کرد.

^۱ Golestan

^۲ Cheleken

^۳ Well logging



شکل ۱-۲: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، موقعیتی از ایران در خاورمیانه، استان گلستان در مرز جنوب شرقی دریای خزر و خطوط لرزه‌ای بدست آمده از دشت گرگان (خطوط قرمز) (Radfar et al, ۲۰۱۸).

۲-۲ موقعیت جغرافیایی دشت گرگان

دشت گرگان در عرض‌های شمالی ۳۶ تا ۳۸ درجه و طول‌های شمالی ۵۴ تا ۵۶ درجه، در جنوب شرقی حوضه خزر قرار گرفته است که از سمت شرق به کوه‌های کپه‌داغ و در جنوب به دامنه‌های البرز متصل می‌باشد. برای پی بردن به چینه‌شناسی و چگونگی وضعیت ساختمانی این منطقه جز با تکیه بر داده‌های مقاطع چینه‌شناسی و ساختمانی برداشت شده در منطقه و داده‌های ژئوفیزیکی و چاه‌های حفر شده میسر نخواهد شد، که در ادامه به نتایج حاصل از بررسی‌های لرزه‌ای و چاه‌های حفر شده در این ناحیه اشاره خواهد شد.

۲-۳ فعالیت‌های اکتشافی در دشت گرگان

۲-۳-۱ عملیات گرانی‌سنجی

عملیات گرانی‌سنجی منطقه گرگان در طول سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۵۰ توسط شرکت C.G.G^۱ انجام گرفته که نتایج این پیمایش نشان‌دهنده وجود چندین آنومالی در ناحیه دشت گرگان است. همچنین انجام مطالعات لرزه‌ای نیز جهت بررسی دقیق‌تر روند ساختمان‌های زیر سطحی انجام شد. نتایج گرانی‌سنجی نشان دادند که در دشت گرگان ساختمان تاقدیسی که نشان‌دهنده تله ساختمانی باشد وجود ندارد بلکه تمام آنومالی‌ها به صورت گل‌فشان^۲ به نقشه در می‌آیند و ابعاد کوچکی را دارا هستند. پتانسیل هیدروکربنی (گاز) این ناحیه ناشی از فعالیت گل‌فشان‌ها می‌باشد که در داخل لایه‌های نفوذپذیر مانند ماسه‌ها قرار می‌گیرد و با توجه به پوش سنگ موجود می‌توان این ساختارها را به عنوان تله‌های گازی ناشی از گل‌فشان

^۱ Compagnie Générale de Géophysique

^۲ Mud Volcanoes

در نظر گرفت که این ساختارها در اعماق کم و عمق آنها در هر کدام از گل‌فشان‌ها بین ۹۰۰ الی ۱۳۰۰ متر متغیر می‌باشد، این لایه پوششی را طبقات قهوه‌ای^۱ گویند (Tabatabee et al, ۲۰۰۳).

۲-۳-۲ عملیات لرزه‌ای

- عملیات لرزه‌ای از سال ۱۹۵۶ تاکنون در دشت گرگان در سه مرحله با استفاده از روش بازتابی دوبعدی مورد پیمایش قرار گرفته است که حدوداً مساحتی بالغ بر ۳۸۴۰ کیلومتر مربع از ناحیه را زیر پوشش قرار داده است.
- در فاصله زمانی سال‌های ۱۹۵۶_۱۹۵۷ یک اکتشاف عمومی از دشت گرگان توسط شرکت U.G.C^۲ به منظور آگاهی از موارد زیر انجام گرفت.
 - ✓ کنترل دقیق‌تر آنومالی‌های گراویمتری انجام شده قبلی
 - ✓ مشخص کردن ساختارهای مساعد برای تجمع هیدروکربن‌ها
 - ✓ مشخص کردن ساختارهای زیرسطحی گل‌فشان‌هایی مانند گارنیاریک تپه^۳ و نفته‌لیجه^۴
 - ✓ مشخص کردن امکان احتمالی ارتباط زیر سطحی دو گل‌فشان گارنیاریک تپه و نفته‌لیجه
 - ✓ جهت بررسی طبیعت پلانجینگ تاقدیس موجود در زیر سطح دشت گرگان که در گوشه شمال شرق ناحیه قرار دارد.
 - ✓ بررسی امکان وجود هرگونه شیب‌ها یا گسل‌های زیرسطحی که تشکیل تله‌های مناسب را داده باشد (Stockline, ۱۹۷۷).

^۱ Brown Beds

^۲ United Geophysical company

^۳ Garniarik hill Or Garniarik – Teppe

^۴ Naft Lijeh

- در طول سال‌های ۱۹۶۴_۱۹۶۷ میلادی توسط شرکت وسترن (W.G.C)^۱ حدود ۲۲۰۰ کیلومتر خط لرزه‌ای با پوشش ۴۰٪ در شمال و شرق گارنیاریک‌تپه و موازی با شمال رودخانه گرگان با تعیین اهداف موارد زیر صورت گرفت.
- ✓ وضوح بیشتر تصاویر و افزودن آن‌ها به اکتشافات قبلی.
- ✓ ارزیابی منطقه برای ساختارهای زیرسطحی مناسب که ممکن بود حاوی تجمعات هیدروکربنی باشد. در پی آن ۱۱ حلقه چاه در منطقه حفاری شد که به غیر از چاه‌های گرگان ۳ الف که دارای گاز اقتصادی بوده و اینچه و قزل‌تپه ۲ که دارای گاز کمی بودند، بقیه خشک بودند.
- در سال ۱۳۵۹ هجری شمسی یکسری عملیات لرزه‌نگاری توسط شرکت NIOC^۲ در منطقه به عمل آمد و در پی آن در سال ۱۳۶۱ عملیات دیگری به روش رقومی طی ۱۱ خط لرزه انجام گرفت که با استفاده از نتایج آن نقشه افقی بالای سازند چلکن تهیه گردید.

۲-۴ ساختمان‌های موجود در پهنه دشت گرگان

۲-۴-۱ ساختمان گرگان

بر مبنای اطلاعات حاصل از کاوش‌های ژئوفیزیکی اولیه در دشت گرگان، که توسط شرکت U.G.C در سال ۱۹۵۷ انجام شد، به وجود تعدادی ساختمان پراکنده در قالب دو مجموعه یکی در غرب گنبد کاووس و دیگری در مجاورت گل‌فشان گارنیاریک‌تپه پی بردند، که تحت عنوان ساختمان گرگان مشخص و جهت حفاری اکتشافی در نظر گرفته شدند، و مجموعاً تعداد ۵ حلقه چاه بر روی این ساختمان حفاری گردید.

^۱ Western Geophysical company

^۲ National Iranian OIL Company

۲-۴-۲ ساختمان ایمر^۱

یک تاقدیس طویل مشخص شده بر مبنای کاوش‌های لرزه‌نگاری با جهت معمولی شمال شرقی-جنوب غربی واقع در جنوب غرب گنبد کاووس و در نزدیکی دریاچه ایمر می‌باشد.

۲-۴-۳ ساختمان پهلوی دژ^۲ یا آق‌قلا^۳

ساختمان پهلوی دژ (آق‌قلا کنونی) بر اساس ارزیابی‌های انجام شده توسط شرکت W.G.C در جلگه گرگان مشخص شده است. این ساختمان در ۳۳ کیلومتری شمال شرق شهر گرگان واقع شده که ساختارهای زمین‌شناسی آن بر مبنای افق‌های مختلف در نهشته‌های دوران سوم و نیز کرتاسه به نقشه در آمده‌اند.

۲-۴-۴ ساختمان اینچه^۴

ساختمانی است با جهت عمومی شمال غربی-جنوب شرقی که در ۲/۶ کیلومتری شرق دهکده پهلوی دژ واقع شده است. این تاقدیس نیز بر مبنای کاوش‌های لرزه‌نگاری گسترده توسط شرکت W.G.C شناسایی شده است که متشکل از ترکیب دو تاقدیس در موقعیت‌های شمالی و جنوبی می‌باشد.

^۱ Eymer

^۲ Pahlavi Dezh

^۳ Aqqala

^۴ Incheh

۵-۴-۲ ساختمان قزل تپه

این ساختمان بر مبنای کاوش‌های انجام شده توسط شرکت W.G.C در نزدیکی دهکده قزل تپه کشف گردیده است، و افق‌های به نقشه در آمده در آن عبارتند از (ابطحی ۱۳۷۷):

✓ افق‌های فوقانی G (papery shale) و U (سازند چلکن)

✓ افق میانی D (دگر شییبی زاویه‌دار ما بین میوسن - پلیوسن و کرتاسه تحتانی)

✓ افق تحتانی K (سازند مراوه تپه^۱)

۶-۴-۲ ساختمان میثم^۲

این ساختمان که توسط عملیات ژئوفیزیکی مشخص گردیده است در ناحیه شمال شرق دریای خزر و به فاصله تقریبی ۵۰ کیلومتری بهشهر واقع شده است و بر اساس نقشه منحنی‌های میزان، شروع طبقات قهوه‌ای دارای ۷۰ متر ارتفاع قائم و ۹۰ کیلومتر مربع افقی می‌باشد که دارای روند شرقی - غربی است.

۷-۴-۲ ساختمان مقداد^۳

این ساختمان در نتیجه تعبیر و تفسیر لرزه‌نگاری‌های انجام شده طی سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۷۲ مشخص گردید، و در فاصله حدود ۵۵ کیلومتری شمال بهشهر در شرق دریای خزر است. فاصله محل چاه اکتشافی مقداد ۱ از ساحل شرقی حدود ۵۰ کیلومتر و از ساحل جنوبی ۳۵ کیلومتر است.

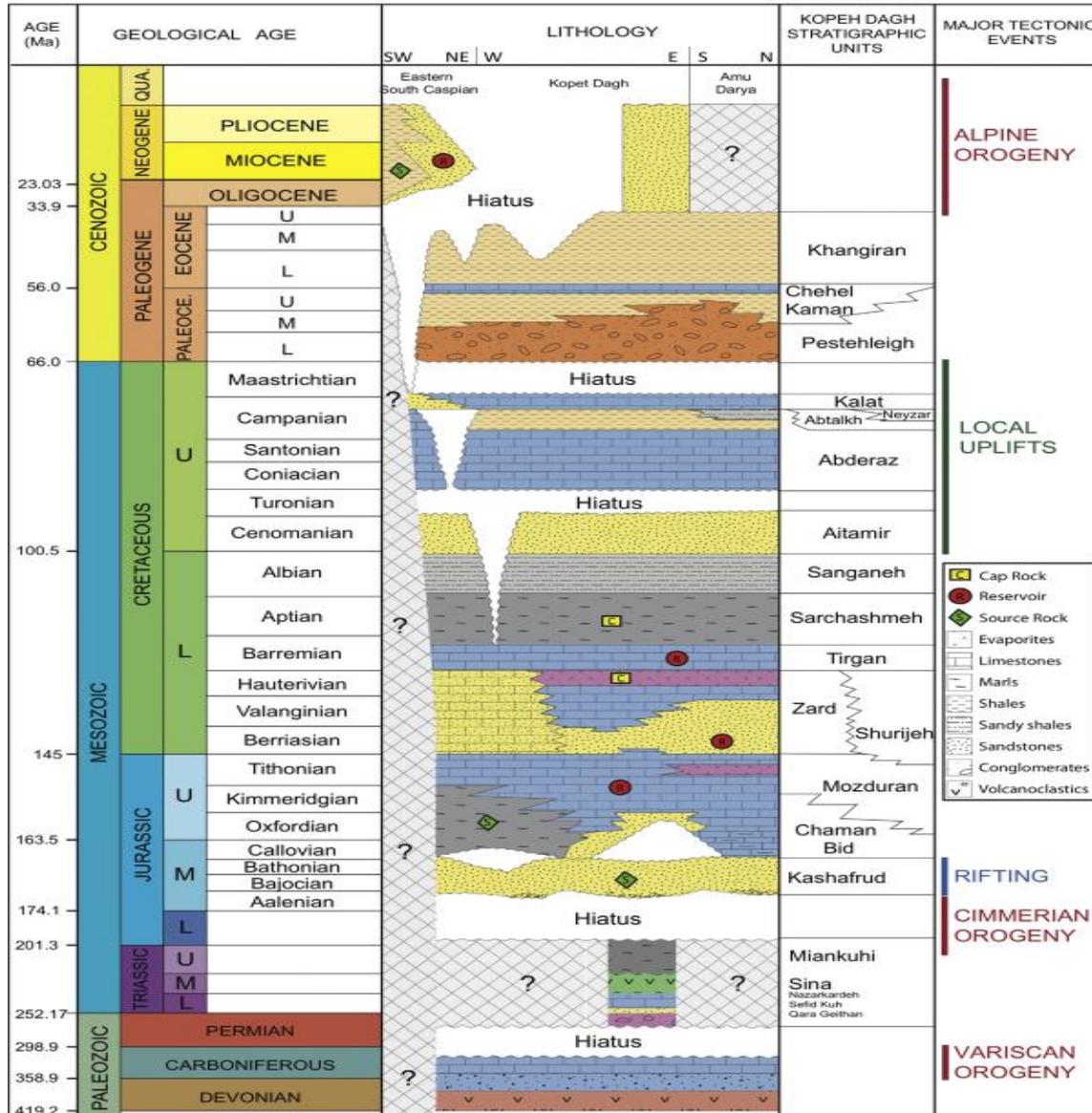
^۱ Maraveh Tappeh

^۲ Meysam

^۳ Meghdad

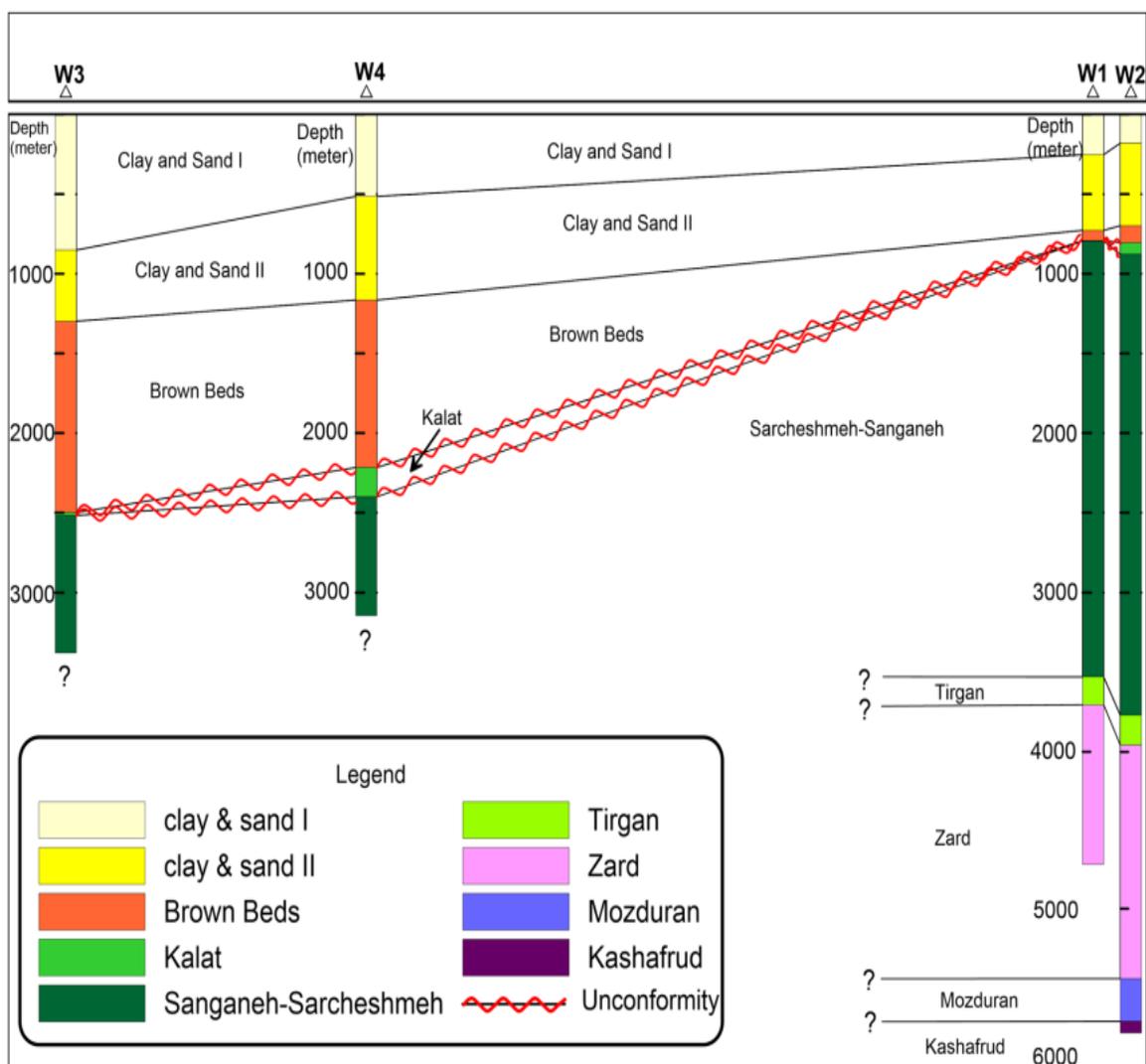
۲-۵ چینه‌شناسی منطقه

توصیف‌های سنگ‌شناسی دقیق این امکان را می‌دهد که روبرت و همکاران (۲۰۱۴) ستون چینه‌شناسی را برای حوضه کپه‌داغ به این صورت ارائه دهند (شکل ۲-۲).

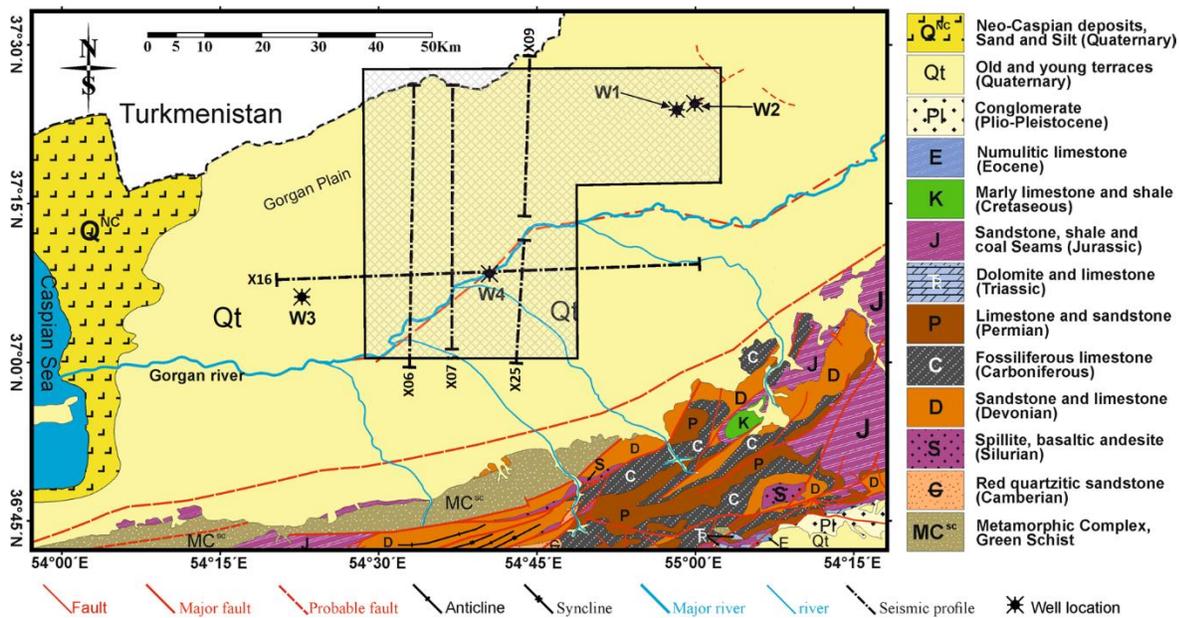


شکل ۲-۲: ستون چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه (Robert et al, ۲۰۱۴).

منطقه کاملاً توسط رسوبات کواترنری پوشانده شده است و چینه‌شناسی که در اینجا شرح داده می‌شود، براساس داده‌های زمین‌شناسی بدست آمده از چهار حلقه چاه حفر شده در دشت گرگان می‌باشد که در ادامه به آن می‌پردازیم (شکل ۲-۳ و ۲-۴).



شکل ۲-۳: ارتباط و همبستگی چینه‌شناسی بین چهار حلقه چاه در منطقه مورد مطالعه (Radfar et al, ۲۰۱۸).



شکل ۲-۴: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در دشت گرگان و محل پروفیل‌های لرزه‌ای به همراه مختصات چاه‌های حفاری شده (Radfar et al, ۲۰۱۸).

سازندها و طبقاتی که با توجه به حفاری ۴ حلقه چاه، شکل (۲-۳) در منطقه مشخص شده‌اند به صورت مختصر شرح داده می‌شود (Radfar et al, ۲۰۱۸).

- سازند کشف‌رود قدیمی‌ترین سازندی است که در چاه W₂، شکل (۲-۳)، مشاهده شده است که حدود ۷۰ متر به سازند کشف‌رود نفوذ کرده است. این واحد متشکل از میکای سیاه^۱ و شیل متشکل از کوارتز سیاه با ماسه سنگ آهکی می‌باشد که شامل حداقل ۳۰۰-۳۰۰۰ متر رسوبات سیلیکاته دریایی اعم از کنگلومرا تا رس‌هایی که منشأ آن از کوه بینالود^۲ است (امتداد شرقی البرز).

^۱ Black Micaceous

^۲ Binalood Mountain

این سازند مناطق مرتفع و برآمدگی‌های ناگهانی از ترکمنستان به سمت ایران را نشان می‌دهد که بیانگر گسل‌های کششی^۱ است (Taheri et al, ۲۰۰۹; Radfar et al, ۲۰۱۸).

- سازند مزدوران^۲ در چاه W۲، شکل (۲-۳)، مشاهده می‌شود که ضخامت ۲۷۰ متر را دارد و این سازند از سنگ آهک میکریتی^۳ خاکستری تیره، دولومیت^۴ کریستالی خاکستری روشن و سنگ آهک اولیتی^۵ خاکستری تیره تشکیل شده است و شامل کربنات‌های است که در طی پیشروی دریا در زمان ژوراسیک پایانی رسوب کرده‌اند که با سازند کشف‌رود ارتباط پایه‌ای دارد و دارای مخزن گازی می‌باشد (Kavoosi et al, ۲۰۰۹; Robert et al, ۲۰۱۴; Radfar et al, ۲۰۱۸).
- سازند شوربجه^۶ در سمت غرب منطقه ضخامتش کاهش یافته و به جای آن سازند زرد^۷ جایگزین می‌شود، که عمدتاً از مارن^۸ (خاک رسی آهک‌دار) دریایی و شیل‌های آهکی با لایه‌های ماسه‌سنگ تشکیل شده است که مخزن گازی ثانویه در منطقه می‌باشد. می‌توان مشاهده کرد که ضخامت سازند زرد در چاه W۲، شکل (۲-۳)، در حدود ۱۵۰۰ متر اندازه‌گیری شده و البته این سازند که در چاه‌های W۱ و W۲، شکل (۲-۳)، مشاهده شده است، شامل یک تناوب از شیل خاکستری تیره، مارن، سنگ آهک و سیلت می‌باشد (Kavoosi et al, ۲۰۱۶; Robert et al, ۲۰۱۴; Radfar et al, ۲۰۱۸).

^۱ Extensional Faults
^۲ Mozduran Formation
^۳ Micritic
^۴ Dolomite
^۵ oolitic
^۶ Shurijeh Formation
^۷ Zard Formation
^۸ Marn

- سازند تیرگان^۱ از جنس سنگ آهک خاکستری تیره و شیل‌های آهکی می‌باشد که ضخامت آن در چاه‌های W۱ و W۲، شکل (۲-۳)، به ترتیب برابر ۱۷۰-۱۹۰ متر است که در بالای سازند شوربجه و زرد به صورت هم شیب قرار گرفته (Radfar et al, ۲۰۱۸).
- سازند سرچشمه و سنگانه^۲، به دلیل عدم وجود مرز مشخص بین آن‌ها در چاه‌های W۱ و W۴ حفر شده در دشت گرگان، شکل (۳-۲)، هر دو یک واحد در نظر گرفته می‌شوند که ضخامت این واحد (دو سازند سرچشمه و سنگانه) حدود ۲۷۵۰ متر در چاه W۱ و حدود ۲۹۰۰ در چاه W۲ اندازه‌گیری شده است. این واحد ویژگی‌های سنگ‌شناسی یکنواختی را نشان می‌دهد و بیشتر شامل شیل با آهک بالا به رنگ خاکستری تیره، مارن و لایه نازک سنگ آهک سفید است. تماس این واحد با سازند تیرگان در چاه‌های W۱ و W۲، شکل (۲-۳)، به صورت مداوم و پیوسته می‌باشد که این ارتباط را در شکل (۲-۲)، نیز می‌توان مشاهده کرد (Radfar et al, ۲۰۱۸).
- سازند کلات^۳ در هر چهار چاهی (W۱ و W۲ و W۳ و W۴، شکل ۲-۳) که در دشت گرگان حفر شده مشاهده می‌شود و از سنگ آهک با شیل درون‌لایه‌ای تشکیل شده است و ضخامت آن از حدود ۴ متر در چاه W۱ تا بیش از ۱۸۰ متر در چاه W۴ متغیر می‌باشد (Radfar et al, ۲۰۱۸).
- طبقات قهوه‌ای که معادل سازند چلکن در منطقه می‌باشد برای اولین بار در شبه جزیره چلکن در ترکمنستان کشف شد که ضخامت نهشته‌های آن به چهل متر در این جزیره می‌رسد اما در چاه‌های اکتشافی دشت گرگان ایران این سازند ضخامت نسبتاً زیادی دارد و از شرق به سمت غرب ضخامت آن بیشتر می‌شود. سازند چلکن و سازندهای جوان در کلیه چاه‌های حفاری شده در دشت گرگان مشاهده شده و ضخامت آنها کمتر از ۱۰۰ متر در شرق تا بیش از ۱۰۰۰ متر در غرب منطقه متغیر

^۱ Tirgan Formation

^۲ Sarcheshmeh and Sanganeh Formations

^۳ Kalat Formation

است. این سازند از رس چسبنده به رنگ قهوه‌ای روشن تا قهوه‌ای مایل به زرد و ماسه‌سنگ ریز دانه‌ای خاکستری مایل به سبز تشکیل شده است (Radfar et al, ۲۰۰۱; Buryakovsky et al, ۲۰۱۸).

- افق رس و ماسه II با ضخامت کم و بیش به صورت یکنواخت حدود ۵۰۰-۶۰۰ متر می‌باشد که از رس چسبنده به رنگ آبی مایل به خاکستری تا سبز مایل به خاکستری و ماسه‌سنگ ریز دانه تا متوسط به رنگ خاکستری تیره و ماسه سست خاکستری رنگ و یک لایه سست الیتی تشکیل شده است، که این رسوبات برابر با طبقات آگچاگیل و آپشرون^۱ است (Radfar et al, ۲۰۱۸).
- افق رس و ماسه I از رس چسبنده خاکستری و خرده‌های فراوان پوسته و ماسه سنگ‌های ریز دانه‌ای سست تشکیل شده است (Radfar et al, ۲۰۱۸).

۶-۲ تعریف گسل

گسل عبارت است از نوعی شکستگی که در سنگ‌های پوسته زمین به وجود آید و سنگ‌های دوطرف نسبت به هم دارای جابجایی هستند. گسل‌ها توالی سکansı لایه‌های زمین را مختل می‌کنند که چالش‌هایی را برای چینه‌شناسان و زمین‌شناسان در زمینه تصویرسازی یا تفسیر داده‌های لرزه‌ای ایجاد می‌کند، با این حال گسل‌ها ساختارهایی بسیار جذاب هستند که زمین‌شناسان ساختمانی را مجذوب خود ساخته است.

^۱ Akchagylian and Apsheronian stages

۱-۶-۲ بلوک گسل

بلوک گسل به عنوان ناحیه زیرسطحی تعریف می‌شود که از هر دو طرف توسط گسل‌ها محدود شده است و می‌تواند بلوک بالارونده یا بلوک پایین‌رونده باشد (Onajite, ۲۰۱۴).

✓ فرادیواره^۱

بلوکی که بالای صفحه گسل قرار می‌گیرد.

✓ فرودیواره^۲

بلوکی که زیر صفحه گسل قرار می‌گیرد.

۲-۷ تقسیم بندی گسل‌ها

گسل‌ها بر اساس نوع عملکرد و لغزش به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند که در ادامه به هرکدام از آنها می‌پردازیم.

۱-۷-۲ گسل‌های شیب‌لغز^۳

گسل‌های هستند که امتداد لغزش اصلی آنها موازی با جهت شیب گسل باشد و بر اساس جهت حرکت بلوک‌های فرادیواره و فرودیواره به دو نوع نرمال و معکوس تقسیم می‌شوند.

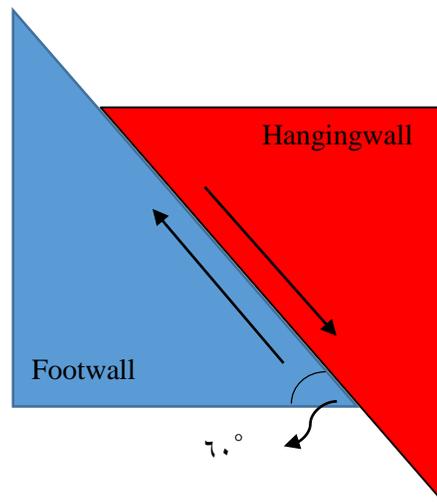
^۱ Hanging Wall

^۲ Foot Wall

^۳ Dip-slip fault

✓ گسل عادی یا نرمال

این نوع گسل بر اثر عملکرد نیروهای کششی حاصل می‌گردد و زاویه صفحه گسل معمولاً بیشتر از ۴۵ درجه است. همچنین فرادیواره نسبت به فرودیواره در امتداد شیب به طرف پایین حرکت می‌کند.

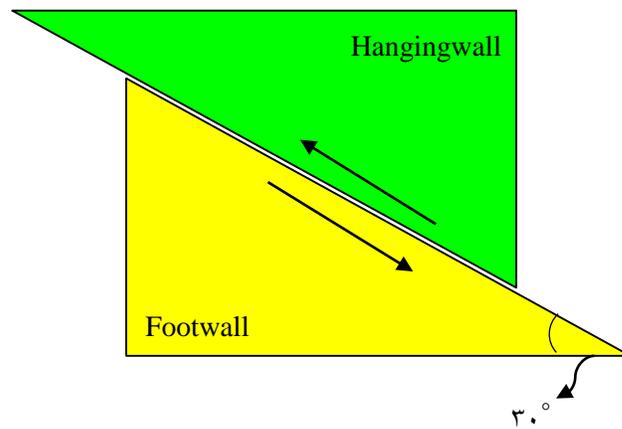


شکل ۲-۵: گسل نرمال.

✓ گسل رانده یا معکوس^۱

این گسل بر اثر عملکرد نیروهای فشاری ایجاد می‌گردد که معمولاً در مجاورت چین‌خوردگی‌ها و مناطق تحت فشار دیده می‌شود و معمولاً کمتر از ۴۵ درجه است، همچنین فرادیواره نسبت به فرودیواره در امتداد شیب به طرف بالا حرکت می‌کند.

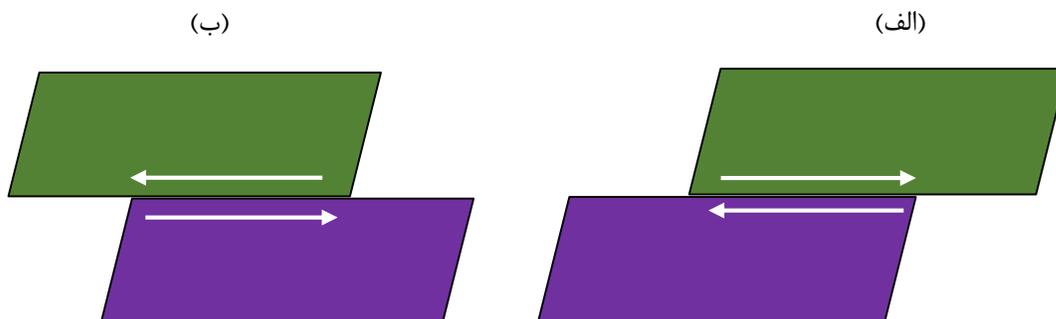
^۱ Reverse or Thrust Fault



شکل ۲-۶: گسل معکوس.

۲-۷-۲ گسل‌های امتدادلغز

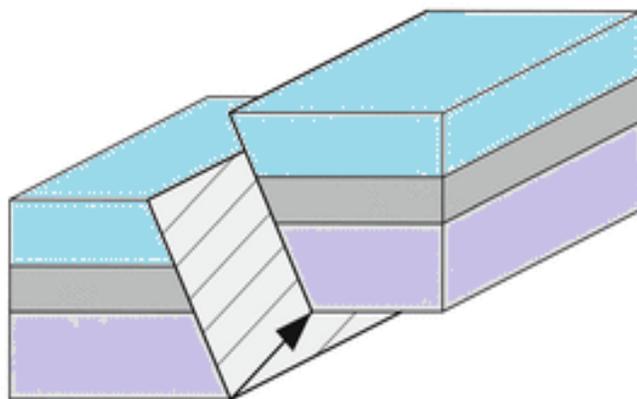
در این حالت لغزش کلی به موازات امتداد صفحه گسل صورت می‌گیرد و در بیشتر مواقع این گسل‌ها به صورت قائم یا با شیب بسیار زیادی می‌باشند که در نتیجه آن جابجایی طبقات افقی صورت می‌گیرد که به دو صورت چپ‌گرد یا راست‌گرد می‌باشند.



شکل ۲-۷: (الف) گسل امتدادلغز راست‌گرد، (ب) گسل امتدادلغز چپ‌گرد

۳-۷-۲ گسل‌های مورب لغز^۱

اگر گسلی هم مؤلفه لغزشی امتدادی داشته باشد و هم مؤلفه لغزشی شیئی داشته باشد در زیر مجموعه گسل‌های مورب لغز قرار می‌گیرد. البته ناگفته نماند که تقریباً بیشتر گسل‌ها هر دو مؤلفه را دارند، اما کوچک، از این رو برای این که همه گسل‌ها در این دسته قرار نگیرند نیاز است که هر دو مؤلفه مورد توجه قرار گرفته و اندازه‌گیری شوند.



شکل ۲-۸: گسل مورب لغز.

۸-۲ رژیم تکتونیکی و زمین‌ساختی دشت گرگان

دشت گرگان دربرگیرنده شمال مناطق مورفولوژیکی و جنگلی البرز تا مرز مشترک ایران و جمهوری ترکمنستان و همچنین بالآمدگی‌های کپه داغ و خلیج گرگان تا رودخانه گرگان و مناطق جنوب-شرقی دریای خزر می‌باشد (شمعانیان و همکاران، ۱۳۸۴). زمین‌شناسی منطقه مربوط به رژیم تکتونیکی و همگرایی صفحات عربستان - اوراسیا است که از زمان ائوسن-سیمرین آغاز شده و تا حال حاضر ادامه دارد (Radfar et al, ۲۰۱۸; Hollingsworth et al, ۲۰۱۰; Allen et al, ۲۰۰۶; Jackson et al. ۲۰۰۲). دشت

^۱ Oblique-slip fault

گرگان منطقه‌ای کم ارتفاع و پست در شرق دریای خزر و غرب پهنه کپه‌داغ قرار گرفته و به همراه نواحی از خزر جنوبی، به بلوک ترکمن و بخشی از پهنه توران معروف شده است. به عبارت دیگر دشت گرگان در میان بالآمادگی‌های کپه‌داغ و نواحی درحال فرونشینی خزر جنوبی جای گرفته است که این دو پهنه زمین‌شناسی را بهم مرتبط می‌سازد (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶). رشته کوه البرز که در موقعیت جنوبی دشت گرگان قرار گرفته است، دارای ارتفاعی معادل ۳۰۰۰ متر می‌باشد که به دلیل رخدادهای زمین‌ساختی مثل برخورد تکتونیکی دو صفحه اوراسیا-عربستان و همچنین دو صفحه اوراسیا-ایران مرکزی با یکدیگر در اواخر دوره تریاس یا به عبارتی اوایل دوره ژوراسیک به وجود آمده است (Zanchi et al, ۲۰۰۶). در منطقه دشت گرگان یا به عبارتی نواحی شمالی رشته کوه البرز و حواشی حوضه خزر جنوبی، مناطقی کم ارتفاع و پست با پوشیدگی کم قرار گرفته است که به دلیل پتانسیل بالای هیدروکربن، از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. حوضه خزر جنوبی که توسط رشته کوه‌های البرز در بخش جنوبی محدود شده است، یکی از ژرف‌ترین حوضه‌های رسوبی با بیش از ۲۰ کیلومتر رسوبات ته‌نشین شده در جهان محسوب می‌شود، و همچنین دلیل ایجاد مرز جدایش بین سنگ‌هایی از اوراسیا و سنگ‌های ایران مرکزی شده است (Stocklin, ۱۹۷۴; Brunet et al, ۲۰۰۳).

۹-۲ وضعیت گسلش دشت گرگان

رژیم تکتونیکی و همگرایی دو صفحه عربستان-اوراسیا باعث شکل‌گیری گسل خزر به عنوان گسل چپ‌گرد در جنوب و گسل عشق‌آباد به عنوان گسل راست‌گرد در شمال دشت گرگان شده است (Radfar et al, ۲۰۱۸). حرکت بخش جنوبی حوضه خزر به سمت غرب نتیجه فعالیت گسل چپ‌گرد خزر در جنوب و فعالیت گسل راست‌گرد عشق‌آباد در شمال دشت گرگان می‌باشد (Radfar et al, ۲۰۱۸; Hollingsworth).

۲۰۰۲ Jackson et al, ۲۰۰۶; Allen et al, ۲۰۰۸; et al). رشته کوه البرز به صورت رورانده در امتداد مرز شمالی به وسیله گسل خزر در حوضه جنوبی خزر محدود شده است (Tatar et al, ۲۰۰۷). در منطقه دشت گرگان و مناطق شرقی حوضه خزر جنوبی به علت وجود پوشش گیاهی گسترده و رسوبات لسی، اطلاعات زیادی در رابطه با چگونگی لغزش گسل‌ها و طول اثرات سطحی آن‌ها در منطقه وجود ندارد. همچنین در این دشت با در نظر گرفتن سیستم گسلی خزر جنوبی به عنوان راندگی‌هایی با شیب رو به جنوب، شیست-های گرگان به صورت منطقه‌ای در مقابل نهشته‌های کواترنری قرار می‌گیرد (Allen et al, ۲۰۰۳; Nemati). رژیم فشارشی در جهت ۱۵۸ درجه جنوب-شرقی (S۱۵۸E) در دشت گرگان حاکم می‌باشد. این رژیم فشارشی ذکر شده به ایجاد گسل‌های امتداد لغز چپ‌گرد در موقعیت شرقی-غربی این منطقه کمک می‌کند (GFZ, ۲۰۱۱).

فصل سوم

نشانه‌های لرزه‌ای کاربردی در
آشکارسازی گسل

۱-۳ مقدمه

تشخیص گسل یک مسئله بسیار چالش برانگیز در تفسیر داده‌های لرزه‌ای است که می‌توان از نشانگرهای لرزه‌ای مختلف در آشکارسازی گسل استفاده کرد، در حقیقت، فرآیند تشخیص گسل شامل استخراج نشانگرهای لرزه‌ای، تقویت نشانگرهای لرزه‌ای و شناسایی خط گسل است. از این جهت نشانگرهای لرزه‌ای استخراج شده در فرآیند تشخیص گسل بسیار مهم هستند (Zheng et al, ۲۰۱۸). از آنجایی که تشخیص و تفسیر مدل گسل در داده‌های لرزه‌ای عموماً کار دشواری می‌باشد در نتیجه نشانگرهای لرزه‌ای در سه دهه اخیر با سرعت زیادی گسترش پیدا کرده‌اند که در پیش‌بینی دقیق و تعیین ساختارهای زمین‌شناسی از جمله گسل به مفسران ژئوفیزیکی کمک فراوانی کرده‌اند (Chopra and Marfurt, ۲۰۰۷). نشانگرهای لرزه‌ای می‌توانند خصوصیات را آشکار کنند که به راحتی نمی‌توان در داده‌های لرزه‌ای مشاهده کرد، از این‌رو نشانگرهای لرزه‌ای این امکان را به ما می‌دهند که پدیده‌های زیرزمینی از جمله گسل در داده‌های لرزه‌ای را شناسایی و تفسیر کنیم (Koson et al, ۲۰۱۴). نشانگرهای لرزه‌ای از جمله واریانس، شباهت و همدوسی برای برجسته‌سازی الگوی گسلی در یک مکعب لرزه‌ای بسیار مفید و با ارزش هستند (Jacquemin et al, ۲۰۰۵). در ادامه این فصل به بیان نشانگرهای مختلف که در زمینه آشکارسازی گسل کاربرد دارند پرداخته می‌شود و به طور تفصیلی مباحث تئوری آنها بیان می‌شود.

۲-۳ تعریف نشانگر لرزه‌ای

تعاریف مختلفی توسط محققان درباره نشانگرهای لرزه‌ای مطرح شده که هر کدام جوانب ویژه‌ای را مد نظر قرار داده‌اند که در ادامه به چند مورد از این تعاریف اشاره می‌کنیم. نشانگرهای لرزه‌ای ویژگی‌هایی از داده‌های لرزه‌ای هستند که با روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف استخراج می‌شوند (Koson et al, ۲۰۱۴). نشانگرهای لرزه‌ای به عنوان یک محاسبه‌گر مبنی بر داده‌های لرزه‌ای مانند پوش^۱، فاز لحظه‌ای^۲، فرکانس لحظه‌ای^۳، قطبیت^۴، شیب^۵ و آزیموت^۶ تعریف می‌شوند (Baisakhi Das et al, ۲۰۱۷). نشانگرهای لرزه‌ای یکی از روش‌های متداول در صنعت می‌باشد و به استخراج اطلاعات مورد نظر از داده‌های ورودی کمک می‌نماید که از الگوریتم‌های خاص با توجه به هدف مطالعاتی برای برجسته کردن بخش‌هایی از داده‌های لرزه‌ای از جمله گسل و غیره استفاده می‌کند و این الگوریتم‌ها به پارامترهای لرزه‌ای، کیفیت داده‌ها و زمین‌شناسی منطقه بستگی دارد. انتخاب نشانگر به ویژگی‌ها و مشخصاتی که باید مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد بستگی دارد و از آنجایی که گسل‌ها ناپیوستگی لایه‌های زیر سطحی هستند، می‌توان آن‌ها را با استفاده از برخی نشانگرهای لرزه‌ای شناسایی کرد که نشانگر واریانس و انحنا از جمله آن‌هایی هستند که برای برجسته‌سازی گسل مفید می‌باشند (Hamidi et al, ۲۰۱۹).

^۱ Envelope

^۲ Instantaneous Phase

^۳ Instantaneous Frequency

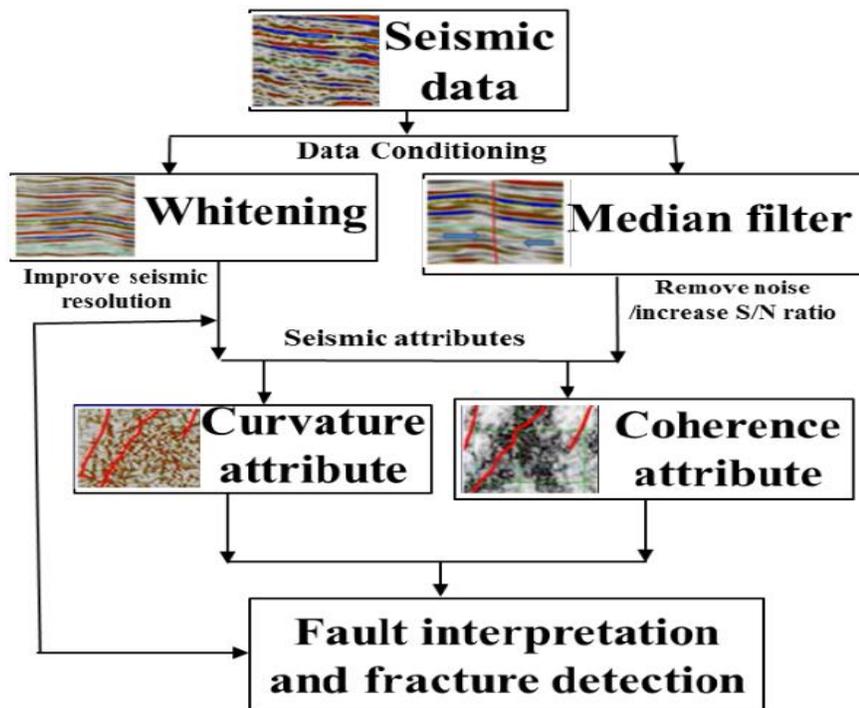
^۴ Polarity

^۵ Dip

^۶ Azimuth

۳-۳ نشانگرهای مناسب برای آشکارسازی الگوی گسلی

نشانگرهای بسیار زیادی توسط محققین در سال‌های متمادی معرفی شده‌اند، که هر یک از آن‌ها بر مبنای تئوری و ماهیت خود در مورد آشکارسازی برخی از رخداد‌های زمین‌شناسی کاربرد دارند. عموماً تحلیل نشانگری داده‌های لرزه‌ای برای آشکارسازی گسل‌ها شامل یک فرایند مشابه با آنچه در شکل (۳-۱) مشاهده می‌شود است. به این ترتیب که در ابتدا یک مرحله آماده‌سازی داده لرزه‌ای انجام می‌شود که در آن توسط برخی فیلترها فرایند یکنواخت‌سازی و نیز افزایش قدرت تفکیک داده‌ها صورت می‌گیرد. پس از آن نشانگرهای مناسب بر روی مقاطع فیلتر شده اعمال می‌گردد و در نهایت مقاطع نشانگری تفسیر می‌شوند. در ادامه این فصل برخی از نشانگرهای لرزه‌ای که مناسب آشکارسازی گسل هستند معرفی و تئوری آنها بیان می‌شود.



شکل ۳-۱: گردش کار مربوط به پردازش داده‌ها و تجزیه و تحلیل نشانگرهای لرزه‌ای برای تفسیر گسل (Abdelnabi et al, ۲۰۱۷).

۱-۳-۳ نشانگر انحنا

انحنا یک نشانگر کاربردی و مهم برای آشکارسازی گسل و کانال است که دلالت بر نرخ تغییر شیب و آزیموت در امتداد بازتاب لرزه‌ای دارد. تجزیه و تحلیل نشانگرهای لرزه‌ای از جمله همدوسی و انحنا برای برجسته سازی گسل‌ها و مناطق شکسته شده کاربرد زیادی دارد. برای بهینه‌سازی تفسیر گسل‌ها و شکستگی‌ها، باید تعداد زیادی از نشانگرهای لرزه‌ای پس از انبارش محاسبه شود. انواع مختلفی از نشانگرهای انحنا را می‌توان از داده‌های لرزه‌ای محاسبه کرد که شامل مثبت‌ترین^۱ و منفی‌ترین^۲ هستند. مثبت‌ترین و منفی‌ترین انحناها بهترین نشانگرها در تعریف شکستگی‌ها و گسل‌ها هستند و از آنها برای تعیین بلوک‌های گسل در بالا و بلوک‌های گسل در مرکز استفاده می‌شود. (Schneider et al, ۲۰۱۶; Bailey et al, ۲۰۱۶).

نشانگر انحنا برای شناسایی ویژگی‌های ساختاری بزرگ عالی است و نمایی بهتر از ویژگی‌های مقیاس لرزه‌ای دامنه ارائه می‌دهد. از آنجایی که نشانگر مثبت‌ترین انحنا، بلوک‌های گسل بالارونده را نشان می‌دهد، و نشانگر منفی‌ترین انحنا، بلوک‌های گسل پایین‌رونده را نشان می‌دهد، در نتیجه پوشش این دو نشانگر گسل‌ها و شکستگی‌ها را برجسته می‌کند، و ثابت می‌کند که خطوط مشاهده شده صرفاً در یک حجم لرزه‌ای سه بعدی پر نوفه^۳ نیستند (Bailey et al, ۲۰۱۴; Chopra and Marfurt, ۲۰۰۷). نشانگر انحنای افق^۴ خصوصیات انحنای محلی را برای آشکارسازی گسل‌ها، خمیدگی‌ها^۵، تاقدیس‌ها^۶ و ناودیس‌ها^۷ اندازه‌گیری می‌کند. از آنجایی که نشانگرهای انحنا به صورت کیفی تفسیر می‌شوند، واحدها نادیده گرفته شده و از همان علوم ریاضی استفاده می‌شود که افق در زمان یا عمق است.

^۱ Most-Positive

^۲ Most-Negative

^۳ Noise

^۴ Horizon curvature

^۵ Flexure

^۶ Anticline

^۷ Syncline

خصوصیات انحنا به شکل ضرایب چند جمله‌ای مرتبه دوم در x و y به صورت منطقه‌ای متناسب با افق

$Z(x,y)$ تعریف می‌شوند:

$$Z(x,y) = C_{xx}x^2 + C_{yy}y^2 + C_{xy}xy + C_xX + C_yY + C_0 \quad (3-1)$$

ضریب C_0 زمان یا عمق افق در $x=0$, $y=0$ است که هیچ تاثیری در انحنا ندارد و نادیده گرفته می‌شود.

ضرایب دیگر مشتقات جزئی مرتبه اول و دوم زمان یا عمق افق Z با توجه به x و y حاصل می‌شوند و معمولاً

از نظر شیب افق p_x و p_y بیان می‌شوند.

معادلات ضرایب عبارتند از (Barnes, ۲۰۱۶):

$$C_{xx} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \frac{\partial p_x}{\partial x} \quad (3-2)$$

$$C_{yy} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} = \frac{1}{2} \frac{\partial p_y}{\partial y} \quad (3-3)$$

$$C_{xy} = \frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial p_x}{\partial y} = \frac{\partial p_y}{\partial x} \quad (3-4)$$

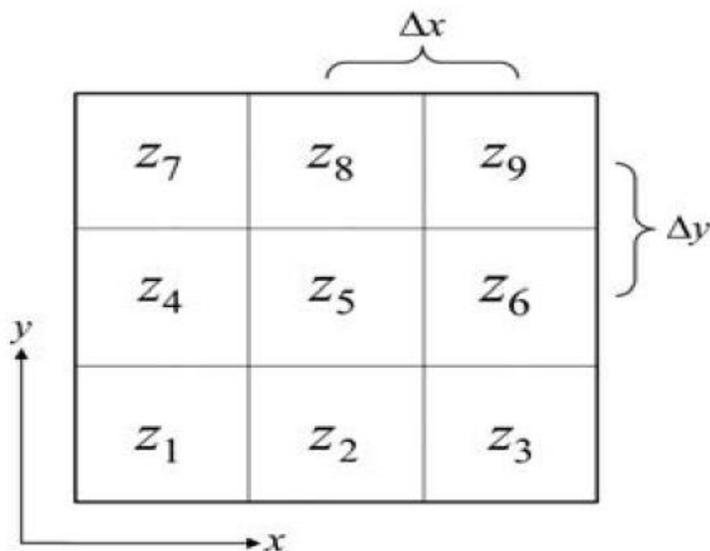
$$C_x = \frac{\partial Z}{\partial x} = p_x \quad (3-5)$$

$$C_y = \frac{\partial Z}{\partial y} = p_y \quad (3-6)$$

در اکثر کاربردها، مشتقات جزئی اول و دوم در فرمول‌ها برای ضرایب انحنا معمولاً توسط سه مرحله معادله

مختلف تخمین زده می‌شوند. برای سه نقطه در یک خط، Z_1 ، Z_2 و Z_3 با فاصله یکسان Δs ، مشتق اول

توسط $(z_3 - z_1) / 2\Delta s$ و مشتق دوم توسط $(z_3 - 2z_2 + z_1) / \Delta s^2$ تخمین می‌یابد. با توجه به شکل (۲-۲) برای مجموعه‌ای از نه نقطه افقی مرتب شده در یک شبکه 3×3 با فاصله یکسان Δx و Δy در جهت x و y ، معادلات مختلفی اصلاح شده است تا میانگین‌های ساده‌ای را در شبکه بگنجاند.



شکل ۲-۳: شبکه‌ای از نه نقطه برای برآورد انحنای یک افق، با زمان یا عمق z_1 تا z_9 و نقاط مجاور با فاصله Δx در جهت x و Δy در جهت y از هم جدا می‌شوند. انحنای تعیین شده به نقطه مرکزی شبکه اختصاص داده می‌شود (Barnes, ۲۰۱۶).

بنابراین فرمول‌های تقریبی ضرایب انحنای تبدیل می‌شوند:

$$C_{xx} = \frac{z_1 + z_2 + z_4 + z_6 + z_7 + z_9}{6\Delta x^2} - \frac{z_2 + z_8 + z_8}{3\Delta x^2} \quad (3-7)$$

$$C_{yy} = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_7 + z_8 + z_9}{6\Delta y^2} - \frac{z_4 + z_6 + z_6}{3\Delta y^2} \quad (3-8)$$

$$C_{xy} = \frac{z_1 + z_4 - z_3 - z_2}{4\Delta x \Delta y} \quad (3-9)$$

$$C_x = \frac{z_3 + z_1 + z_4 - z_2 - z_4 - z_2}{6\Delta x} \quad (3-10)$$

$$C_y = \frac{z_4 + z_3 + z_1 - z_2 - z_3 - z_1}{6\Delta y} \quad (3-11)$$

دو خاصیت اساسی انحنا عبارتند از انحنا میانگین K_{mean} ^۱ و انحنا گوسی K_{gauss} ^۲. آنها عبارتند از ضرایب انحنا (Barnes, ۲۰۱۶):

$$k_{mean} = \frac{C_{xx}(1+C_y^2) + C_{yy}(1+C_x^2) - C_{xy}C_xC_y}{\sqrt{1+C_x^2+C_y^2}} \quad (3-12)$$

$$k_{gauss} = \frac{4C_{xx}C_{yy} - C_{xy}^2}{(1+C_x^2+C_y^2)^2} \quad (3-13)$$

بر مبنای انحنا گوسی K_{gauss} و انحنا میانگین K_{mean} ، انحنا بیشینه K_{max} ^۳ و انحنا کمینه K_{min} ^۴ این گونه بیان می‌شوند (Barnes, ۲۰۱۶):

$$k_{max} = k_{mean} + \sqrt{k_{mean}^2 - k_{gauss}} \quad (3-14)$$

$$k_{min} = k_{mean} - \sqrt{k_{mean}^2 - k_{gauss}} \quad (3-15)$$

با مرتب‌سازی مجدد این معادلات، K_{mean} به دست آمده از K_{max} و K_{min} عبارت است از:

$$k_{mean} = \frac{k_{max} + k_{min}}{2} \quad (3-16)$$

^۱ Mean Curvature

^۲ Gaussian Curvature

^۳ Maximum Curvatures

^۴ Minimum Curvatures

و انحنای گوسی K_{gauss} ، این گونه خواهد بود:

$$k_{gauss} = k_{max}k_{min} \quad (3-17)$$

مثبت ترین انحنای K_{pos} ، به صورت رابطه زیر بیان می شود (Barnes, ۲۰۱۶):

$$k_{pos} = C_{xx} + C_{yy} + \sqrt{(C_{xx} - C_{yy})^2 + C_{xy}^2} \quad (3-18)$$

منفی ترین انحنای K_{neg} ، به صورت رابطه زیر بیان می شود:

$$k_{neg} = C_{xx} + C_{yy} - \sqrt{(C_{xx} - C_{yy})^2 + C_{xy}^2} \quad (3-19)$$

سایر خصوصیات انحنای که از ضرایب مشتق انحنای حاصل می شوند شامل انحنای شیب، انحنای امتداد^۱، منحنی و شاخص شکل^۲ هستند. کمینه، بیشینه، مثبت ترین و منفی ترین انحنای بیشترین مقدار را به عنوان نشانگر نشان داده اند. در جاهایی که شیب افق کم است و می توان آن را نادیده گرفت، معادلات انحنای میانگین و گوسی به تخمین شیب صفر تبدیل می یابند (Barnes, ۲۰۱۶):

$$k_{mean} = C_{xx} + C_{yy} \quad (3-20)$$

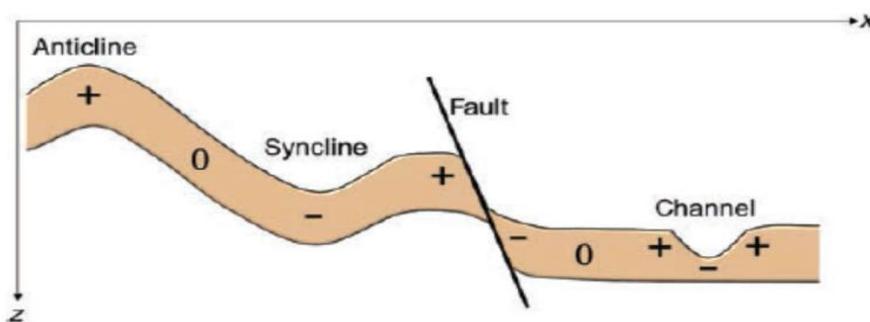
$$k_{gauss} = 2C_{xx}C_{yy} - C_{xy}^2 \quad (3-21)$$

انحنای بیشینه تا بیشترین انحنای مثبت کاهش می یابد و انحنای کمینه تا بیشترین انحنای منفی کاهش می یابد، اما معادلات مثبت ترین انحنای و منفی ترین انحنای بدون تغییر باقی می ماند. انحنای به میزان خم سطح بازتاب اشاره دارد و می توان آن را به عنوان میزان تغییر بازتاب منحنی در جهت معین اندازه گرفت. این نشان می دهد که به ساده ترین روش، می توان با محاسبه مشتقات اول و دوم اجزاء x و y سطح انحنای

^۱ Strike Curvature

^۲ Shape Index

خود را محاسبه کرد. مشتقات اول و دوم یک منحنی را می‌توان با محاسبه مشتقات یک تابع پیوسته و فیت کردن با منحنی داده شده تخمین زد. روش تفاضل محدود برای تخمین تقریبی مشتق به صورت مشتق گیری از خط مستقیم که یک بخش آن خمیده و دارای انحنای است، می‌باشد و به طور مشابه، بخش خمیده را می‌توان با روش حداقل مربعات با استفاده از منحنی سهمی تخمین زد. از طرف دیگر، انحنای یک بازتابنده منحنی در یک نقطه معین می‌تواند به عنوان انحنای یک دایره نوسانی در آن نقطه اندازه‌گیری شود. متقابلاً شعاع دایره نوسانی، انحنای آن نقطه را مشخص می‌کند (Lee Hunt et al, ۲۰۱۷). شکل (۳-۳) مقادیر انحنای بر مبنای تغییرات شیب را نشان می‌دهد که در بالای تاقدیس‌ها انحنای مثبت و در داخل ناودیس‌ها انحنای منفی می‌باشد و در یک بازتابنده شیب‌دار که شیبش بدون تغییر است انحنای صفر می‌باشد. با توجه به شکل (۳-۳) در کانال‌ها در قسمت لبه‌های بالایی انحنای مثبت و در کف کانال انحنای منفی است و در گسل‌ها، بلوک بالایی انحنای مثبت و در بلوک پایینی انحنای منفی می‌باشد.



شکل ۳-۳: مقادیر و علامت‌های انحنای بر مبنای تغییرات شیب (Barnes,)

انحنای خاصیت فیزیکی یک لایه است که میزان انحراف از یک سطح صاف را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن یک دایره مماس با بیشترین تماس ممکن در هر نقطه روی منحنی، شعاع این دایره را که شعاع انحنای^۱

^۱ Radius of the curvature

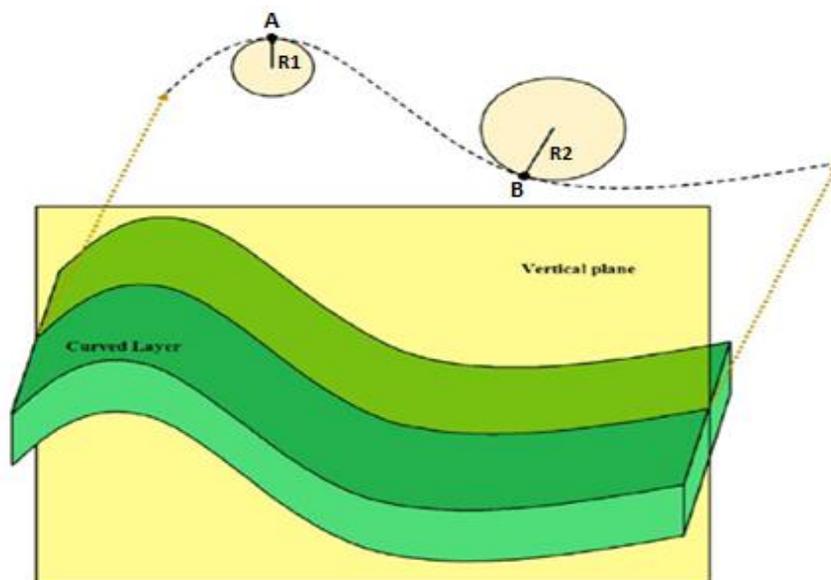
می‌نامیم بدست آید، که با R نشان داده می‌شود. از آنجایی که انحنا K ، دایره در همه نقاط ثابت است، انحنای آن می‌تواند به صورت زیر تعریف شود (Roberts, ۲۰۰۱).

$$K = \frac{1}{R} \quad (3-22)$$

$$K = \frac{1}{R} \frac{d\omega}{ds} \quad (3-23)$$

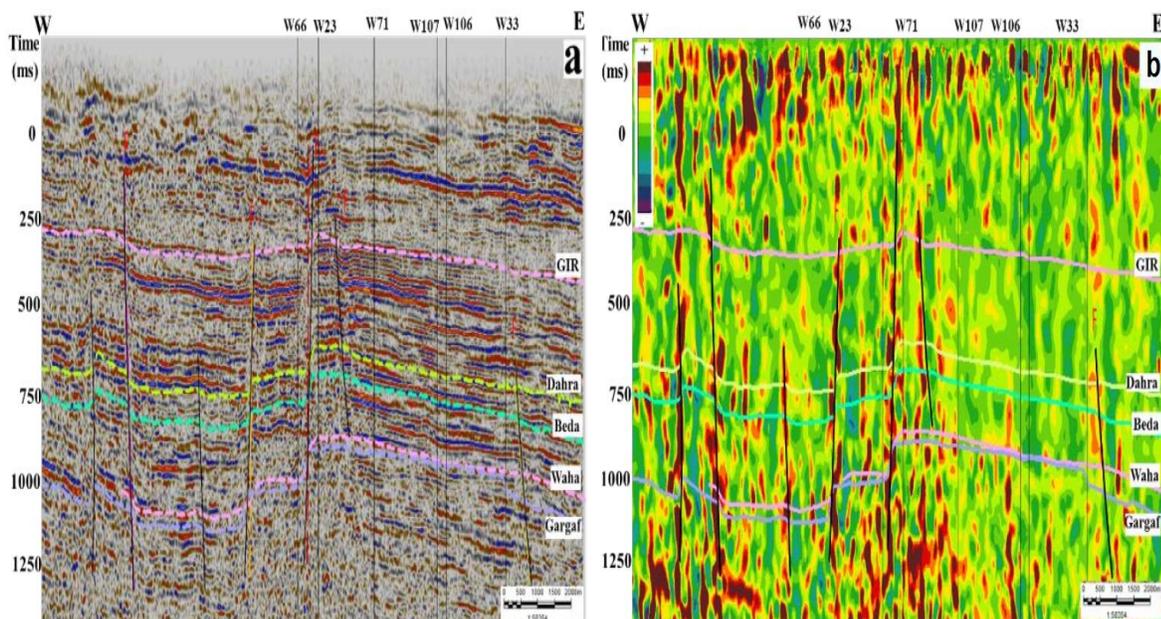
$$K = \frac{d^2y/dx^2}{\left(1 + (dy/dx)^2\right)^{3/2}} \quad (3-24)$$

با استفاده از معادله بالا (۳-۲۲) که رابطه معکوس بین انحنا و شعاع را نشان می‌دهد در نتیجه شعاع کوچکتر معادل انحنای بیشتر است. با مقایسه نقاط A و B در شکل (۳-۴)، مشاهده می‌شود که چگونه یک دایره کوچکتر منجر به انحنای بیشتر می‌شود.



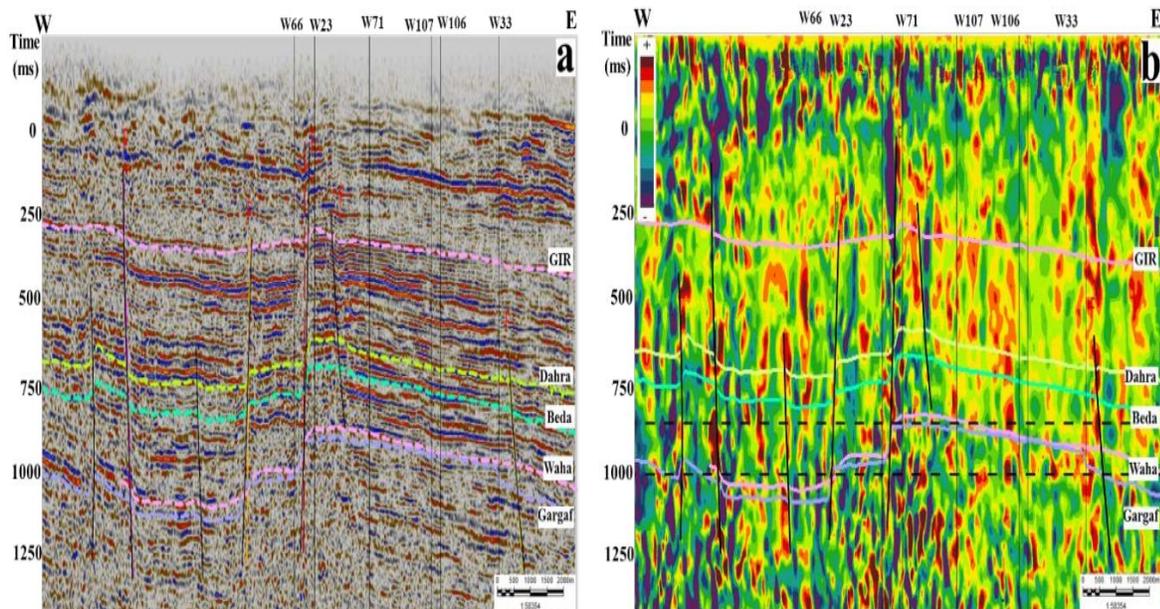
شکل ۳-۴: انحنای یک سطح زمین‌شناسی (Hamidi et al, ۲۰۱۹).

عبدالنبی و همکاران (۲۰۱۷) از هر دو انحنای مثبت و منفی برای تعیین بلوک‌های بالا و پایین گسل استفاده کردند. در شکل (۳-۵) مثبت‌ترین انحنای نشان دهنده ضلع بالایی گسل است و در شکل (۳-۶) منفی‌ترین انحنای نشان دهنده ضلع پایینی گسل است. مثبت‌ترین و منفی‌ترین برش‌های انحنای تشخیصی مناطق شکستگی و گسل که به طور معمول در نزدیکی‌های تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها یا در لایه‌های چینه‌ای و شکننده رخ می‌دهد، استفاده می‌شود. با استفاده از نشانگرها، شکستگی‌هایی را که در منطقه مورد مطالعه وجود دارد قابل مشاهده هستند. شکستگی‌های تعریف شده در منطقه برای توسعه مخزن بسیار مهم هستند، زیرا میزان تولید بستگی به شکستگی طبیعی در منطقه دارد (Abdelnabi et al, ۲۰۱۷).



شکل ۳-۵: (a) داده‌های اصلی، (b) مثبت‌ترین انحنای در inline ۱۲۱۵ که مقادیر بالای مثبت در رنگ قرمز نشان دهنده بلوک بالارونده^۱ گسل می‌باشد (Abdelnabi et al, ۲۰۱۷).

^۱ Uplthrow



شکل ۳-۶: (a) داده‌های اصلی، (b) منفی‌ترین انحنا در ۱۲۱۵ inline که مقادیر بالای منفی در رنگ آبی نشان‌دهنده بلوک پایین‌رونده^۱ گسل می‌باشد (Abdelnabi et al, ۲۰۱۷).

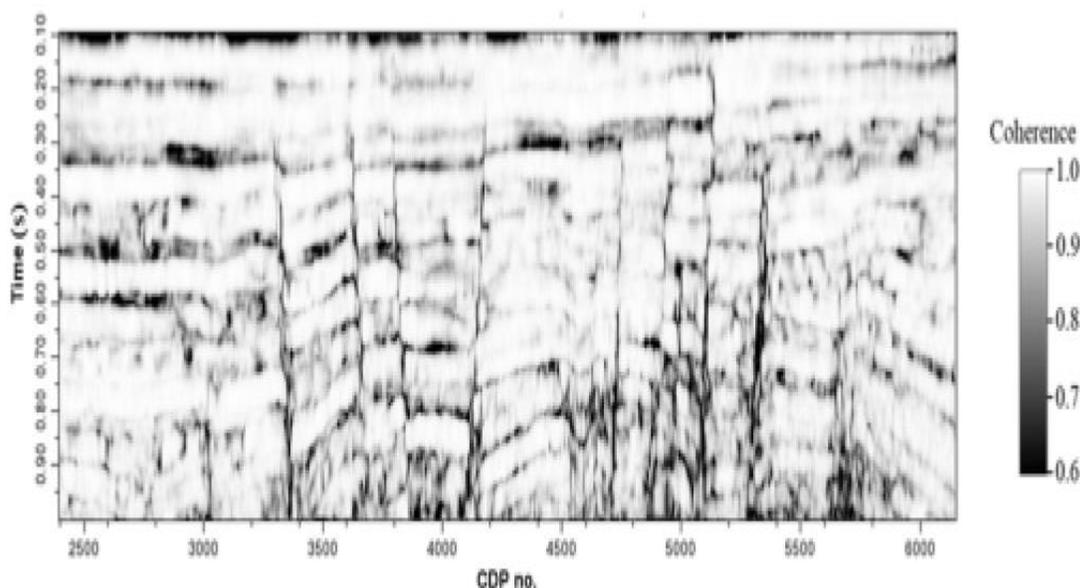
۳-۳-۲ نشانگر همدوسی

این نشانگر شباهت‌های بین دو یا چند ردلرزه را کمی‌سازی می‌کند که شباهت یک به معنای بازتاب‌های لرزه‌ای دارای فاز و دامنه ثابت است و شباهت صفر به معنی بازتاب‌های لرزه‌ای فاز و دامنه غیر ثابت است و شکاف در ردلرزه را آشکار می‌کند که می‌تواند ناشی از گسل‌ها، کانال‌ها و شکستگی‌ها باشد. به عبارتی همدوسی لرزه‌ای یک مقیاس بین صفر و یک است که تشابه بین ردلرزه‌ها و پیوستگی بین دو یا چند ردلرزه را در پنجره لرزه‌ای نشان می‌دهد و این نشانگر شامل سه الگوریتم همبستگی عرضی، شباهت و ساختار ویژه^۲ است که برای شناسایی گسل از الگوریتم شباهت استفاده می‌شود (Dewett et al, ۲۰۱۶; Abdelnabi et al, ۲۰۱۷; Chopra and Marfurt, ۲۰۱۰).

^۱ Downthrow

^۲ Eigenstructure

همدوسی شباهت بین شکل موج یا ردلرزه را اندازه‌گیری می‌کند. از نظر زمین‌شناسی، یک شکل موج لرزه‌ای بسیار همسان و منسجم نشانگر لیتولوژی جانبی پیوسته است و تغییر ناگهانی در شکل موج نشانگر گسل یا شکستگی در رسوبات است (Lawal et al, ۲۰۱۶). روش‌های مختلفی برای محاسبه نشانگر همدوسی وجود دارد که عبارتند از همدوسی بر مبنای همبستگی^۱، همدوسی بر مبنای شباهت^۲، همدوسی بر مبنای واریانس^۳ و همدوسی بر مبنای مقادیر ویژه^۴ (Fangyu et al, ۲۰۱۴). لایو^۵ و همکاران (۲۰۲۰) از نشانگر همدوسی برای تشخیص گسل‌ها و مناطق دارای شکستگی استفاده کردند. که در شکل (۳-۷) می‌توانیم گسل‌های برجسته شده را از برش عمودی همدوسی بدست آمده در مقطع زمانی $t = 0,4$ مشاهده کنیم.



شکل ۳-۷: برش عمودی همدوسی در مقطع زمانی $t = 0,4$ (Lyu et al, ۲۰۲۰).

^۱ Crosscorrelation-based Coherence

^۲ Semblance-based Coherence

^۳ Variance-based Coherence

^۴ Eigenstructure-based Coherence

^۵ Lyu

۱-۲-۳-۳ همبستگی

این روش ابتدا توسط باهوریچ^۱ و فارمر^۲ در سال ۱۹۹۵ ارائه شد که بعدها توسط مارفورت^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۸ تعمیم داده شد که به تفسیر دقیق تر داده‌های لرزه‌ای منجر شد. محاسبه مقدار همبستگی بر مبنای همبستگی این گونه می‌باشد که در مرحله اول ردلرزه مبنا و دو ردلرزه دیگر در مجاورت ردلرزه مبنا انتخاب می‌شوند که یکی در راستای خط چشمه و یکی در راستای خط گیرنده که در نهایت در یک زمان مشخص محاسبه می‌شود. محاسبه در راستای خط گیرنده ρ_x ، در زمان t بین ردلرزه‌های $u(x_i, y_i)$ و $u(x_{i+1}, y_i)$ در بازه‌ای به طول $2k+1$ از رابطه زیر بدست آید.

$$\rho_x(t, \tau_x) = \frac{\sum_{k=-k}^{+k} \{ [u_0(t+k\Delta t) - \mu_0(t)] [u_1(t+k\Delta t - \tau_x) - \mu_1(t - \tau_x)] \}}{\sqrt{\left\{ \sum_{k=-k}^{+k} [u_0(t+k\Delta t) - \mu_0(t)]^2 \right\} \left\{ \sum_{k=-k}^{+k} [u_1(t+k\Delta t - \tau_x) - \mu_1(t - \tau_x)]^2 \right\}}} \quad (3-25)$$

$$\langle u_n \rangle (t) = \frac{1}{2k+1} \sum_{k=-k}^{+k} u_n(t + k\Delta t) \quad (3-26)$$

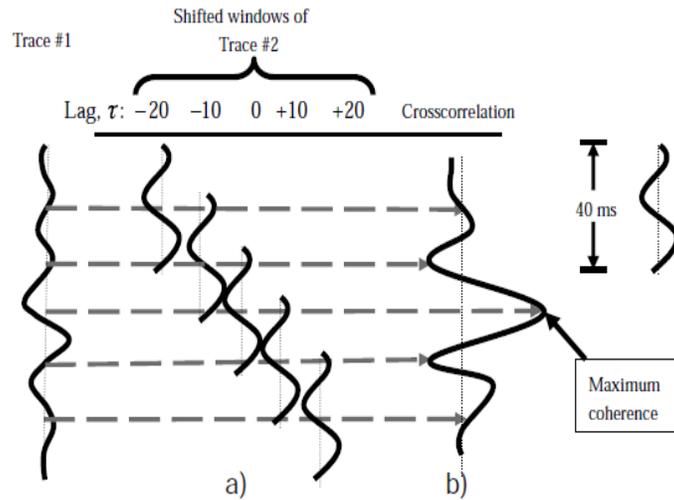
از آنجا که ما می‌دانیم میانگین واقعی پردازش صحیح داده‌های لرزه‌ای \cdot می‌باشد، اغلب ساده‌سازی محاسباتی را انجام می‌دهیم که $\langle u \rangle (t) = \cdot$ است و همچنین اگر پنجره تجزیه و تحلیل بزرگتر از یک موجک لرزه‌ای باشد این یک تخمین منطقی خواهد بود، و روند را برای طیف وسیعی از انتقال‌ها^۴، τ_x ، ادامه می‌دهیم که نتایج در شکل (۸-۳-۸) ترسیم شده است.

^۱ Bahorich

^۲ Farmer

^۳ Marfurt

^۴ Lags



شکل ۳-۸: یک نمودار شماتیکی که همبستگی بین دو ردلرزه را نشان می‌دهد. ردلرزه شماره ۱ ثابت شده در حالی که پنجره‌های از ردلرزه شماره ۲ (اینجا، ۴۰ میلی ثانیه) در حال نوسان در امتداد زمان تاخیر و همبستگی می‌باشد (Chopra and Marfurt, ۲۰۰۷).

محاسبه در راستای خط چشمه ρ_y ، در زمان t بین ردلرزه‌های $u(x_i, y_i)$ و $u(x_i, y_{i+1})$ در بازه‌های به طول $2k+1$ از رابطه زیر بدست آید.

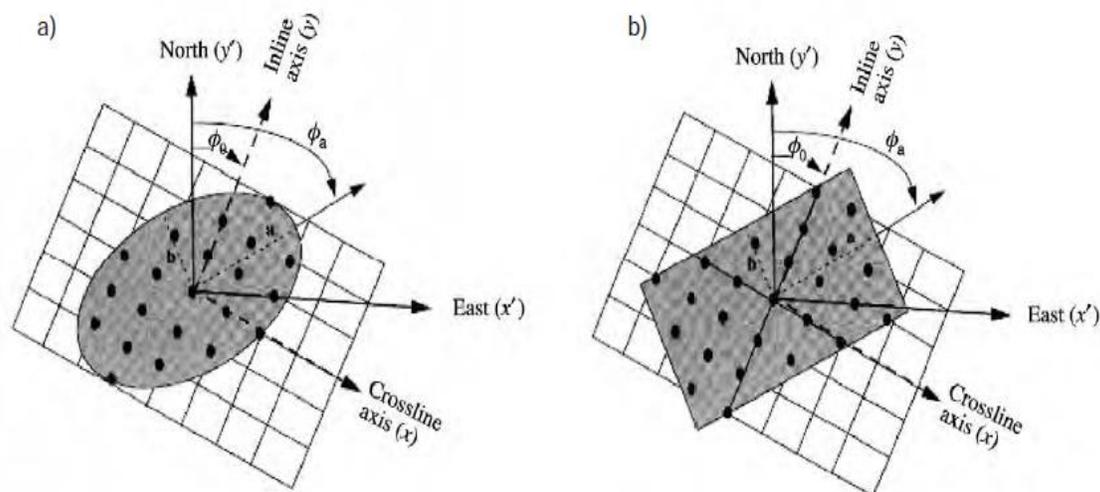
$$\rho_y(t, \tau_y) = \frac{\sum_{k=-k}^{+k} \left\{ \frac{[u_x(t+k\Delta t) - \mu_x(t)] [u_y(t+k\Delta t - \tau_y) - \mu_y(t - \tau_y)]}{\sqrt{\left\{ \sum_{k=-k}^{+k} [u_x(t+k\Delta t) - \mu_x(t)]^2 \right\} \left\{ \sum_{k=-k}^{+k} [u_y(t+k\Delta t - \tau_y) - \mu_y(t - \tau_y)]^2 \right\}}} \right\}}{\sqrt{\left\{ \sum_{k=-k}^{+k} [u_x(t+k\Delta t) - \mu_x(t)]^2 \right\} \left\{ \sum_{k=-k}^{+k} [u_y(t+k\Delta t - \tau_y) - \mu_y(t - \tau_y)]^2 \right\}}} \quad (3-27)$$

باهوریچ و فارمر در سال ۱۹۹۵ با استفاده از فرمول‌ها و ترکیب ضرایب همبستگی inline و crossline، همبستگی سه بعدی هم‌دوسی C_{XC} را تخمین زده و به صورت زیر تعریف کردند.

$$C_{XC} \equiv \sqrt{[\max \rho_x(t, \tau_x, x_i, y_i)] [\max \rho_y(t, \tau_y, x_i, y_i)]} \quad (3-28)$$

۲-۳-۳-۳ هم‌دوسی بر مبنای شباهت

این الگوریتم ابتدا توسط مارفورت و همکاران در سال ۱۹۹۸ مورد استفاده قرار گرفت. در رویکرد شباهت برای محاسبه هم‌دوسی، یک فضا و دهانه^۱ زمانی یا یک پنجره تحلیل سه بعدی برای داده‌ها تعریف می‌شود، که پنجره تحلیل با توجه به شکل (۳-۹) به صورت مستطیل یا بیضی تعریف می‌شود و همچنین باید برای هر نقطه از داده، یک شب و آزیموت در نظر گرفته شود. این شیب و آزیموت ممکن است از طریق صاف کردن توسط کاربر تعریف شود یا صریحاً از طریق یک محاسبه شیب جداگانه، که معمولاً با استفاده از اسکن شیب محور شباهت (شبیه سازی) ارائه شده در سال ۱۹۹۸ توسط مارفورت و همکاران تعریف می‌شود. همانطور که در شکل (۳-۹) نشان داده شده است، یک پنجره تحلیل بیضوی (شکل ۳-۹-۳) یا مستطیلی (شکل ۳-۹-۳) تعریف شده که حاوی ردلرزه‌های J با مرکزیت نقطه تحلیل می‌باشد.



شکل ۳-۹: (a) پنجره تحلیل بیضوی و (b) پنجره تحلیل مستطیلی، مرکز هر نقطه تحلیل با طول محور اصلی a ، طول محور فرعی b ، و آزیموت محور اصلی ϕ_a ، تعریف می‌شود. اصطلاح ϕ_0 نشان دهنده آزیموت محور لرزه‌ای inline از شمال است (Chopra and Marfurt, ۲۰۰۷).

^۱ Aperture

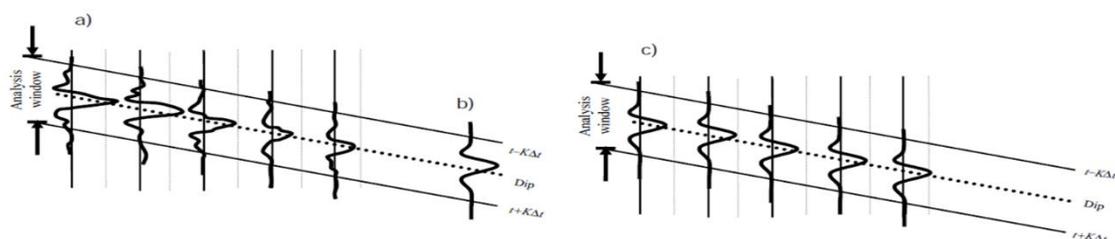
شباهت $\sigma(t, p, q)$ که نسبت انرژی میانگین ردلرزه به میانگین انرژی تمام ردلرزه‌ها در امتداد یک شیب مشخص بوده این‌گونه تعریف می‌شود (Chopra and Marfurt, ۲۰۰۷):

$$\sigma(t, p, q) \equiv \frac{[\sum_{j=1}^J u_j(t-px_j-qty)]^2}{\sum_{j=1}^J \{[u_j(t-px_j-qty)]^2\}} \quad (۳-۲۹)$$

x_j و y_j فاصله زمین ردلرزه از مرکز پنجره تحلیل در راستای x و y هستند، و شیب‌های ظاهری p و q بر حسب میلی ثانیه بر متر یا هر فوت اندازه‌گیری می‌شوند و یک رویداد مسطح منطقه‌ای را در زمان t تعریف می‌کنند. به عبارت دیگر p و q شیب‌های ظاهری در موقعیت ردلرزه هدف در راستای x و y بر حسب میلی ثانیه بر متر هستند. برای اینکه این الگوریتم در مقابل نوفه پایدار باشد محاسبات در یک پنجره زمانی صورت می‌گیرد و در نهایت میانگین‌گیری انجام خواهد گرفت. به عبارتی دیگر برای جلوگیری از این مشکل، به صورت قراردادی اسکن‌های سرعت-تحلیل شباهت را اتخاذ کرده و یک شباهت میانگین از یک پنجره تحلیل عمودی محاسبه می‌شود:

$$C_s(t, p, q) = \frac{\sum_{k=-K}^K [\sum_{j=1}^J u_j(t+k\Delta t-px_j-qty)]^2}{\sum_{k=-K}^K \sum_{j=1}^J \{[u_j(t+k\Delta t-px_j-qty)]^2\}} \quad (۳-۳۰)$$

در شکل (۳-۱۰-a) ورودی به صورت پنج پنجره تحلیل ردلرزه نشان داده شده که ابتدا انرژی پنج ردلرزه ورودی در یک پنجره تحلیل محاسبه می‌شود. شکل (۳-۱۰-b) میانگین ردلرزه را نشان داده و سپس میانگین ردلرزه محاسبه می‌شود. در شکل (۳-۱۰-c) سرانجام، هر ردلرزه با میانگین ردلرزه جایگزین شده و انرژی پنج ردلرزه میانگین محاسبه می‌شود. شباهت عبارت است از نسبت انرژی (c) به انرژی (a). اگر هر ردلرزه از پنجره (a) دارای شکل موج و دامنه یکسان باشد، میزان شباهت ۱,۰ است. در غیر این صورت، کمتر از ۱,۰ است (شکل ۳-۱۰).

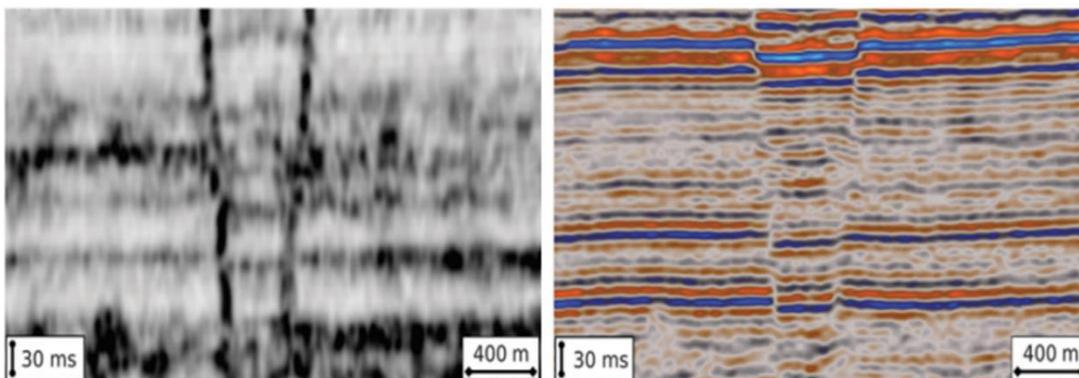


شکل ۳-۱۰: یک نمودار شماتیکی که مراحل بکار رفته شده در تخمین و برآورد شباهت از همدوسی را نشان می‌دهد (Chopra and Marfurt, ۲۰۰۷).

خصوصیات هندسی گسل مانند طول، ارتفاع و صفحات گسل را می‌توان با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای استخراج کرد. لیباک^۱ و همکاران (۲۰۱۷) به نتایجی دست یافتند که نشان می‌دهد نشانگر همدوسی مبتنی بر شباهت نتایج بهتری را در مناطقی که جابجایی کمی در نزدیکی گسل دارند را به ما می‌دهد و داده‌های دقیق‌تری از طول گسل را ارائه می‌کند که در شکل (۱۱-۳) می‌توانم عملکرد نشانگر همدوسی مبتنی بر شباهت را مشاهده کنیم.

(ب)

(الف)



شکل ۳-۱۱: مقاطع لرزه‌ای عمودی، (الف) مقطع لرزه‌ای اصلی، (ب) مقطع عمودی در حجم همدوسی مبتنی بر شباهت به دست آمده با استفاده از داده‌های لرزه‌ای اصلی به عنوان ورودی (Libak et al, ۲۰۱۷).

^۱ Libak

۳-۳-۲-۳ همدوسی بر مبنای واریانس

یکی دیگر از روش‌های عمومی محاسبه شکل موج، واریانس است. با اصلاح تعریف فرمول واریانس، داریم:

$$var(t, p, q) = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^j [u_j(t - px_j - qy_j) - \langle u(t, p, q) \rangle]^2 \quad (3-31)$$

که در آن میانگین، $\langle u(t, p, q) \rangle$ این‌گونه تعریف شده است:

$$\langle u(t, p, q) \rangle = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^j u_j(t - px_j - qy_j) \quad (3-32)$$

در اینجا باید توجه داشت که $\langle u \rangle$ برای هر صفحه به موازات بازتاب دهنده با پنجره تحلیل محاسبه می‌شود در حالی که روابط (۳-۳۱) و (۳-۳۲) تعریف رسمی واریانس را ارائه می‌دهند، اما اکثر متخصصین از فرم محاسباتی بسیار کارآمدتر واریانس (از نظر معادلات ریاضی) استفاده می‌کنند (Chopra and Marfurt, ۲۰۰۷).

$$var(t, p, q) = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^j [u(t - px_j - qy_j, x_j, y_j)]^2 - \left[\frac{1}{j} \sum_{j=1}^j u(t - px_j - qy_j, x_j, y_j) \right]^2 \quad (3-33)$$

برای برآورد همدوسی، واریانس را در طول پنجره تحلیل عمودی از $2K + 1$ نمونه‌ها جمع می‌کنیم و با صرف انرژی، همه ردلرزه‌ها را نرمال می‌کنیم.

$$C_v(t, p, q) = \frac{\sum_{K=-k}^{+K} \frac{1}{j} \sum_{j=1}^j [u_j(t+k\Delta t - px_j - qy_j)]^2 - \sum_{K=-k}^{+K} k \left[\frac{1}{j} \sum_{j=1}^j u_j(t+k\Delta t - px_j - qy_j) \right]^2}{\sum_{K=-k}^{+K} \frac{1}{j} \sum_{j=1}^j [u_j(t+k\Delta t - px_j - qy_j)]^2} \quad (3-34)$$

یا به این صورت نوشته می‌شود:

$$C_v(t, p, q) = \frac{1}{\sum_{K=-k}^{+K} \left[\frac{1}{j} \sum_{K=-K}^{+K} u_j(t+k\Delta t - px_j - qy_j) \right]^2} \sum_{K=-k}^{+K} \frac{1}{j} \sum_{K=-K}^{+K} u_j(t+k\Delta t - px_j - qy_j)} \quad (3-35)$$

$$C_v(t, p, q) = 1 - C_s(t, p, q) \quad (3-36)$$

$$C_v(t, p, q) = 1 - \frac{B}{C} \quad (3-37)$$

$$B = \sum_{k=1}^K \left[\sum_{j=1}^J u_j(t + k\Delta t - px_j - qy_j) \right] \quad (3-38)$$

$$C = \sum_{k=1}^K \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [u_j(t + k\Delta t - px_j - qy_j)] \quad (3-39)$$

بنابراین، برآورد همدوسی بر مبنای واریانس از نظر عددی با یک علامت منفی با برآورد همدوسی بر مبنای شباهت یکسان است. واریانس (و به همین دلیل همچنین شباهت) معیاری برای چگونگی مناسب بودن هر ردلرزه در میانگین ردلرزه است. اگر همه ردلرزه‌ها برابر باشند، برآورد همدوسی بر مبنای واریانس C_v ، صفر و برآورد میزان همدوسی بر مبنای شباهت C_s ، یک می‌باشد، با این حال، حتی اگر تمام ردلرزه‌ها از شکل موج دقیقاً یکسانی برخوردار باشند، و دامنه آنها متفاوت باشد، C_v بیشتر از صفر و C_s کمتر از یک می‌باشد. در مقابل، برآورد ضریب همدوسی بر مبنای همبستگی C_{xc} ، یک است تا زمانی که شکل موج یکسان باشد و از دامنه هر ردلرزه صرف نظر شود (Chopra and Marfurt, 2007). لاوال^۱ و همکاران (2016) به منظور تشخیص دقیق گسل‌ها در داده‌های لرزه‌ای، یک رویکرد جدید با استفاده از نشانگرهای مختلف لرزه‌ای مانند همدوسی، انحنای و شیب پیشنهاد کردند. علاوه بر این، از نشانگر همدوسی مبتنی بر واریانس برای بهینه‌سازی و برجسته‌سازی نقاط گسل در یک بخش لرزه‌ای استفاده کردند. در شکل (3-12) می‌توان عملکرد نشانگر همدوسی مبتنی بر واریانس را مشاهده کرد.

^۱Lawal



شکل ۳-۱۲: نشانگر همدوسی مبتنی بر واریانس (Lawal et al, ۲۰۱۶).

۳-۳-۲-۴ همدوسی بر مبنای مقادیر ویژه

برای اولین بار این الگوریتم توسط گرسزنکورن^۱ و مارفورت در سال ۱۹۹۹ ارائه شد که توسط ماتریس کواریانس محاسبه می‌شود. ماتریس کواریانس شامل کلیه ضرایب همبستگی غیر نرمال و همبستگی خودکار هر ۹ پنجره ردلرزه با یکدیگر می‌باشد. در این روش که از مکعب لرزه‌ای سه‌بعدی استفاده می‌شود، مکعب تحلیل شامل n نمونه و z ردلرزه می‌باشد. برای محاسبه الگوریتم همدوسی بر مبنای مقادیر ویژه، مکعب لرزه‌ای باید به ماتریس دوبعدی تبدیل شود که این ماتریس از رابطه زیر با مرتبه $z \times n$ بدست آید (Gersztenkorn and Marfurt, ۱۹۹۹).

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \dots & d_{NJ} \end{bmatrix} \quad (۳-۴۰)$$

ماتریس کواریانس برای نمونه n ام به صورت رابطه (۳-۴۱) از ماتریس D (۳-۴۰) محاسبه می‌شود:

^۱ Gersztenkorn

$$d_n d_n^T = \begin{bmatrix} d_{n1} \\ d_{n2} \\ \vdots \\ d_{nj} \end{bmatrix} [d_{n1} \quad d_{n2} \quad \dots \quad d_{nj}] = \begin{bmatrix} d_{n1}^2 & d_{n1}d_{n2} & \dots & d_{n1}d_{nj} \\ d_{n1}d_{n2} & d_{n2}^2 & \dots & d_{n2}d_{nj} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1}d_{nj} & d_{n2}d_{nj} & \dots & d_{nj}^2 \end{bmatrix} \quad (3-41)$$

اگر بردار d_n یک بردار صفر نباشد، پس هر نمونه ماتریس کواریانس $d_n d_n^T$ ($n = 1, 2, \dots, N$) همانطور که در معادله (3-41) نشان داده شده است یک ماتریس مرتبه یک نیمه متقارن مثبت می باشد. ماتریس کواریانس برای کل مکعب تحلیل به صورت رابطه زیر می باشد:

$$C = D^T D = \sum_{n=1}^N d_n d_n^T = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N d_{n1}^2 & \sum_{n=1}^N d_{n1}d_{n2} & \dots & \sum_{n=1}^N d_{n1}d_{nj} \\ \sum_{n=1}^N d_{n1}d_{n2} & \sum_{n=1}^N d_{n2}^2 & \vdots & \sum_{n=1}^N d_{n2}d_{nj} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{n=1}^N d_{n1}d_{nj} & \sum_{n=1}^N d_{n2}d_{nj} & \dots & \sum_{n=1}^N d_{nj}^2 \end{bmatrix} \quad (3-42)$$

در رابطه (3-42) مرتبه ماتریس C توسط مقادیر ویژه مثبت برآورد می شود. همچنین تولید خروجی از این بردار جدید d_n منجر به یک ماتریس مرتبه یک می شود:

$$d_n d_n^T = (\alpha_n d_1)(\alpha_n d_1^T) = \alpha_n^2 d_1 d_1^T \quad (3-43)$$

از معادله (3-43)، یک سری خروجی ماتریس مرتبه یک از نمونه اول برای همه نمونه ها تولید می شود:

$$d_1 d_1^T = d_1 d_1^T \quad (3-44)$$

$$d_2 d_2^T = \alpha_2^2 d_1 d_1^T$$

:

$$d_N d_N^T = \alpha_N^2 d_1 d_1^T$$

خلاصه خروجی ماتریس‌های مرتبه یک N در معادله (۳-۴۴) منجر به ماتریس کواریانس C می‌شود:

$$C = D^T D = \sum_{n=1}^N d_n d_n^T = (1 + \alpha_1^2 + \dots + \alpha_N^2) d_1 d_1^T \quad (3-45)$$

برآورد همدوسی بر مبنای مقادیر ویژه توسط رابطه زیر بدست آید (Gersztenkorn and Marfurt, ۱۹۹۹):

$$E_C = \frac{\lambda_1}{\text{Tr}(C)} = \frac{\lambda_1}{\sum_{j=1}^J C_{jj}} = \frac{\lambda_1}{\sum_{j=1}^J \lambda_j} \quad (3-46)$$

در این رابطه λ_1 بزرگ‌ترین مقدار ویژه می‌باشد. از آنجایی که C دارای یک مقدار خاص غیر صفر، λ_1 می‌باشد. در نتیجه بیان آن برای E_C ساده است و می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$E_C = \frac{\lambda_1}{\sum_{j=1}^J \lambda_j} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1} = 1 \quad (3-47)$$

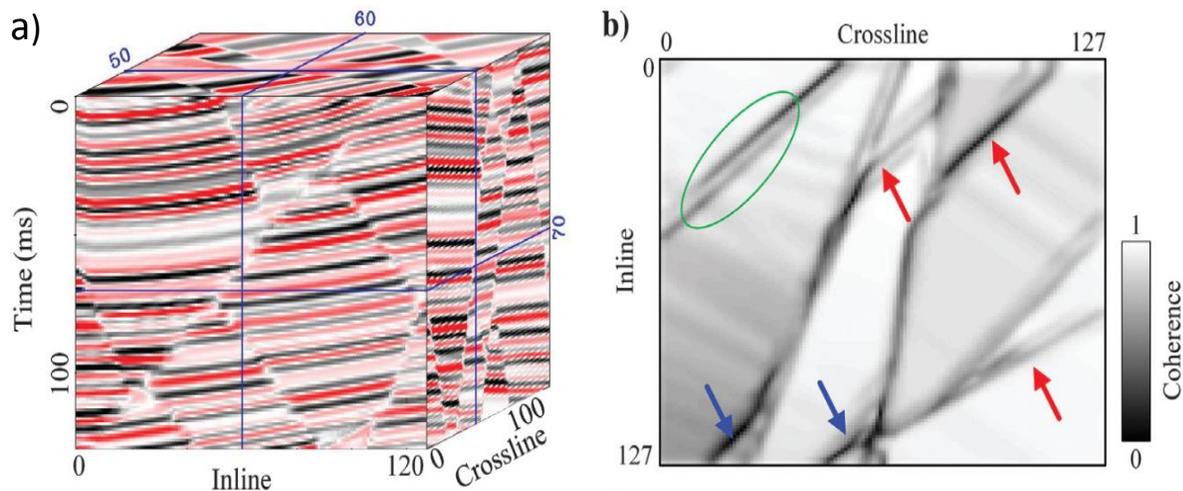
$\text{Tr}(C)$ در رابطه (۳-۴۶) ارائه شده توسط گلوب و ون لوان^۱ در سال ۱۹۸۹ عبارت است از:

$$\text{Tr}(C) = \sum_{j=1}^j \sum_{n=1}^N d_{nj}^2 = \sum_{j=1}^j c_{jj} = \sum_{j=1}^j \lambda_j \quad (3-48)$$

لیوو^۲ و همکاران (۲۰۲۰) با توسعه و بهبود روش همدوسی مبتنی بر مقادیر ویژه موفق شدند رویکردی را ارائه دهند که منجر به شناسایی گسل و کانال‌های زمین‌شناسی با وضوح و دقت بالایی شود، که در شکل (۳-۱۳) می‌توان نتایج روش بهبود یافته همدوسی مبتنی بر مقادیر ویژه را مشاهده کرد.

^۱ Golub and Van loan

^۲ Liu



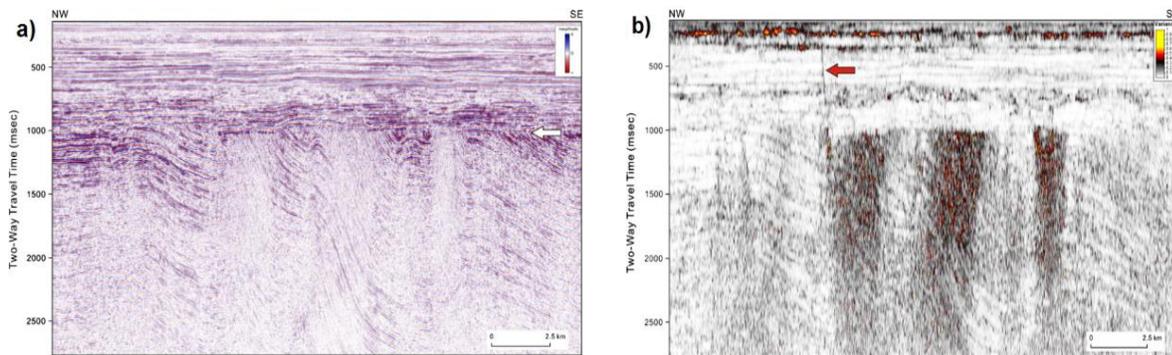
شکل ۳-۳: (a) حجم مصنوعی سه‌بعدی، شامل چندین گسل مجزا و خطوط آبی رنگ افقی، برش زمانی را در ۷۰ ms نشان می‌دهد. (b) برش همدوسی مبتنی بر مقادیر ویژه در ۷۰ ms در شکل (a) می‌باشد که فلش‌های قرمز مناطق گسل خوردگی بزرگ و فلش‌های آبی گسل‌های ظریف و کوچک را نشان می‌دهند (Liu et al, ۲۰۲۰).

۳-۳-۳ نشانگر واریانس

نشانگر واریانس که به صورت یک روند لبه‌یابی می‌باشد، شباهت شکل موج‌ها یا ردلرزه مجاور را نسبت به پنجره‌های جانبی و یا عمودی داده شده را اندازه‌گیری می‌کند، بنابراین می‌تواند ناپیوستگی گسل‌های مربوط به داده‌های لرزه‌نگاری یا چینه‌شناسی را نشان دهد. نشانگر واریانس ابزاری بسیار مؤثر برای توصیف گسل‌ها و لبه‌های کانال در هر دو برش افقی و عمودی مقطع لرزه‌ای است. ثابت شده است که نشانگر واریانس به آشکارسازی کانال‌ها و گسل‌ها کمک می‌کند و همچنین برای نمایش مستقیم مناطق اصلی گسل، شکستگی‌ها، ناپیوستگی‌ها و مرزهای سکانشی استفاده می‌شود (Pigott et al, ۲۰۱۳). واریانس غالباً برای تفکیک و شناسایی گسل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد اما می‌تواند برای نمایان کردن ویژگی‌های چینه‌شناسی نیز مورد استفاده قرار گیرد. الگوریتم واریانس نرمال شده از نظر ریاضی به این صورت شرح داده می‌شود (Koson et al, ۲۰۱۴).

$$\sigma_t^y = \frac{\sum_{j=\frac{t-L}{\gamma}}^{j=\frac{t+L}{\gamma}} w_{j-t} \sum_{i=1}^j (X_{ij} - X_j)^2}{\sum_{j=\frac{t-L}{\gamma}}^{j=\frac{t+L}{\gamma}} w_{j-t} \sum_{i=1}^j (X_{ij})^2} \quad (3-49)$$

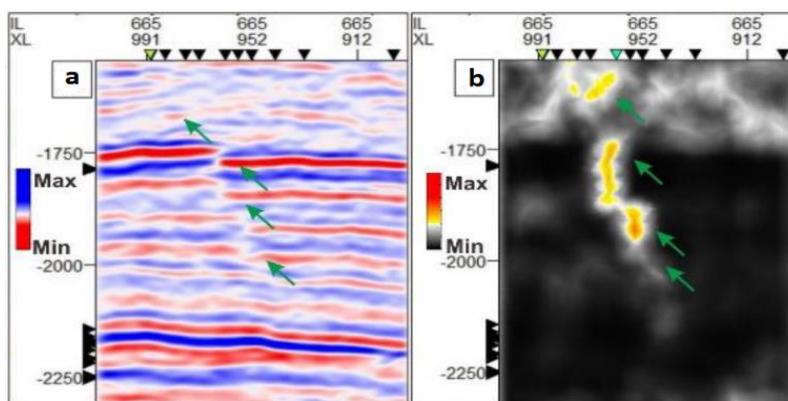
در این رابطه X_{ij} مقدار نمونه در موقعیت افقی i و عمودی j و w_{j-t} عبارت است از نرم کردن عمودی بر روی یک پنجره به طول L . واریانس مستقیماً مناطق عمده گسل را نشان می‌دهد، با این حال، ویژگی‌های ظریف متفاوت که ممکن است در بخش دامنه استاندارد مشاهده شوند، با توجه به پارامترهای انتخاب شده برای این ساختار مبهم هستند. نکته این است که وضوح واریانس به پنجره جستجو بستگی دارد. پیگوت^۱ و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از نشانگر واریانس به نتایج قابل قبولی در راستای آشکارسازی گسل‌ها در داده‌های لرزه‌ای دست یافتند، و همانطور که در شکل (۳-۱۴) مشاهده می‌کنیم واریانس رنگ‌های تیره تا گرم را در صفحه به نمایش گذاشته که مناطق تیره به صورت نواری بیانگر شکستگی و گسل می‌باشد.



شکل ۳-۱۴: (a) مقطع لرزه‌ای اصلی، (b) نشانگر واریانس برای شکل a را نشان می‌دهد که فلش قرمز به مناطق گسل اشاره دارد (Pigott et al, ۲۰۱۳).

^۱ Pigott

اشرف^۱ و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از الگوریتم نرم‌سازی گوسی^۲، ابتدا داده اصلی را برای افزایش تداوم ویژگی‌های ساختاری (گسل و شکستگی) نرم کرده و سپس نشانگر واریانس را برای شناسایی گسل اعمال کردند که نتایج را می‌توان در ۶۶۵ inline، شکل (۱۵-۳) مشاهده کرد.



شکل ۱۵-۳: (a) داده لرزه‌ای اصلی نرم شده در ۶۶۵ inline، (b) مقطع نشانگر واریانس (Ashraf et al, ۲۰۲۰).

۳-۳-۴ نشانگر شباهت

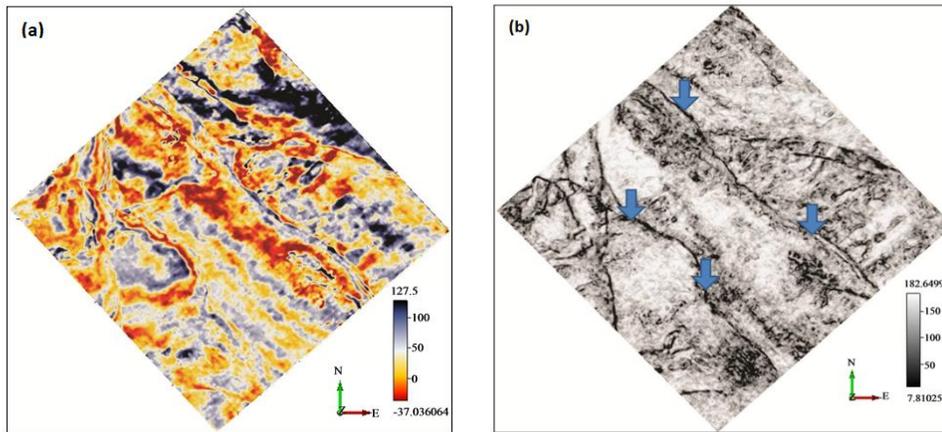
نشانگر شباهت شکلی از همدوسی است که بیانگر شباهت دو یا چند قسمت از ردلرزه‌های مجاور هم با یکدیگر می‌باشد. مقدار تشابه یک، نشان‌دهنده این است که قسمت‌های ردلرزه‌ها کاملاً از نظر شکل موج و دامنه یکسان می‌باشند و مقدار تشابه صفر، نشان‌دهنده عدم شباهت کامل آن‌ها با یکدیگر است. منظور از قسمت‌های ردلرزه‌ها، بخشی از هر ردلرزه می‌باشد که از طریق یک پنجره زمانی انتخاب شده است، و با فرض اینکه قسمت‌های ردلرزه، تشکیل یک فضای سه‌بعدی را می‌دهند، در این صورت شباهت به صورت رابطه (۳-۵۰) تعریف می‌شود که عبارت داخل پرانتز فاصله اقلیدسی میان بردارهای نرمال شده (قسمت‌های ردلرزه) می‌باشد.

^۱ Ashraf

^۲ Gaussian smoothing algorithm

$$sim = 1 - \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2 + \sum_{i=1}^N y_i^2}} \right) \quad (3-50)$$

اودو^۱ و همکاران (۲۰۱۴) از نشانگر شباهت برای برجسته سازی الگوی گسلی استفاده کردند که می توان نتیجه آن را در شکل (۳-۱۶) مشاهده کرد.



شکل ۳-۱۶: (a) مقطع لرزه ای اصلی، (b) مقطع نشانگر شباهت که فلش های آبی رنگ نواحی گسل خوردگی را نشان می دهند (Odoh et al, ۲۰۱۴).

۵-۳-۳ نشانگر تباین دامنه^۲

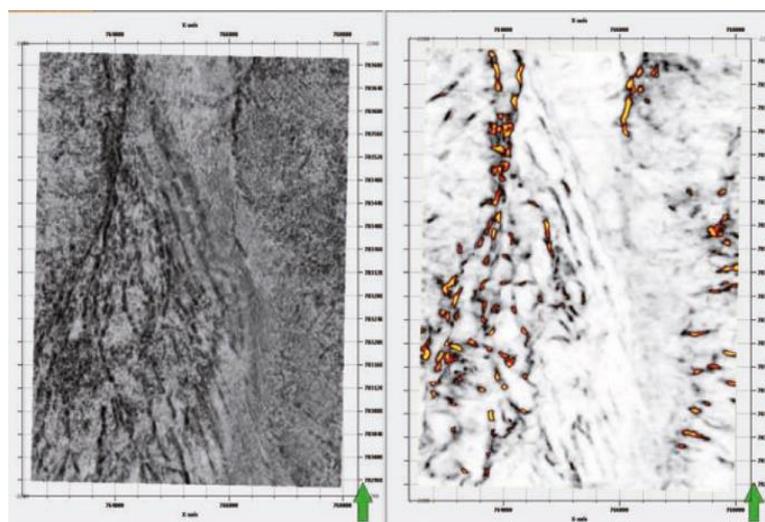
نشانگر تباین دامنه اختلاف بین دامنه ها در مرز ناپیوستگی را اندازه گیری می کند و به عبارتی تعبیری از ضریب بازتاب است. تباین دامنه روشی جدید برای شناسایی گسل در داده های لرزه ای می باشد. این روش در مقایسه با روش های کلاسیک مانند همدوسی و انحنا، پیشرفت های قابل توجهی در تشخیص گسل نشان داده است. چاهین^۳ و همکاران (۲۰۱۴) برای برجسته سازی نواحی گسل خورده در داده های لرزه ای از

^۱ Odoh

^۲ Amplitude Contrast attribute

^۳ Chahine

نشانگرهای تباین دامنه و واریانس استفاده کردند، که با مقایسه این دو نشانگر با یکدیگر به نتایجی دست یافتند که نشان می‌دهد نشانگر تباین دامنه در تشخیص ناپیوستگی‌های گسلی از وضوح بالاتری نسبت به نشانگر واریانس برخوردار است. در شکل (۱۷-۳) می‌توان مقایسه عملکرد این دو نشانگر را مشاهده کرد.



شکل ۳-۱۷: مقایسه عملکرد دو نشانگر واریانس (سمت راست) و تباین دامنه (سمت چپ) در شناسایی الگوی گسلی (Chahine et al, ۲۰۱۴).

۳-۳-۶ نشانگر آشفتگی^۱

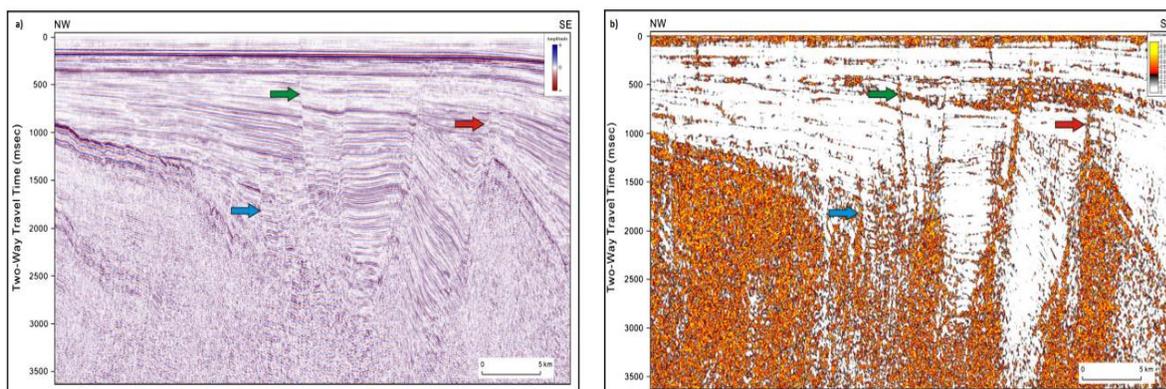
نشانگر آشفتگی به عنوان یک معیار فاقد سازماندهی در روش برآورد شیب و آزمون تعریف می‌شود، و به عبارت دیگر، نشانگر آشفتگی می‌تواند بافت‌های آشفته را در داده‌های لرزه‌ای شناسایی کند، و همچنین موقعیت‌های مختل شده را در بازتابنده‌ها به صورت مستقیم برجسته می‌سازد. با استفاده از نشانگر آشفتگی می‌توان رخساره‌های رسوبی را با سنگ‌شناسی متغیر (مثل شن و ماسه) تشخیص داد. حداکثر آشفتگی بیانگر ناپیوستگی‌های گسلی و نواحی دارای شکستگی می‌باشد (Koson et al, ۲۰۱۴). نشانگر آشفتگی یک الگوریتم سه‌بعدی است که ناپیوستگی را از تحلیل بردار گرادیان به دست می‌آورد. در روش آشفتگی ابتدا

^۱ Chaos attribute

بردار گرادیان $\nabla x(t_1, t_2, t_3)$ برآورد می‌شود، بدین صورت که مشتق $x(t_1, t_2, t_3)$ نسبت به هر یک از ابعاد (t_1, t_2, t_3) در داده‌های سه‌بعدی انجام می‌شود و شیب و آزیموت منطقه‌ای، موقعیت هر نمونه از داده‌های لرزه‌ای را به دست می‌آورد که به صورت رابطه (۳-۵۱) نشان داده می‌شود (Randen et al, ۲۰۰۱).

$$\nabla x(t_1, t_2, t_3) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x(t_1, t_2, t_3)}{\partial t_1} \\ \frac{\partial x(t_1, t_2, t_3)}{\partial t_2} \\ \frac{\partial x(t_1, t_2, t_3)}{\partial t_3} \end{bmatrix} \quad (3-51)$$

پیگوت و همکاران (۲۰۱۳) برای آشکارسازی الگوی گسلی از نشانگر آشفستگی استفاده کردند، که نتیجه عملکرد این نشانگر در شکل (۳-۱۸) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۳-۱۸: (a) مقطع لرزه‌ای اصلی، (b) نشانگر آشفستگی برای شکل a را نشان می‌دهد که فلش‌ها به مناطق گسل خورده اشاره دارند (Pigott et al, ۲۰۱۳).

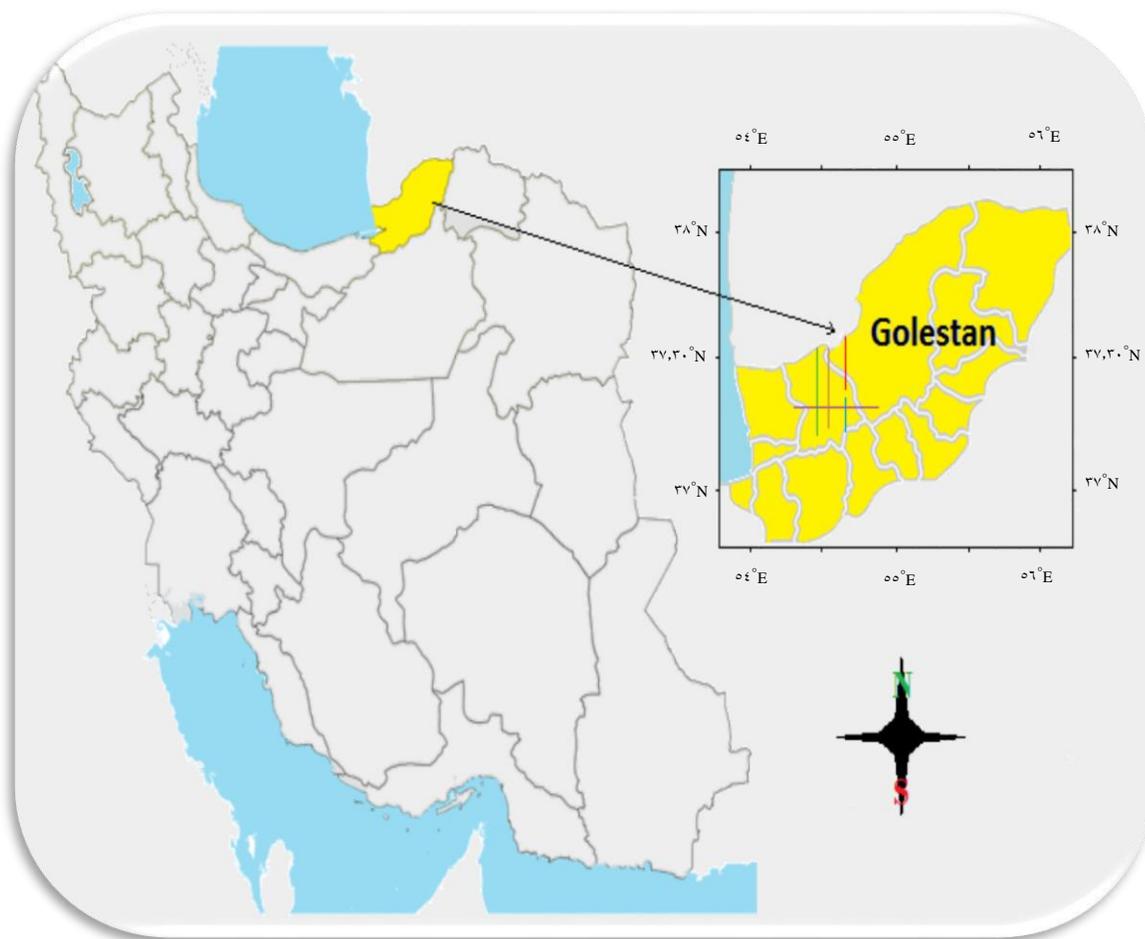
در نهایت ما در این پایان‌نامه از چهار نشانگر شباهت، واریانس، تباین‌دامنه و آشفستگی برای شناسایی هر چه بهتر الگوی گسلی استفاده کردیم که در فصل بعدی نتایج حاصل شده قابل مشاهده می‌باشد. اما نشانگرهای همدوسی و انحنا، متاسفانه در نسخه نرم‌افزاری که در اختیار داشتیم قابل استفاده نبودند.

فصل چهارم

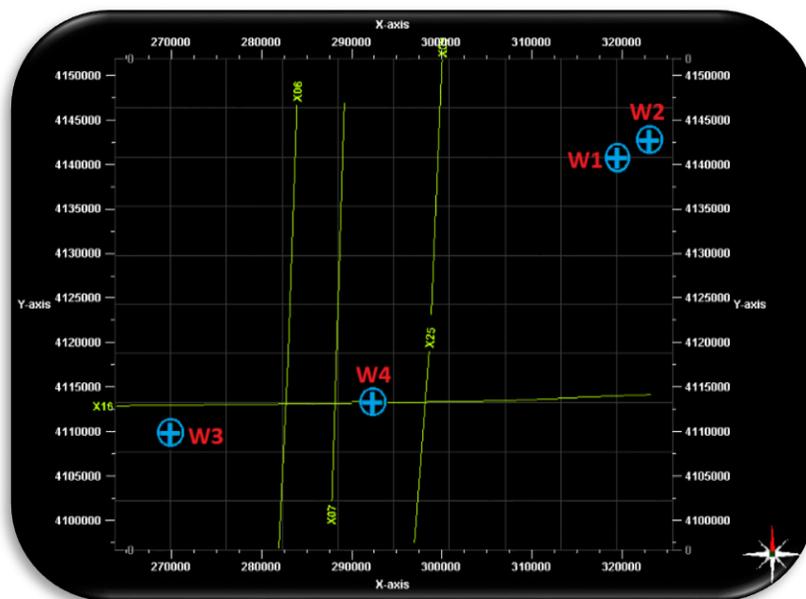
تفسیر داده‌های لرزه‌ای با استفاده از
نشانگرهای لرزه‌ای

۴-۱ مقدمه

این پژوهش یک مطالعه یکپارچه از داده‌های لرزه‌ای دوبعدی بدست آمده از دشت گرگان در حوضه خزر جنوبی و دامنه‌های البرز و کپه‌داغ در شمال شرقی ایران برای بررسی و به تصویر کشیدن الگوی گسلی می‌باشد. بررسی و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی حاصل شده از دشت گرگان درک درستی از زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه به ما می‌دهد. از آنجایی که تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی بخش مهمی از فعالیت‌های اکتشافی نفت و مواد معدنی به شمار می‌رود، در نتیجه تفسیر ویژگی‌های ساختمانی زمین مثل گسل‌ها، به این دلیل که می‌توانند به صورت نفت‌گیرهای ساختمانی یا اینکه کانون زلزله باشند، بسیار مهم هستند که باید شناسایی و بررسی شوند. برای آشکارسازی الگوی گسلی، بهتر است که از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی استفاده شود، زیرا انرژی لرزه‌ای پس از برخورد با صفحات گسل در تمام جهات پخش می‌شود، در نتیجه تفسیر بهتری از دامنه‌ها و انرژی ثبت شده بر روی گیرنده‌ها در زمینه آشکارسازی الگوی گسلی خواهیم داشت. اما در داده‌های لرزه‌ای دوبعدی بخشی از انرژی که بر روی داده‌ها وجود دارد، خارج از صفحه زیر پروفیل لرزه‌ای منشاء گرفته است. در این پژوهش از پنج خط لرزه‌ای دوبعدی (X۰۶، X۰۷، X۰۹، X۱۶، X۲۵) بدست آمده از دشت گرگان استفاده شده است، که می‌توان در شکل (۴-۱) و (۴-۲) موقعیت آن‌ها را مشاهده کرد. ما در این مطالعه برای تشخیص گسل خوردگی در داده‌های لرزه‌ای دوبعدی از نشانگرهای لرزه‌ای مختلف در نرم افزار Petrel و OpendTect استفاده می‌کنیم. نرم افزار Petrel، یک نرم افزار یکپارچه برای مطالعه چالش‌های زیرزمینی شامل تفسیر اطلاعات لرزه‌نگاری و شبیه‌سازی مخزن می‌باشد. نرم افزار OpendTect نیز یکی از کارآمدترین نرم‌افزارهای آماده‌سازی و تفسیر داده‌های لرزه‌ای می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان عارضه‌های زمین‌شناسی را شناسایی کرد.



شکل ۴-۱: نمای کلی از خطوط لرزه‌ای دوبعدی در منطقه مورد مطالعه.



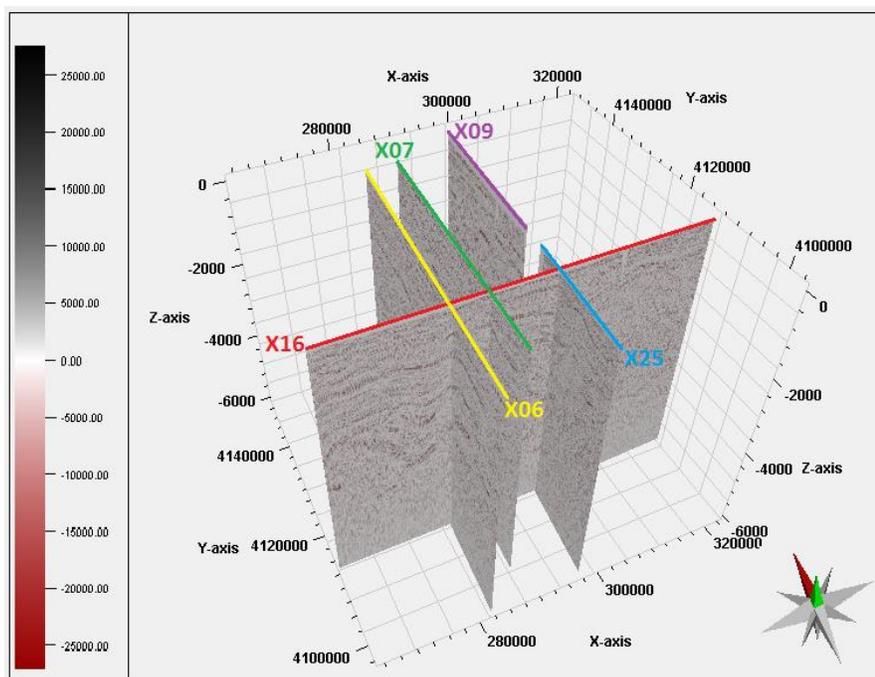
شکل ۴-۲: موقعیت خطوط لرزه‌ای دوبعدی و چاه‌های حفاری شده در پنجره سه‌بعدی.

۴-۲ تفسیر خطوط لرزه‌ای

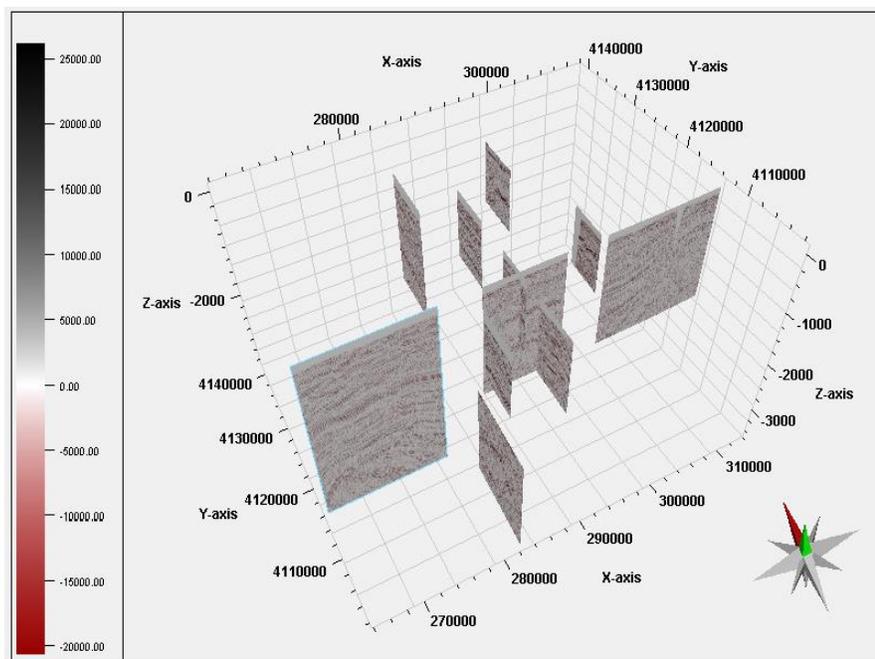
برای آشکارسازی الگوی گسلی بر روی داده‌های لرزه‌ای برداشت شده از منطقه دشت گرگان، ما از نشانگرهای لرزه‌ای واریانس، تباین‌دامنه، آشفتگی و شباهت استفاده کرده‌ایم. اما با بررسی‌های انجام شده به این نتیجه پی بردیم زمانی که نشانگر را بر روی کل خط لرزه‌ای اعمال می‌کنیم، الگوی گسلی با توجه به بزرگ بودن خط لرزه‌ای به وضوح مشخص نمی‌شود. بنابراین ما با بررسی خطوط لرزه‌ای، نواحی گسل خورده را به صورت زیر مقطع^۱ از هر خط لرزه‌ای استخراج کرده و سپس نشانگرهای ذکر شده را روی هر زیر مقطع اعمال کردیم که در ادامه نتایج حاصل شده را در بخش‌های مربوطه ارائه خواهیم کرد. در شکل (۴-۳) می‌توان زیر مقطع‌های دوبعدی استخراج شده (شکل ۴-۳-ب) از خطوط لرزه‌ای (شکل ۴-۳-الف) را در یک پنجره سه‌بعدی مشاهده کرد.

^۱ Subsection

(الف)



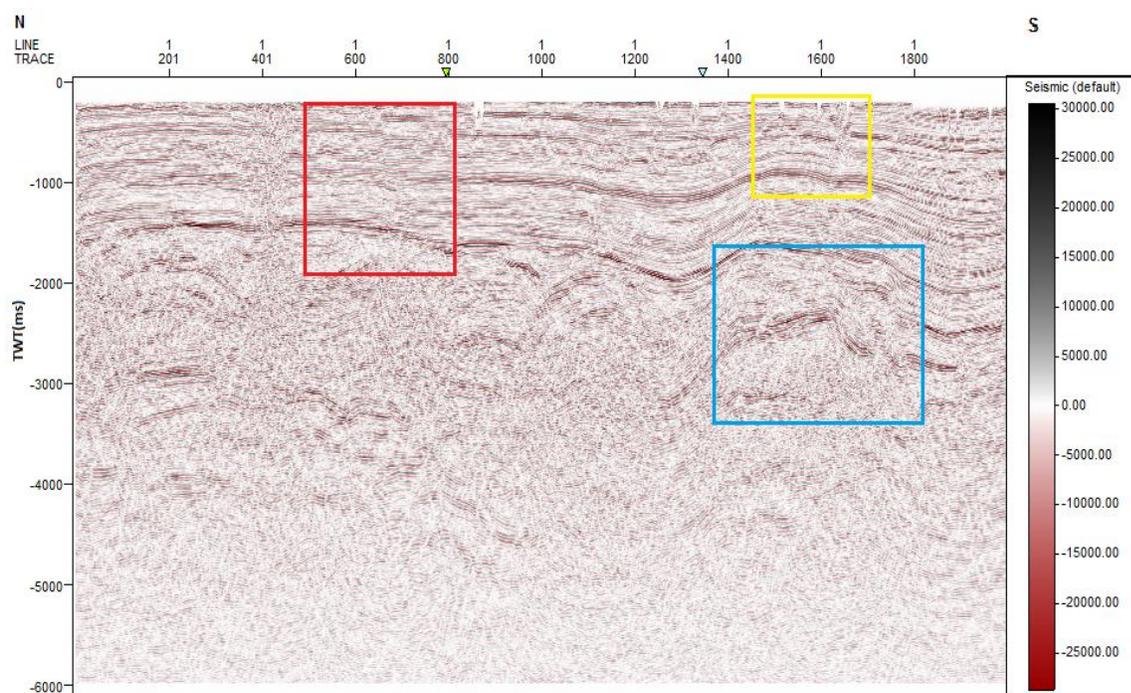
(ب)



شکل ۳-۴: (الف) نمای کلی از خطوط لرزه‌ای دوبعدی در پنجره سه‌بعدی، (ب) نمای کلی از زیر مقاطع استخراج شده.

۱-۲-۴ خط لرزه‌ای X۰۶

این خط لرزه‌ای با امتدادی شمالی- جنوبی (N-S) و طولی معادل ۵۰ کیلومتر در دشت گرگان تا مرز ترکمنستان امتداد دارد که در شکل (۴-۴) می‌توان مقطع لرزه‌ای اصلی X۰۶ را به همراه موقعیت زیر مقطع‌های استخراج شده روی آن را مشاهده کرد.

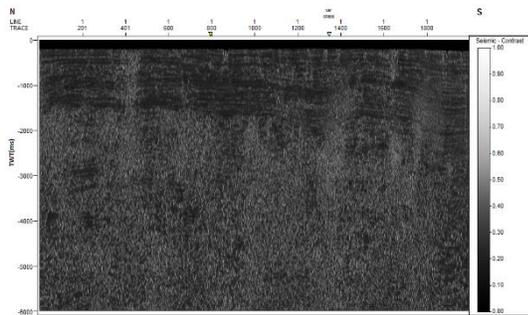


شکل ۴-۴: مقطع لرزه‌ای اصلی X۰۶ به همراه موقعیت زیر مقطع‌های استخراج شده روی آن.

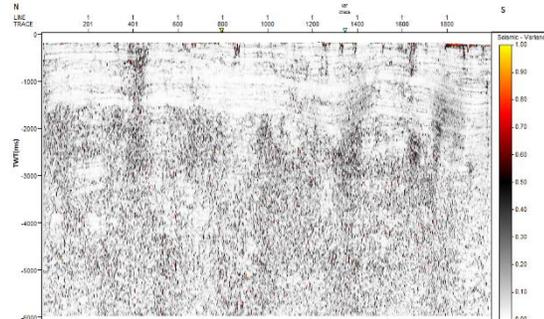
ما بر روی کل خط لرزه‌ای اصلی X۰۶ (شکل ۴-۴) هر چهار نشانگر مورد استفاده برای شناسایی الگوی گسلی در این پژوهش را اعمال می‌کنیم که در شکل (۴-۵) می‌توان نتایج حاصل از اعمال نشانگرهای واریانس، تباین‌دامنه، آشفتگی و شباهت را بر روی مقطع لرزه‌ای اصلی X۰۶ مشاهده کرد. شکل (۴-۵-الف) مقطع نشانگری واریانس را نشان می‌دهد، و با توجه به ماهیت نشانگر واریانس، انتظار می‌رود در جاهایی که صفحه گسل وجود دارد، واریانس مقادیر بالای دامنه را نشان دهد، اما به دلیل این‌که مقطع لرزه‌ای ما بزرگ می‌باشد، نواحی گسل خورده به وضوح مشخص نمی‌شود. شکل (۴-۵-ب) نتایج حاصل از

نشانگر تباین دامنه را نشان می‌دهد، و با توجه به این که در دو طرف گسل ممکن است به دلیل جابجایی بازتابنده‌ها از یکدیگر، مقادیر مثبت و منفی و یا مقادیر با دامنه بالا یا دامنه پایین، در کنار یکدیگر قرار بگیرند، در نتیجه انتظار می‌رود در مقطع نشانگری تباین دامنه نیز در نواحی که احتمال گسل خوردگی وجود دارد ما مقادیر بالای این نشانگر را داشته باشیم، اگرچه مقادیر بالای دامنه با رنگ سفید در مقطع مربوطه مشخص می‌باشد، اما باز هم به علت بزرگ بودن خط لرزه‌ای، الگوی گسلی به خوبی قابل رویت نمی‌باشد. شکل (۵-۴-ج) مقطع نشانگری آشفتگی را نشان می‌دهد. مطابق با پاسخی که نشانگر واریانس ارائه کرده، در مورد نشانگر آشفتگی انتظار می‌رود که در مرز صفحات گسل، مقادیر نسبتاً بالای نشانگر آشفتگی را داشته باشیم، که در واقع روی مقطع نشانگری حاصل شده، تنها در بعضی از جاها به صورت واضح دیده می‌شود، اما در زیر مقاطع نشانگری که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود، این قسمت‌ها برجسته‌تر شده‌اند. شکل (۵-۴-د) مقطع نشانگری شباهت را نشان می‌دهد، و با توجه به توضیحاتی که در رابطه با تئوری نشانگر شباهت در فصل سوم به آن اشاره شده است، انتظار داریم در صفحه گسل که ناپیوستگی وجود دارد، نشانگر شباهت مقادیر کمی را نشان دهد، مقادیر کم بیانگر ناپیوستگی در ردلرزه‌های مجاور می‌باشد، با توجه به این که خطوط لرزه‌ای دشت گرگان دارای ناپیوستگی بسیار زیادی می‌باشد و لزوماً هم به خاطر گسل خوردگی نیست و می‌تواند به دلیل مشکلات داده برداری باشد، مقادیر کم نشانگر شباهت به وفور دیده می‌شود. رژیم کششی و فشارشی که در منطقه دشت گرگان حاکم می‌باشد، سبب ایجاد گسل‌های نرمال در این منطقه شده است، که در ادامه ما با ارزیابی زیر مقاطع استخراج شده به صورت مجزا هر کدام از این گسل‌ها را بررسی و تفسیر خواهیم کرد.

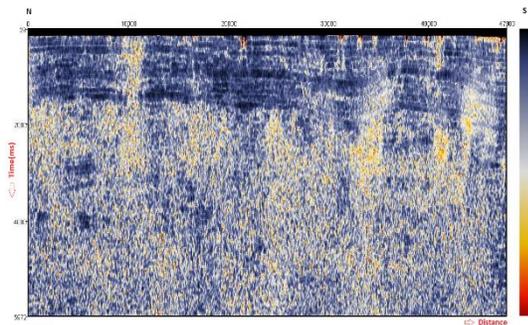
(ب)



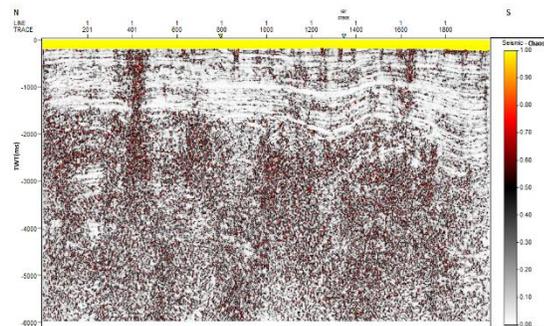
(الف)



(د)



(ج)

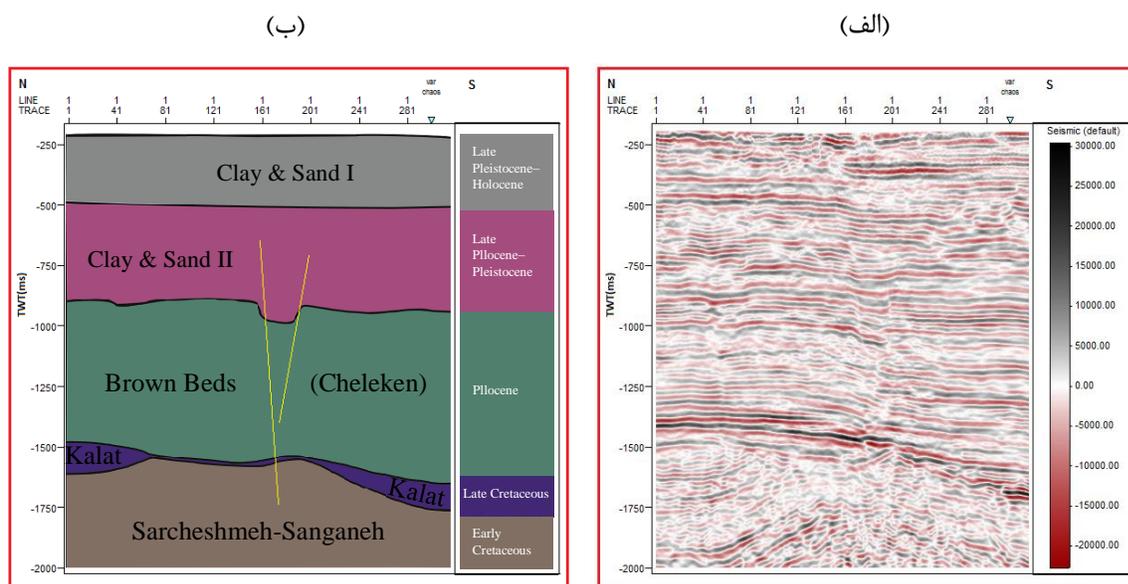


شکل ۴-۵: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۱-۱-۲-۴ زیر مقطع AX۰۶

موقعیت این زیر مقطع با کادر قرمز رنگ در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. شکل (۴-۶-الف) حالت تفسیر نشده این زیر مقطع به صورت خام را نشان می‌دهد و شکل (۴-۶-ب) حالت تفسیر شده این زیر مقطع را نشان می‌دهد که الگوی گسلی بر روی آن پیک شده است. ما با تفسیر ناحیه گسل خورده و استفاده از اطلاعات چاه‌های حفاری شده و همچنین اطلاعات مربوط به چین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه توانستیم سازنده‌ها و طبقاتی را که تحت تاثیر گسل خوردگی قرار گرفته‌اند را مشخص کنیم. همان‌گونه که

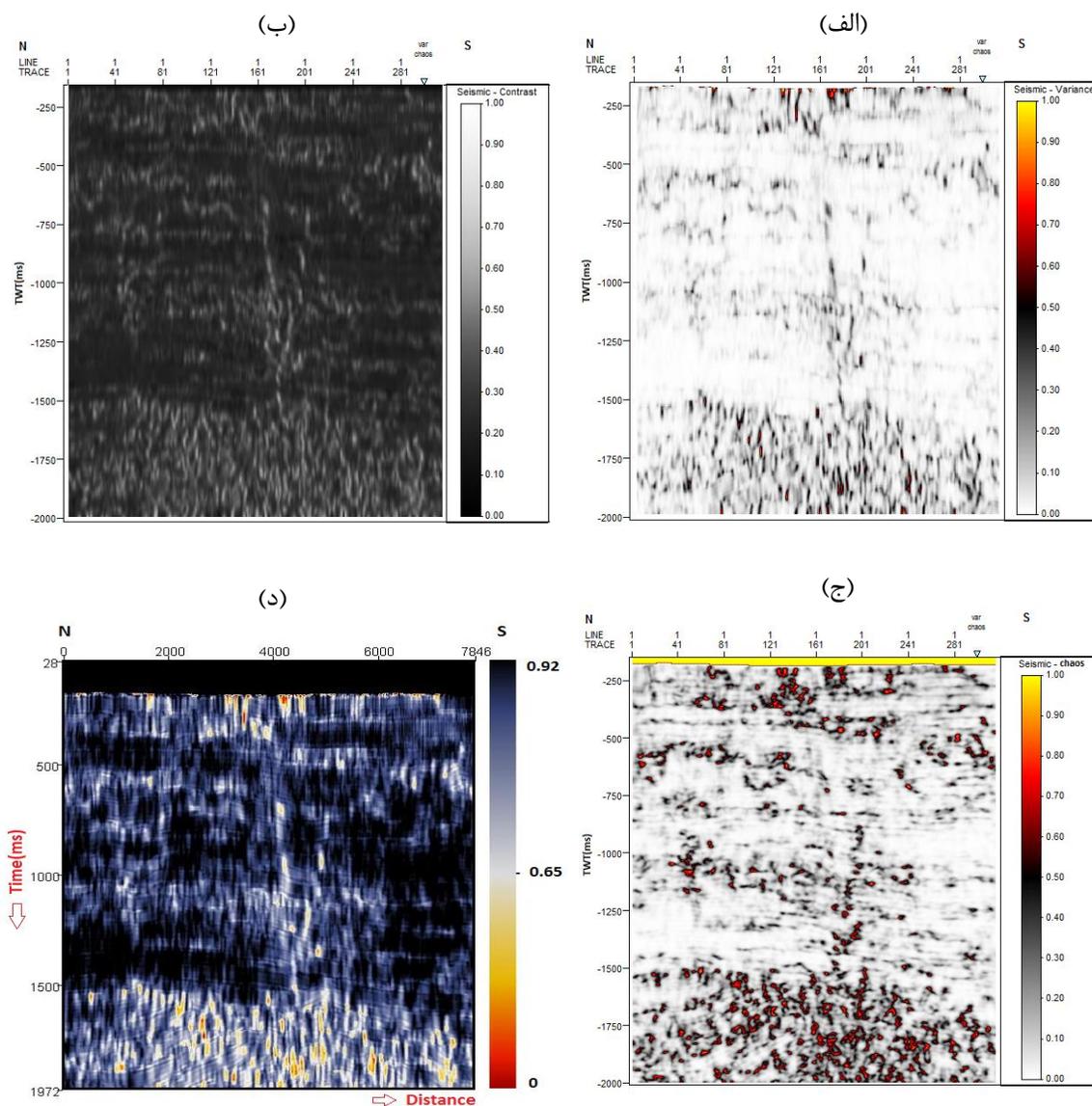
در شکل (۶-۴-ب) مشاهده می‌کنید، افق‌ها و سازندهای سرچشمه-سنگانه، کلات، سازند چلکن (طبقات قهوه‌ای)، افق رس و ماسه II (آپشرون و آگچاگیل) و افق رس و ماسه I تحت تاثیر گسل خوردگی نرمال قرار گرفته‌اند. ما در ادامه از نشانگرهای لرزه‌ای مناسب که در شناسایی هر چه بهتر عارضه گسلی در این زیرمقطع مفید بوده‌اند، استفاده کرده‌ایم.



شکل ۶-۴: (الف) زیر مقطع خام AX۰۶، (ب) تفسیر زیرمقطع AX۰۶.

شکل (۷-۴) نتایج حاصل از اعمال نشانگرهای لرزه‌ای واریانس، تباین‌دامنه، آشفتگی و شباهت بر روی زیر مقطع AX۰۶ (شکل ۶-۴-الف) استخراج شده از مقطع لرزه‌ای X۰۶ را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌کنید در مقایسه با مقاطع نشانگری که بر روی کل خط لرزه‌ای X۰۶ اعمال شده بود، بر روی زیر مقطع‌ها الگوی گسلی بسیار واضح‌تر هستند. این موضوع بخصوص بر روی مقاطع نشانگری واریانس (شکل ۷-۴-الف) و تباین‌دامنه (شکل ۷-۴-ب) به خوبی مشخص شده است، اگرچه نشانگر شباهت (شکل ۷-۴-د)

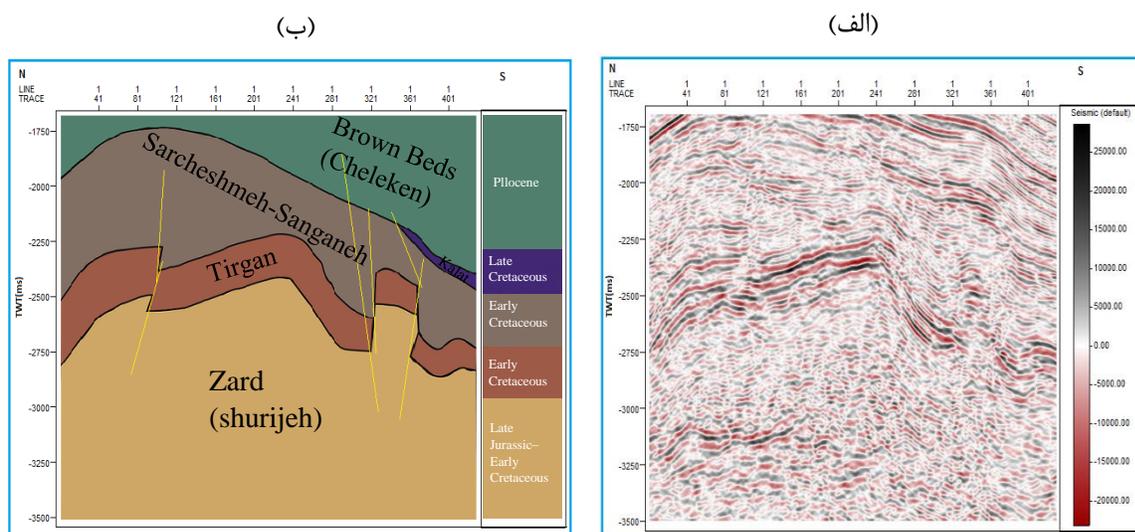
نیز نتیجه قابل قبولی را ارائه کرده است، اما در نشانگر آشفتگی (شکل ۴-۷-ج) اثراتی از الگوی گسلی دیده می‌شود که به خوبی نتایج نشانگرهای دیگر نمی‌باشد.



شکل ۴-۷: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۲-۱-۲-۴ زیر مقطع BX۰۶

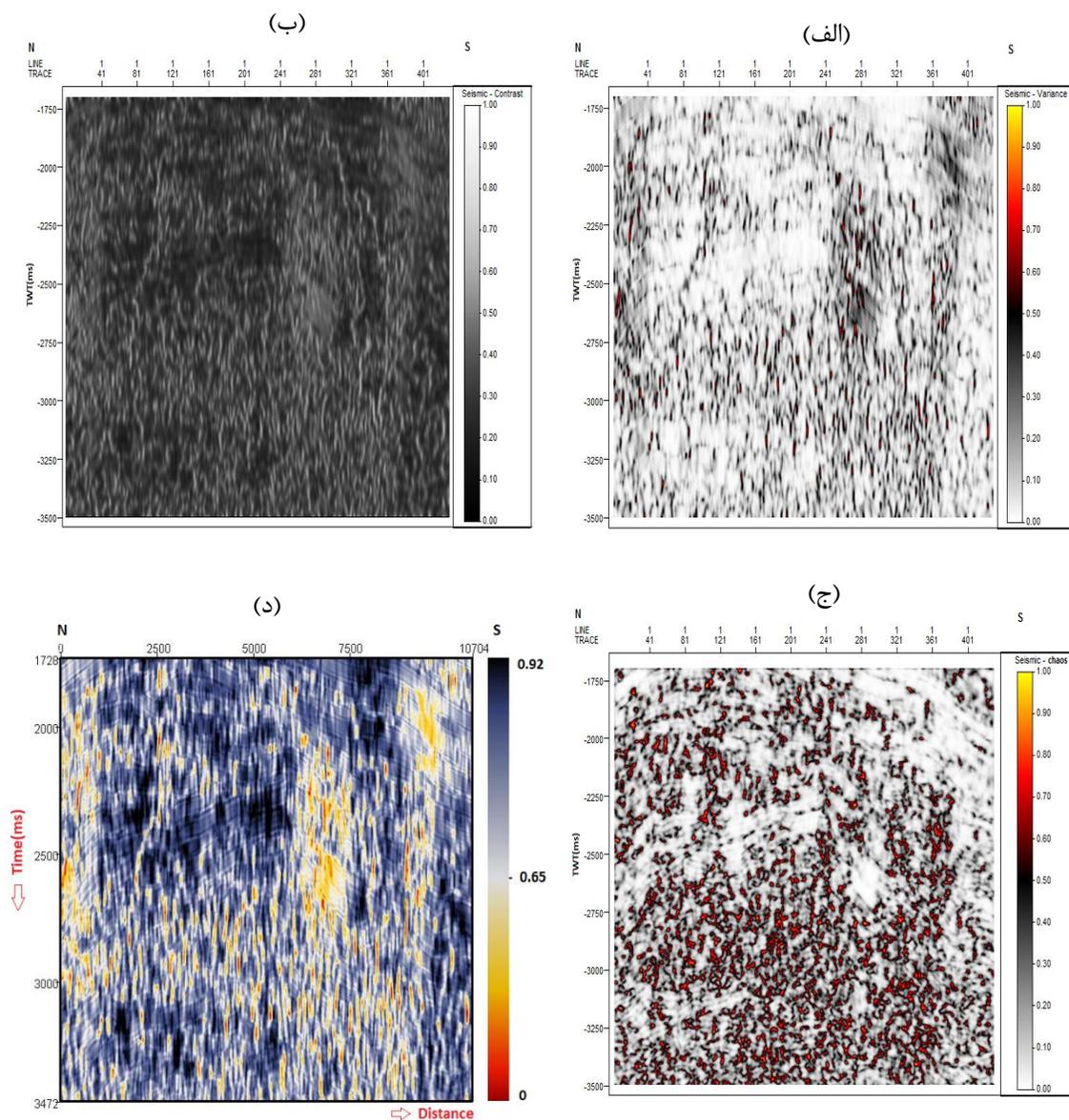
موقعیت این زیر مقطع با کادر آبی رنگ در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. شکل (۴-۸-الف) حالت تفسیر نشده این زیر مقطع به صورت خام را نشان می‌دهد، و شکل (۴-۸-ب) حالت تفسیر شده این زیر مقطع می‌باشد که خطواره‌های گسلی به رنگ زرد روی آن مشخص شده است. با ارزیابی و تفسیراتی که روی این زیرمقطع انجام دادیم، توانستیم سازندهای زرد (شوریجه)، تیرگان، سرچشمه-سنگانه و چلکن (طبقات قهوه ای) را که تحت تاثیر گسل خورگی نرمال قرار گرفته اند، مشخص کنیم.



شکل ۴-۸: (الف) زیر مقطع خام BX۰۶، (ب) تفسیر زیرمقطع BX۰۶.

شکل (۴-۹) نتایج به دست آمده توسط نشانگرهای لرزه‌ای واریانس، تباین‌دامنه، آشفتگی و شباهت را بر روی زیر مقطع BX۰۶ (شکل ۴-۸-الف) نشان می‌دهد، که هر کدام را به صورت مجزا به نمایش گذاشته‌ایم. با توجه به زیر مقطع خام استخراج شده BX۰۶، می‌بینید که ناپیوستگی‌های گسلی در لایه‌های زیر سطحی موجود در شکل (۴-۸) به خوبی قابل رویت هستند. اما پس از این که نشانگرهای لرزه‌ای مربوطه را بر روی زیر مقطع اعمال می‌کنیم، نتایج دلخواه و مورد نظر ما برای آشکار سازی نواحی گسل خورده برآورد نمی‌شود.

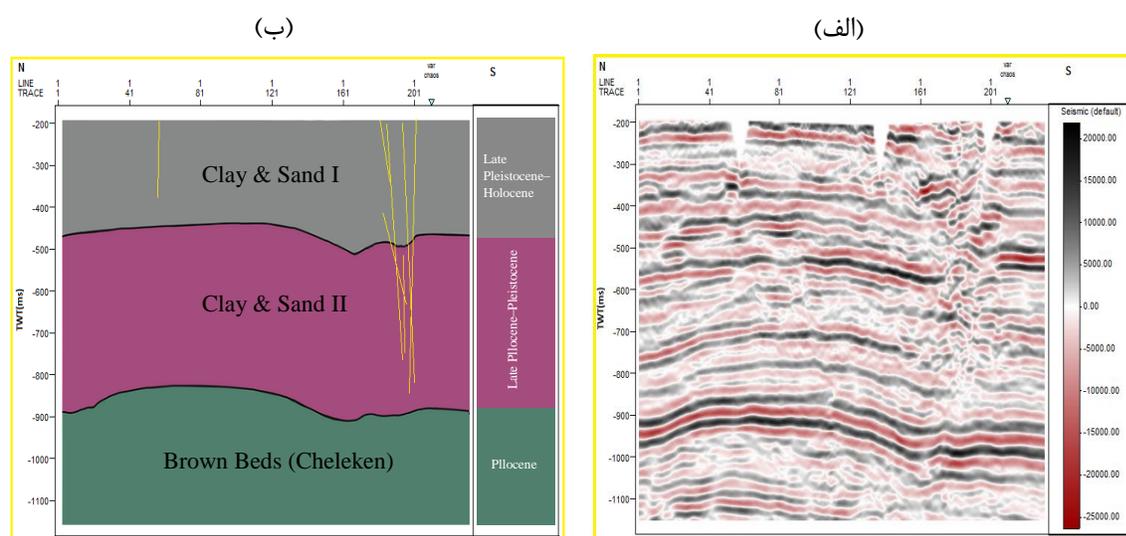
و این می‌تواند به دلیل وجود نوفه یا درهم گسیختگی لایه‌های زیر سطحی باشد که با مشاهده نتیجه حاصل شده توسط نشانگر آشفتگی (شکل ۴-۹-ج)، این قضیه بیشتر اثبات می‌شود و اگر توجه کنید می‌بینید که تقریباً در تمام نواحی مقطع نشانگری آشفتگی، بی‌نظمی بسیار زیاد می‌باشد. اما در نشانگرهای واریانس، تباین دامنه و شباهت (شکل ۴-۹) تا حدودی می‌توان مکان‌های گسل خورده را مشاهده کرد.



شکل ۴-۹: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۳-۱-۲-۴ زیر مقطع CX۰۶

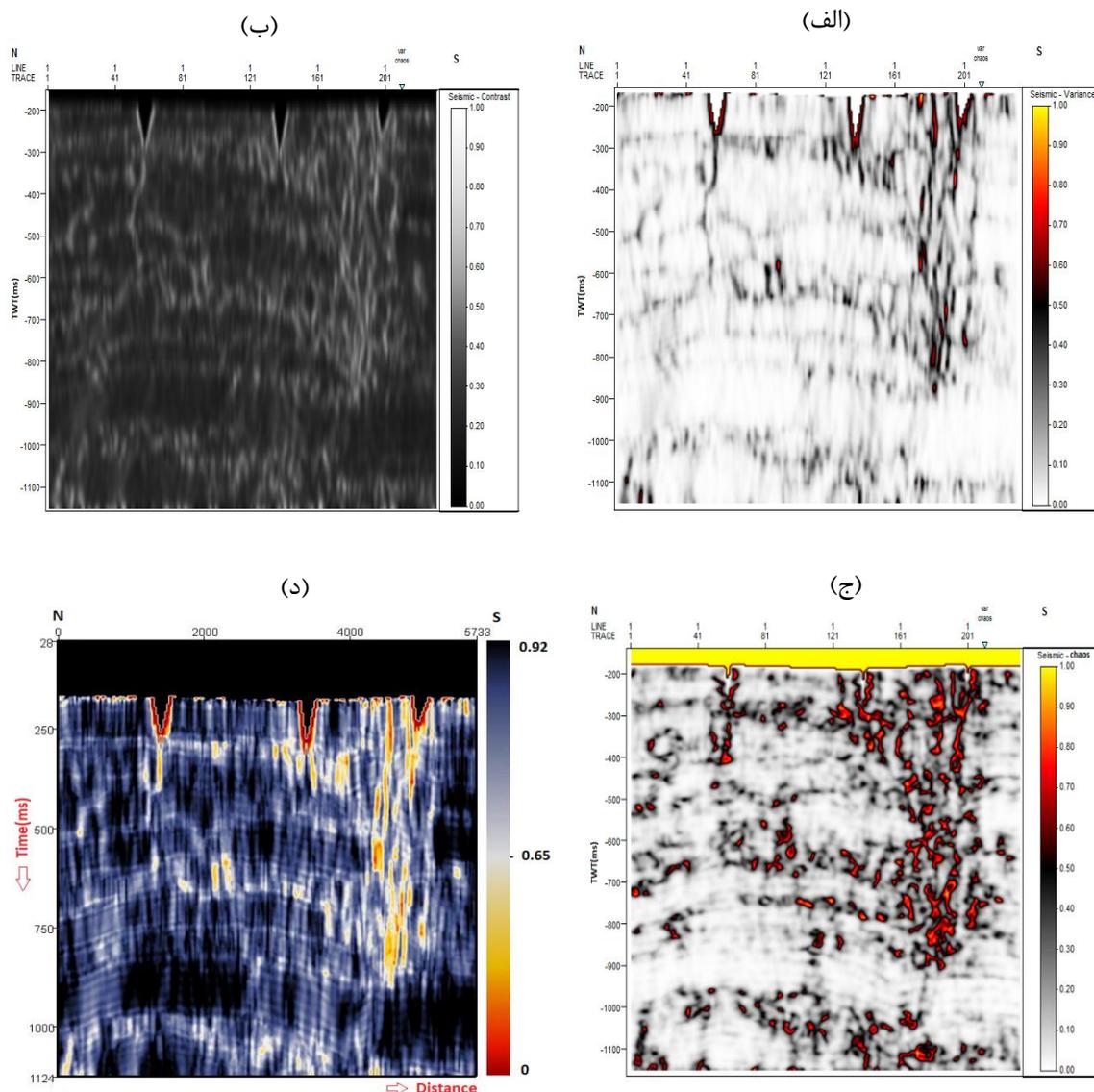
موقعیت این زیر مقطع با کادر زرد رنگ در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. شکل (۴-۱۰-الف) حالت تفسیر نشده زیر مقطع CX۰۶ به صورت خام می‌باشد و شکل (۴-۱۰-ب) حالت تفسیر شده این زیر مقطع می‌باشد که گسل خوردگی نرمال را بر روی افق رس و ماسه I و افق رس و ماسه II (آپشرون و آگچاگیل) نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۰: (الف) زیر مقطع خام CX۰۶، (ب) تفسیر زیرمقطع CX۰۶.

شکل (۴-۱۱) نتایج به دست آمده توسط اعمال نشانگرهای لرزه‌ای واریانس، تباین دامنه، آشفتگی و شباهت بر روی زیر مقطع CX۰۶ (شکل ۴-۱۰-الف) می‌باشد. با بررسی‌های انجام شده بر روی مقاطع نشانگری حاصل از نشانگرهای لرزه‌ای واریانس (شکل ۴-۱۱-الف) و تباین دامنه (شکل ۴-۱۱-ب)، مشاهده می‌شود که نتایج قابل قبولی را ارائه کرده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود در محدوده‌های سمت راست و بالای مقاطع نشانگری تولید شده، یکسری گسل و شکستگی‌های ریز نمایان شده‌اند. همچنین در مقابل با بررسی نتیجه نشانگر آشفتگی (شکل ۴-۱۱-ج)، مشاهده می‌شود که نواحی گسل خورده را طبق ماهیتی که دارد

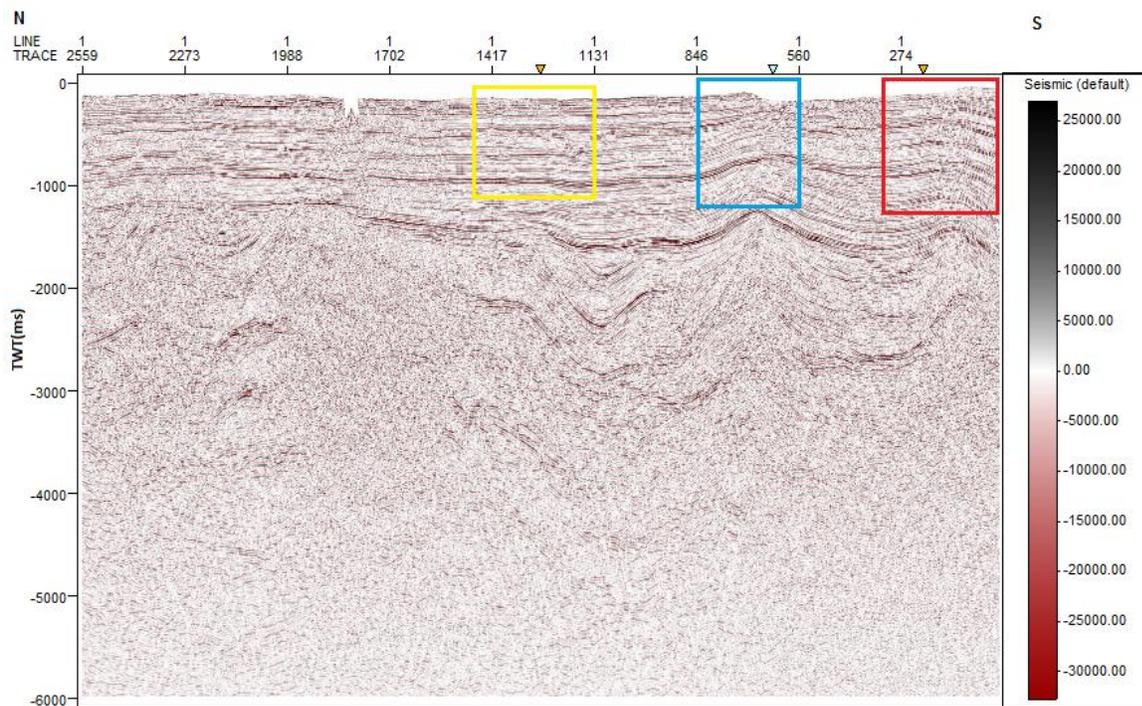
به صورت آشفته نمایان کرده و همانطور که انتظار می‌رود ناپیوستگی‌های گسلی را با مقادیر بالای دامنه نشان می‌دهد. در آخر با آنالیز مقطع نشانگری حاصل از نشانگر شباهت (شکل ۴-۱۱-د)، می‌بینیم که نواحی گسل خورده و دارای شکستگی را با مقادیر پایین دامنه نشان می‌دهد که نسبتاً جواب قابل قبولی را در زمینه شناسایی گسل برای ما ارائه کرده است.



شکل ۴-۱۱: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۲-۲-۴ خط لرزه‌ای X۰۷

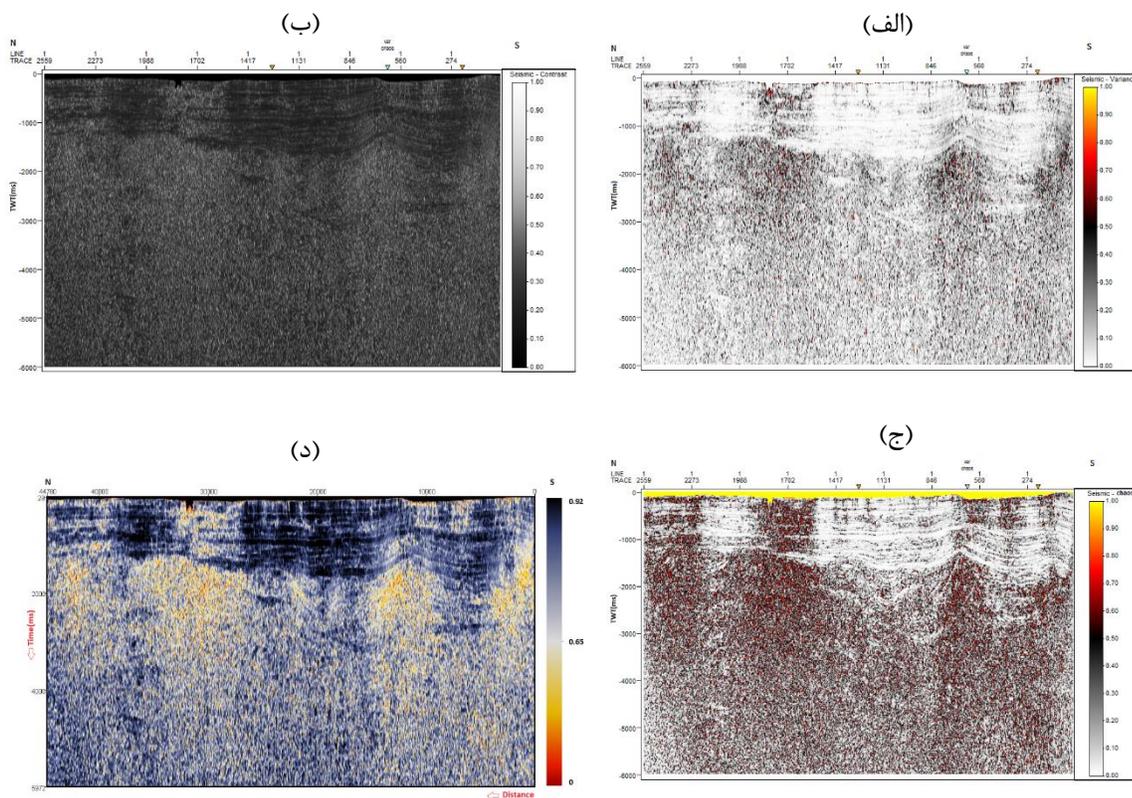
این خط لرزه‌ای با روند شمالی- جنوبی (N-S) و طولی معادل ۴۶ کیلومتر به موازات خط لرزه‌ای X۰۶ در دشت گرگان قرار دارد که در شکل (۴-۱۲) می‌توان مقطع لرزه‌ای X۰۷ را به همراه موقعیت زیر مقطع‌های استخراج شده روی آن را مشاهده کرد.



شکل ۴-۱۲: مقطع لرزه‌ای اصلی X۰۷ به همراه موقعیت زیر مقطع‌های استخراج شده روی آن.

ما در ابتدا همانند کاری که برای خط لرزه‌ای X۰۶ انجام دادیم، هر چهار نشانگر واریانس، تباین دامنه، آشفتگی و شباهت را بر روی کل مقطع لرزه‌ای X۰۷ اعمال می‌کنیم، که می‌توان نتایج حاصل شده توسط هر نشانگر را در شکل (۴-۱۳) مشاهده کرد. با بررسی نتایج بدست آمده می‌بینیم که در هر چهار مقطع نشانگری بدست آمده، در نواحی پایین‌تر از ۲۰۰۰ میلی‌ثانیه، پیوستگی لایه‌ها دیده نمی‌شود و بازتابنده‌ها به صورت درهم گسیخته و آشفته هستند و هیچ‌گونه عارضه‌ای قابل رویت نمی‌باشد، اما در نواحی بالای

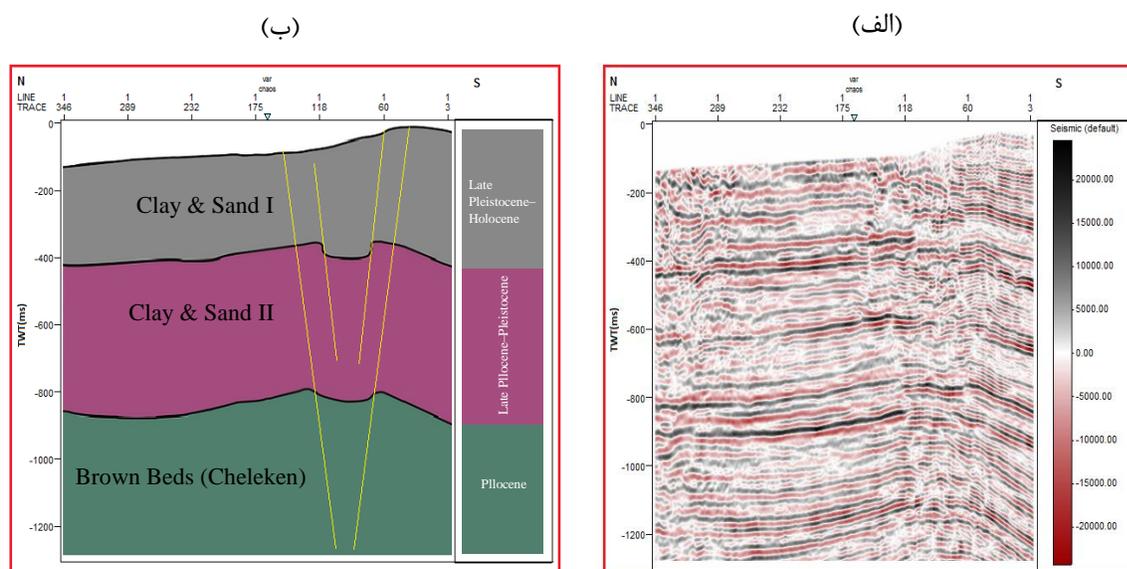
۲۰۰۰ میلی ثانیه، همانطور که ملاحظه می‌کنید در هر چهار نشانگر به ویژه نشانگر آشفستگی (شکل ۴-۱۳-ج) و نشانگر واریانس (شکل ۴-۱۳-الف)، مرز لایه‌ها به همراه خطواره‌ها مشخص بوده که توانستیم مناطق دارای ناپیوستگی‌های گسلی را تا حدودی شناسایی کنیم. با این وجود به دلیل بزرگ بودن خط لرزه‌ای برداشت شده از منطقه و عدم وضوح بالا در نواحی گسل خورده، ما این نواحی را به صورت زیر مقطع از خط لرزه‌ای اصلی استخراج کرده و به صورت دقیق‌تری مورد بررسی قرار داده‌ایم.



شکل ۴-۱۳: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین‌دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفستگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۱-۲-۲-۴ زیر مقطع AX۰۷

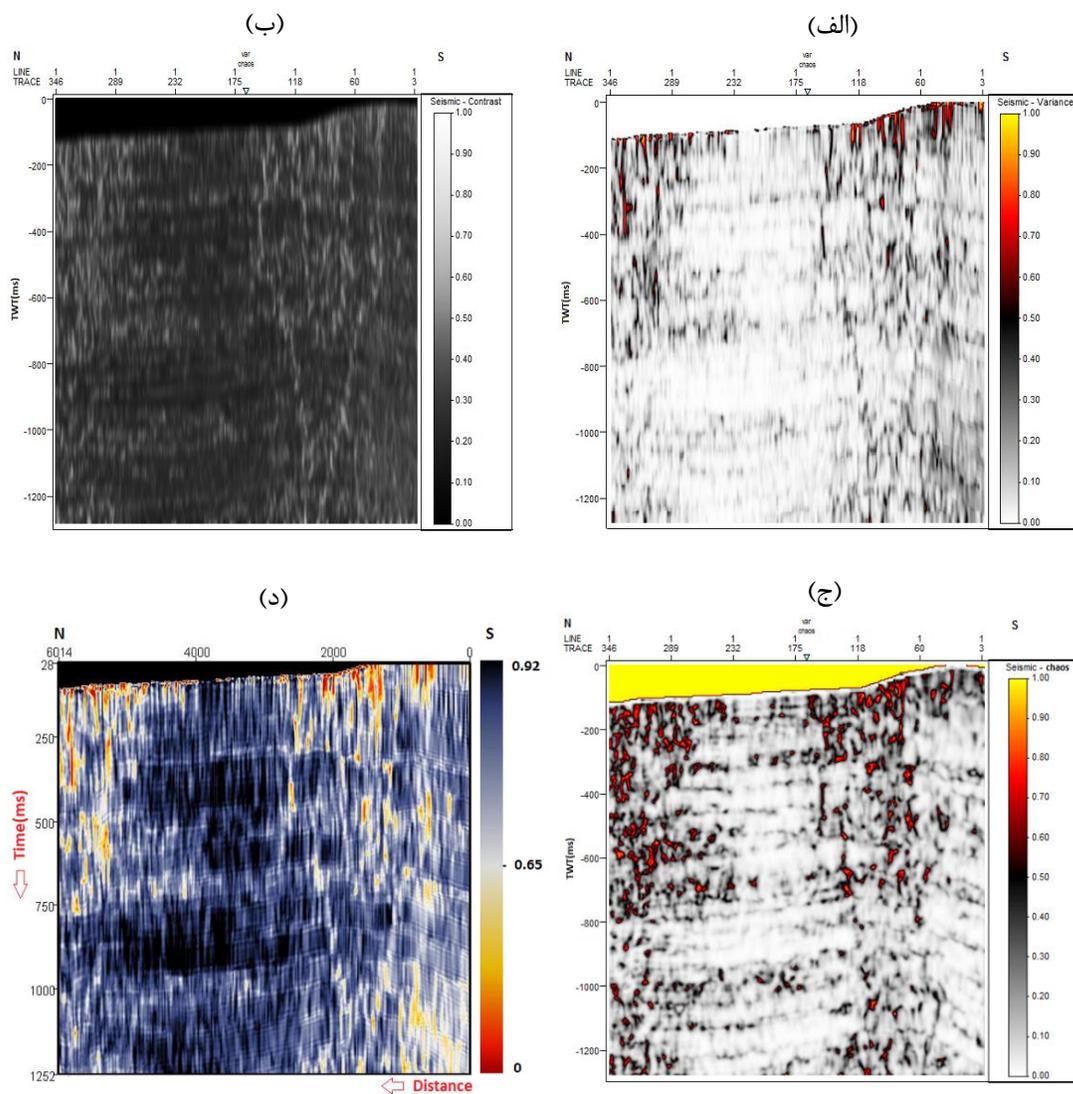
موقعیت این زیر مقطع با کادر قرمز رنگ در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است که در شکل (۴-۱۴-الف) می‌توانیم حالت تفسیر نشده و اصلی این زیر مقطع (AX۰۷) را مشاهده کنیم، اما در شکل (۴-۱۴-ب) حالت تفسیر شده این زیر مقطع را نشان می‌دهد که موقعیت گسل خوردگی نرمال را روی سازند چلکن (طبقات قهوه‌ای)، افق رس و ماسه II (آپشرون و آگچاگیل) و افق رس و ماسه I مشخص کرده‌ایم.



شکل ۴-۱۴: (الف) زیر مقطع خام AX۰۷، (ب) تفسیر زیر مقطع AX۰۷.

همانطور که قبلاً هم اشاره شد، ما زیر مقطع‌ها را به هدف شناسایی و برجسته‌سازی واضح‌تر گسل‌ها استخراج کرده‌ایم. در نتیجه با اعمال نشانگرهای مختلف بر روی آن‌ها به بررسی هر چه دقیق‌تر الگوی گسلی می‌پردازیم، که می‌توان نتایج بدست آمده از اعمال نشانگرهای لرزه‌ای واریانس، تباین دامنه، آشفتگی و شباهت را بر روی زیر مقطع AX۰۷ در شکل (۴-۱۵) مشاهده کرد. با آنالیز مقاطع نشانگری تولید شده توسط چهار نشانگر نامبرده، ما به نتایج قابل قبولی در آشکار سازی الگوی گسلی دست پیدا کردیم. همانطور

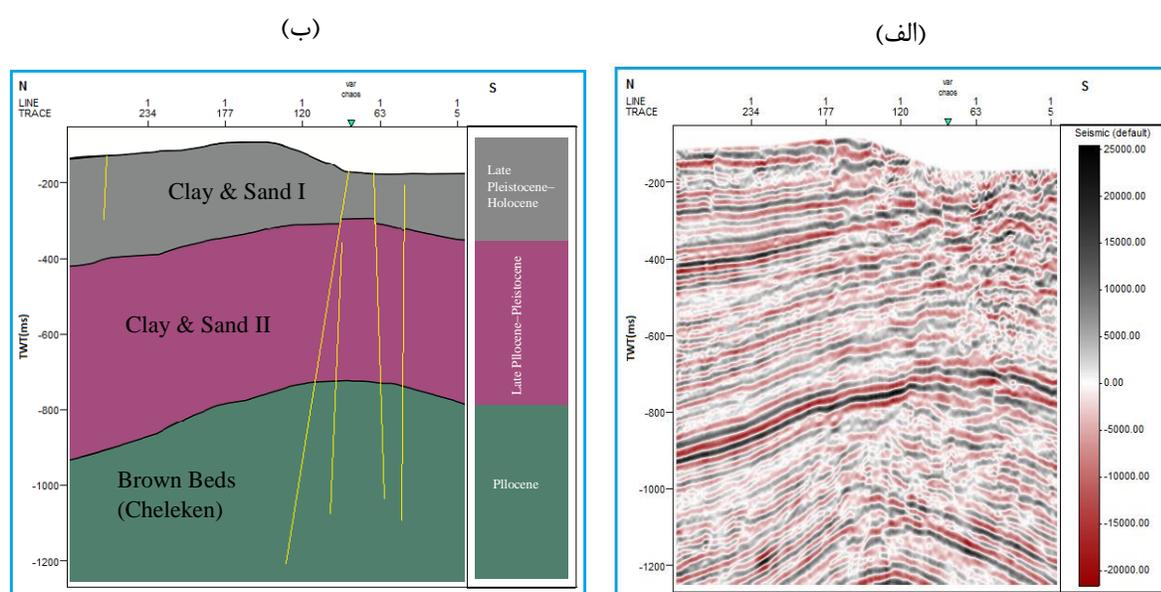
که مشخص است، خطوط گسل در مقاطع نشانگری تولید شده توسط سه نشانگر واریانس (شکل ۴-۱۵-الف)، شباهت (شکل ۴-۱۵-ب) و تباین دامنه (شکل ۴-۱۵-ج)، به وضوح دیده می‌شود. به طور مثال با تجزیه و تحلیل نشانگر تباین دامنه می‌بینیم که ناپیوستگی‌های گسلی را با دامنه بالا و به رنگ سفید روشن در زمینه مشکی به خوبی نمایش می‌دهد. اما نشانگر آشفتگی (شکل ۴-۱۵-د) تا حدودی نتایج مورد انتظار را برای شناسایی خطوط گسل برآورد کرده است.



شکل ۴-۱۵: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۲-۲-۴ زیر مقطع BX۰۷

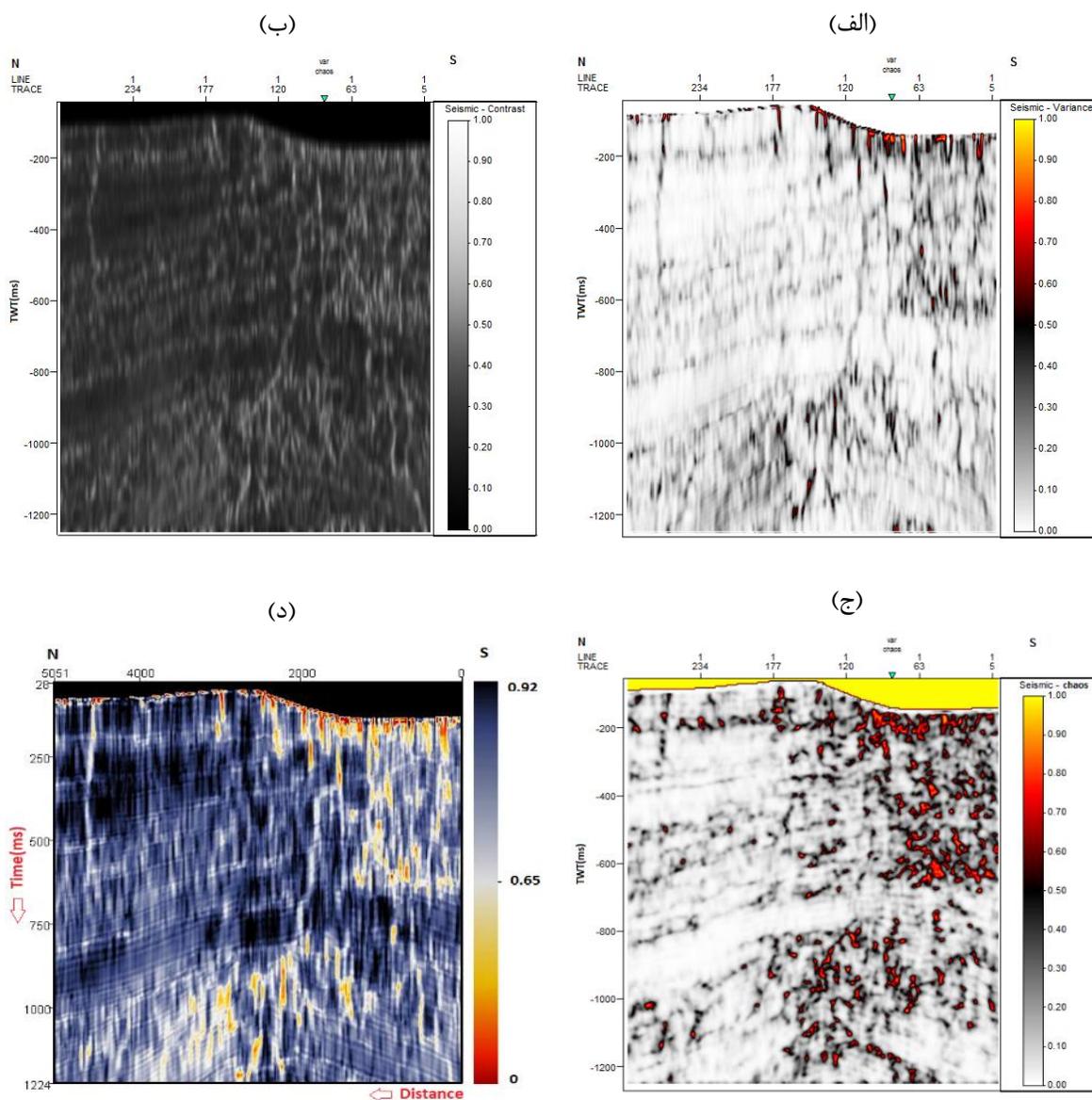
موقعیت این زیر مقطع با کادر آبی رنگ در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است. شکل (۴-۱۶-الف) حالت تفسیر نشده و خام زیر مقطع BX۰۷ را نشان می‌دهد و شکل (۴-۱۶-ب) حالت تفسیر شده این زیر مقطع می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌کنید در این زیرمقطع، سازند چلکن (طبقات قهوه‌ای)، افق رس و ماسه II (آپشرون و آگچاگیل) و افق رس و ماسه I، دچار گسل خوردگی نرمال شده‌اند.



شکل ۴-۱۶: (الف) زیر مقطع خام BX۰۷، (ب) تفسیر زیر مقطع BX۰۷.

با اعمال نشانگرهای لرزه‌ای واریانس، شباهت، تباین‌دامنه و آشفتگی بر روی زیر مقطع خام BX۰۷، مجموعه‌ای از گسل‌های پنهان پدیدار شده‌اند که در شکل (۴-۱۷) نمایش داده‌ایم. در ادامه به مقایسه و آنالیز نتایج بدست آمده توسط هر نشانگر پرداخته می‌شود. با مشاهده نتایج بدست آمده می‌تواند دید که هر سه نشانگر واریانس (شکل ۴-۱۷-الف)، تباین‌دامنه (شکل ۴-۱۷-ب) و شباهت (شکل ۴-۱۷-ج) به خوبی در آشکار سازی الگوی گسلی در این زیر مقطع موفق بوده‌اند و نتایج مناسب را برآورد کرده‌اند. اما نشانگر آشفتگی (شکل ۴-۱۷-ج) تا حدودی مناطق گسل خورده را به صورت دامنه بالا و آشفتگی در

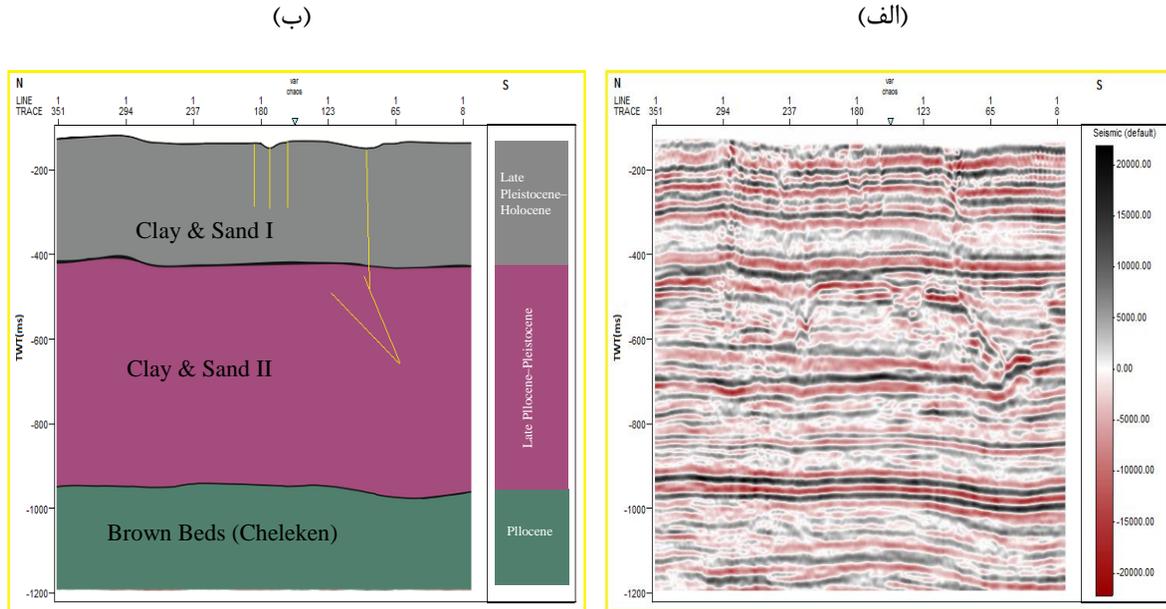
بازتابنده‌ها نشان می‌دهد. همچنین در اینجا نشانگر شباهت نسبت به نشانگرهای دیگر، خطوط گسل را با وضوح و کیفیت بالاتری به نمایش درآورده است. با این حال نشانگر هندسی واریانس از قدرت تفکیک بالاتری برخوردار است، به طوری که حتی ریز گسل‌ها و شکستگی‌های ریز را در نواحی مختلف زیر مقطع به خوبی نشان می‌دهد. این در حالیست که نشانگر تباین‌دامنه نیز گسل را به خوبی برای ما برجسته کرده است.



شکل ۴-۱۷: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین‌دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۳-۲-۴ زیر مقطع CX۰۷

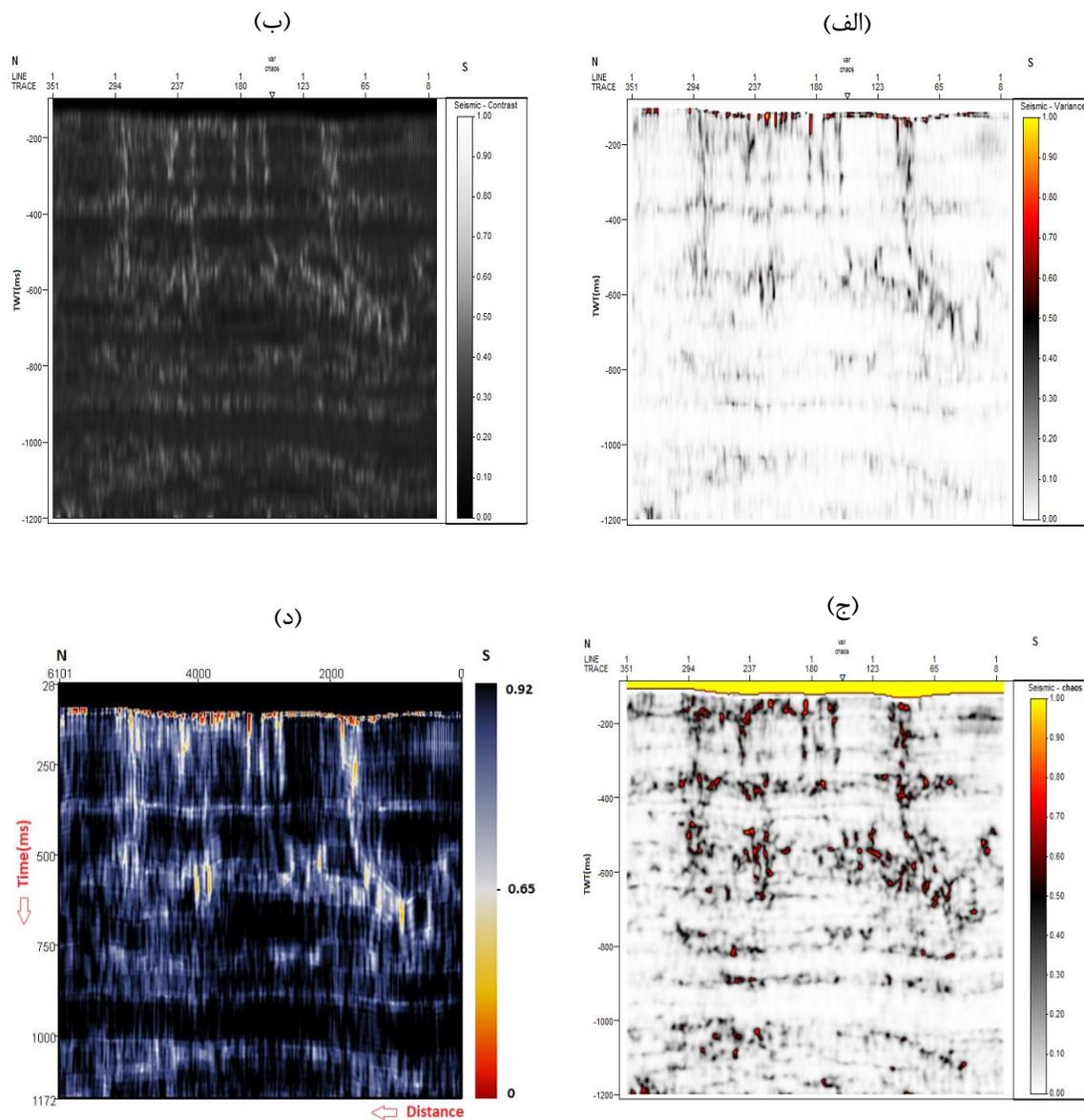
موقعیت این زیر مقطع با کادر زرد رنگ در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است. شکل (۴-۱۸) الف) حالت تفسیر نشده و خام زیر مقطع CX۰۷ را نشان می‌دهد. شکل (۴-۱۸) ب) حالت تفسیر شده این زیر مقطع را نشان می‌دهد. ما با آنالیز این زیرمقطع و با توجه به جابجایی که در بازتابنده‌ها دیده می‌شود، توانستیم گسل خوردگی‌های نرمالی را که در افق رس و ماسه II (آپشرون و آگچاگیل) و افق رس و ماسه I، رخ داده است را شناسایی و ترسیم کنیم.



شکل ۴-۱۸: الف) زیر مقطع خام CX۰۷، ب) تفسیر زیر مقطع CX۰۷.

ما با تفسیر و بررسی که روی مقاطع نشانگری حاصل شده از نشانگرهای واریانس، تباین دامنه، آشفتگی و شباهت در شکل (۴-۱۹) انجام دادیم، دریافتیم که هر چهار نشانگر نامبرده در نمایان کردن الگوی گسلی در این زیر مقطع به درستی و طبق انتظارات ما عمل کرده‌اند. همانطور که پیداست، تمامی ناپیوستگی‌های گسلی در مقاطع نشانگری تولید شده توسط هر چهار نشانگر به خوبی نمایان شده‌اند که تقریباً از سطح

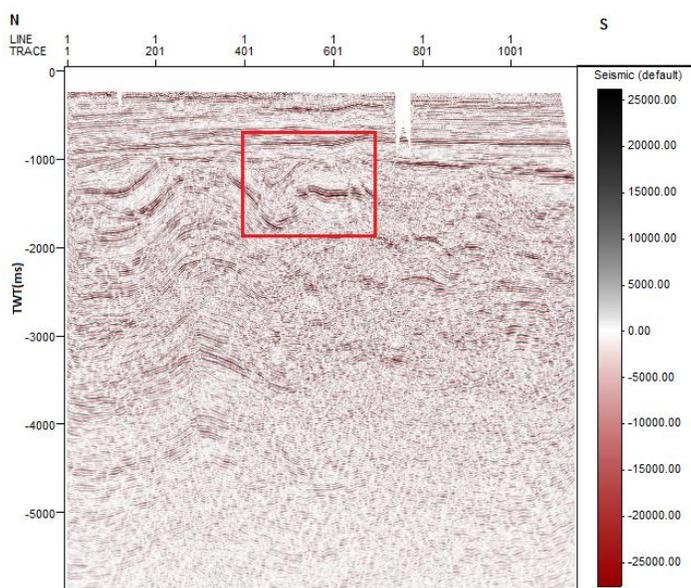
زمین تا موقعیت زمانی ۷۰۰ میلی ثانیه امتداد یافته‌اند. هر نشانگر با توجه به ماهیت خود در این زیر مقطع بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. در نتیجه با مقایسه نتایج هر چهار نشانگر نمی‌توان گفت که کدام نشانگر جواب بهتری را نسبت به دیگری ارائه کرده است.



شکل ۴-۱۹: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین‌دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفستگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۳-۲-۴ خط لرزه‌ای X۰۹

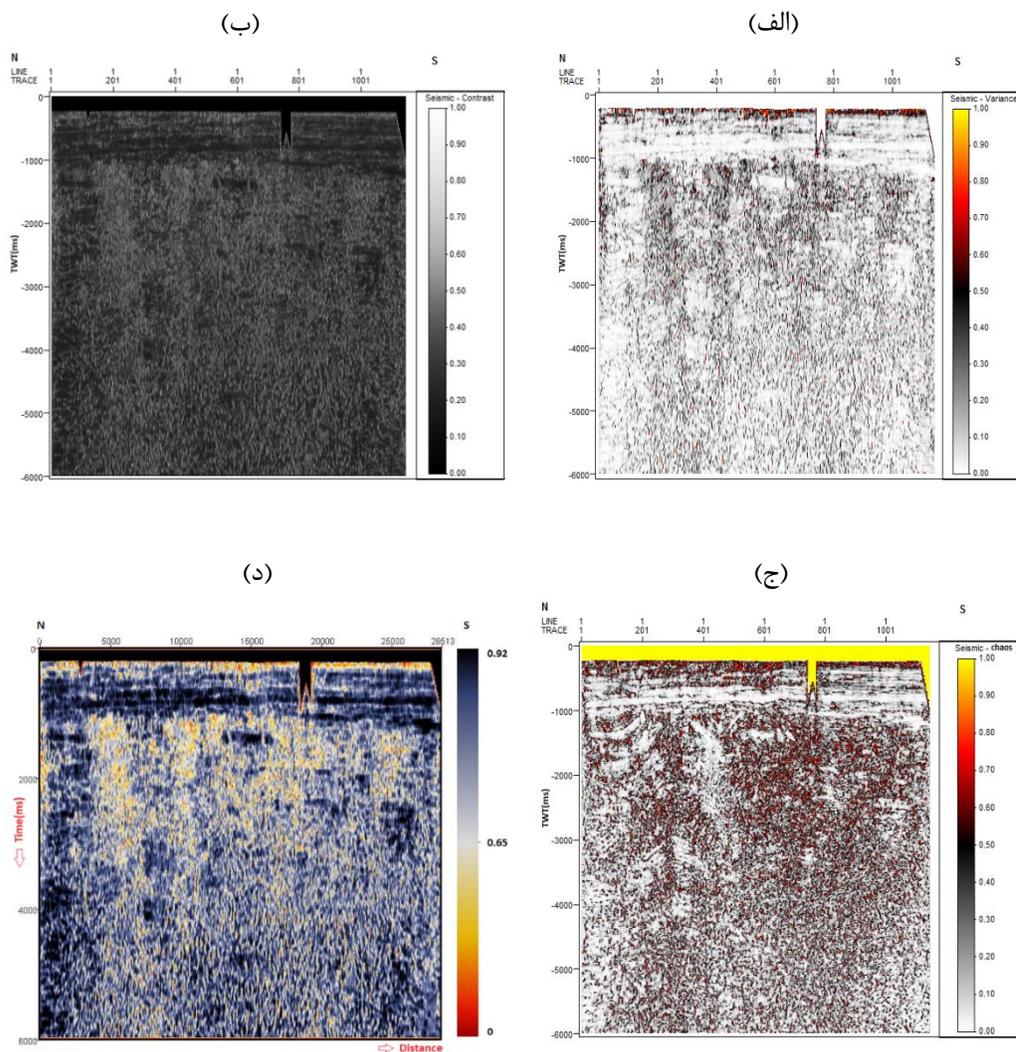
این خط لرزه‌ای با روند شمالی- جنوبی (N-S) و طولی معادل ۲۸ کیلومتر تا مرز ترکمنستان ادامه دارد که در شکل (۴-۲۰) می‌توان مقطع لرزه‌ای X۰۹ را به همراه موقعیت زیرمقطع استخراج شده روی آن را مشاهده کرد.



شکل ۴-۲۰: مقطع لرزه‌ای اصلی X۰۹ که موقعیت زیر مقطع دارای گسل روی آن مشخص شده.

این خط لرزه‌ای با اینکه نسبت به خطوط لرزه‌ای که تا به حال بررسی کرده‌ایم گسترش کوچیکتری دارد، ولی همچنان باز هم با اعمال نشانگر بر روی کل مقطع لرزه‌ای، ما نتایج واضح و مشخصی در رابطه با نمایان شدن الگوی گسلی بدست نمی‌آوریم، در نتیجه با استخراج یک زیرمقطع از نواحی گسل خورده، به صورت واضح‌تری به تفسیر و بررسی الگوی گسلی می‌پردازیم. در شکل (۴-۲۱) ما نشانگرهای لرزه‌ای واریانس، تباین‌دامنه، آشفستگی و شباهت را بر روی کل خط لرزه‌ای مربوطه اعمال کردیم و همانطور که مشاهده می‌کنید تقریباً در نواحی پایین‌تر از ۱۰۰۰ میلی ثانیه، پیوستگی در لایه‌ها وجود ندارد و به صورت آشفته

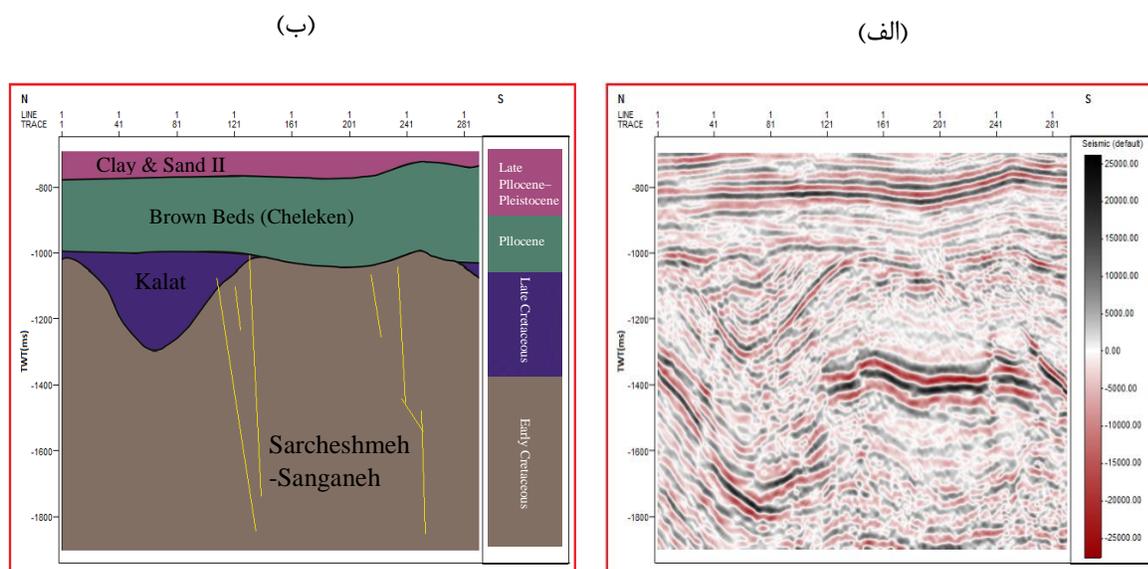
و درهم گسیخته می‌باشد. اما در نواحی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌ثانیه، شکستگی و ناپیوستگی بزرگی در لایه زیرسطحی دیده می‌شود، که متاسفانه ما این ناپیوستگی را با وضوح و کیفیت پایینی در نتایج سه نشانگر شباهت (شکل ۴-۲۱-د)، واریانس (شکل ۴-۲۱-الف) و تباین دامنه (شکل ۴-۲۱-ب) می‌بینیم. در حالی که با آنالیز مقطع نشانگری آشفته‌گی (شکل ۴-۲۱-ج) می‌بینید که در تمامی قسمت‌ها فقط آشفته‌گی و در هم گسیخته‌گی با دامنه بالا مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۲۱: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفته‌گی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۱-۳-۲-۴ زیر مقطع AX۰۹

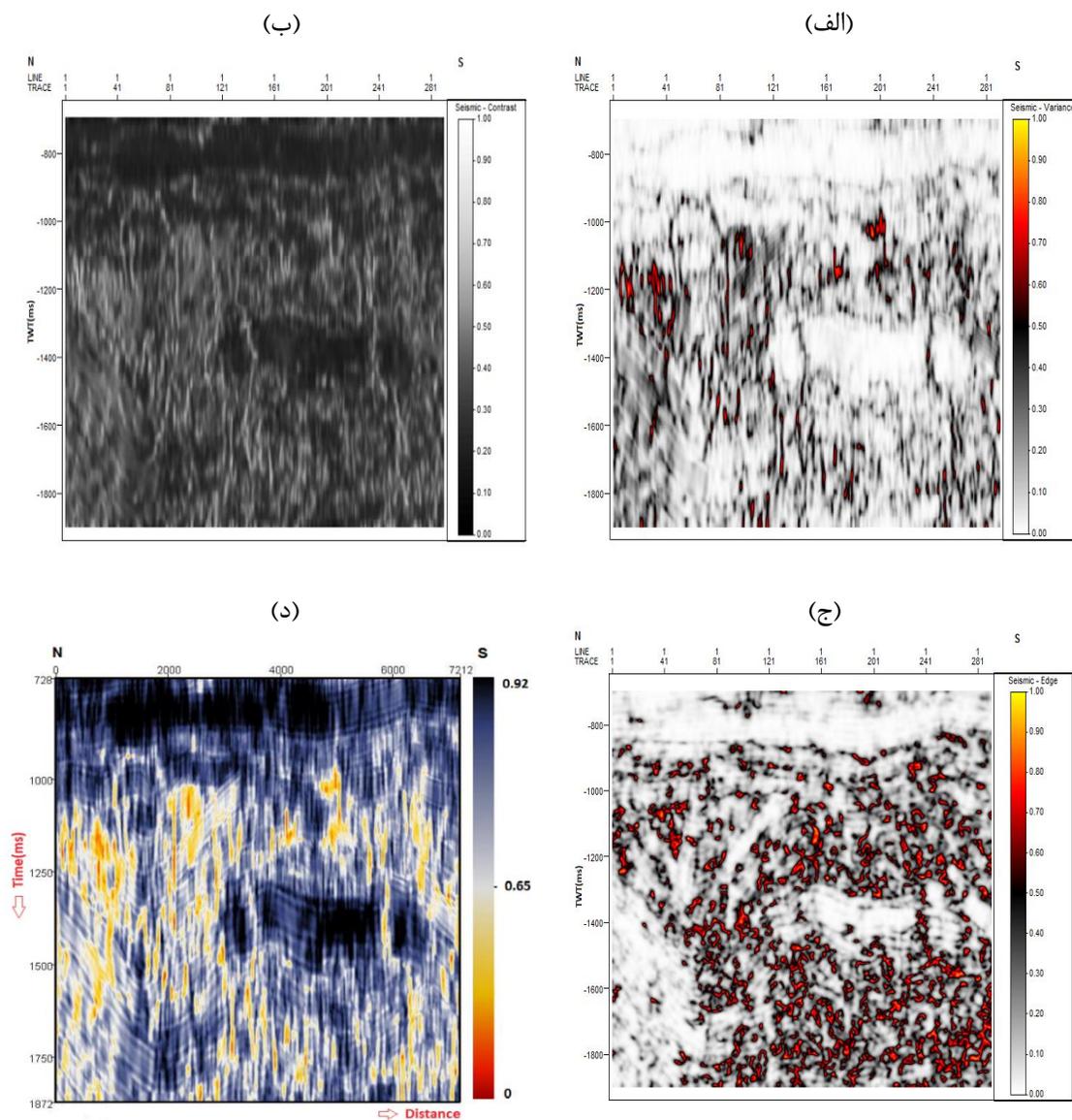
موقعیت این زیر مقطع با کادر قرمز رنگ در شکل (۴-۲۰) نشان داده شده است. شکل (۴-۲۲-الف) حالت تفسیر نشده و خام زیر مقطع AX۰۹ را نشان می‌دهد و شکل (۴-۲۲-ب) حالت تفسیر شده این زیر مقطع را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌کنید در این زیرمقطع دو سازند کلات و سرچشمه-سنگانه دچار گسل خوردگی نرمال شده‌اند، که در ادامه با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای مناسب الگوی گسلی را آشکار سازی می‌کنیم.



شکل ۴-۲۲: (الف) زیر مقطع خام AX۰۹، (ب) تفسیر زیر مقطع AX۰۹.

قبل از اعمال نشانگر بر روی زیرمقطع خام AX۰۹ استخراج شده، شکستگی در لایه به حدی بزرگ و برجسته می‌باشد که ما می‌توانیم به وضوح ناپیوستگی به وجود آمده و همچنین بلوک بالا و پایین گسل را به خوبی مشاهده کنیم. شکل (۴-۲۳) مقاطع نشانگری واریانس، تباین دامنه، آشفستگی و شباهت را نشان می‌دهد. با آنالیز نتایج بدست آمده می‌توان فهمید که دو نشانگر واریانس (شکل ۴-۲۳-الف) و تباین دامنه (شکل ۴-۲۳-ب) خطوط گسل را بهتر و با وضوح بیشتری تفکیک نموده‌اند، و همچنین تا حدودی نشانگر

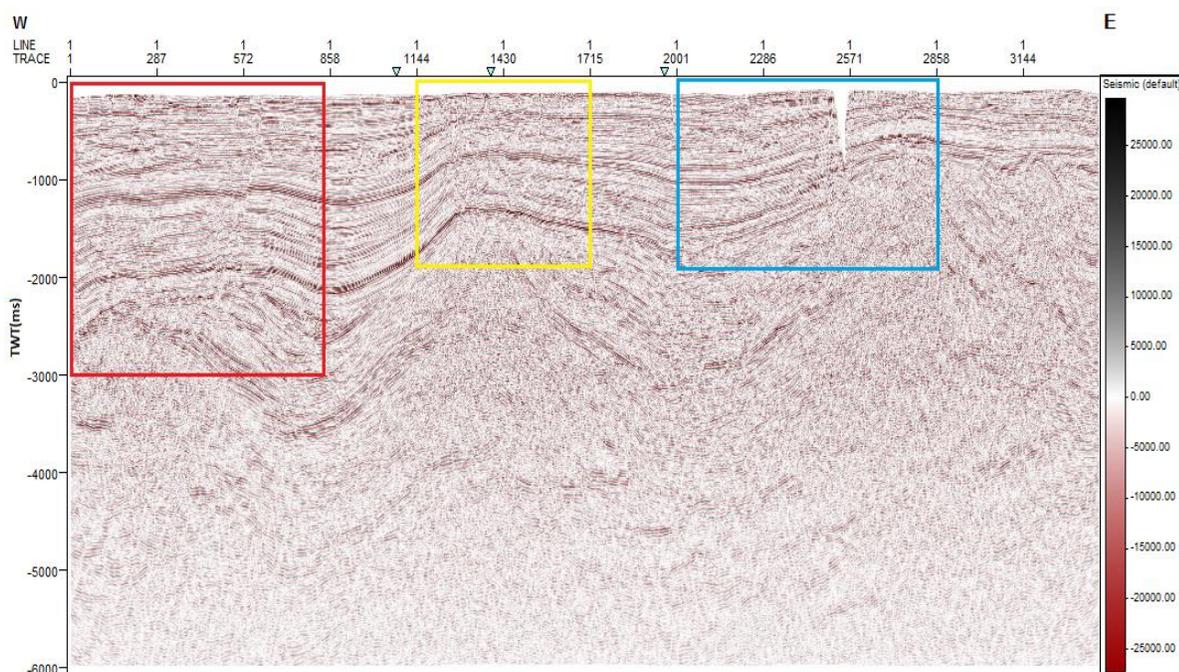
شباهت (شکل ۴-۲۳-د) نتایج قابل قبول و مورد رضایت ما را نمایش داده است، اما به خوبی دو نشانگر نامبرده گسل را شناسایی و برجسته نساخته است. در صورتی که متاسفانه نشانگر آشفتگی (شکل ۴-۲۳-ج) پاسخ مورد انتظار ما را ارائه نکرده است. با جمع‌بندی کلی روی نتایج حاصله می‌بینیم که در اطراف لایه گسل خورده، درهم گسیختگی و آشفتگی بسیار زیادی مشاهده می‌شود، که این امر سبب شده تا تفکیک و شناسایی گسل توسط نشانگرها دشوار شود.



شکل ۴-۲۳: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباين دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۴-۲-۴ خط لرزه‌ای X۱۶

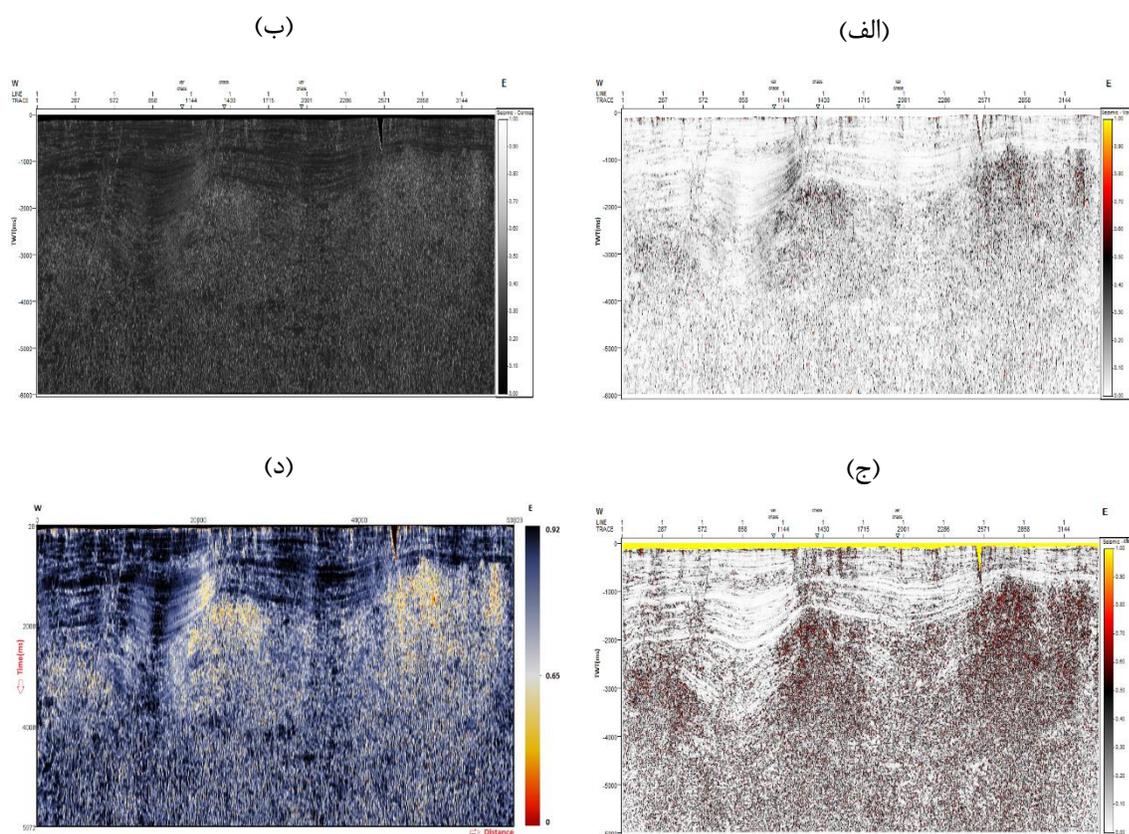
این خط لرزه‌ای با روند غربی- شرقی (W-E) و با طولی معادل ۳,۵۹ کیلومتر در منطقه دشت گرگان به صورت عمود بر سایر خطوط لرزه‌ای قرار دارد که در شکل (۴-۲۴) می‌توان خط لرزه‌ای X۱۶ را به همراه موقعیت زیرمقطع‌های استخراج شده بر روی آن مشاهده کرد.



شکل ۴-۲۴: مقطع لرزه‌ای اصلی X۱۶ که موقعیت زیر مقطع دارای گسل روی آن مشخص شده.

خط لرزه‌ای X۱۶ بزرگترین خط برداشت شده از منطقه می‌باشد که با اعمال نشانگرهای لرزه‌ای واریانس، تباین دامنه، آشفستگی و شباهت بر روی کل این خط لرزه‌ای، گسل خوردگی را مورد بررسی قرار می‌دهیم که می‌توان نتایج حاصل شده توسط نشانگرها را در شکل (۴-۲۵) مشاهده کرد. با تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده، به وجود یک گسل خیلی بزرگ و برجسته در غرب خط لرزه‌ای که از سطح زمین تا نواحی ۳۰۰۰ میلی ثانیه امتداد دارد، پی بردیم که با استخراج این ناحیه به صورت زیر مقطع در ادامه به طور

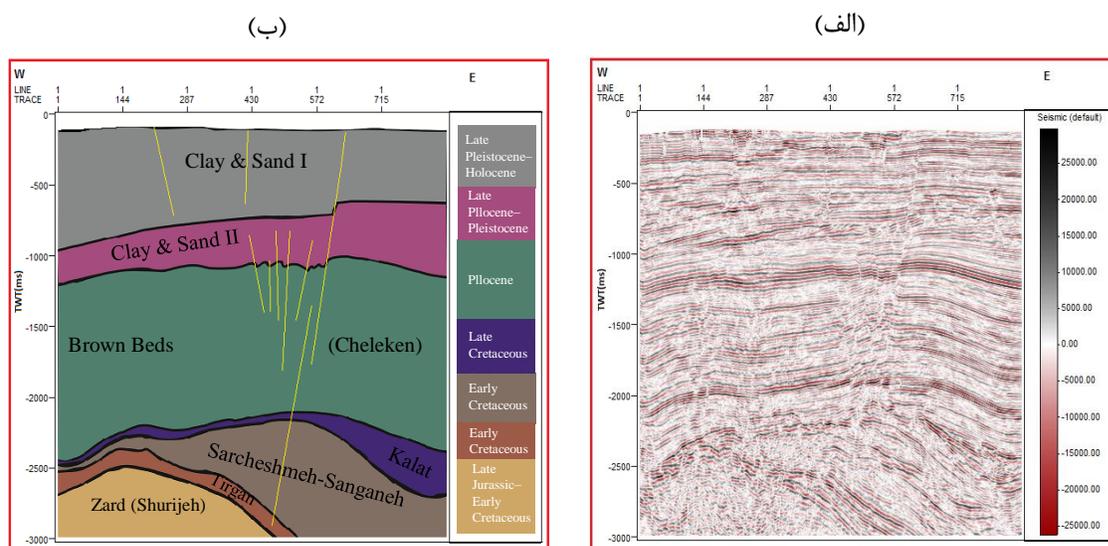
جداگانه بیشتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با آنالیز روی مقطع نشانگری آشفتهگی (شکل ۴-۲۵-ج) و تا حدودی نشانگر واریانس (شکل ۴-۲۵-الف) می‌بینیم که در نواحی بالاتر از ۳۰۰۰ میلی ثانیه، پیوستگی لایه‌ها به صورت نوارهای سفید رنگ به وضوح مشاهده می‌شود، اما در نواحی پایین‌تر از ۳۰۰۰ میلی ثانیه پیوستگی لایه‌ها وجود ندارد و تمام نواحی را به صورت آشفته و درهم گسیخته با دامنه بالا نشان می‌دهد، در حالی که نشانگر شباهت (شکل ۴-۲۵-د) این نواحی آشفته را با دامنه پایین نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۲۵: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتهگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۱-۴-۲-۴ زیرمقطع AX۱۶

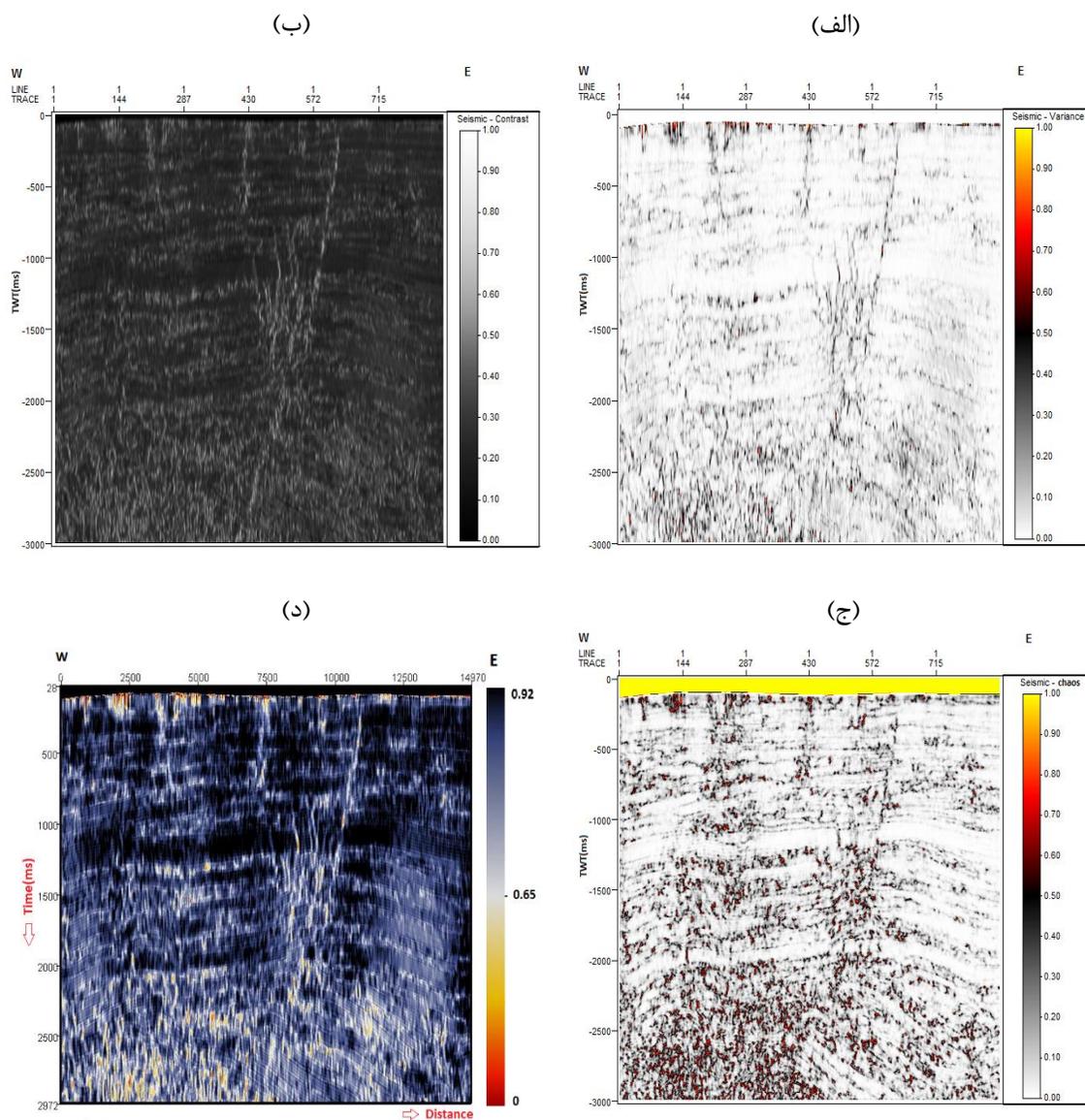
موقعیت این زیرمقطع با کادر قرمز رنگ در شکل (۴-۲۴) نشان داده شده است. شکل (۴-۲۶-الف) حالت تفسیر نشده و خام زیر مقطع AX۱۶ را نشان می‌دهد. با توجه به آنالیز و تفسیراتی که روی این زیرمقطع انجام دادیم، سازندهای تیرگان، سرچشمه-سنگانه، کلات، چلکن (طبقات)، افق رس و ماسه II (آپشرون و آگچاگیل) و افق رس و ماسه I که تحت تاثیر گسل خوردگی نرمال قرار گرفته‌اند را شناسایی و ترسیم کردیم. شکل (۴-۲۶-ب) نتایج این تفسیرات را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۶: (الف) زیر مقطع خام AX۱۶، (ب) تفسیر زیرمقطع AX۱۶.

شکل (۴-۲۷) نتایج حاصل از عملکرد نشانگرهای واریانس، تباین دامنه، آشفتگی و شباهت بر روی زیرمقطع AX۱۶ می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌کنید هر چهار نشانگر مورد استفاده بر روی این زیرمقطع همگی الگوی گسلی را به خوبی شناسایی کرده‌اند، اما در این مقایسه نشانگر واریانس (شکل ۴-۲۷-الف) و تباین دامنه (شکل ۴-۲۷-ب) ناپیوستگی‌های گسلی را با دامنه بالا در مقطع نشانگری خود نشان می‌دهند و نسبت به دو نشانگر دیگر از وضوح و قدرت تفکیک بالاتری برخوردار هستند، به گونه‌ای که حتی

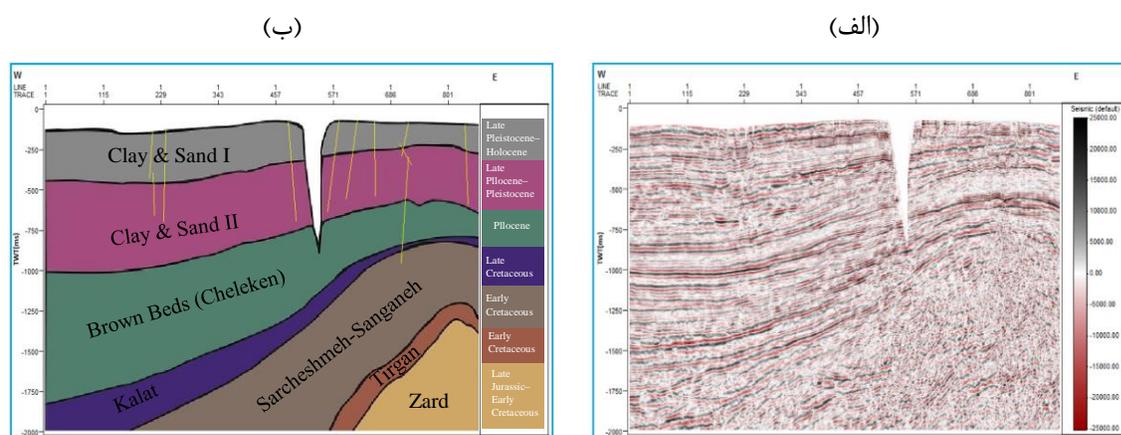
شکستگی‌ها و ریزگسل‌ها را به خوبی تفکیک کرده و نمایش می‌دهند، و این درحالی است که دو نشانگر آشفستگی (شکل ۴-۲۷-ج) و شباهت (شکل ۴-۲۷-د) نیز در برجسته سازی این الگوی گسلی موفق بوده‌اند. همچنین با بررسی مقطع نشانگری آشفستگی در قسمت‌های پایینی نواحی گسل خورده، بی‌نظمی و عدم پیوستگی در خطوط گسل مشاهده می‌شود، در نتیجه با توجه به ماهیت نشانگر آشفستگی این ناحیه را با دامنه بالا نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۲۷: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین‌دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفستگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۴-۲-۴-۲ زیرمقطع BX۱۶

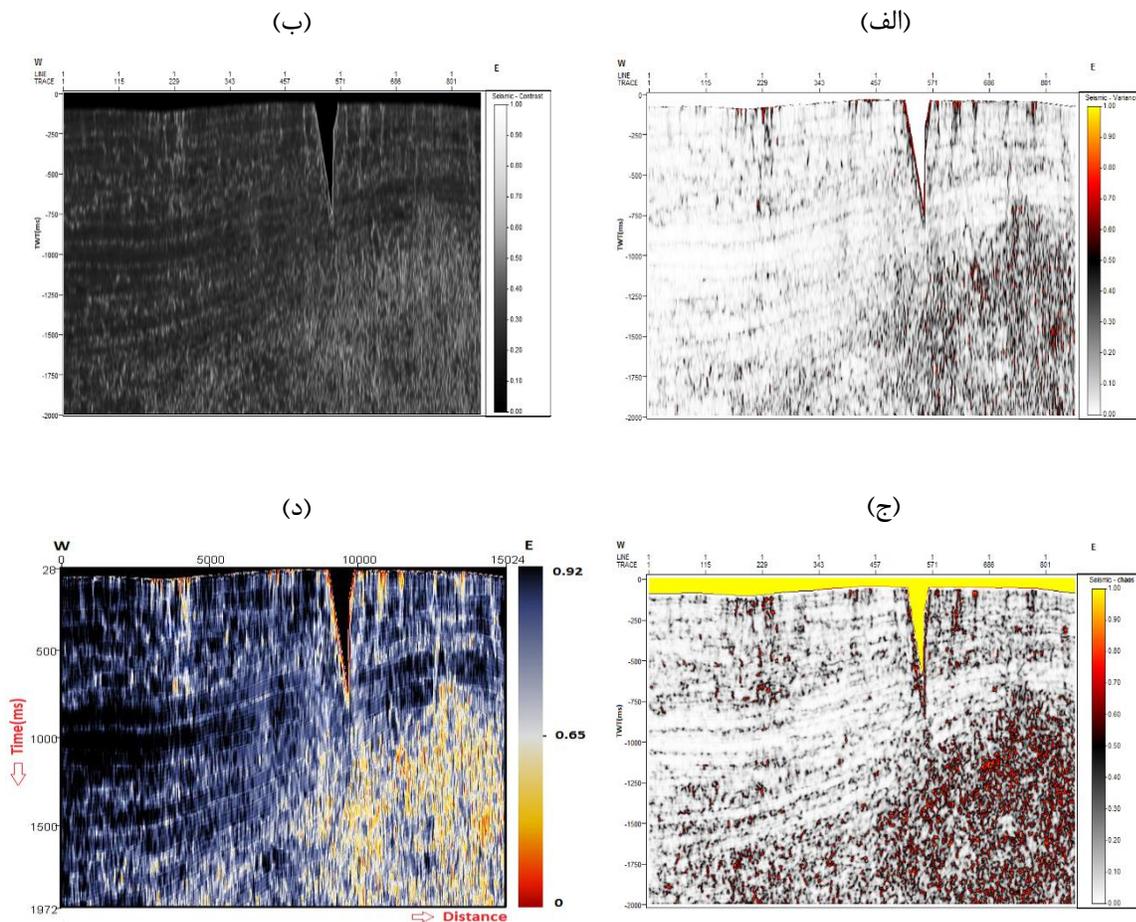
موقعیت این زیرمقطع با کادر آبی رنگ در شکل (۴-۲۴) نشان داده شده است. شکل (۴-۲۸-الف) حالت تفسیر نشده و خام زیرمقطع BX۱۶ را نشان می‌دهد و شکل (۴-۲۸-ب) حالت تفسیر شده این زیرمقطع را نشان می‌دهد، و همانطور که دیده می‌شود یکسری گسل نرمال در سازندهای سرچشمه-سنگانه، کلات، چلکن (طبقات قهوه‌ای)، افق رس و ماسه II (آپشرون و آگچاگیل)، افق رس و ماسه I، رخ داده است.



شکل ۴-۲۸: (الف) زیر مقطع خام BX۱۶، (ب) تفسیر زیر مقطع BX۱۶.

شکل (۴-۲۹) نتیجه اعمال نشانگرهای واریانس، تباین دامنه، آشفستگی و شباهت بر روی زیر مقطع BX۱۶ می‌باشد. ما با تفسیر هر چهار مقطع نشانگری تولید شده دریافتیم که یکسری گسل خوردی به صورت ردیفی در ناحیه زمانی ۰ تا ۷۵۰ میلی ثانیه در زیرمقطع استخراج شده وجود دارد. با مقایسه نتایج حاصل شده هر نشانگر می‌توان دید که واریانس (شکل ۴-۲۹-الف) در به تصویر کشیدن الگوی گسلی بهترین عملکرد را در بین نشانگرها داشته است، که خطواره‌های گسلی را با دامنه بالا و به رنگ مشکی در زمینه سفید به صورت واضح نمایان می‌کند. البته باید گفت که نشانگر تباین دامنه (شکل ۴-۲۹-ب) نیز در آشکارسازی عارضه‌های گسلی نتایج قابل قبولی ارائه کرده است، و در اینجا می‌بینید که دو نشانگر شباهت

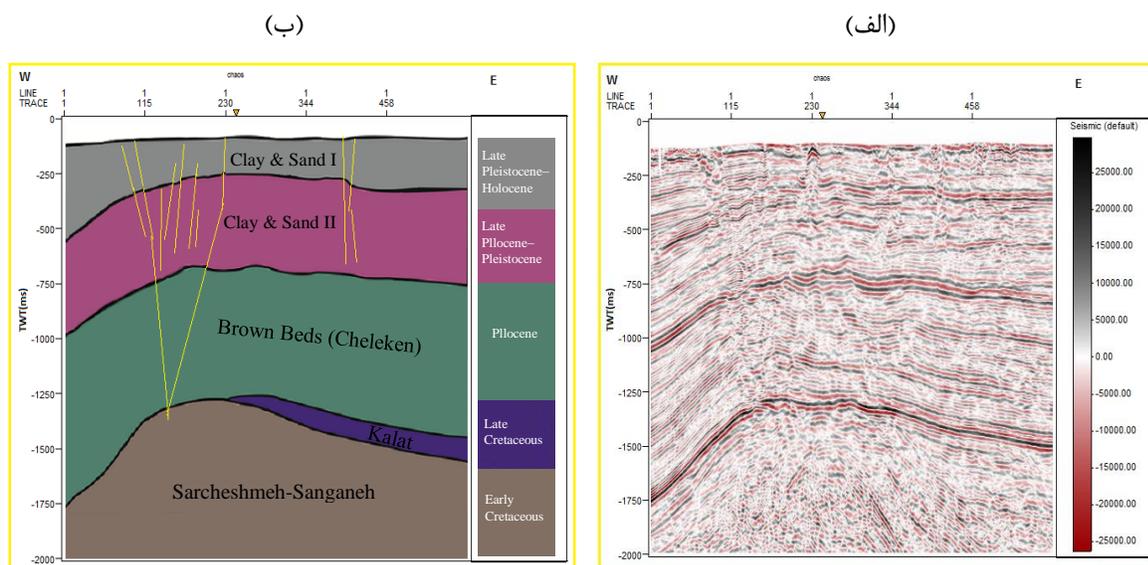
(شکل ۴-۲۹-د) و آشفته‌گی (شکل ۴-۲۹-ج)، ناپیوستگی‌های گسلی را به خوبی تفکیک نکرده‌اند، اما در عوض نشانگر آشفته‌گی لایه‌های که دارای بی‌نظمی و درهم گسیختگی هستند را به خوبی نمایان می‌کند و همچنین به خاطر این ماهیتی که دارد پیوستگی و گم شدگی در لایه‌ها را به وضوح نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۹: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین‌دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفته‌گی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۳-۴-۲-۴ زیرمقطع CX۱۶

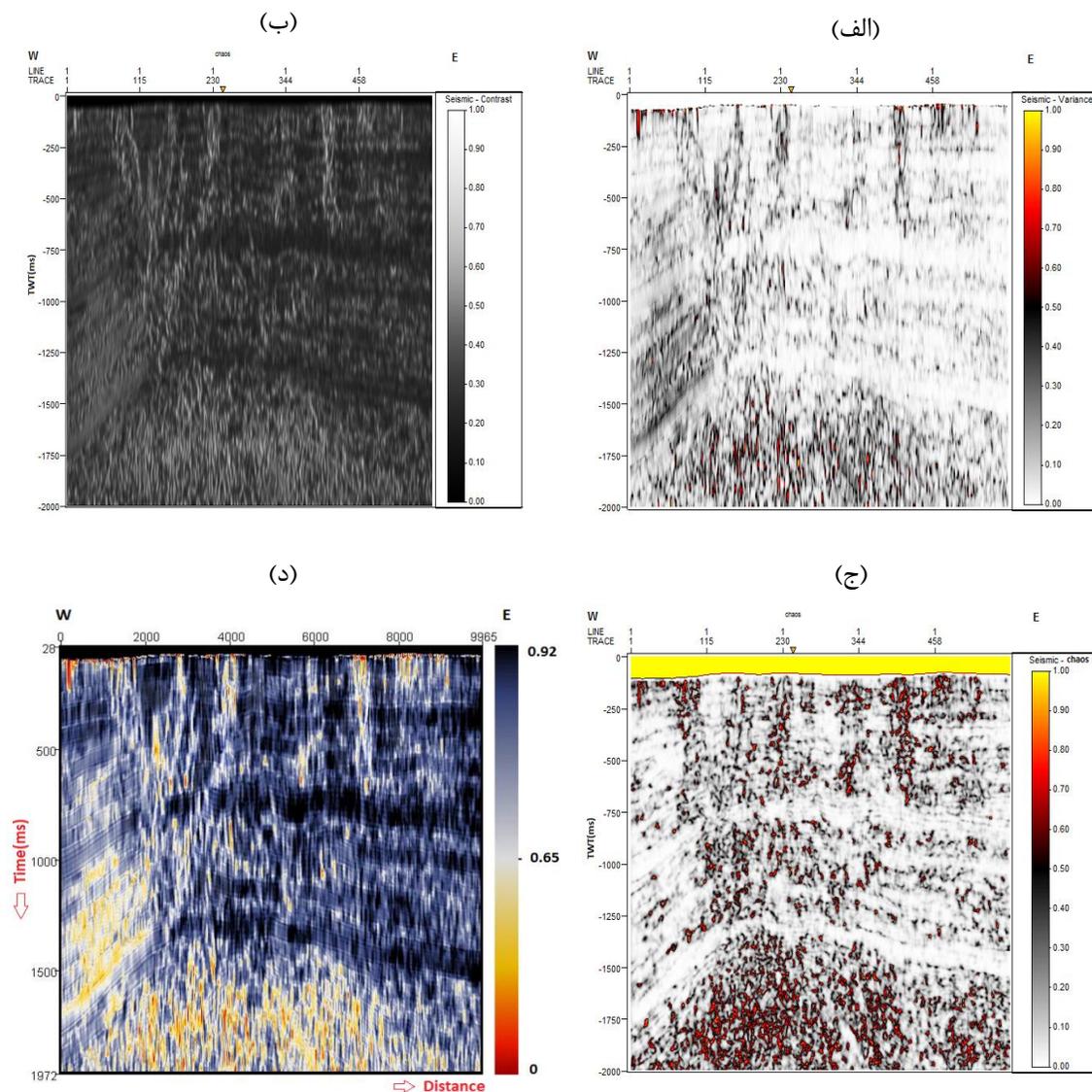
موقعیت این زیرمقطع با کادر زرد رنگ در شکل (۴-۲۴) نشان داده شده است. شکل (۴-۳۰-الف) حالت تفسیر نشده و خام زیر مقطع CX۱۶ را نشان می‌دهد. ما با توجه به ارزیابی و تفسیراتی که روی این زیرمقطع انجام دادیم، توانستیم تعدادی خطواره ریز و درشت را که به صورت گسل خوردگی نرمال در سازندهای سرچشمه-سنگانه، چلکن (طبقات قهوه‌ای)، افق رس و ماسه II (آپشرون و آگچاگیل)، افق رس و ماسه I، رخ داده است را شناسایی و در شکل (۴-۳۰-ب) ترسیم کنیم.



شکل ۴-۳۰: (الف) زیر مقطع خام CX۱۶، (ب) تفسیر زیر مقطع CX۱۶.

با توجه به شکل (۴-۳۱) که تصویر عملکرد نشانگرهای واریانس، تباین دامنه، آشفتگی و شباهت بر روی زیر مقطع CX۱۶ می‌باشد، می‌توان دید که در سمت چپ تصویر خطواره‌های گسلی زیادی در کنار هم شگل گرفته‌اند که تقریباً از سطح زمین رخنمون دارند و تا نواحی ۱۵۰۰ میلی ثانیه امتداد پیدا کرده‌اند، که این خطواره‌ها و ریز گسل‌ها در نشانگر واریانس (شکل ۴-۳۱-الف) و تباین دامنه (شکل ۴-۳۱-ب) با تفکیک بهتری نسبت به دو نشانگر شباهت (شکل ۴-۳۱-د) و آشفتگی (شکل ۴-۳۱-ج) به تصویر کشیده

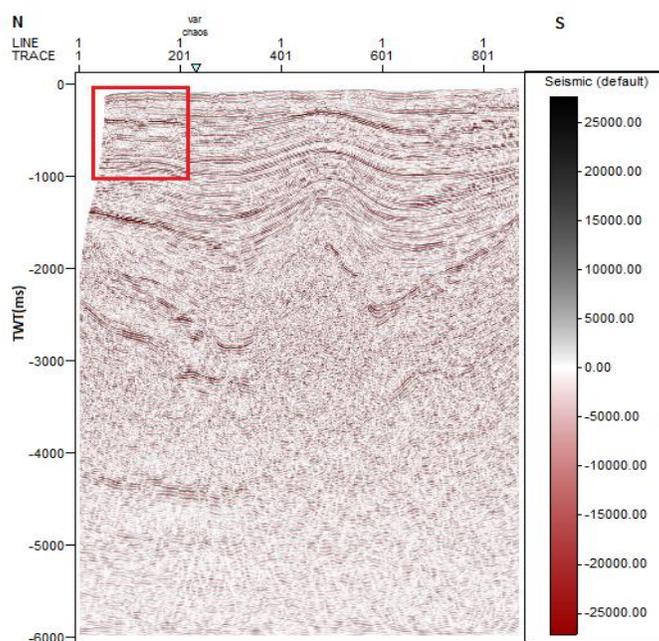
شده‌اند، و اما با آنالیز نشانگر آشفتگی می‌بینید که این خطواره‌ها را به شکل نواحی آشفته و درهم گسیخته نشان می‌دهد، که گمان می‌رود این نواحی آشفته، دودکش گازی باشد ولی با بررسی دقیق‌تر دو نشانگر واریانس و تباین‌دامنه، مشاهده می‌شود که این عارضه از خطواره‌های ریز و درشت شکستگی در کنار هم تشکیل شده است، در نتیجه این شک و گمان از بین می‌رود، و در نهایت همانطور که انتظار می‌رود مقطع نشانگری شباهت این عارضه را با دامنه پایین در تصویر نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۱: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین‌دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۵-۲-۴ خط لرزه‌ای X۲۵

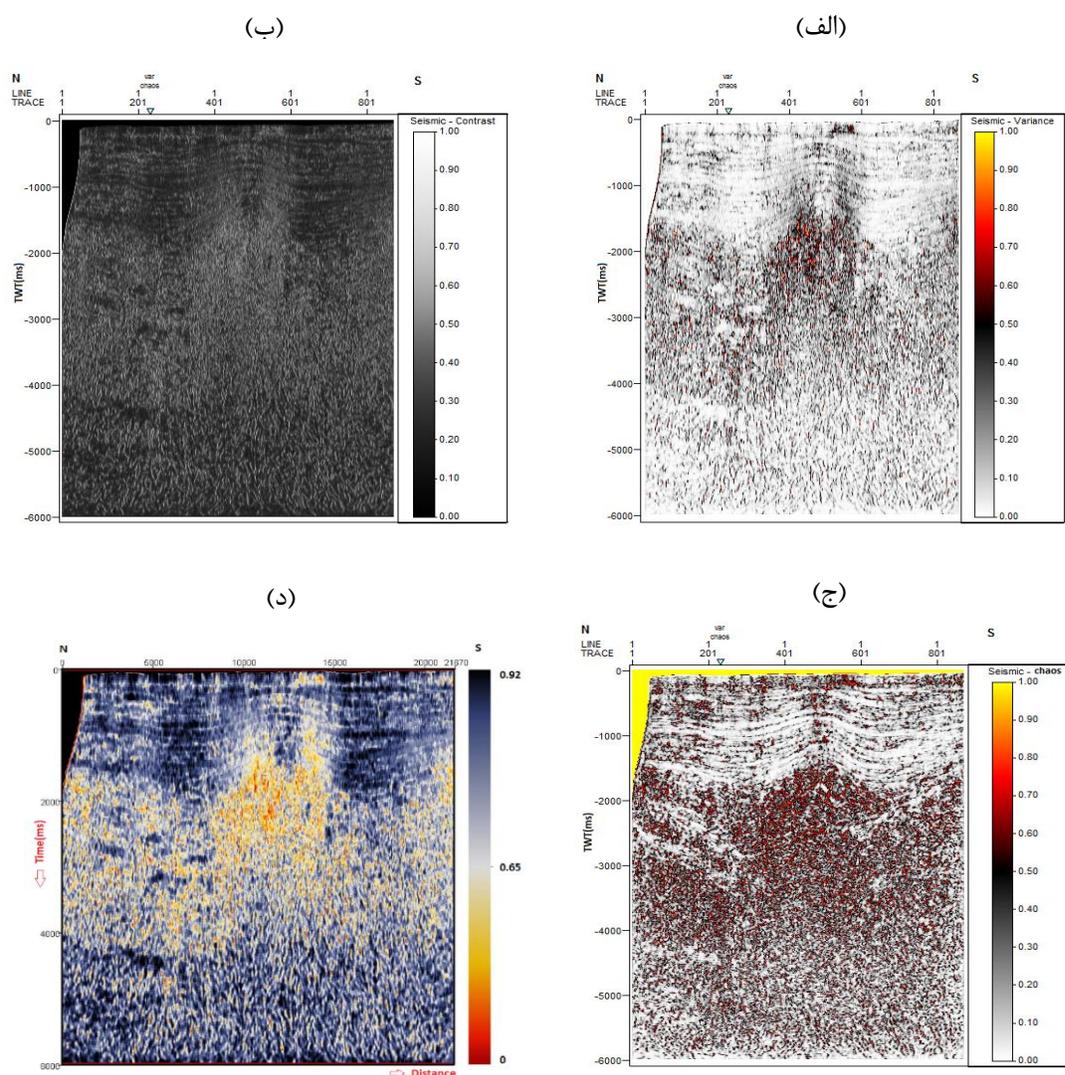
این خط لرزه‌ای با روند شمالی- جنوبی (N-S) و طولی معادل ۵,۲۱ کیلومتر به موازات خط لرزه‌ای X۰۹ در دشت گرگان قرار دارد که در شکل (۴-۳۲) می‌توان خط لرزه‌ای X۲۵ را به همراه موقعیت زیرمقطع استخراج شده روی آن را مشاهده کرد.



شکل ۴-۳۲: مقطع لرزه‌ای اصلی X۲۵ که موقعیت زیر مقطع دارای گسل روی آن مشخص شده.

خط لرزه‌ای X۲۵ کوچکترین مقطع برداشت شده در منطقه می‌باشد که در نتیجه اطلاعات زیادی از عارضه‌های زیر سطحی را در خود جای نداده است. ما با اعمال نشانگرهای لرزه‌ای واریانس، تباین‌دامنه، آشفستگی و شباهت بر روی کل این مقطع لرزه‌ای که در شکل (۴-۳۳) نتایج حاصل از هر نشانگر به صورت مجزا ارائه شده است، الگوی گسل خوردگی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به نتایج بدست آمده توسط نشانگرهای لرزه‌ای، به ویژه نشانگر آشفستگی (شکل ۴-۳۳-ج) که نسبت به سایر نشانگرها پیوستگی و آشفستگی را در لایه‌ها به خوبی نشان می‌دهد، می‌توان یک ساختمان تاقدیسی را تقریباً در نواحی ۱۷۰۰

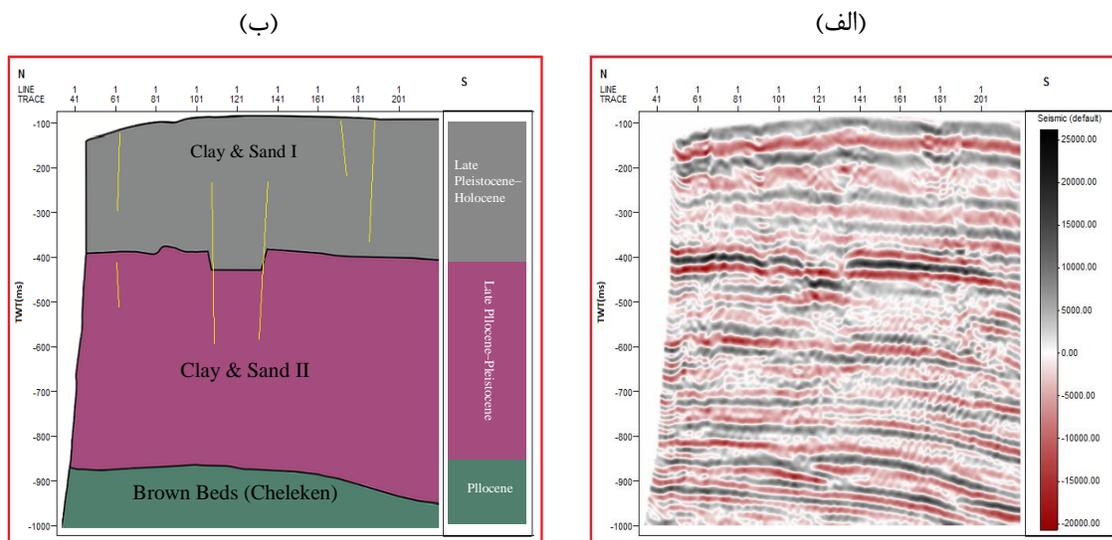
میلی ثانیه در وسط تصویر به وضوح مشاهده کرد، و در نواحی بالای ۱۵۰۰ میلی ثانیه پیوستگی لایه‌ها به همراه خطواره‌های موجود به خوبی قابل مشاهده هستند، و اما در نواحی پایین‌تر از ۱۵۰۰ میلی ثانیه، همانطور که دیده می‌شود تغییراتی در نتایج نشانگرها به وجود نیامده و به صورت یکپارچه درهم گسیخته می‌باشد، که در نهایت ما با تفسیرهای که انجام دادیم، یک ناحیه از ناپیوستگی‌های گسلی را شناسایی و به صورت زیر مقطع استخراج کردیم که در ادامه به آن می‌پردازیم.



شکل ۴-۳۳: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین‌دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

۱-۵-۲-۴ زیرمقطع AX۲۵

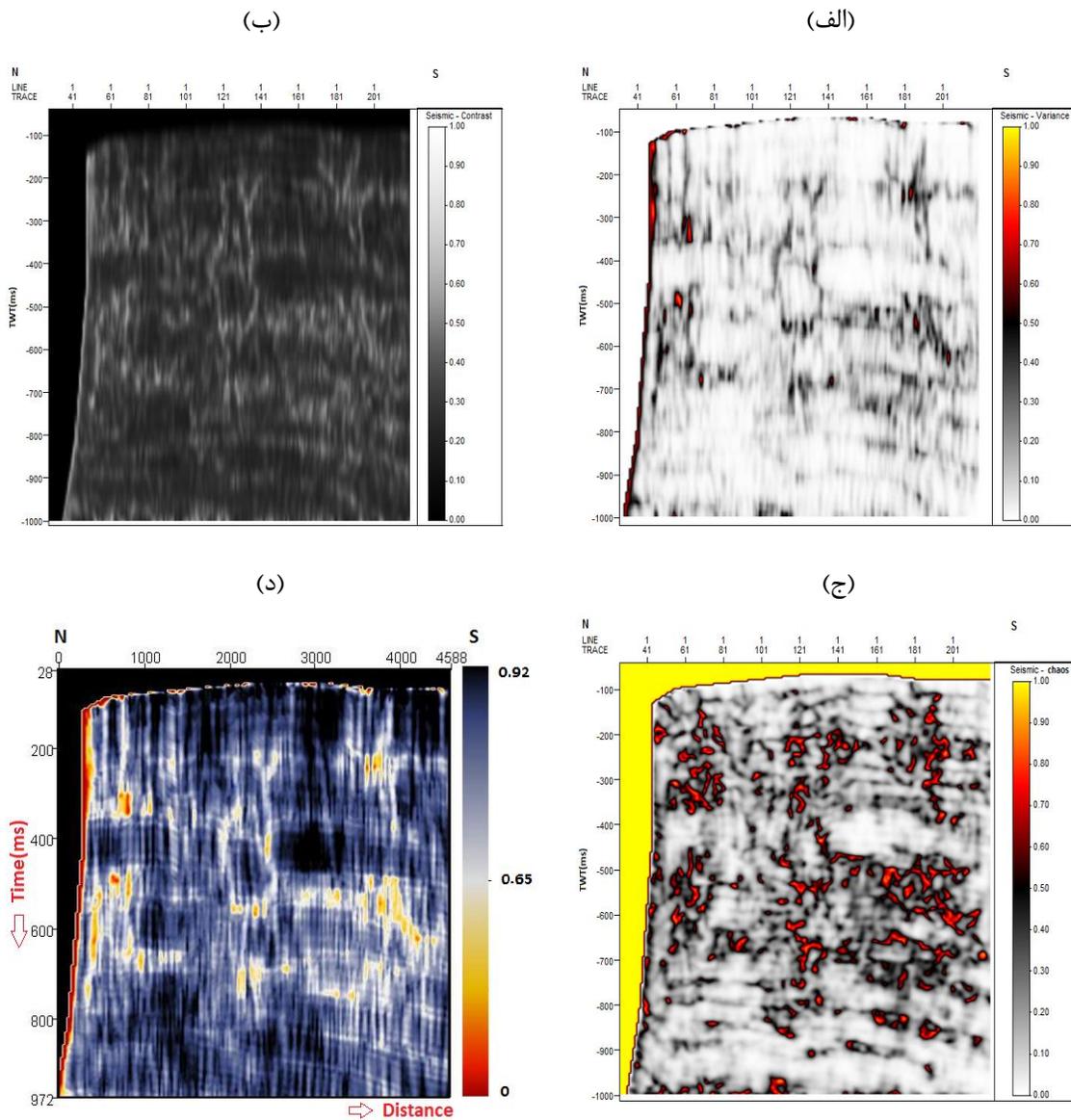
موقعیت این زیرمقطع با کادر قرمز رنگ در شکل (۴-۳۲) نشان داده شده است. شکل (۴-۳۴) الف) حالت تفسیر نشده و خام زیرمقطع AX۲۵ را نشان می‌دهد، و شکل (۴-۳۴) ب) حالت تفسیر شده این زیرمقطع را نشان می‌دهد که موقعیت گسل خوردگی نرمال را روی افق رس و ماسه II (آپشرون و آگچاگیل) و افق رس و ماسه I، پیک کرده‌ایم.



شکل ۴-۳۴: الف) زیر مقطع خام AX۲۵، ب) زیر مقطع AX۲۵ به همراه تفسیر گسل.

ما برای برجسته‌سازی الگوی گسلی در زیر مقطع AX۲۵، از نشانگرهای واریانس، تباین دامنه، آشفتگی و شباهت استفاده کرده‌ایم که می‌توانید تصاویر بدست آمده توسط این نشانگرها را در شکل (۴-۳۵) مشاهده کنید. ما با ارزیابی انجام شده بر روی مقاطع نشانگری دریافتیم که نشانگر تباین دامنه (شکل ۴-۳۵) ب) در مقایسه با سایر نشانگرها بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. این در حالی است که نشانگرهای واریانس (شکل ۴-۳۵) الف) و شباهت (شکل ۴-۳۵) د) نیز خطوط گسل را به خوبی نمایش داده‌اند، اما

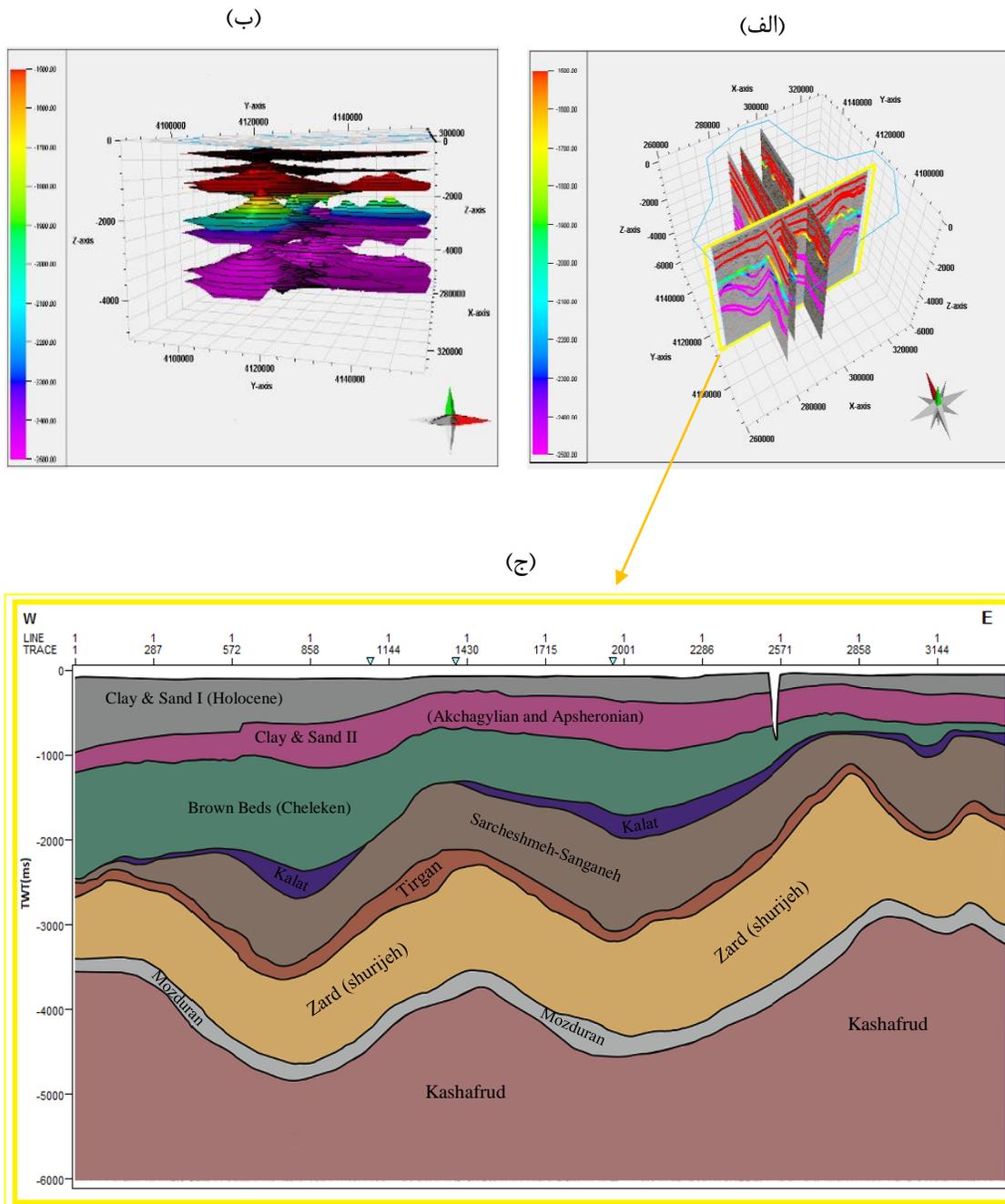
نشانگر آشفتگی خطوط گسل را با دامنه بالا و به صورت آشفته برای ما نمایش می‌دهد. به صورت کلی هر نشانگر با توجه به ماهیتی که دارد نتایج مورد انتظار ما را برآورد کرده است.



شکل ۴-۳۵: (الف) مقطع نشانگری واریانس، (ب) مقطع نشانگری تباین دامنه، (ج) مقطع نشانگری آشفتگی، (د) مقطع نشانگری شباهت.

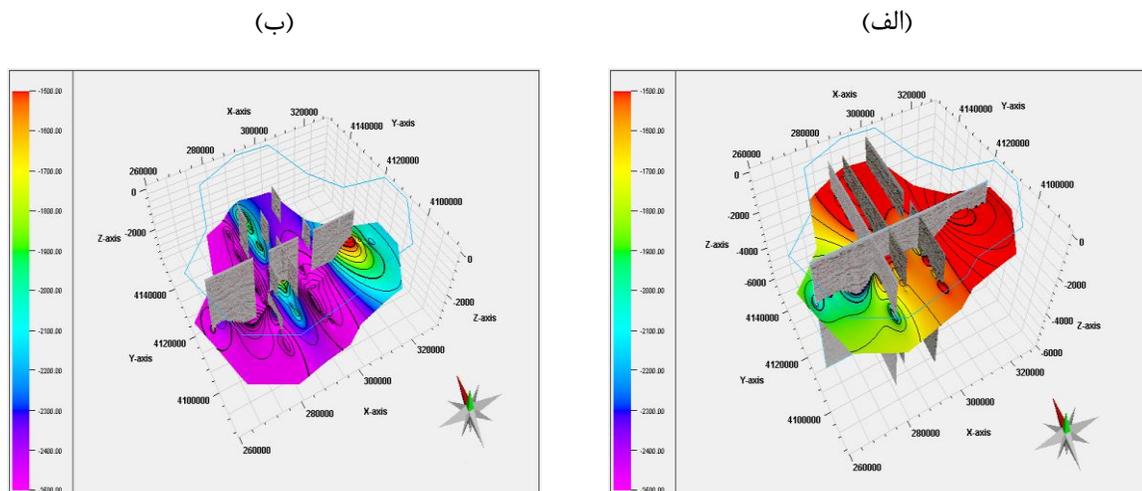
۳-۴ درون‌یابی و مدل‌سازی ساختاری

در این مرحله ما یک مدل ساختاری را با استفاده از سرسازندهای پیک شده ایجاد می‌کنیم که می‌توانید در شکل (۳۶-۴-ب) و (۳۸-۴-ج) نتیجه این مدل‌سازی را مشاهده کنید. ما در ابتدا با استفاده از نرم افزار Petrel فرآیند افق‌گیری روی خطوط لرزه‌ای مربوطه در این پژوهش را به صورت اتوماتیک، نیمه اتوماتیک و دستی انجام داده‌ایم، یا به عبارت دیگر می‌توان گفت که سرسازندهای (رس و ماسه I، رس و ماسه II (آپشرون و آگچاگیل)، طبقات قهوه‌ای (چلکن)، کلات، سرچشمه-سنگانه، تیرگان، زرد (شوریجه)، مزدوران، کشف‌رود) مربوط به هر خط لرزه‌ای را پیک کردیم، و برای نمونه و درک بهتر، از بین خطوط لرزه‌ای که در پنجره سه‌بعدی شکل (۳۶-۴-الف) می‌بینید، خط لرزه‌ای X16 را که عمود بر تمام خطوط لرزه‌ای می‌باشد را در شکل (۳۶-۴-ج) نمایش داده‌ایم، و محل تقاطع هر خط لرزه‌ای را با خط لرزه‌ای دیگر چک کردیم تا درصد خطا کاهش پیدا کند، و در ادامه با تفسیرهای لازم بر روی هر خط لرزه‌ای، گسل‌ها را شناسایی و روی هر یک از خطوط لرزه‌ای به صورت دستی پیک کردیم (شکل ۴-۳۸-الف). سپس یک polygon (خطوط آبی رنگ موجود در شکل ۴-۳۶-الف) را که در برگیرنده تمام خطوط لرزه‌ای باشد را تعریف کردیم و در نهایت برای صفحه‌سازی و ایجاد مدل ساختاری برای تمام سرسازندها از الگوریتم‌های Gaussin، Minimum curvature، Convergent Interpolation و Moving Average استفاده کردیم، و از آنجایی که ما تشخیص دادیم الگوریتم Moving Average دقت بالاتری نسبت به الگوریتم‌های نامبرده در این زمینه دارد، در نتیجه ما برای ایجاد مدل ساختاری (شکل ۴-۳۶-ب) و تبدیل سرسازندها به Surface (شکل ۴-۳۷) از این الگوریتم با Orientation \cdot و Major/Minor rate ۲,۲ استفاده کرده‌ایم.



شکل ۴-۳۶: (الف) نمای کلی از سرسازندهای پیک شده روی خطوط لرزه‌ای در پنجره سه‌بعدی، (ب) مدل ساختاری سرسازندهای پیک شده در مقطع لرزه‌ای X۱۶، (ج) مقطع لرزه‌ای X۱۶ که در آن سرسازندها تفسیر شده‌اند.

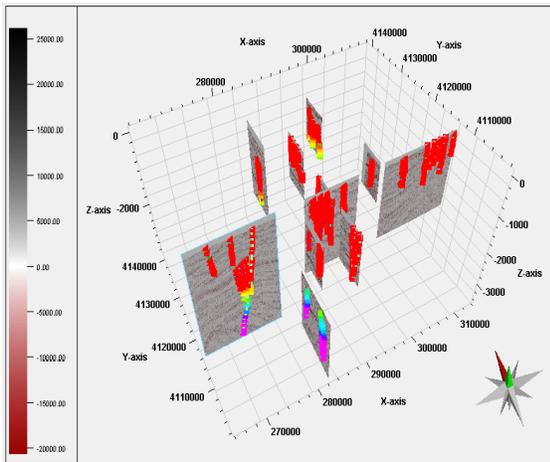
شکل (۳۷-۴-الف) Surface سرسازند سرچشمه-سنگانه می‌باشد که موقعیت خطوط لرزه‌ای برداشت شده در آن نشان داده شده است، و شکل (۳۷-۴-ب) Surface سرسازند تیرگان می‌باشد که موقعیت زیر مقاطع استخراج شده از خطوط لرزه‌ای در آن مشخص می‌باشد.



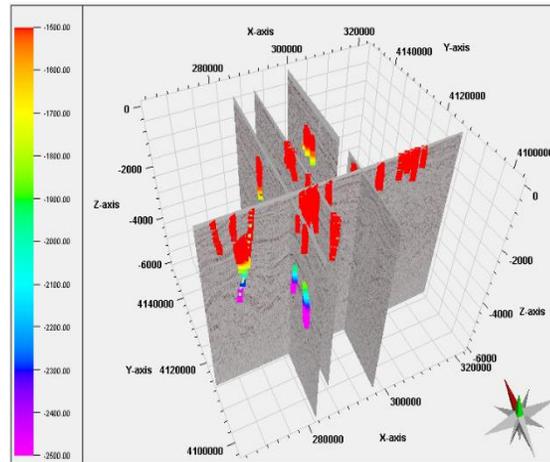
شکل ۳۷-۴: (الف) نمایش سه‌بعدی Surface سرسازند سرچشمه و سنگانه بر روی خطوط لرزه‌ای، (ب) نمایش سه‌بعدی Surface سرسازند تیرگان بر روی زیر مقاطع استخراج شده است.

شکل (۳۸-۴) موقعیت گسل‌های پیک شده روی کل خطوط لرزه‌ای (شکل ۳۸-۴-الف) و کل زیر مقاطع استخراج شده از خطوط لرزه‌ای (شکل ۳۸-۴-ب) را نشان می‌دهد، و همچنین شکل (۳۸-۴-ج) موقعیت گسل‌های پیک شده نسبت به Surface هر یک از سرسازندهای (شکل ۳۶-۴-ج) مربوط به خطوط لرزه‌ای $X_{۰۶}$ ، $X_{۰۷}$ ، $X_{۰۹}$ ، $X_{۱۶}$ ، $X_{۲۵}$ (شکل ۳۶-۴-الف) را نشان می‌دهد. ما برای مشاهده موقعیت بهتر گسل-خوردگی از زاویه دیگر، یک افق کمکی را در بین افق‌های تیرگان و سرچشمه سنگانه درون‌یابی کردیم و سپس گسل‌ها را روی Surface تولید شده نمایش دادیم که نتایج آن را در شکل (۳۸-۴-د) ارائه کرده‌ایم، و همانطور که می‌بینید با تغییر زاویه Surface تولید شده و گسل‌های پیک شده روی آن، موقعیت گسل‌ها جلوه تازه‌ای پیدا کرده است.

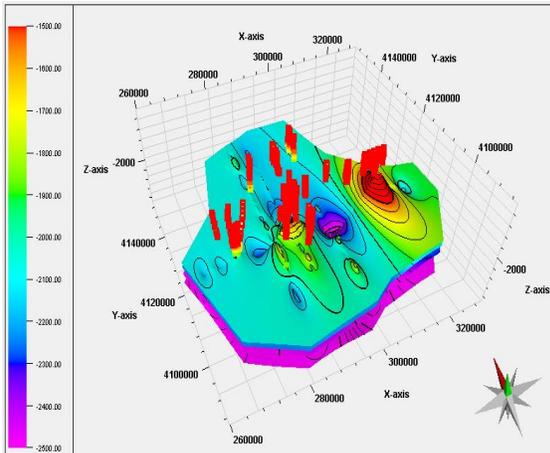
(ب)



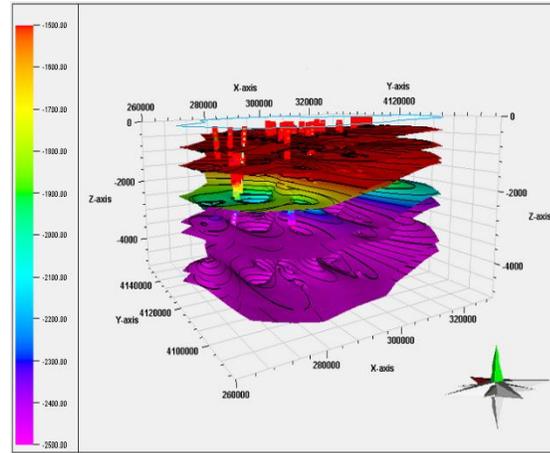
(الف)



(د)



(ج)



شکل ۴-۳۸: (الف) موقعیت گسل‌ها بر روی خطوط لرزه‌ای، (ب) موقعیت گسل‌ها بر روی زیر مقاطع استخراج شده از خطوط لرزه‌ای، (ج) نمایش موقعیت گسل‌ها در مدل ساختاری تولید شده از اطلاعات مربوط به سرسازندها، (د) موقعیت گسل‌ها بر روی Surface کمکی.

فصل پنجم

نتیجه

گیری و پیشنهاداتها

۵-۱ نتیجه گیری

شناسایی ساختارهای زیرسطحی در اکتشاف مواد هیدروکربنی که نقش بسزایی در اقتصاد یک کشور را ایفا می‌کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف ما از این پژوهش شناسایی گسل‌ها در داده‌های دو بعدی دشت گرگان بوده، و از آنجایی که دشت گرگان تاکنون از نظر پتانسل تولید هیدروکربن به اثبات نرسیده، در نتیجه پژوهش در این منطقه و شناسایی ساختارهای زیرسطحی از جمله گسل‌ها ارزشمند می‌باشد. با توجه به پوشش گسترده رسوبات در دشت گرگان و همچنین نبود اثرات گسلی در سطح زمین، شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی را دشوار می‌سازد. با بررسی و تفسیر داده‌های دوبعدی برداشت شده که دارای پیچیدگی ساختاری و درهم ریختگی افق‌ها می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که ناهنجاری در ساختارهای زیرسطحی در این منطقه بسیار بالا است، از این رو تشخیص و شناسایی گسل در این داده‌ها کاری دشوار و زمان بر می‌باشد. مهم‌ترین نتیجه این تحقیق شناسایی الگوی گسلی و نواحی دارای شکستگی که در اثر تنش‌هایی در رژیم تکتونیکی شکل گرفته‌اند، می‌باشد که پس اعمال نشانگر بر روی داده‌های لرزه‌ای این امر محقق شده و الگوهای گسلی روی مقاطع لرزه‌ای شناسایی شدند. ما با ارزیابی و بررسی‌های که روی داده‌های لرزه‌ای انجام دادیم، به این نتیجه دست یافتیم که برای نمایش واضح‌تر گسل در مقاطع لرزه‌ای که دارای گسترش زیادی هستند، بهتر است از هر مقطع لرزه‌ای یک یا چند زیرمقطع از نواحی گسل‌خورده استخراج کنیم و سپس نشانگر مناسب را برای شناسایی گسل بر روی زیرمقطع مربوطه اعمال کنیم، که این امر علاوه بر این که سبب افزایش وضوح نواحی گسل‌خورده و تفسیر راحت‌تر ساختارهای زیرسطحی می‌شود، به نتایج حاصل از نشانگرهای لرزه‌ای نیز کمک می‌کند که از کیفیت و قدرت وضوح بالاتری برخوردار باشند، و این به نوبه خود باعث آشکارسازی هر چه بهتر ساختارهای پنهان در داده‌ای لرزه‌ای می‌شود. با اعمال نشانگر واریانس که یکی از نشانگرهای استفاده شده برای آشکارسازی گسل در این مطالعه

می‌باشد، نتایج بهتری حاصل شده و توانستیم موقعیت و نواحی گسل خوردگی را تشخیص دهیم، اگرچه نشانگر تباین دامنه و شباهت نیز نتایج قابل قبولی را در زمینه آشکارسازی الگوی گسلی ارائه کرده‌اند. ما با درون‌یابی خطوط پیک شده برای هر سرسازند، مدل ساختاری را ایجاد کردیم که موقعیت هر یک از گسل‌های پیک شده روی آن نمایش داده شده است، که با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شده می‌توان امتداد افق‌ها را بر روی لاین‌های مختلف مشاهده کرد.

۵-۲ پیشنهادها

۱. وجود چاه‌های بیشتر و داشتن اطلاعات کافی در زمینه چاه‌پیمایی و مغزه‌گیری و ترکیب نتایج حاصل از تحلیل نشانگری با این اطلاعات، در تعیین دقیق‌تر الگوی گسلی کمک می‌کند.
۲. استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی دیگر مانند گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی در کنار داده‌های لرزه‌ای می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از نواحی زیرسطحی در منطقه برآورد کند.
۳. پیشنهاد می‌شود برای تفسیر ساختارهای زیرسطحی و اطلاع از وضعیت گسل خوردگی از داده‌های سه بعدی استفاده شود که تصویر زیرسطحی بهتری نسبت به داده‌های دوبعدی ارائه می‌کند و می‌توان مدل‌سازی بهتری را ارائه داد.

منابع

- ابطحی، م.، ۱۳۷۷، خلاصه گزارش از فعالیت‌های انجام شده در دشت گرگان.
- شمعانیان، غ و همکاران، ۱۳۸۴، هیدروژئوشیمی منابع آب زیر زمینی در حوزه آبریز گرگان رود - قره سو، استان گلستان
مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم
- قاسمی، م. ر.، محمدخانی، ح. و عبدلهی، ع.، ۱۳۸۶، گذر از برپایی در کپه داغ به فرونشینی کاسپین جنوبی، معرفی
گسله‌های نوشناخته گنبدکاووس و یساقی: بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین.
- Abdelnabi, A., Liu, K., Gao, S. and Abushalah, Y., ۲۰۱۷. Seismic attributes aided fault detection and enhancement in the Sirte basin, Libya. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts* ۲۰۱۷ (pp. ۲۳۴۰-۲۳۴۴). Society of Exploration Geophysicists.
- Akper, A., ۲۰۱۲. Mud volcanoes in the South Caspian basin: nature and estimated depth of its products. *Natural Science*, ۲۰۱۲.
- Allen, M.B., Blanc, E.J., Walker, R., Jackson, J., Talebian, M. and Ghassemi, M.R., ۲۰۰۶. Contrasting styles of convergence in the Arabia-Eurasia collision: Why escape tectonics does not occur in Iran. *SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, ۴۰۹, p.۵۷۹.
- Allen, M.B., Vincent, S.J., Alsop, G.I., Ismail-zadeh, A. and Flecker, R., ۲۰۰۳. Late Cenozoic deformation in the South Caspian region: effects of a rigid basement block within a collision zone. *Tectonophysics*, ۳۶۶(۳-۴), pp.۲۲۳-۲۳۹.

Ashraf, U., Zhang, H., Anees, A., Mangi, H.N., Ali, M., Ullah, Z. and Zhang, X., 2020. Application of Unconventional Seismic Attributes and Unsupervised Machine Learning for the Identification of Fault and Fracture Network. *Applied Sciences*, 10(11), p.3864.

Bahorich, M. and Farmer, S., 1995. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube. *The leading edge*, 13(10), pp.1053-1058.

Bailey, A.H., King, R.C., Holford, S.P. and Hand, M., 2016. Extending interpretations of natural fractures from the wellbore using 3D attributes, The Carnarvon Basin, Australia: Interpretation, 4. SB104-SB129, <http://doi.org/10.1190/INT-2015-0113.1>.

Bailey, A., King, R., Holford, S., Sage, J., Backe, G. and Hand, M., 2014. Remote sensing of subsurface fractures in the Otway Basin, South Australia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(8), pp.6591-6612.

Barnes, A.E. ed., 2016. *Handbook of poststack seismic attributes*. Society of Exploration Geophysicists.

Brunet, M.F., Korotaev, M.V., Ershov, A.V. and Nikishin, A.M., 2003. The South Caspian Basin: a review of its evolution from subsidence modelling. *Sedimentary Geology*, 159(1-4), pp.119-148.

Buryakovskiy, L., Aminzadeh, F. and Chilingarian, G.V., 2001. *Petroleum geology of the south Caspian Basin*. Elsevier.

Chahine, C., Truelove, L. and Volcan, M.H., 2014. Enhanced delineation of reservoir compartmentalization from advanced preand post-stack seismic attribute analysis. *First break*, 32(3).

Chopra, S. and Marfurt, K.J., 2007. *Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization*. Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers.

Das, B., Chatterjee, R., Singha, D.K. and Kumar, R., 2017. Post-stack seismic inversion and attribute analysis in shallow offshore of Krishna-Godavari basin, India. *Journal of the Geological Society of India*, 9(1), pp.32-40.

Dewett, D.T. and Henza, A.A., 2016. Spectral similarity fault enhancement: Interpretation, 6. *SB 149-SB 159*, <http://doi.org/10.1190/INT-2015-0114.1>.

Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press.

Gersztenkorn, A. and Marfurt, K.J., 1999. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping. *Geophysics*, 64(8), pp.1468-1479.

GFZ (Deutsches GeoForschungs Zentrum), 2011. available online at: http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/pub/stress_data/stress_data_frame.html

Hamidi, R. and Ghosh, D., 2019, March. Seismic Attribute Feasibility Study for Fault and Fracture Analysis and Integration with Spectral Decomposition: Application in Sarawak Basin. In *International Petroleum Technology Conference*. International Petroleum Technology Conference.

Hollingsworth, J., Nazari, H., Ritz, J.F., Salamati, R., Talebian, M., Bahroudi, A., Walker, R.T., Rizza, M. and Jackson, J., ۲۰۱۰. Active tectonics of the east Alborz mountains, NE Iran: Rupture of the left-lateral Astaneh fault system during the great ۸۵۶ AD Qumis earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, ۱۱۵(B۱۲).

Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R. and Nazari, H., ۲۰۰۸. Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since ۱۰ Ma. *Geology*, ۳۶(۱۰), pp.۷۶۳-۷۶۶.

Hunt, L., Beshry, B., Chopra, S. and Webster, C., ۲۰۱۸. Determination of target-oriented parameters for computation of curvature attributes. *Interpretation*, ۶(۲), pp.T۴۸۰-T۴۹۸.

Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. and Berberian, M., ۲۰۰۲. Active tectonics of the south Caspian basin. *Geophysical Journal International*, ۱۴۸(۲), pp.۲۱۴-۲۴۵.

Jacquemin, P. and Mallet, J.L., ۲۰۰۵. Automatic faults extraction using double hough transform. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts ۲۰۰۵* (pp. ۷۵۵-۷۵۸). Society of Exploration Geophysicists.

Kavoosi, M.A., ۲۰۱۶. Depositional systems and sequence stratigraphy analysis of the Upper Callovian to Tithonian sediments in the Central and Western Kopet-Dagh Basin, Northeast Iran. *Geological Journal*, ۵۱(۴), pp.۵۲۳-۵۴۴.

Kavoosi, M.A., Lasemi, Y., Sherhati, S. and Moussavi-Harami, R., ۲۰۰۹. Facies analysis and depositional sequences of the Upper Jurassic Mozduran Formation, a carbonate reservoir in the Kopet Dagh Basin, NE Iran. *Journal of Petroleum Geology*, ۳۲(۳), pp.۲۳۵-۲۵۹.

Koson, S., Chenrai, P. and Choowong, M., 2014. Seismic attributes and their applications in seismic geomorphology. *Bulletin of Earth Sciences of Thailand*, 4(1), pp.1-9.

Lawal, A., Al-Dharrab, S., Deriche, M., Alregib, G. and Amir Shafiq, M., 2016. Fault detection using seismic attributes and visual saliency. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016* (pp. 1939-1943). Society of Exploration Geophysicists.

Libak, A., Alaei, B. and Torabi, A., 2017. Fault visualization and identification in fault seismic attribute volumes: Implications for fault geometric characterization. *Interpretation*, 4(2), pp.B1-B16.

Li, F. and Lu, W., 2014. Coherence attribute at different spectral scales. *Interpretation*, 2(1), pp.SA99-SA106.

Liu, N., Li, Z., Sun, F., Li, F. and Gao, J., 2020. Seismic geologic structure characterization using a high-order spectrum-coherence attribute. *Interpretation*, 4(2), pp.T391-T401.

Lyu, B., Qi, J., Sinha, S., Li, J. and Marfurt, K.J., 2020. Improving fault delineation using maximum entropy multispectral coherence. *Interpretation*, 4(4), pp.T835-T840.

Marfurt, K.J., Kirilin, R.L., Farmer, S.L. and Bahorich, M.S., 1998. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm. *Geophysics*, 63(4), pp.1150-1165.

Nemati, M., Hollingsworth, J., Zhan, Z., Bolourchi, M.J. and Talebian, M., ۲۰۱۳. Microseismicity and seismotectonics of the South Caspian Lowlands, NE Iran. *Geophysical Journal International*, ۱۹۲(۳), pp.۱۰۵۳-۱۰۷۰.

Odoh, B.I., Ilechukwu, J.N. and Okoli, N.I., ۲۰۱۴. The use of seismic attributes to enhance fault interpretation of OT field, Niger delta. *International Journal of Geosciences*, ۲۰۱۴.

Onajite, E., ۲۰۱۳. *Seismic data analysis techniques in hydrocarbon exploration*. Elsevier.

Pigott, J.D., Kang, M.H. and Han, H.C., ۲۰۱۳. First order seismic attributes for clastic seismic facies interpretation: Examples from the East China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, ۶۶, pp.۳۴-۵۴.

Radfar, A., Chakdel, A.R., Nejati, A. and Soleimani, M., ۲۰۱۹. New insights into the structure of the South Caspian Basin from seismic reflection data, Gorgan Plain, Iran. *International Journal of Earth Sciences*, ۱۰۸(۲), pp.۳۷۹-۴۰۲.

Randen, T., Pedersen, S.I. and Sønneland, L., ۲۰۰۱. Automatic extraction of fault surfaces from three-dimensional seismic data. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts ۲۰۰۱* (pp. ۵۵۱-۵۵۴). Society of Exploration Geophysicists.

Rezaei, A. and Mousavi, Z., ۲۰۱۹. Characterization of land deformation, hydraulic head, and aquifer properties of the Gorgan confined aquifer, Iran, from InSAR observations. *Journal of Hydrology*, ۵۷۹, p.۱۲۴۱۹۶.

Rezvandehy, M., Aghababaei, H. and Raissi, S.T., ۲۰۱۱. Integrating seismic attributes in the accurate modeling of geological structures and determining the storage of the gas reservoir in Gorgan Plain (North of Iran). *Journal of applied geophysics*, ۷۳(۳), pp.۱۸۷-۱۹۵.

Robert, A.M., Letouzey, J., Kavooosi, M.A., Sherkati, S., Müller, C., Vergés, J. and Aghababaei, A., ۲۰۱۴. Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin. *Marine and Petroleum Geology*, ۵۷, pp.۶۸-۸۷.

Roberts, A., ۲۰۰۱. Curvature attributes and their application to ۳D interpreted horizons. *First break*, ۱۹(۲), pp.۸۵-۱۰۰.

Schneider, S., Eichkitz, C.G., Schreilechner, M.G. and Davis, J.C., ۲۰۱۶. Interpretation of fractured zones using seismic attributes—Case study from Teapot Dome, Wyoming, USA. *Interpretation*, ۴(۲), pp.T۲۴۹-T۲۶۰.

Soleimani, M., Aghajani, H. and Heydari-Nejad, S., ۲۰۱۸. Structure of giant buried mud volcanoes in the South Caspian Basin: Enhanced seismic image and field gravity data by using normalized full gradient method. *Interpretation*, ۶(۴), pp.T۸۶۱-T۸۷۲.

Soleimani, M. and Rafiei, M., ۲۰۱۶. Imaging seismic data in complex structures by introducing the partial diffraction surface stack method. *Studia Geophysica et Geodaetica*, ۶۰(۴), pp.۶۴۴-۶۶۱.

STOCKLIN, J., ۱۹۷۷. Structural correlation of the Alpine ranges between Iran and Central Asia.

Stöcklin, J., ۱۹۷۴. Possible ancient continental margins in Iran. In *The geology of continental margins* (pp. ۸۷۳-۸۸۷). Springer, Berlin, Heidelberg.

Tabatabaee, S. H., Ghorori, M. H., Pourreza, S., and Aiobi, M., June ۲۰۰۳. Review Interpretation of Gravity surve in Gorgan Area.

Taheri, J., Fürsich, F.T. and Wilmsen, M., ۲۰۰۹. Stratigraphy, depositional environments and geodynamic significance of the Upper Bajocian–Bathonian Kashafrud Formation, NE Iran. *Geological Society, London, Special Publications*, ۳۱۲(۱), pp.۲۰۵-۲۱۸.

Taner, M.T., ۲۰۰۱. Seismic attributes. *CSEG recorder*, ۲۹(۷), pp.۴۹-۵۶.

Tingdahl, K.M. and De Rooij, M., ۲۰۰۵. Semi-automatic detection of faults in ۳D seismic data. *Geophysical prospecting*, ۵۲(۴), pp.۵۳۳-۵۴۲.

Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M.R. and Sabouri, J., ۲۰۰۶. Inversion tectonics in central Alborz, Iran. *Journal of Structural Geology*, ۲۸(۱۱), pp.۲۰۲۳-۲۰۳۷.

Zheng, W. and Ma, J., ۲۰۱۸, November. Automatic Fault Detection for ۳D Seismic Data Based on the Seismic Coherence of Mutative Scale Analysis Window. In *International Conference on Intelligence Science* (pp. ۳۹۱-۴۰۰). Springer, Cham.

Abstract

Since fault has great significances for the trapping and migration of hydrocarbon resources, fault detection is one of the most important components of seismic interpretation in petroleum exploration. Traditionally, Fault interpretation is done by inspecting seismic sections and time slices by interpreter. This method is subjective and also time consuming. Afterwards, because of noise effect and also weak reflections, fault pattern visualization and

detection on the seismic data is a sensitive task and challenging problem. Therefore, using seismic attributes for this problem has been widely developed in recent decades. Gorgan plain in the north of Iran is an unknown region about hydrocarbon exploration and a few researches have been done in this area. In this thesis a research has been done about delineating the fault pattern in the seismic data acquired on this region. The research method is based on using some appropriate seismic attributes in fault detection. The most of appropriate attributes for fault detection are based on discontinuity and dissimilarity along reflectors on seismic data. Several attributes were tested and finally four attributes were selected for the purpose of research. These attributes are variance, amplitude contrast, chaos and similarity. The attributes analysis has been done on five 2D seismic lines. The results have shown that the variance attribute has a superior efficiency in fault pattern visualization and the weakest results have been provided by chaos attribute. Afterwards, in this research, a structural model using existing information about subsurface formations and also by picking reflectors on seismic data has been provided which the detected fault patterns by seismic attributes have been shown in this model.

Keywords: seismic attributes, Gorgan plain, fault pattern, structural model



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc Thesis in Petroleum Exploration Engineering

Fault pattern visualization on Gorgan plain data using seismic attributes

By:

Meysam Haghani

Supervisors:

Dr. Mohammad Radad

Dr. Ali Nejati Kalateh

Advisor:

Dr. Mehrdad Soleimani Monfared

January, ۲۰۲۱