

# تلفیق نشانگرهای لرزه‌ای و شبکه‌های عصبی در شناسایی سامانه‌های گسلی در منطقه تنگه هرمز

مریم السادات میرکمالی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا رمضی<sup>۲</sup>، محمدرضا بختیاری<sup>۳</sup> و هاله رامش<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دکتر، اداره ژئوفیزیک، مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، اداره ژئوفیزیک، مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۱۸

## چکیده

در این مطالعه به شناسایی سامانه‌های گسلی تنگه هرمز با استفاده از تلفیق نشانگرهای لرزه‌ای و شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداخته شده است. گسل‌ها و شکستگی‌ها نقش مهمی در ایجاد منطقه‌هایی با تخلخل و تراوایی زیاد ایفا می‌کنند. همچنین آنها در مسیرهای مهاجرت سیال سنگ مخزن و پوش سنگ را قطع می‌کنند. در منطقه تنگه هرمز فعالیت‌های زمین‌ساختی شدید و زمین‌ساخت نمک منجر به تشکیل ساختارهای پیچیده شده است. بنابراین شناسایی دقیق گسل‌ها و منطقه‌های شکستگی و چگونگی گسترش آنها در افزایش تولید از تله‌های نفتی، اهمیت خاصی دارد. در شناسایی چگونگی گسترش و حرکت گسل‌ها در منطقه تنگه هرمز (بخش خاوری خلیج فارس) درون سازندهای میشان، آغاچاری و در زیر افق دگرشیبی قاعده گوری، روش مدل‌سازی ساختمانی (Image processing) و تجسم‌گرایی (visualization) تفسیر لرزه‌ای به کار گرفته شده است. در این روش بر پایه ترکیب نشانگرهای ورودی در سامانه شبکه عصبی مصنوعی و ایجاد نشانگرهای جدید، تصویر ساختمانی مناطق گسلی به دست آمده است. ابتدا مجموعه‌ای از نشانگرهای پیشرفته به منظور تلفیق نشانگرهای محاسبه شده در نقاط تفسیری گسلی و غیرگسلی، به عنوان ورودی به سامانه شبکه عصبی تحت نظر برای آموزش معرفی شده‌اند. در پایان مکعب گسلی به عنوان ابزار قوی اکتشافی برای شناسایی دقیق سامانه گسلی و تشخیص بهتر گسل‌ها و شکستگی‌ها، در مدل‌سازی کیفی منطقه به دست آمده است. همبستگی (correlation) بالای میان گسل‌ها در مکعب گسلی، در نتیجه به کارگیری نشانگرهای ترکیبی، امکان ردگیری (tracking) دقیق تر و معتبر تر گسترش گسل‌ها را فراهم می‌کند. در نتیجه این پژوهش، سه نوع سامانه گسلی در منطقه مورد مطالعه شناسایی شده‌اند که در نتیجه زمین‌ساخت کششی و فشارشی کوهزایی عمان یا حرکات زمین‌ساخت عمودی کوهزایی زاگرس و جریان نمک در طی رسوب‌گذاری به وجود آمده‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** گسل، نشانگر لرزه‌ای، شبکه عصبی، تنگه هرمز، خلیج فارس.

\*نویسنده مسئول: مریم السادات میرکمالی

E-mail: m.s.mirkamali@aut.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

موفقیت در اکتشاف و گسترش میدان‌های هیدروکربنی، مستلزم شناسایی دقیق سامانه نفتی منطقه است و در این راستا یکی از مهم‌ترین مسائل شناسایی گسل‌ها و چگونگی گسترش آنها، به عنوان مجرای اصلی مهاجرت سیال، به‌ویژه در نواحی ژرف‌تر است (Ligtenberg, 2005). از این رو تشخیص سامانه گسلی نقش مهمی در شناسایی مسیر مهاجرت، تجمع هیدروکربن، متغیرهای مخزنی، درزگیری و نشست‌داری گسل‌ها و عملکرد آنها در حفظ یا تخریب مخزن نفتی، تعیین محل دقیق چاه‌ها و نیز در افزایش توانایی تولید در میدان‌های نفتی ایفا می‌کند (Meldahl et al., 1999; Meldahl et al., 2001; Aminzadeh & Connolly, 2002; Ligtenberg, 2005). زمین‌ساخت فعال کرتاسه بالایی، ترشیری پایینی و میوسن در حوضه رسوبی تنگه هرمز با حضور سامانه‌های مختلف گسلی همراه است. با توجه به اهمیت اقتصادی تنگه هرمز از دیدگاه حضور ذخایر هیدروکربنی و خواص مخزنی سازند اینترامیشن میوسن میانی، شناسایی سامانه گسلی دید بهتری از سامانه نفتی منطقه فراهم می‌کند (Alsouki et al., 2008).

معمولاً در شناسایی گسل‌ها بر پایه تفسیر نشانگرها، از متغیر پیوستگی (continuity) استفاده می‌شود. مکعب‌های همدوسی (coherency) لبه‌های بازتابنده‌ها را مشخص و گسل‌ها را از اطرافشان متمایز می‌کنند (Bahorich & Farmer, 1995; Tingdahl & Rooij, 2005). (Tingdahl & Rooij, 2005). با استفاده از تفسیر نشانگرهای لرزه‌ای و نتایج چاه‌ها، مدل زمین‌ساختی ساختارهای پیچیده تنگه هرمز را ارائه کردند. در صورتی که داده لرزه‌ای دارای کیفیت خوب و یا گسل اصلی در مقطع لرزه‌ای موجود نباشد، کاربرد چند نشانگر خاص کافی نیست و تنها عده کمی از

شناسایی گسل‌ها دست یافتند. انتخاب نشانگرهای مناسب و مرتبط در استفاده از شبکه‌های عصبی اهمیت بسزایی دارد؛ به‌طوری که نتایج معتبر و قابل اطمینانی را ارائه می‌دهد. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از انتخاب ورودی‌های مناسب و روش‌های نظارت شده شبکه عصبی از یک شبکه مؤثر و کارآمد در تشخیص سامانه گسلی منتج از عملکرد زمین‌ساختی شدید و پیچیده استفاده شود. با کاربرد تصویرسازی ساختمانی و تجسم‌گرایی تفسیر لرزه‌ای می‌توان گسل‌های عادی و وارون متأثر از حرکات کششی و فشارشی رویدادهای زمین‌ساختی عمان و زاگرس و حرکت رو به بالای

هدایت شیب (dip steering) استفاده شده است. شکل ۲ مقطع لرزه‌ای داده‌های فیلتر شده را روی خط طولی خاوری - باختری نشان می‌دهد.

برای مقایسه توانایی شناسایی گسل‌ها توسط مطالعه نشانگرهای ترکیبی در برابر نشانگرهای منفرد، ابتدا روی مکعب لرزه‌ای، مجموعه‌ای از نشانگرهای یک و یا چند ردلرزه‌ای دارای پتانسیل افزایش توان تقابل میان گسل و زمینه به صورت جداگانه محاسبه شدند. در این مرحله نشانگرهای مختلف به صورت سعی و خطا در بازه‌های مرتبط متفاوت برای تطابق اندازه، جهت و گسترش گسل‌ها پردازش و مجموعه‌ای از بهترین آنها با متغیرهای خاص خود و با بیشترین کارایی در شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها انتخاب می‌شوند. مجموعه نشانگرهایی شامل انرژی (energy) در بازه‌های زمانی مختلف، واریانس شیب (dip variance) در فواصل مختلف، تشابه (similarity) در جهات و فواصل مختلف و مجذور بسامد میانگین (average frequency squared) برای سامانه شبکه عصبی در این روش به کار برده شده‌اند. سپس در محل‌های تفسیر شده روی مقطع لرزه‌ای، با دقت دو سری نقاط مشخصه گسلی و غیرگسلی به تعداد مساوی، به صورت دستی برای آموزش شبکه عصبی انتخاب شدند. در شکل ۳ برخی محل‌های تفسیر شده گسلی روی مقطع لرزه‌ای با نقاط سفید رنگ و زمینه با نقاط سیاه مشخص شده‌اند.

در مرحله بعد، گروه نشانگرها به منظور محاسبه نشانگرهای اولیه در نقاط مشخصه و تلفیق آنها و در نتیجه به دست آوردن گروه نشانگرهای جدید، به عنوان لایه ورودی به شبکه عصبی نظارت شده معرفی می‌شوند. فرایند شبکه عصبی روی نشانگرهای مرتبط در نمونه‌های گسلی و غیرگسلی آموزش داده می‌شوند تا با تطبیق وزن‌های مرتبط با گره‌ها، خطای میان نتایج برآورد شبکه و خروجی واقعی به کمترین مقدار برسد. در مرحله آموزش شبکه عصبی، ۳۰٪ داده‌ها برای مجموعه آزمایشی و ۷۰٪ داده‌ها برای مجموعه آموزشی تقسیم شدند. مجموعه آزمایشی به تعیین نقطه بهینه برای توقف مرحله آموزش کمک می‌کند در حالی که از مجموعه آموزشی برای یافتن زمان بهینه آموزش شبکه استفاده می‌شود (Aminzadeh & de Groot, 2004). شبکه عصبی وزن‌های متفاوتی را به نشانگرهای مختلف در نقاط مشخصه نسبت می‌دهد. هر یک از نشانگرها بر پایه وزنی که شبکه به آنها می‌دهد، دارای اهمیت هستند (Aminzadeh et al., 2002). هنگامی که خطا در مجموعه آزمایشی به کمترین مقدار برسد، آموزش متوقف می‌شود. همچنین میزان خطا باید در هر دو مجموعه کمترین باشد. پس از آموزش، شبکه عصبی آموزش دیده دو نشانگر خروجی گسلی و غیرگسلی را که روی همه داده‌ها نگاشته شده‌اند، محاسبه می‌کند. در مکعب گسلی احتمال وجود گسل برای هر نمونه در گسل و زمینه، مقادیر میان یک (احتمال بالای گسل) تا صفر (احتمال پایین گسل) دارد (Meldahl et al., 1999; Ligtnerberg, 2005; Bakhtiari et al., 2009). در این مطالعه، انواع نشانگرهای مرتبط با وزن‌های متفاوت که به خروجی با احتمال بالای گسل منجر می‌شوند، بررسی شدند و با روش پلکانی و بهینه کردن متغیرهای اطلاعات، سامانه شبکه عصبی مناسبی طراحی شد.

#### ۴- نشانگرهای لرزه‌ای

با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای استخراجی از توابع ریاضی مشتق شده از داده‌های لرزه‌ای (Brown, 2001)، ویژگی‌های بیشتر ذاتی ردلرزه‌ای از دید کیفی (پیش‌بینی سنگ‌شناسی) و کمی (پیش‌بینی پتروفیزیکی) تجزیه و تحلیل می‌شوند و تجسم‌گرایی تفسیر لرزه‌ای برای شناسایی پدیده‌ها افزایش می‌یابد. بدین ترتیب پدیده‌های زمین‌شناسی به سبب تفاوت در پاسخ لرزه‌ای متفاوت با زمینه‌شان، که بر کیفیت داده‌های لرزه‌ای تأثیر می‌گذارند، با استفاده از نشانگرهای مختلف توصیف روشنی می‌یابند. اگر چه نشانگرهای لرزه‌ای به پدیده زمین‌شناسی خاصی حساس نیستند (Meldahl et al., 2001). دامنه داده‌های لرزه‌ای عامل اصلی برای تعیین

نمک هرمز کامبرین را درون سازندهای میشان، آغاچاری و در زیر افق دگرشیبی قاعده گوری، در تنگه هرمز تعیین کرد.

#### ۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش خاوری خلیج فارس، در جنوب خاوری جزیره لارک در تنگه هرمز - حد فاصل خلیج فارس و دریای عمان - قرار دارد (شکل ۱ - الف). منطقه تنگه هرمز در محل تلاقی چندین ایالت زمین‌شناسی، که کمربند چین‌خورده زاگرس در شمال باختری، سکوی عربی در جنوب باختری، حوضه مکران در شمال خاوری، کوه‌های عمان و شبه جزیره مسندام در جنوب خاوری است قرار گرفته است. رویدادهای زمین‌ساختی عمان (کرتاسه بالایی و پالئوسن زیرین) (شکل ۱ - ب) و زاگرس (الیگوسن - میوسن زیرین) در حرکت روبه بالای نمک هرمز کامبرین و به ترتیب در ساختار بالای دگرشیبی تورونین یا افق بنگستان و دگرشیبی گوری تأثیر زیادی گذاشته است (Alsouki et al., 2008; Alsouki, 2008). چین‌خوردگی و راندگی در زیر سطح ناپیوستگی قاعده گوری نشان از عملکرد ساخت فشارشی کوهزایی عمان و مراحل اولیه فاز کوهزایی زاگرس (میوسن زیرین) و در نتیجه وارون‌شدگی زمین‌ساختی از مرحله کششی به فشارشی دارد. بالا آمدن نمک هرمز کامبرین سبب تشکیل ساختارهای ریزشی و لغزشی در مجاورت ساختارهای اصلی مرتبط با نمک، در طی رسوب‌گذاری سازندهای میشان (میوسن میانی) و آغاچاری (میوسن بالایی) ناشی از کوهزایی زاگرس شده است (Alsouki, 2008). همزمان با رسوب‌گذاری سازندهای گورپی تا پابده (کرتاسه بالایی و پالئوسن زیرین)، به علت وجود کشش در منطقه، رسوبات درون ساختارهای نیمه‌فروزمینی تشکیل شده‌اند. افزون بر این تأثیر کوهزایی عمان، به صورت چین‌های فشرده در بازتابنده‌های سازند گورپی ظاهر شده است. بررسی‌های ناحیه‌ای نشان‌دهنده حضور فرازمین مسندام در خاور منطقه و رسوب‌گذاری این مجموعه در باختر این فرازمین درون حوضه نیمه‌فروزمینی است. ساختارهای فرازمین و فروزمین حاصل از حرکات زمین‌ساختی این فرازمین با روند ساختاری شمال خاوری - جنوب باختری و گسل‌های عادی و راندگی به موازات همین روند وجود دارد. محدوده خاوری حوضه نیمه‌فروزمینی با شیب حوضه به سوی خاور را، گسل زندان با روند شمالی - جنوبی مشخص می‌کند. تحت تأثیر فاز چین‌خوردگی صفحه عربی با صفحه اوراسیا (الیگوسن) و گسترش آن به سوی جنوب خاوری در منطقه (میوسن زیرین)، دگرشیبی مهمی در بخش گوری (میوسن میانی) قاعده سازند میشان ایجاد شده است. حرکات زمین‌ساختی گسل امتدادلغز زندان در حوضه رسوبی زاگرس، سبب فرونشست تدریجی این حوضه نیمه‌فروزمینی به سوی شمال خاوری شده است. در دو فرازمین گسل‌خورده در بخش مرکزی و باختری تنگه هرمز، ساختمان باختری به علت نفوذ نمک هرمز پیچیدگی‌های خاصی دارد و دو جزیره هرمز و لارک در سطح زمین ظاهر شده‌اند (Alsouki, 2008).

#### ۳- روش کار

نتایج این مطالعه بر پایه تفسیر داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی با نسخه پردازشی PSTM-TMA، که میان خطوط طولی لرزه‌ای ۳۶۰۰-۲۷۰۰ و خطوط عرضی ۶۸۰۰-۵۳۰۰ و فاصله زمانی ۲۶۰۰ - ۰ میلی‌ثانیه و به مساحت تقریبی ۱۵۰ کیلومتر مربع واقع شده به دست آمده است. برای افزایش کیفیت داده‌ها، کاهش نوفه و بهبود ناپیوستگی لرزه‌ای نشانگرها، فیلترهای مختلفی به کار برده می‌شود (Barnes, 2006; Chopra & Marfurt, 2007). فیلتر جهت‌دار ساختمانی روی داده‌های لرزه‌ای و فیلترهای تقویت تصویر روی نتایج نشانگرها اعمال شده‌اند. متغیرهای ریاضی فیلتر تقویت بر پایه شیب، امتداد، موقعیت و حد جدایش ناپیوستگی‌های لرزه‌ای محاسبه شد. برای بهبود نتایج پایانی، در محاسبات نشانگرهای چند ردلرزه‌ای از مکعب

به‌طور کلی کیفیت داده‌ها در این مکعب لرزه‌ای به‌نسبت خوب ارزیابی می‌شود. با این وجود، محتوای بسامدی (شکل ۴-۴) و پیوستگی بازتابنده‌های قوی (شکل‌های ۲ و ۵) در افق‌های پایینی/گورپی/پایده، در پهنه‌های نامنظم، به‌دلیل زمین‌ساخت شدید و پیچیده تا حدودی ضعیف می‌شود. به‌طوری که محوشدگی بازتابندگی و بی‌نظمی زیاد سطوح بازتابی (شکل ۵-۵)، توزیع ناهمسان بسامد (شکل ۴-۴) و ناهمگنی بالای تشابه (شکل ۶-۶) به‌همراه تغییرات ناگهانی میان کمترین و بیشترین مقادیر شیب (شکل ۷-۷) این مناطق را به‌خوبی نشان می‌دهد.

محتوای بسامدی همسان (شکل ۴)، همگنی بالای تشابه (شکل ۶) و کمترین مقادیر شیب (شکل ۷) در امتداد بازتابنده‌ها و دور از نواحی گسلی و شکستگی‌ها (شکل ۵) مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه سطح دگرشیبی قاعده گوری دارای اختلاف (کنتراست) مقاومت صوتی بالایی است، دامنه قوی (شکل ۲) و به دنبال آن انرژی (شکل ۵) نیز افزایش می‌یابد. پیگیری افق گوری در سرتاسر مقطع لرزه‌ای تقریباً امکان‌پذیر است. تغییرات زمانی میان افق گوری و میشان از ۱۲۲۰ میلی‌ثانیه در سوی باختری تا ۱۶۳۰ میلی‌ثانیه در سوی خاوری است. سازند میشان به‌صورت همشیب روی بخش زیرین آن -گوری- قرار دارد و ردگیری افق اینترامیشان درون این سازند امکان‌پذیر است. افق میشان با همبری عادی در زیر سازند آغاچاری قرار دارد و لایه‌های سازند آغاچاری نیز کم‌وبیش هندسه مشابهی با لایه‌های مختلف در افق میشان دارند.

در نتیجه تغییرات فاصله‌ای سریع، بسامد محلی (شکل‌های ۴-۴، B و C) در امتداد گسل سریع‌تر از بازتابنده‌ها تغییر می‌کند. انرژی (شکل‌های ۵-۵، B و C) در نواحی گسلی و شکستگی بسیار کمتر از پیرامون آن است؛ به این علت که در این نواحی جذب یا پاشش انرژی لرزه‌ای بیشتر و با کاهش دامنه، انرژی کم می‌شود. گسل‌ها و شکستگی‌ها مانند ناپیوستگی‌هایی در داده‌ها رفتار می‌کنند که پاسخ ضعیفی به تشابه نشان داده‌اند (شکل‌های ۶-۶، B و C)، به‌طوری که در محل گسل‌ها بیشترین ناهمگنی وجود دارد و در لبه گسل‌ها به‌نسبت ناهمگن خواهد بود. در این نواحی به‌سبب شیب زیادتر در مقایسه با پیرامون آنها، شیب قطبی (شکل‌های ۷-۷، B و C) بیشترین مقدار را نشان می‌دهد.

نبود ساختارهای چین‌خورده و رانده (شکل‌های ۵ و ۶) نشان‌دهنده رسوب‌گذاری سازنده‌های میشان و آغاچاری در محیط‌های رسوبی دریایی است. هندسه بازتابنده‌های سازنده‌های گورپی و پایده و تغییرات جانبی ستبرا (شکل ۵-۵) در نتیجه عملکرد زمین‌ساخت کششی همزمان با رسوب‌گذاری این سازنده‌ها در منطقه مورد مطالعه بوده است. تشکیل چین‌های فشرده در لایه‌های سازند گورپی نشان از عملکرد زمین‌ساخت فشارشی دارد. انقطاع بازتابنده‌ها در زیر سطح دگرشیبی قاعده گوری (شکل‌های ۲ و ۵-۵) در نتیجه فرسایش شدید لایه‌های چین‌خورده بالایی است.

#### ۵-۲. شبکه عصبی

برای بهبود نتایج، از تلفیق نشانگرهای منفرد برای بالا بردن دقت نگاهت گسل‌ها و افزایش تقابل میان گسل‌ها و شکستگی‌های بازمینه در مکعب احتمال گسلی با روش شبکه عصبی استفاده شده است. شکل ۸ نشانگرهای به‌کار رفته در شبکه عصبی را برای ایجاد مکعب گسلی نشان می‌دهد. تعداد نشانگرهای تشابه استفاده شده در چند نشانگر در مقایسه با نشانگرهای دیگر بیشتر است که به‌عنوان یک ابزار قوی در یافتن گسل‌ها و شکستگی‌ها معرفی می‌شود.

مکعب احتمال گسلی (شکل ۹) به‌گونه قابل قبولی در مقایسه با نشانگرهای منفرد، به انواع مختلف ویژگی‌های گسل‌ها، شکستگی‌ها و لایه‌های زمین‌شناسی حساسیت دارد. در این مکعب پیوستگی میان گسل‌ها و شکستگی‌ها و تقابل میان آنها و زمینه افزایش یافته است. به‌طوری که گسل‌ها و شکستگی‌های با پیوستگی بیشتر، نوفه کمتر و نگاهت دقیق‌تر نمایش داده شده‌اند.

شکل ۹ به‌ترتیب مقطعی از مکعب گسلی و برش زمانی ۱۴۹۰ میلی‌ثانیه را

ویژگی‌های فیزیکی همچون مقاومت صوتی، ضرایب بازتاب، سرعت و جذب است، در حالی که مؤلفه فاز داده‌های لرزه‌ای نقش مهمی در تعیین شکل و موقعیت هندسی ساختمان‌های زمین‌شناسی ایفا می‌کند (Taner et al., 1994).

تغییرات فضایی خواص چینه‌شناسی سنگ و سیال، تغییر متغیرهای هندسی و فیزیکی نشانگرها را نتیجه می‌دهد (Taner et al., 1994; Chopra & Marfurt, 2007; Chao et al., 2009). نشانگرهای هندسی برای تفسیر چینه‌ای، ساختمانی و گسل‌ها با هدف افزایش دید و وجه هندسی، شکل و موقعیت پدیده‌های بازتابی به‌کار برده می‌شوند (Taner et al., 1994). از آنجا که نشانگرهای هندسی به تغییرات جانبی در شیب، آزیموت، پیوستگی، تشابه، انحنا و انرژی حساسیت دارند، به‌طور معمول در بازه‌های زمانی محاسبه می‌شوند (Chopra & Marfurt, 2007). اندازه بازه عامل کنترل‌کننده‌ای در قدرت جدایش نشانگرهای محاسباتی است. با توجه به کیفیت داده‌ها، بازه‌های خیلی کوچک نشانگرهای آلوده به نوفه و پنجره‌های خیلی بزرگ نشانگرهای بیش از حد هموار با جزئیات کم را نتیجه می‌دهند (Chopra & Marfurt, 2007; McClymont et al., 2008; Chao et al., 2009). سوی دیگر نشانگرهای فیزیکی همچون دامنه، فاز و بسامد لحظه‌ای در مورد معنای فیزیکی انتشار موج و برای تفسیر ویژگی‌های مخزن، سنگ‌شناسی، پتروفیزیکی و وجود هیدروکربن به‌کار می‌روند (Taner et al., 1994; Hashemi et al., 2008).

#### ۴-۱. مجذور بسامد میانگین

بیانگر متوسط مربعات دامنه وزن داده شده بسامد است. به‌طور کلی گسل‌ها دارای تغییرات عمودی با شیب بیشتری نسبت به بازتابنده‌ها هستند و تغییرات سریع‌تر پاسخ لرزه‌ای در امتداد صفحه گسل نسبت به بازتابنده‌ها، بر پاسخ بسامد محلی مؤثر خواهد بود (Tingdahl & Rooij, 2005). شکل ۴ مقطع نشانگر مجذور بسامد میانگین را روی خط طولی نشان می‌دهد.

#### ۴-۲. انرژی

انرژی در هر نمونه زمانی به‌صورت توان دوم دامنه موج لرزه‌ای در یک بازه زمانی مشخص بیان می‌شود (Tingdahl & Rooij, 2005) که بیانگر میزان یکنواختی بافت در یک بازتاب لرزه‌ای و در تعیین بی‌هنجاری‌های دامنه و قدرت بازتاب و تشخیص پیوستگی و هندسه بازتابنده‌ها سودمند باشد (West et al., 2002; Chopra & Marfurt, 2007). شکل ۵ مقطع نشانگر انرژی را روی خط طولی نشان می‌دهد.

#### ۴-۳. تشابه

تشابه کمیتی است که میزان همانندی اجزای دو ردلرزه با یکدیگر را تعیین می‌کند که نه تنها به شکل موج، بلکه به تفاضل دامنه‌ها نیز حساس است (Tingdahl et al., 2001; Tingdahl & Rooij, 2005). مقدار تشابه برای همه زوج ردلرزه‌های محتمل در هر نمونه زمانی و در زمان‌های مختلف بر پایه فاصله اقلیدسی به‌نجارشده محاسبه می‌شود (Aminzadeh et al., 2002). اندازه تشابه، مقادیری از صفر (عدم تشابه دو ردلرزه) تا یک (تساوی دو ردلرزه) را به دست می‌دهد (Tingdahl et al., 2001). شکل ۶ مقطع نشانگر تشابه را روی خط طولی نشان می‌دهد.

#### ۴-۴. شیب قطبی

معمولاً در محل گسل‌ها شیب شدیدتر از مناطق دیگر است. این ویژگی توسط محاسبه شیب در محل هر نمونه لرزه‌ای نمایش داده می‌شود. شیب قطبی، ریشه مربعی مجموع مربعات شیب طولی و عرضی است که شیب‌های مکعب هدایت شیب، در دو جهت طولی و عرضی به شیب حقیقی تبدیل می‌شود (Tingdahl & Rooij, 2005). شکل ۷ مقطع نشانگر شیب قطبی را روی خط طولی نشان می‌دهد.

#### ۵-۱. بحث

#### ۵-۱.۱. نشانگرهای لرزه‌ای

بررسی مقطع لرزه‌ای (شکل ۲) و نتایج نشانگرهای منفرد نشان‌دهنده این است که

در سازند میشان در مقایسه با ابعاد کوچک تر آنها در سازند آغاچاری نشان از شدت به نسبت بالای رشد ساختارهای مرتبط با نمک هرمز در طی رسوب گذاری سازند میشان دارد.

### ۶- نتیجه گیری

بر پایه روش نگاهت ساختمانی و تجسم گرایایی تفسیر لرزه‌ای، شناسایی سامانه گسلی سازندهای میشان، آغاچاری و در زیر افق دگرشیبی قاعده گوری تنگه هرمز (بخش خاوری خلیج فارس) امکان پذیر است. برای بالا بردن کیفیت تصویر سازی در مدل سازی ساختمانی منطقه، از ترکیب مجموعه نشانگرهای پیشرفته با به کارگیری فناوری شبکه عصبی در مکعب گسلی استفاده می شود. به طور کلی سه سامانه مختلف گسلی در منطقه مورد مطالعه در ارتباط با زمین ساخت کششی و فشارشی کوهزایی عمان و حرکات عمودی کوهزایی زاگرس و حرکت رو به بالای نمک هرمز فعال بوده‌اند که عملکرد آنها در زمان‌های مختلف سبب به وجود آمدن ساختارهای پیچیده شده است.

گسل‌های نوع اول از نوع وارون با جابه‌جایی بزرگ دارای روند شمال خاوری-جنوب باختری هستند که در نتیجه حرکات زمین ساختی فزاینده مسندام و رسوب گذاری در حوضه‌های نیمه فروزمینی ایجاد شده‌اند.

گسل‌های نوع دوم از نوع عادی و امتداد لغز با جابه‌جایی کوچک دارای روند شمالی-جنوبی متمایل به باختر هستند که در امتداد نیمه فروزمین‌ها و در نتیجه حرکات زمین ساختی گسل امتداد لغز زندان در حوضه رسوبی زاگرس به وجود آمده‌اند.

گسل‌های نوع سوم از نوع گسل‌های بسیار کوچک عادی و وارون یا شکاف‌های بزرگ هستند که به علت فعالیت نمک‌ها به صورت محلی ایجاد شده‌اند.

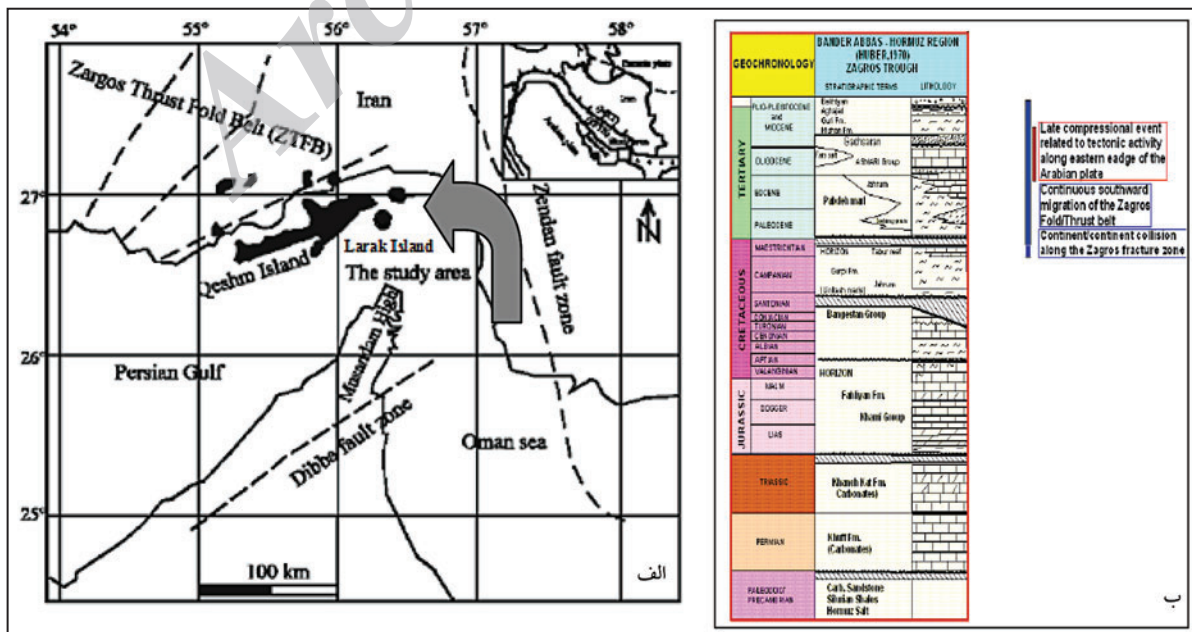
در نتیجه همبستگی بالای میان گسل‌ها در مکعب گسلی، امکان ردگیری شیب و امتداد آنها و نیز شناسایی چگونگی گسترش گسل در ساختمان و موقعیت آن نسبت به پوش سنگ، برای کاهش ریسک اکتشاف در مخازن نفتی به کار می‌رود.

برای بررسی تغییرات امتداد گسل‌ها نشان می‌دهد. تعداد زیادی از گسل‌های عادی و وارون با ابعاد مختلف و چگونگی گسترش متفاوت در منطقه مورد مطالعه قابل تشخیص هستند. این گسل‌ها را می‌توان به سه گروه تقسیم بندی کرد:

**گسل‌های نوع اول (شکل ۹- A):** این گسل‌ها با جابه‌جایی بزرگ از نوع وارون با روند شمال خاوری-جنوب باختری و با شیب به سوی خاور، در زیر سطح دگرشیبی قاعده گوری، در مجاورت پهنه‌های نامنظم (شکل ۹- D) دیده می‌شوند. تشکیل ساختارهای مرتبط با حرکت رو به بالای نمک هرمز با حضور این گسل‌های ژرف به عنوان مفری برای حرکت رو به بالای نمک توجه می‌شود. این گسل‌ها به احتمال زیاد در مراحل زمین ساخت کششی در زمان کرتاسه در نتیجه حرکات زمین ساختی فزاینده مسندام و رسوب گذاری آن درون حوضه نیمه فروزمینی به صورت گسلش عادی به وجود آمده‌اند. سپس در اثر اعمال نیروهای زمین ساخت فشارشی کوهزایی عمان و زاگرس، عملکرد راندگی پیدا کرده‌اند. فعالیت دوباره این گسل‌ها سبب شده است که لایه‌های بالایی سطح دگرشیبی قاعده گوری تحت تأثیر قرار گیرند. پهنه گسلی عادی (شکل ۹- B) با روند شمال خاوری-جنوب باختری و با شیب کمتر به سوی خاور، که سبب جابه‌جایی افق گوری و اینترامیشن شده، به عنوان شاهدی برای حرکت وارون این گسل‌ها در نظر گرفته می‌شود.

**گسل‌های نوع دوم (شکل ۹- C):** این گسل‌ها پهنه‌های گسلی عادی با جابه‌جایی کوچک و دارای حرکت امتداد لغز با روند عمومی شمال شمال باختری-جنوب جنوب خاوری هستند که در امتداد گسل‌های وارون به وسیله حرکات زمین ساختی عمودی گسترش یافته‌اند. این گسل‌ها در مراحل کششی در امتداد نیمه فروزمین‌ها و در نتیجه حرکات زمین ساختی گسل امتداد لغز راست بر زندان در حوضه رسوبی زاگرس در طی ته نشست رسوبات میشان و آغاچاری به وجود آمده‌اند.

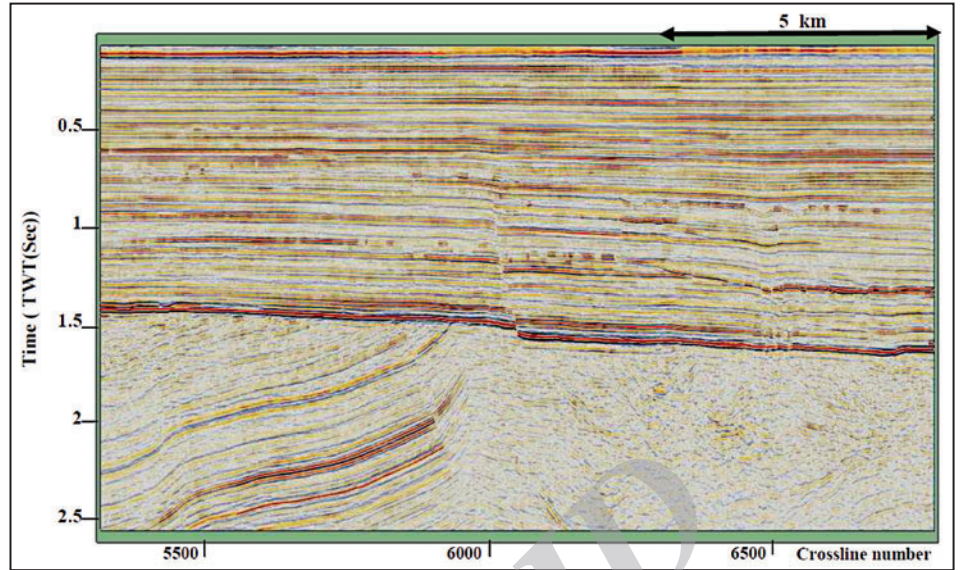
**گسل‌های نوع سوم (شکل ۹):** گسل‌های محلی بسیار کوچک عادی و وارون یا شکاف‌های بزرگ هستند که توسط ریزش و لغزش رسوبات، تحت تأثیر بالا رفتن کف حوضه رسوبی در اثر نیروهای کششی همزمان با رشد توده نمکی در روی سطح شیب تشکیل شده‌اند. ابعاد بزرگ تر شکستگی‌ها و گسل‌های محلی



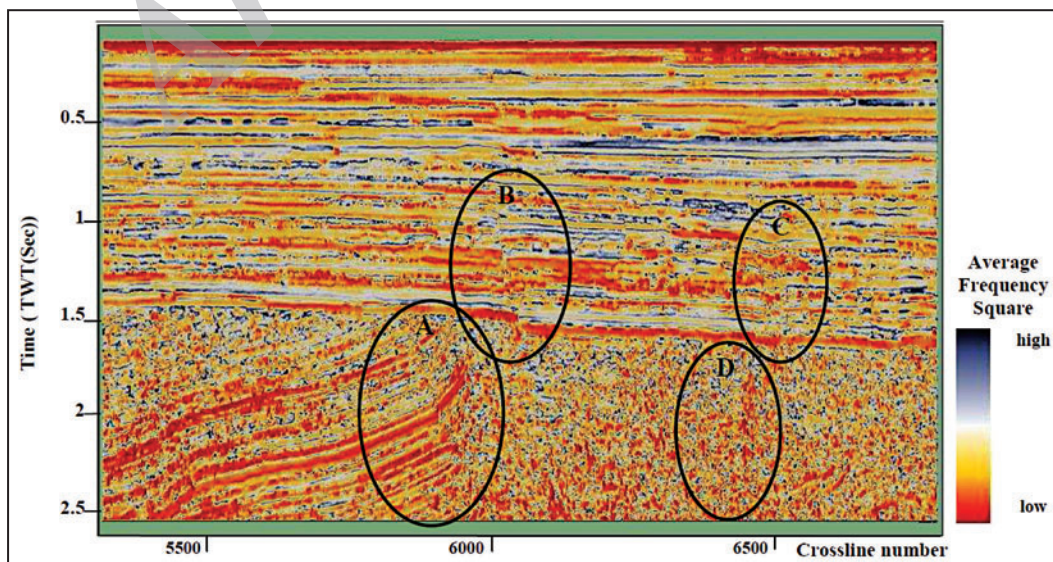
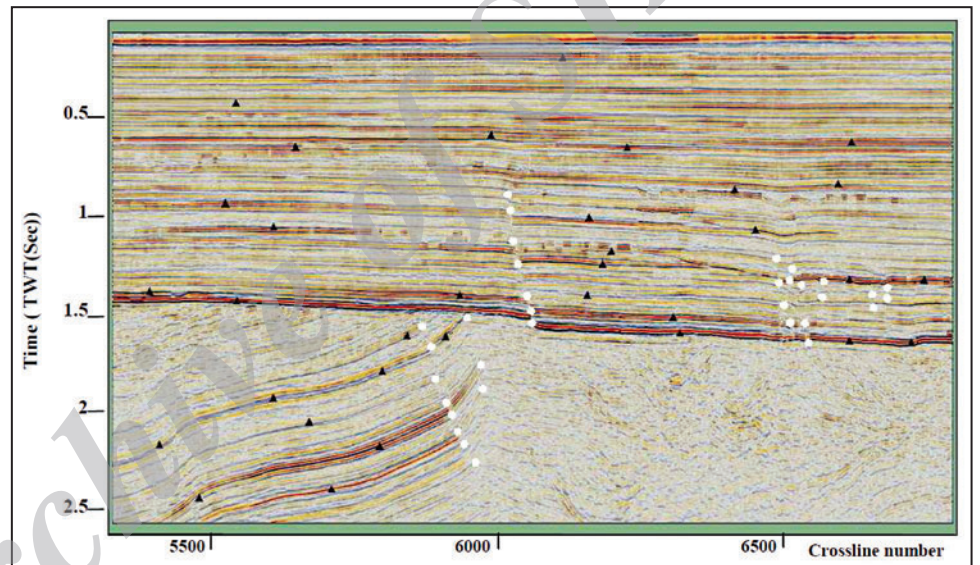
شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه (تنگه هرمز؛ ب) جدول چینه شناسی (Alsouki et al., 2008).



شکل ۲- مقطع لرزه‌ای، داده‌های فیلتر شده را روی خط طولی خاوری- باختری نشان می‌دهد.

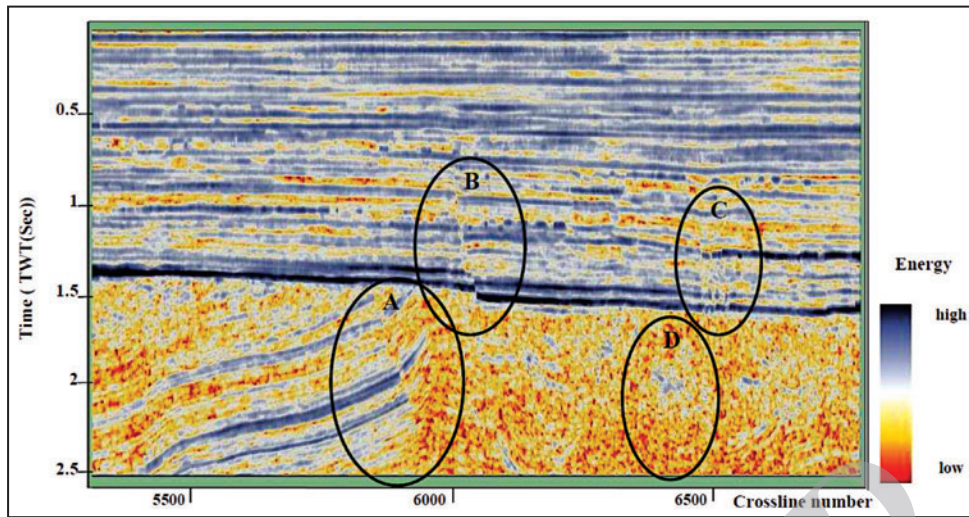


شکل ۳- مقطع گسلی به همراه نقاط گسلی سفید و غیر گسلی سیاه.

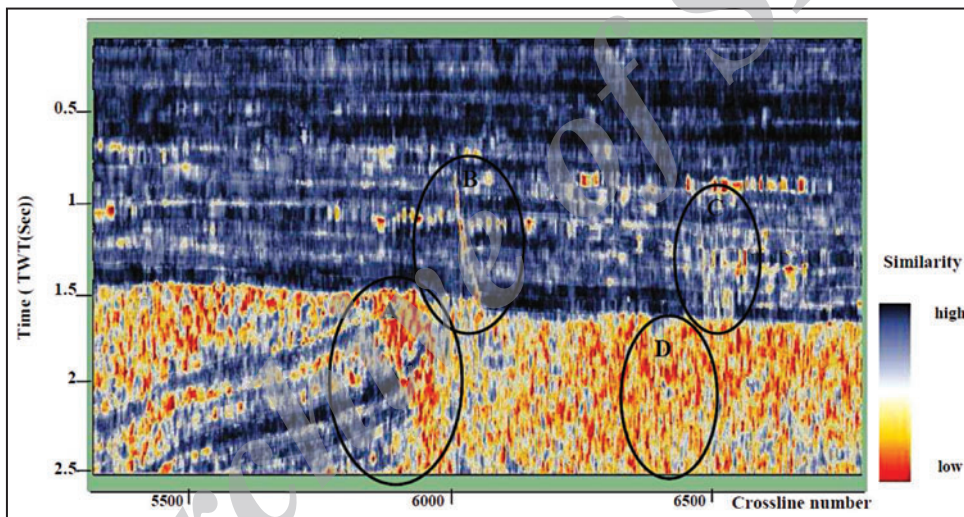


شکل ۴- نشانگر مجذور بسامد میانگین با محتوای بسامدی بالاتر و همسان بازتابنده‌ها و تغییرات ناهمسان بسامد محلی در نتیجه تغییرات فاصله‌ای سریع در امتداد گسل‌ها، شکستگی‌ها و پهنه‌های نامنظم نسبت به بازتابنده‌ها است.

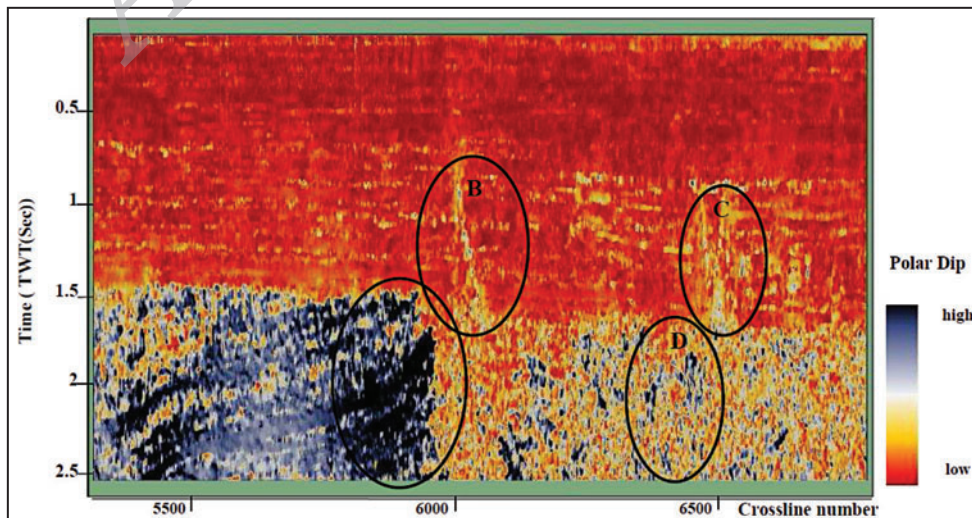




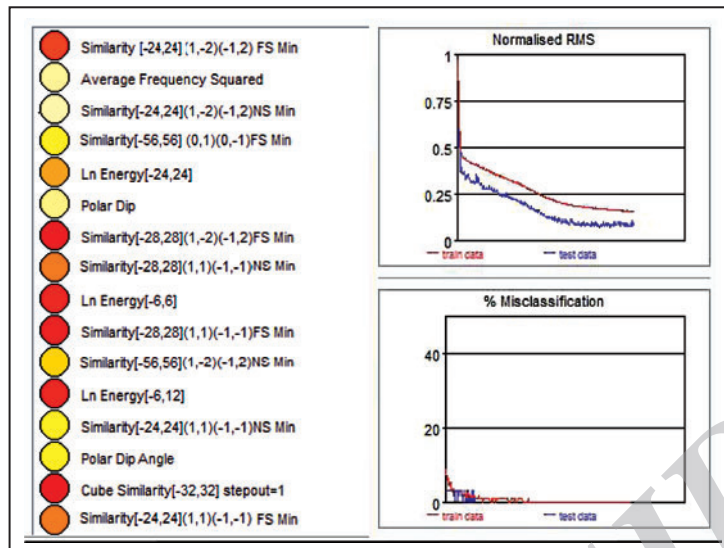
شکل ۵- نشانگر انرژی در بازتابنده‌ها بالا و در نواحی گسلی و شکستگی به سبب جذب یا پاشش انرژی و کاهش دامنه، بسیار کمتر از پیرامون آنهاست.



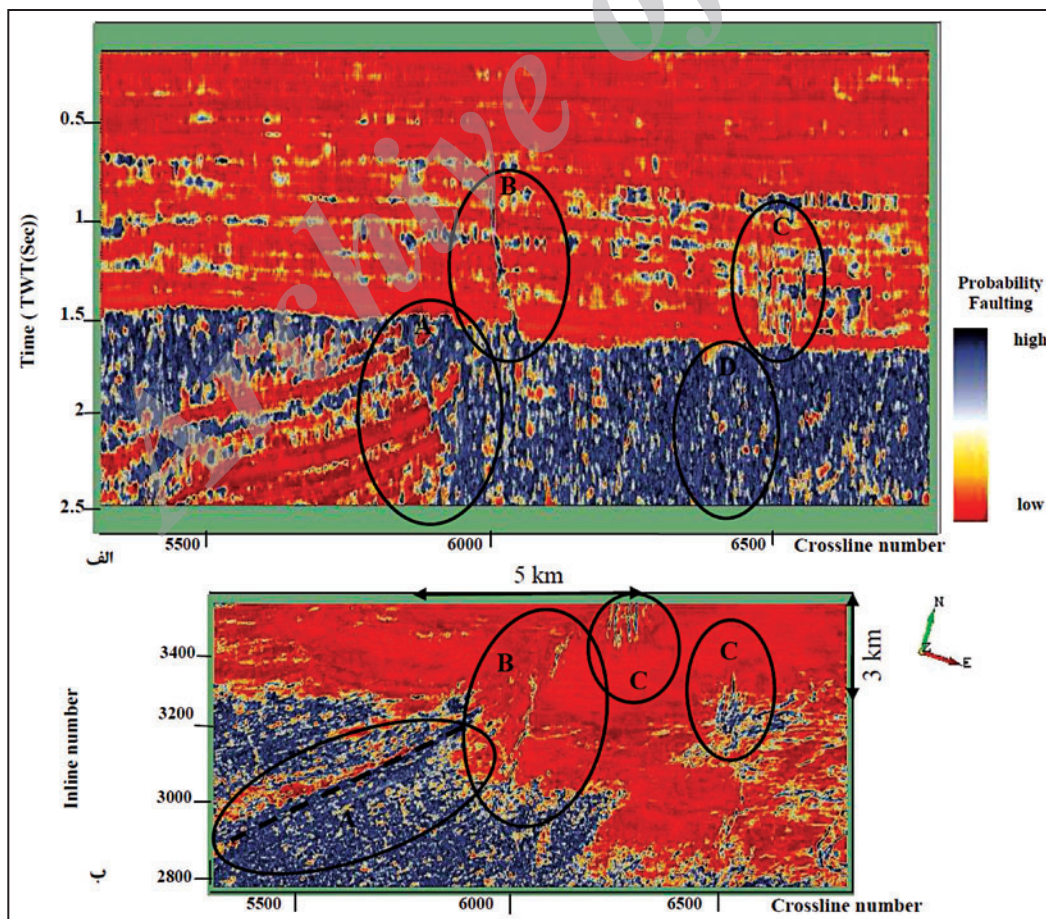
شکل ۶- نشانگر تشابه در نواحی دور از گسل کاملاً همگن و در نواحی گسلی و لبه آنها در نتیجه پاسخ ضعیف به تشابه ناهمگن است.



شکل ۷- نشانگر شیب قطبی، مقادیر شیب در صفحه‌های گسلی از طرفین آن بیشتر است.



شکل ۸- پنجره شبکه عصبی که طیف رنگی گره‌ها به ترتیب از سرخ تا زرد نشان‌دهنده نشانگرهای ورودی و با اهمیت بیشتر در نشانگر خروجی (راست)، خطای میانگین مربعات عادی شده (گوشه چپ بالایی) و درصد رده‌بندی نادرست (گوشه چپ پایینی)، خطای منحنی‌های آزمایشی (پایین‌تر) و آموزشی (بالا‌تر) در حد ۰/۲۰ است.



شکل ۹- الف) مقطعی از مکعب گسلی و ب) برش زمانی ۱۴۹۰ میلی‌ثانیه را با نگاهت دقیق گسل‌ها و شکستگی‌ها و تقابل بالای آنها و زمینه نشان می‌دهد. امکان ردگیری دقیق شیب و امتداد گسل‌ها و چگونگی گسترش گسل در ساختمان در نتیجه پیوستگی بالای میان گسل‌ها فراهم شده است.



## References

- Alsouki, M. F., 2008- Analysis and interpretation of Strait of Hormuz complex structures based on 3D- seismic data, AmirKabir University of Technology Department of Engineering Mining Metallurgy and Petroleum and National Iranian Oil co. (NIOC) Exploration Directorate.
- Alsouki, M., Hassani, H., Irannajad, M. & Riahi, M. A., 2008- The structural imaging in offshore area of Strait of Hormuz based on 3D seismic Data: *Journal of Applied sciences*, 8 (15): 2725-2731.
- Aminzadeh, F. & Connolly, D., 2002- Looking for gas chimneys and faults: *AAPG Explorer*, 23 (12): 20–21.
- Aminzadeh, F. & de Groot, P., 2004- Soft computing for qualitative and quantitative seismic object and reservoir property prediction :Part 1: Neural network applications: first break, 22: 49-54.
- Aminzadeh, F., Connolly, D. & de Groot, P., 2002- Interpretation of Gas Chimney Volumes, th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 931–934.
- Bahorich, M. & Farmer, S., 1995- 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: the coherence cube: *The Leading Edge*, 14: 1053–1058.
- Bakhtiari, M. R., Riahi, M. A. & Tingdahl, K., 2009- Fault detection by intergration of seismic attributes in an oil reservoir: *Journal of seismic exploration*, 18: 289-304.
- Barnes, E., 2006- A filter to improve seismic discontinuity data for fault interpretation: *Geophysics*, 71 (3): P1–P4.
- Brown, A., 2001- Understanding seismic attributes: *Geophysics*, 66: 47-49.
- Chao, W., Mian, C. & Yan, J., 2009- A prediction method of borehole stability based on seismic attribute technology: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 65: 208–216.
- Chopra, S. & Marfurt, K. J., 2007- Seismic attributes: A new historical perspective, *Geophysics*, 70 (4): 3S0–28S0.
- Hashemi, H., Tax, D. M. J., Duin, R. P. W., Javaherian, A. & de Groot, P., 2008- Gas chimney detection based on improving the performance of combined multilayer perceptron and support vector classifier: *Nonlinear Processes in Geophysics*, 15: 863–871.
- Ligtenberg, J. H., 2005- Detection of fluid migration pathways in seismic data: implications for fault seal analysis: *Basin Research*, 17: 141–153.
- McClymont, A. F., Green, A. G., Streich, R., Horstmeyer, H., Troncke, J., Nobes, D. C., Pettinga, J., Campbell, J. & Langridge, R., 2008- Visualization of active faults using geometric attributes of 3D GPR data: An example from the Alpine Fault Zone, New Zealand: *Geophysics*, 73 ( 2): B11–B23.
- Meldahl, P., Heggland, R., Bril, B. & de Groot, P., 1999- The chimney cube, an example of semi-automated detection of seismic objects by directive attributes and neural networks: Part 1: methodology, 69th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts v. 1: 931–934.
- Meldahl, P., Heggland, R., Bril, B. & de Groot, P., 2001- Identifying faults and gas chimneys using multiattributes and neural networks: *The Leading Edge*, 20: 474–482.
- Taner, M. T., Schuelke, J. S., O'Doherty, R. & Baysal, E., 1994- Seismic attributes revisited: 64th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts , 1104–1106.
- Tingdahl, K. M. & de Rooij, M., 2005- Semi-automatic Detection of Faults in 3-D Seismic Data: *Geophysical Prospecting*, 53, 533-542.
- Tingdahl, K. M., Bril, A. H. & de Groot, P. F., 2001- Improving seismic chimney detection using directional attributes: *J. Petrol. Sci. Eng.*, 29: 205–211.
- West, B., May, S., Eastwood, J. E. & Rossen, C., 2002- Interactive seismic facies classification using textural and neural networks: *The Leading Edge*, 21: 1042-1049.