

## استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای مبتنی بر افق در تعیین گسل‌ها و شکستگی‌ها

حامد محمدآبادی<sup>۱\*</sup>، علی عدالت<sup>۲</sup> و حمیدرضا سیاه‌کوهی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>کارشناس ارشد ژئوفیزیک، لرزه‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دکترای ژئوفیزیک، لرزه‌شناسی، شرکت نفت و گاز پارس، تهران، ایران

<sup>۳</sup>دانشیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۱/۴/۱۳، پذیرش نهایی: ۹۱/۵/۲)

### چکیده

نیاز به تعیین محل گسل‌ها و شکستگی‌ها در تحقیقات جامع مخازن هیدروکربنی، گامی مهم و اجتناب‌ناپذیر است. تعیین دقیق محل این ویژگی‌های ساختمانی، ابزاری بسیار موثر در شناسایی محل بهینه چاههای تولیدی است. در این تحقیق با استفاده از نشانگرهای مبتنی بر افق، سعی در تفسیر گسل‌ها و شکستگی‌ها در لایه مخزنی کنگان در یکی از میدان‌های هیدروکربنی واقع در خلیج فارس شده است. اطلاعات پایه‌ای مورد استفاده شامل داده‌لرزه‌ای سه‌بعدی مهاجرت یافته و افق‌های زمانی در محدوده مورد بررسی است. به منظور تشخیص گسل‌ها در محدوده مخزن، چند نشانگر بر پایه افق شامل نشانگرهای با استفاده از اطلاعات لرزه‌نگاری و افق زمانی سراسزند کنگان تولید شد. سپس نقشه‌های نشانگری منتجه مورد ارزیابی قرار گرفت و الگوی گسلش با استفاده از آنها تعیین شد. نتایج این تحقیق بیانگر توانایی زیاد گروه نشانگرهای احنا در تعیین شکستگی‌های کوچک‌تر از قدرت تفکیک اطلاعات لرزه‌نگاری است.

واژه‌های کلیدی: گسل، افق زمانی، نشانگر لرزه‌ای، احنا

## Applying horizon-based attributes to detect faults/fractures

Mohammadabadi, H.<sup>1</sup>, Edalat, A.<sup>2</sup> and Siahkoohi, H. R.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. in Geophysics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Ph.D. of Geophysics, Pars Oil and Gas Company (POGC), Tehran, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 24 Jul 2010, Accepted: 03 Jul 2012)

### Abstract

Faults/fractures detection is an essential step of the full field study in hydrocarbon reservoir. Definition of exact location of these structural events is a critical step to optimize location of the development wells. Despite of the fast development of the geo science technology and oil industry in recent years, detection of the small geological events such as faults and fractures in some of the situations is still problematic.

There are some methods to identify the faults. One of these methods is direct interpretation of the faults on seismic sections. Considering most of the faults/fractures in carbonate reservoirs are too small to identify by conventional faults interpretation and are smaller than seismic resolution, this method could not specify all of the reservoir fractures. One of the new methods for distinguishing the faults and fractures which has been developed recently is used to seismic attributes which allows us to detect sub-seismic faults/fractures.

In this study we try to interpret faults/fractures in Kangan- Dalan reservoir formations with Upper Permian-Lower Triassic age in one of the hydrocarbon reservoirs in Persian

Gulf. These layers were divided to five zones namely K1, K2, K3, K4 and K5. Total thickness of the reservoir layers varies from 400 meters to 600 meters and these formations including of sequences of Calcite, Dolomite and Anhydrite.

The geophysical data which have been used in the study consist of 3D seismic post-migrated data and interpreted time horizons in the study area. The seismic data have 25\*6.25 m grid size with two second length of seismic traces and four milliseconds sampling rate. Petrel software has been also used for seismic attribute generation and comparing them.

In the first step of the study, 3D seismic data as well as interpreted time horizons of the top and base of the reservoir were loaded in the mentioned software. Then, in order to detect the faults, some horizon-based Root Mean Square (RMS) amplitude, dip, azimuth and curvature attributes were generated using Top Kangan time map and 3D seismic data. In this regards, the suitable parameters were selected by performing some tests and quality control of the results. Then generated seismic attribute maps were evaluated and fault/fractures patterns of the reservoir layer were determined and compared with each other using these maps. In this step, the resulted seismic attribute in fault/fractures demonstration in reservoir level was investigated. Finally, it was found that in the study reservoir curvature attribute and root mean square (RMS) of amplitude are the best seismic attributes for faults/fractures detection.

The results of this study shows ability of the curvature attribute groups to detect sub-seismic faults/fractures. Moreover it shows using only one attribute could not be detect all of the fault/fractures in the reservoir; so some seismic attributes should be generated and results of the all attributes should be compared to find an accurate fault pattern.

**Key words:** Faults, Time horizons, Seismic attribute, Curvature

## ۱ مقدمه

بهینه حفاری را به طریقی تعیین کرد که در حد امکان با گسل‌ها تلاقي نداشته باشد و در صورت تلاقي، با آگاهی از آن، اقدامات پيشگيرانه موردنizar برای عبور بدون خطر از گسل را پيش‌بینی کرد.

روش‌های متعددی برای تعیین گسل وجود دارد. یکی از این روش‌ها تفسیر گسل‌ها روی مقاطع لرزه‌نگاری است. اما با توجه به اینکه در مخازن کربناته بسیاری از شکستگی‌ها و گسل‌ها کوچک‌تر از حد تصویربرداری لرزه‌ای هستند، در گستره قدرت تفکیک اطلاعات لرزه‌ای مرسوم جایی ندارند و این روش توانایی تعیین تمامی شکستگی‌های مخزن را ندارد. یکی از راه‌های شناخت گسل‌ها که امروزه گسترش زیادی پیدا کرده، استفاده از نشانگرها لرزه‌ای است که تعیین شکستگی‌ها در مقیاس کوچک‌تر را امکان‌پذیر می‌سازد.

در تحقیقات جامع مخازن هیدروکربنی نیاز به داشتن تعریف دقیقی از ساختمان مخزن باعث شده تا شناخت گسل‌ها و شکستگی‌ها یکی از مراحل حساس در این گونه تحقیقات باشد. در واقع بدون داشتن تعریف دقیقی از ساختمان مخزن خصوصاً گسل‌ها و شکستگی‌های آن، تحقیقات جامع مخازن، اعتبار کافی نخواهد داشت. شناخت دقیق شکستگی‌ها و گسل‌های میدان مورد بررسی، اطلاعاتی را فراهم می‌کند که در تعیین خصوصیات مخزن، ساخت مدل ایستایی و دینامیک مخزن و همچنین طراحی چاه‌های تولیدی، نقش موثری دارند. لذا نتایج این تحقیق می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در شناخت چارچوب ساختمانی مخزن و نیز برآورد بهتر مشخصات شارش مخزن کمک شایانی کند. همچنین در طراحی چاه‌ها، با داشتن شناخت از گسل‌ها می‌توان مسیر

تحلیل نشانگر انحنای یک سطح، به حذف اثرات شبیه ناحیه‌ای کمک می‌کند و بر ویژگی‌های کوچک مقیاس مرتبط با ویژگی‌های رسوبی اولیه و یا به گسل‌های ریز تاکید دارد. حضور شکاف‌های باز یا بسته ارتباط مستقیمی با انحنای بازتاب دارد زیرا با افزایش انحنا کشش در طول سطح افزایش می‌یابد و باعث تولید شکستگی‌ها می‌شود. نشانگرهای همدوسی و انحنا برای تعیین گسل‌ها و ویژگی‌های چینه‌شناسی قابل استفاده‌اند. نشانگر همدوسی بر وجود ناپیوستگی‌ها در دامنه لرزه‌ای تاکید می‌کند. عمدت‌ترین علت ناپیوستگی در دامنه لرزه‌ای، وجود گسل‌هایی است که باعث ناپیوستگی دامنه افق می‌شوند. ناپیوستگی‌ها همچنین در موقعی که مرز کانال‌ها افق را قطع می‌کنند وجود دارند و اینها به خوبی با نشانگر همدوسی تفسیر می‌شوند. محاسبه همدوسی روی پنجره نسبتاً بلند زمانی می‌تواند تصویر دقیقی از گسل به‌دست دهد. نشانگرهای انحنا دارای ویژگی‌هایی از قبیل به نقشه در آوردن، سادگی و ترکیب مشخصات خطی سطحی هستند.

تحلیل کیفی و کمی نشانگرهای انحنا، می‌تواند بیانگر نتایج گوناگونی باشد و به شناخت ویژگی‌های ساختمانی کمک شایانی کند. انحنا یک خاصیت دو بعدی است که میزان و چگونگی خمیدگی یک سطح را در یک نقطه مشخص روی منحنی تشریح می‌کند و به منزله نرخ تغییر جهت منحنی تعریف می‌شود. انحنا ارتباط مستقیمی با مشتق دوم منحنی دارد و اغلب از مشتق دوم در حکم اندازه‌گیری مستقیم انحنای منحنی استفاده می‌شود. روش دیگر برای توصیف انحنا مطابق شکل ۱ این است که یک مقطع دو بعدی عرضی را برای یک سطح تصور کنیم. بردارهای عمود بر سطح در طول افق و به فواصل منظم رسم می‌شوند. در جایی که افق صاف و دارای شیب مسطح است، بردارهای مشابه همگی موازی‌اند و بنابر این انحنای افق در این مکان‌ها صفر است. در جاهایی که افق یک

نشانگر لرزه‌ای به هر پارامتری گفته می‌شود که بتوان آن را به نوعی از داده‌های لرزه‌ای قبل یا بعد از برآنبارش به دست آورد، یا به صورت فضایی به نقشه درآورده (تائز، ۲۰۰۱). با پیشرفت فناوری برداشت لرزه‌ای سه‌بعدی در دهه ۱۹۹۰ و همه‌گیر شدن آن، تحلیل نشانگرهای لرزه‌ای نیز پیشرفت قابل توجهی کرد. از اواسط دهه ۱۹۸۰ به بعد نشانگرهای مبتنی بر افق (دالی و همکاران، ۱۹۸۹) معرفی شدند و روشن شد که این نشانگرها می‌توانند بعضی خصوصیات بازتابنده‌ها (مانند شکستگی‌ها) را که به راحتی نمی‌توان آنها را در مقاطع لرزه‌ای قائم دید، نمایش دهند. عمومی‌ترین این نشانگرها که در کارهای عملی کاربرد زیادی دارند عبارت‌اند از نقشه‌های شیب، آزمیوت، انحنا، و جذر میانگین مربعی دامنه استخراج شده در امتداد یک افق.

هارت (۲۰۰۲) از نشانگرهای بر پایه افق برای تعیین ویژگی‌های ساختاری که ممکن است با شکستگی‌ها رابطه داشته باشند استفاده کرد. روبرت (۲۰۰۱) امکان برآورده حجمی انحنای بازتابنده را بررسی کرد. کوپرا و مارفورت (۲۰۰۷) از انحرافات ناحیه‌ای مربوط به شیب ظاهری روی هر قطعه زمانی برای تعیین اندازه انحنا در هر نمونه حجم سه‌بعدی استفاده کردند.

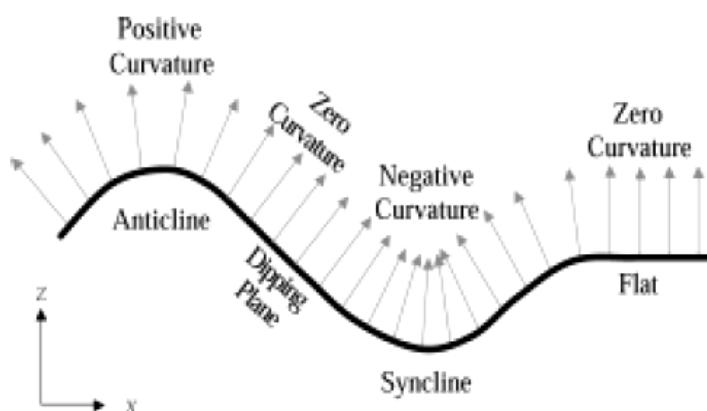
## ۲ روش‌شناسی

پس از گسترش سریع لرزه‌شناسی سه‌بعدی و علایقی که در زمینه شکستگی‌ها به وجود آمد، نقشه‌های انحنا به سرعت مورد توجه واقع شد. علی‌رغم اینکه ارتباط دقیق میان شکستگی‌های باز، ساختارهای دیرینه (paleostructure) و تنش‌های حال حاضر هنوز به طور کامل در ک نشده، اما رابطه زمین‌شناسی ساختمانی میان شکستگی و انحنا به خوبی ثابت شده است. انحنا به منزله یک خاصیت سه‌بعدی از سطح دو بعدی تعریف می‌شود و نشان‌دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن است.

وزنی (Weighted average filtering). اغلب لازم است تا چندین تکرار از فیلتر مشابه قبل از رسیدن به نتیجه رضایت‌بخش صورت گیرد. همه اینها اثر فیلتر پایین‌گذار را دارند و تغییرات خیلی سریع در سطح را تضعیف می‌کنند. هدف اصلی اعمال فیلتر، حذف موثر نوافه‌های گوناگون بدون کاهش قدرت تفکیک است. دومین نکته مهم، نمایش است. همه کارایی یک نشانگر خاص، با استفاده از یک تصویر رنگی نامناسب از دست خواهد رفت. انتخاب دقیق یک نقشه رنگی برای نمایش روی صفحه می‌تواند تاثیر بسزایی در کارایی یک نشانگر داشته باشد. در استخراج اطلاعات اتحنا مربوط به یک سطح، فاصله نمونه‌برداری و در نتیجه اندازه پنجره (aperture) باید تعریف شود. مثلاً یک تپه سنگی از فاصله‌ای دور مشابه یک سطح با اتحنا کم است اما در فاصله‌ای نزدیک تپه، وجود سنگ‌های بالاندازه‌های گوناگون نشان‌دهنده ناهمواری سطح تپه است و به همان نسبت، اتحنا موضعی زیاد خواهد بود. اگر سنگ‌ها را به طور خاص بررسی کنیم، برخی ناهموار، برخی گرد شده و برخی صاف هستند. یعنی همه آنها مقادیر اتحنا کاملاً متفاوتی دارند. بنابر این محاسبه اتحنا تپه‌ای از سنگ‌ها وابسته به مقیاس اندازه‌گیری است.

تاقدیس یا ویژگی تپه‌ای شکل را تشکیل می‌دهد، بردارها واگرا هستند و اتحنا مثبت تعریف می‌شود. وقتی منحنی یک ناودیس را تشکیل می‌دهد بردارها همگرا می‌شوند و اتحنا، منفی تعریف می‌شود که البته این قرارداد همیشگی نیست. براساس نوع انتخاب مقطع عرضی و جهت آن، برای یک نقطه مشخص اتحناهای متفاوتی نتیجه می‌شود. پتانسیل تغییرپذیری در اتحنا، براساس جهت انتخاب مقطع عرضی، با غث می‌شود تا عرضه تعریف واضح و روشنی از اتحنا برای سطوح سه‌بعدی ضروری باشد.

آماده‌سازی سطح جنبه خیلی مهمی از روند محاسبه اتحنا است. با توجه به ارتباط خیلی نزدیک اتحناها با مشتق دوم سطح، کیفیت آنها نسبت به سطح آلدگی نوافه بسیار حساس است. از طرفی معمولاً چشمه‌های نوافه زیادی روی سطح به نقشه درآمده وجود دارد. مثلاً چشمه‌های زمین‌شناسی، پردازشی، برداشت داده‌ها و پیمایش افق horizon auto (tracking) بنابراین لازم است قبل از به کار بردن یک سطح به منظور محاسبه، اتحنا آن سطح آماده شود. این عمل با کاربرد برخی شکل‌های خفیف فیلتر دو بعدی عملی می‌شود. روش‌های متفاوتی برای این نوع فیلتر کردن معرفی شده است. مثلاً فیلتر میانگین تکرار کننده (Iterative median filtering) و فیلتر متوسط



شکل ۱۰ استفاده از مقطع دو بعدی عرضی برای توصیف اتحنا؛ پیکان‌ها نشان‌دهنده بردارهای عمود بر سطح هستند. برای بردارهای موازی، اتحنا صفر، بردارهای واگرا اتحنا مثبت و بردارهای همگرا اتحنا منفی تعریف می‌شود (روبرت ۲۰۰۱).

مربعات با استفاده از مقادیر هشت شبکه کناری، به سطح نسبت داده می‌شود.

$$y = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (2)$$

محاسبه ضرایب معادله فوق به مجموعه‌ای از نمایش‌های ساده ریاضی محدود می‌شود.

$$a = (z_2 + z_5 + z_9) / 6\Delta x^2 \quad (3)$$

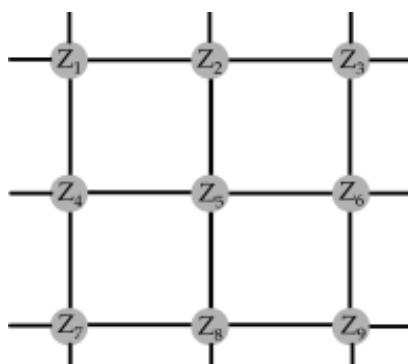
$$b = (z_4 + z_5 + z_6) / 6\Delta x^2 \quad (4)$$

$$c = (z_3 + z_5 - z_1 - z_9) / 4\Delta x^2 \quad (5)$$

$$d = (z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7) / 6\Delta x^2 \quad (6)$$

$$e = (z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9) / 6\Delta x^2 \quad (7)$$

$$f = [2(z_2 + z_4 + z_6 + z_8) - (z_1 + z_3 + z_7 + z_9) + 5z_5] / 9 \quad (8)$$



شکل ۲. مقادیر شبکه گرهی نسبت داده شده به یک سطح که براساس اندازه پنجره مورد استفاده در محاسبه نشانگر اینجا تعریف شده است (روبرت ۲۰۰۱).

مقادیر شبکه گرهی سطح براساس شکل ۲ هستند و  $\Delta X$  فاصله بین نقاط گرهی است. هرچه شبکه نقاط بزرگتری انتخاب شود، نیاز به حل معادلات نرمال بیشتری خواهد بود و در نتیجه محاسبه اینجا زمان بیشتری می‌گیرد. با استفاده از ضرایب پیش‌گفته می‌توان نشانگر زاویه شیب را محاسبه کرد:

تحقیقان زیادی از اینجا یا نشانگرهای مرتبط با اینجا برای پیشگویی شدت شکستگی روی سطح به نقشه در آمده استفاده کرده‌اند. وجود همبستگی بین شکستگی‌ها و اینجا به دلیل تنفس ایجاد شده به هنگام تاخوردگی یا خم شدگی است. میزان تنفس موجود در بالای لایه با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{hE}{2R} = \frac{hkE}{2} \quad (1)$$

که در آن،  $h$  ضخامت لایه،  $E$  مدول یانگ و  $R$  شعاع اینجا است و  $k$  اینجا را نشان می‌دهد. طبق معادله فوق برای سنگ‌های با مدول یانگ مشابه، تنفس درون یک لایه وابسته به مقدار اینجا است و میزان فاصله از سطح بی‌اثر است. در برخی موارد، شرایطی به وجود می‌آید که تشخیص اینجا به دو علت عدمه به درستی صورت نمی‌گیرد: الف) به علت فقدان سادگی ساختارهای زمین‌شناسی، اینجا یک سطح به نقشه در آمده می‌تواند با اثراتی فراتر از تاخوردگی ایجاد شود مانند ناپیوستگی فرسایشی و ویژگی‌های مکانی مثل تلماسه‌ها و..... ب) وجود اینجا کاذب مثل بالاکشیدگی یا پایین‌افتادگی سرعت و یا گسلش ظاهری ایجاد شده از آلودگی نوفه. بنابراین واسنجی (کالیبره) کردن نشانگر اینجا با شدت شکستگی موجود مهم خواهد بود. این واسنجی کردن نیازمند مقایسه اطلاعات مربوط به شکستگی با یک مجموعه کامل نشانگرهای اینجا است. این مجموعه با استفاده از عرض پنجره‌های متفاوت به منظور ایجاد مقیاس یا طول موجی که در آن داده‌های استخراج شده بهترین تناسب را با داده مربوط به شکستگی داشته باشند، ایجاد می‌شود. راههای متفاوتی برای تعیین و محاسبه اینجا سطح وجود دارد که برخی از آنها را استوارت و پودوسکی (۱۹۹۸) خلاصه کرده‌اند و فلین و جین (۱۹۸۹) مورد مقایسه قرار داده‌اند. برای محاسبه اینجا در یک نقطه خاص، یک سطح درجه دو موضعی براساس کمترین

کمینه حول صفر، دچار تغییر علامت‌های سریع می‌شود. با اینکه محاسبه انحنای گاوی مطلق، این مشکل را حل می‌کند ولی عموماً این نشانگرها که از نظر ریاضی و هندسی دارای معنا هستند، برای به نقشه درآوردن سطوح محدودند.

#### ۴ تفسیر گسل

یکی از کاربردهای مرسوم نقشه نشانگرها مبتنی افق (Horizon attribute maps) است. از طرفی جزئی رد گسل است. به طور مرسوم، مقدار شیب، آزمیوت شیب، شدت بازتاب و ساختار باقی‌مانده (Residual structure)، نشانگرها مورد استفاده برای این هدف هستند. همواره باید چند نشانگر مورد استفاده قرار بگیرند، زیرا یک گسل ضرورتا روی یک نشانگر ظهور نمی‌کند. گسل ممکن است در حکم بخشی از بی‌亨جارتی مقدار شیب (اغلب شیب تند) یا آزمیوت شیب، یا هر دو ظهور کند. نسبت سیگنال به نویه کم باعث کاهش تعداد ویژگی‌های قابل تشخیص می‌شود.

نمایش یک افق در سه بعد، کمک زیادی به تفسیر خواهد کرد. اگر در تصاویر، یک چشمۀ فرضی نور را در نظر بگیریم که به سطح تایید شده است، اجزای زیادی قابل رویت خواهد بود. این نور براساس سایه‌های تولید شده یا برجستگی‌های روی سطح گسل می‌تواند بسیاری از شکستگی‌ها و بی‌قاعدگی‌ها در سطح را آشکار کند. اگر در مناطق با کیفیت داده خوب، نور تابانیده شود، اطلاعات (بینش) اضافی به دست خواهد آمد. براساس جهت تابش نور، اطلاعاتی از جهت‌گیری گسل به دست می‌آید (بسته به روشن یا سایه‌دار بودن گسل).

بسیاری اطلاعات با استفاده از نگاه مفسر به ترکیبی از خطوط امتدادی و عرضی، قطعات زمانی و نقشه‌های ساده نشانگرها به دست می‌آید. مفسر اغلب باید اطلاعاتی را از روشن‌های متفاوت برای نمایش و تفسیر یک ساختار

$$\text{dip.angle} = \tan^{-1}(\sqrt{d^2 + e^2}) \quad (9)$$

انحنای میانگین علی‌رغم اینکه خاصیت مهم سطح است اما یک نشانگر مفید خاص نیست، با این حال برای محاسبه سایر نشانگرها این، قابل استفاده است:

$$k_m = \frac{[a(1+e^2) + b(1+d^2) - cde]}{(1+d^2+e^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

انحنای بیشینه: بیشترین انحنای یک سطح را نشان می‌دهد.

$$k_{\max} = k_m + \sqrt{k_m^2 - k_g^2} \quad (11)$$

این نشانگر در تعیین حدود و هندسه گسل‌ها بسیار مفید است. از طرفی معکوس شدگی موجود در مقادیر انحنا باعث می‌شود تا جهت پیچش گسل‌ها را بتوان تعیین کرد. یکی از مزایای انحنای اطلاعات شکلی است که باعث می‌شود گسل‌ها از سایر ویژگی‌های سطحی متمایز شوند. علاوه بر جهت گسل‌ها، اندازه هر گسل هم با انحنای بیشینه تشریح می‌شود.

انحنای کمینه:

$$k_{\min} = k_m - \sqrt{k_m^2 - k_g^2} \quad (12)$$

مقادیر انحنای کمینه به طور مشخصی از مقادیر انحنای بیشینه کوچک‌تر است. وقتی انحنای کمینه خیلی کوچک یا صفر است نشان می‌دهد که سطح گسترا (Developable) است. وقتی انحنای کمینه بزرگ است موقعیتی است که در سطح آشفتگی غیرهمسان رخداده، به گونه‌ای که دچار شکستگی یا گسلش شده است.

$$k_g = \frac{[4ab - c^2]}{(1+d^2+e^2)^2} \quad (13)$$

#### ۳ انحنای گاوی

لیسل (1994) انحنای گاوی را به مثابه روشهای تعیین گسل‌ها پیشنهاد کرد. اما برخی شواهد نشان می‌دهد که مقادیر انحنای گاوی، با توجه به نوسان مقادیر انحنای

(Maaqala Anticline). این ویژگی‌ها، بسیاری از ساختارهای میدانی اصلی نفت و گاز در عمان، عربستان سعودی، کویت، جنوب عراق و جنوب ایران (پهنه آبادان) و همچنین منطقه خلیج فارس را شکل داده‌اند. شکل‌گیری ساختار بسیار بزرگ پارس جنوبی/گندم شمالی، غوار، سافانیا-خفجی و بورگن، مدیون این ویژگی ساختاری شمال-جنوب است. این ناحیه دربردارنده بیش از دو سوم نفت و یک سوم ذخایر گازی کشف شده در جهان است. دلیل این اتفاق، ترکیب برخی عوامل مطلوب در این ناحیه است. مهم‌ترین عامل، طولانی شدن و البته به هم نریختن تاریخچه رسویی از زمان پرکامبرین تا به حال است. رسوی گذاری سنگ‌مشاهی مناسب، مخازن و پوش‌سنگ با کیفیت خیلی خوب به همراه حضور ساختارهای خیلی بزرگ جزء عامل‌های اصلی و مطلوب هستند. کنگان-دالان در حکم سازند تولیدی این میدان، دارای ضخامت متغیر بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ متر است و در محدوده عمقی بین ۲۵۰۰ تا ۳۹۰۰ متری تجمع یافته است. سازند کنگان از جنس آهک دولومیتی و سازند دالان شامل سه بخش است که بخش‌های بالایی و پایینی کربناته و بخش میانی رسویات تبخیری است. این سازند به ترتیب از بالا به پنج زون k2، k1، k3، k4 و k5 تقسیم‌بندی شده است. البته زون‌های تولیدی این سازند، فقط شامل چهار لایه اول هستند. زون‌های اول تا سوم شامل توالی‌های آهک، دولومیت، انیدریت‌اند.

**۶ کاربرد و اعمال نشانگر لرزه‌ای اتحنا**  
به منظور محاسبات رایانه‌ای این تحقیق از نرم‌افزار پترل (Petrel) ویرایش ۲۰۰۸ محصول شرکت شلومبرژه استفاده شده است. داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی در دو قالب Y-SEG و ZGY در این نرم‌افزار وارد می‌شوند و برای تفسیر افق‌ها و گسل‌ها در سه بعدمورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از آماده‌سازی اولیه داده لرزه‌ای افق مخزنی

سه‌بعدی عرضه کند. مثلاً گاهی همبستگی خوبی بین دو نشانگر وجود دارد که می‌تواند مهم باشد.

## ۵ زمین‌شناسی منطقه تحت بررسی

منطقه مورد بررسی در خلیج فارس و حوضه رسوی خاورمیانه واقع شده است. این حوضه شامل خلیج فارس، سراسر منطقه غربی و جنوبی گستره زاگرس، شبه‌جزیره عربی، عراق، اردن، سوریه و جنوب شرق ترکیه است. صفحه عربی به طول تقریبی ۳۰۰۰ کیلومتر و پهنهای تقریبی ۲۰۰۰ کیلومتر است و ویژگی‌های ساختمانی اصلی منطقه نتیجه دو فاز زمین‌ساختی مهم است. اولین فاز زمین‌ساختی اصلی برخورد صفحه عمار (Amar Plate Collision) به صفحه ایران در ۶۴۰-۶۲۰ میلیون سال پیش است. دومین فاز زمین‌ساختی اصلی منطبق با سامانه ریفت نجد (Najd Rift System) است که ۵۷۰-۵۳۰ میلیون سال قبل رخ داده و پهنهای آن ۳۰۰ کیلومتر و روند کلی آن شمال غرب - جنوب شرق و موازی کوه‌های زاگرس است.

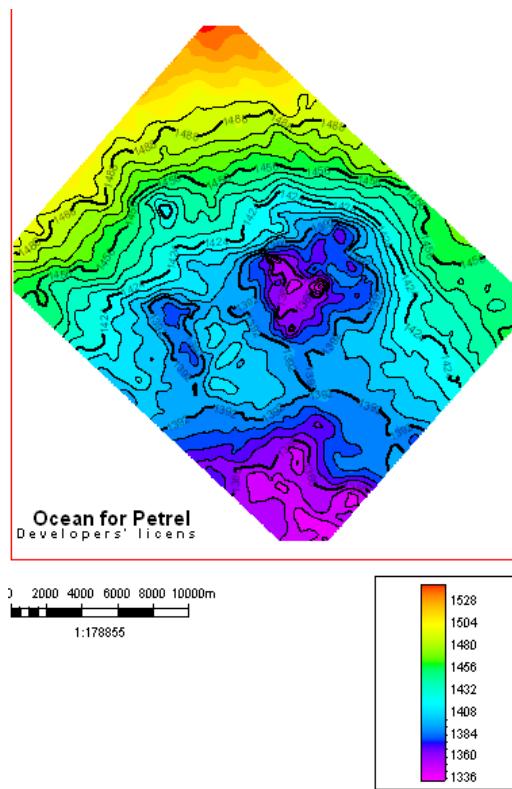
این رخدادهای زمین‌ساختی اصلی، به خصوص اولین آنها، عامل ایجاد بلندی‌های قطر- فارس و سایر ساختارهای مشابه مثل بلندی‌های غوار (Ghawar High) است. متعاقباً جوان شدن روندهای ساختمانی شمال-جنوب، توسعه ساختاری پوشش رسوی و توزیع ذخیره هیدروکربنی منطقه را کنترل کرده است. بلندی‌های قطر- فارس مشابه سایر روندهای شمالی دارای مبنای از پرکامبرین است و حدود ۶۴۰-۶۲۰ میلیون سال قبل به علت برخورد در طول روند شمالی گسیختگی عمار در مرکز پوسته عربی تشکیل شده است.

ویژگی‌های اصلی روند شمال - جنوب عبارت‌اند از: کمان قطر- فارس (Qatar-Fars Arch)، تاقدیس‌ان نالا (En Nala Anticline)، تاقدیس خوریاس- برگن (Khurias-Burgan Anticline) و تاقدیس ماکالا

گیرد تا هر گونه ردگیری اشتباه مسیر افق، تصحیح شود. هر اشتباهی در تفسیر افق منجر به ایجاد خطای نفشه نشانگرهای لرزه‌ای و درنتیجه بروز خطای در تفسیر گسل‌ها و شکستگی‌ها می‌شود. بنابراین تفسیر افق، یک گام بحرانی در عملی شدن این تحقیق است.

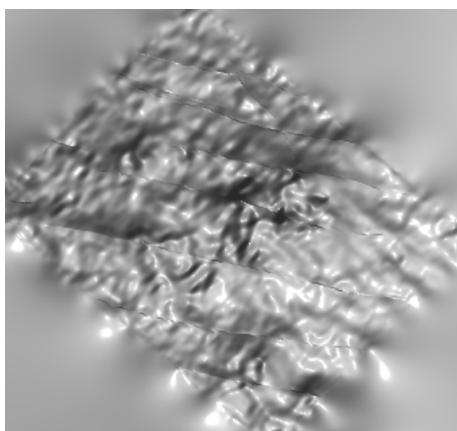
یکی از اهداف مهم این تحقیق، کاربرد نشانگر انحنا و تعیین میزان کارایی آن در مقایسه با سایر نشانگرهای مبتنی بر افق است. بدین‌منظور انواع متفاوت نشانگرهای انحنا شامل کمترین انحنا، بیشترین انحنا، انحنای گاوی و انحنای میانگین، تحت بررسی‌های کامل قرار گرفت و حالت‌های بهینه هر کدام به دست آمد. به‌منظور محاسبه نشانگرهای انحنا، ابتدا افق مدنظر پس از تبدیل به نقاط، به صورت یک سطح تعریف و در حکم ورودی نشانگر انحنا به کار گرفته شد. همچنین یک چندوجهی به منزله مرز منطقه تعریف شد. با اعمال هندسه منطقه مورد بررسی و تعریف ابعاد شبکه مدنظر، محاسبات انحنا آغاز و درنهایت نقشه‌های انحنا ترسیم شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، نقشه‌های انحنا، دید بسیار خوب و نسبتاً کاملاً از مدل گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه به دست دادند؛ به‌ نحوی که حتی می‌توان آن را در حکم واسنجی سایر نشانگرها مورد استفاده قرار داد. شکل‌های ۴ تا ۹ مربوط به نمایش نشانگرهای آزمیوت بیشترین انحنا، انحنای گاوی، بیشترین و کمترین انحنا و همچنین انحنای میانگین در بازه مورد بررسی این تحقیق براساس تعریف نقاط گرهی و اعمال فاصله مناسب بین این نقاط و در نتیجه هایگاه ضرایب معادله مربوط به تولید سطح درجه دوم براساس رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ است. پس از تعیین و نمایش نشانگرهای انحنا، به‌منظور کنترل و بررسی نتایج و مقایسه میزان کارایی سایر نشانگرهای مبتنی بر افق، از نشانگرهای جذر میانگین مربعی دامنه، شبی، انرژی میانگین و مقدار استخراج شده استفاده شد.

موردنظر از منظر تفسیر، تحت بررسی قرار گرفت. افق موردنظر که در شکل ۳ به نمایش درآمده است حد بالایی مخزن در حوالی ۱۴۰۰ میلی ثانیه است. برای تفسیر این افق نسبتاً قوی، دو روش پیش‌بینی شده است. روش اول مبتنی بر تفسیر افق به صورت دستی است که کاربر با پیگیری مسیر ردلرزه‌ها افق را طی و سپس آن را در حکم افق جدید و تحت بررسی، ذخیره می‌کند.

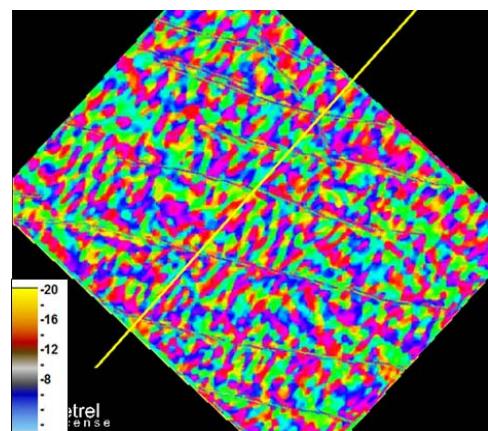


شکل ۳. افق لرزه‌ای مورد بحث در حکم حد بالایی مخزن در ۱۴۰۰ میلی ثانیه.

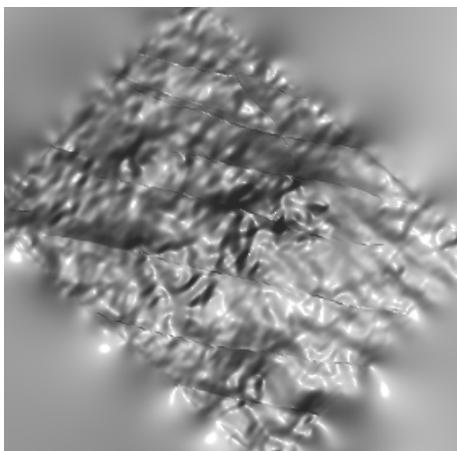
اما روش دوم بر پایه تفسیر خودکار افق بنا نهاده شده است و کاربر پس از تعیین افق موردنظر در پنجره تفسیر می‌تواند پیمایش دو یا سه‌بعدی از افق مربوط را به دست آورد. در مورد مقایسه این دو روش، نکته قابل ذکر اینکه روش دستی در صورت وجود دقت در ردگیری مسیر، قابلیت اطمینان بیشتری دارد، اما روش خودکار علی‌رغم صرف وقت بیشتر، باید حتماً تحت بررسی مجدد قرار



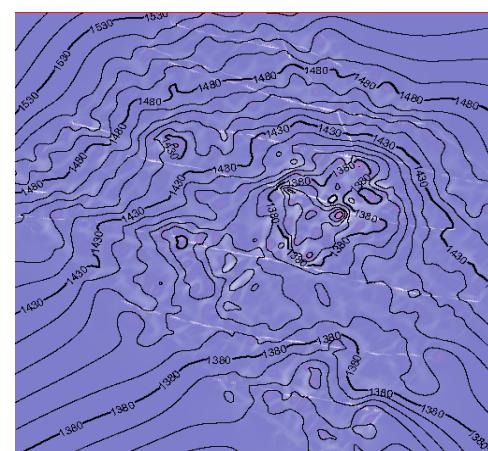
شکل ۵. نشانگر لرزه‌ای انحنای گاوسی با استفاده از تابش نور.



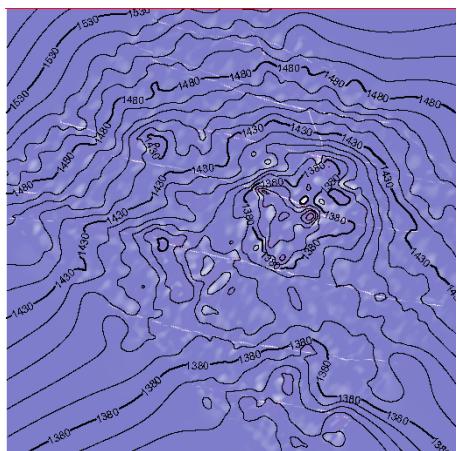
شکل ۴. نشانگر لرزه‌ای آزمودت بیشترین انحنا؛ مسیر پیش‌بینی شده برای گسل‌ها با خطواره‌ها به هم مرتبط شده‌اند.



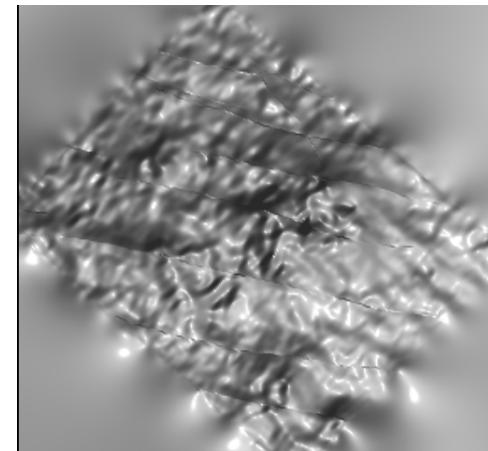
شکل ۷. نشانگر لرزه‌ای بیشترین انحنا با استفاده از تابش نور.



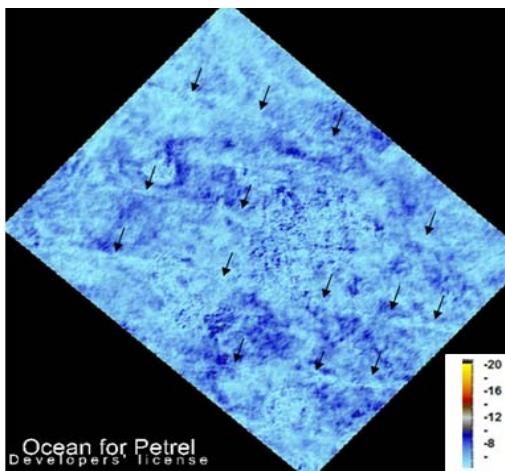
شکل ۶. نشانگر لرزه‌ای بیشترین انحنا و نمایش شبکه گسلی با استفاده از پریندها.



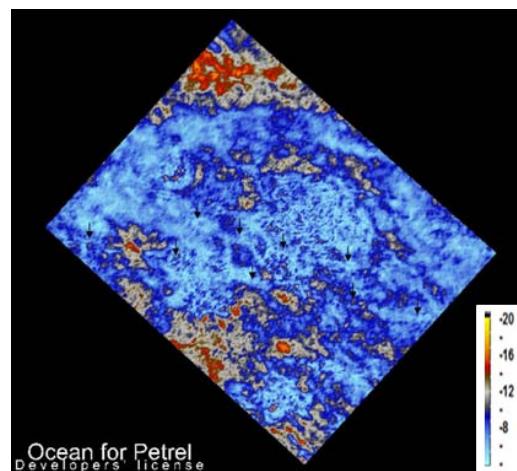
شکل ۹. نشانگر لرزه‌ای انحنای میانگین نمایش مناسبی از خطوط گسلی را به دست می‌دهد.



شکل ۸ نشانگر لرزه‌ای کمترین انحنا.



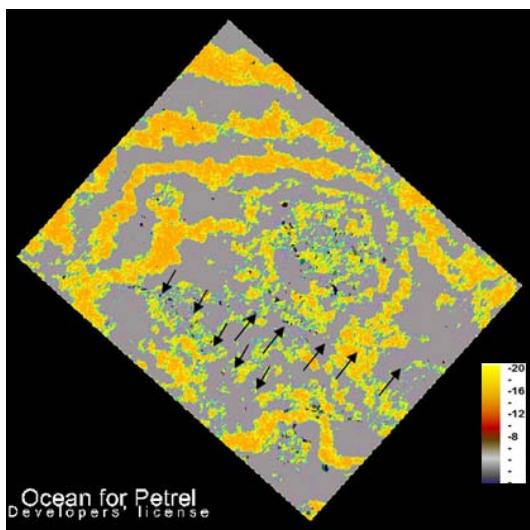
شکل ۱۱. نشانگر لرزه‌ای جذر میانگین مربعی دامنه.



شکل ۱۰. نشانگر لرزه‌ای جذر میانگین مربعی دامنه.

حجمی لرزه‌ای قابل دسترسی نیست، عملی سازد. شکل ۱۳ مربوط به نشانگر لرزه‌ای مقدار استخراج شده است. به منظور محاسبه نشانگر انرژی میانگین از رابطه ۱۵ استفاده می‌شود. این نشانگر مرتع جذر میانگین مربعی دامنه است و بازتاب‌ها را درون یک پنجه زمانی یا عمقی برای  $k$  نمونه زنده اندازه می‌گیرد. نمایشی از این نشانگر در شکل ۱۴ آمده است.

$$\frac{\sum_i^n amp^2}{k} \quad (15)$$



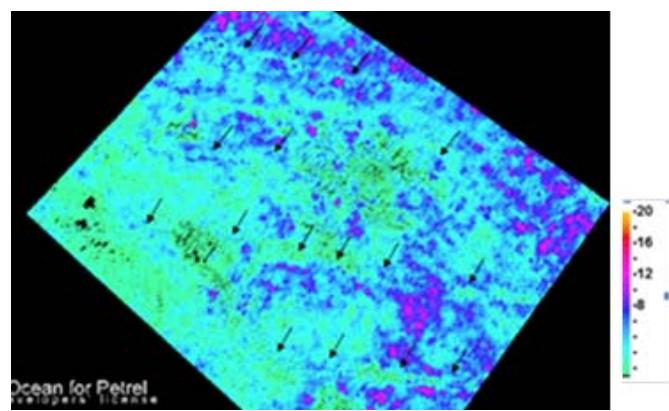
شکل ۱۲. نشانگر لرزه‌ای شبیه.

پس از آماده‌سازی مقدمات لازم، شرایط برای اعمال نشانگرهای مبتنی بر افق آماده می‌شود. اولین نشانگر مورد استفاده، نشانگر جذر میانگین مربعی دامنه است که مطابق رابطه ۱۶ محاسبه شد و مورد بررسی قرار گرفت.

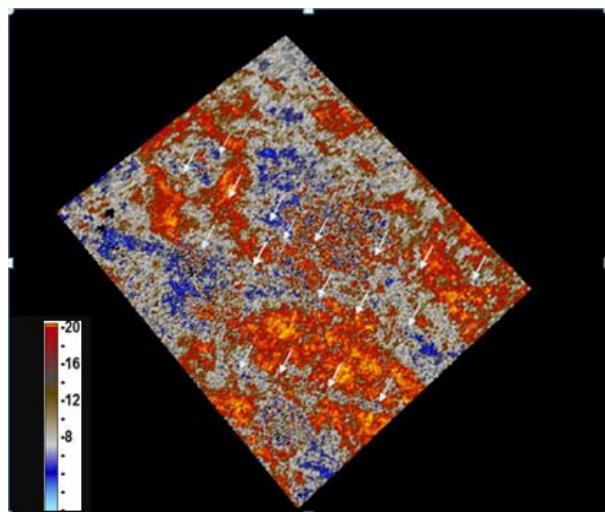
$$\sqrt{\frac{\sum_i^n amp^2}{k}} \quad (14)$$

مسئله مهم در تولید نقشه هر نشانگر، کاربرد یک مقیاس رنگی مناسب است، به گونه‌ای که استفاده از رنگ‌های نامناسب حتی می‌تواند منجر به ناکارآمدی یک نشانگر کارآمد هم بشود. بنابراین لازم است به منظور نیل به یک مقیاس رنگی مناسب، جدول‌های رنگی زیادی مورد بررسی قرار گیرد تا حالت بهینه بدست آید. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشانگر جذر میانگین مربعی دامنه را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۲ نمایشی از نشانگر شبی است.

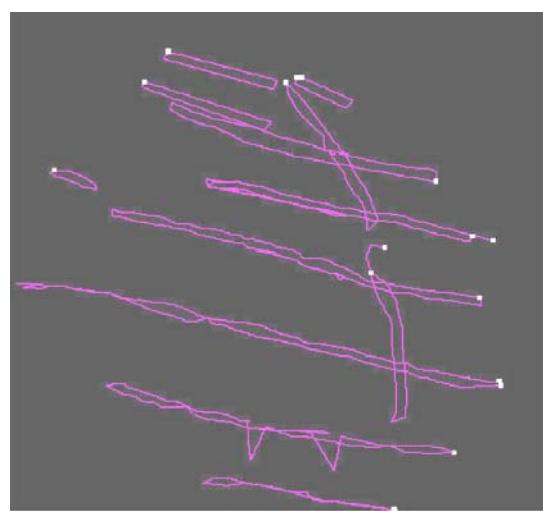
نشانگر لرزه‌ای مقدار استخراج شده، ابزار استخراج مقدار لرزه‌ای ورودی نسبت به تک‌افق یا یک تفسیر موجود است و به کاربر اجازه می‌دهد تا تولید نقشه‌های نشانگری سطحی را از حجم‌های لرزه‌ای تولید شده در حکم نشانگرهای حجمی با روش‌هایی که مستقیماً به منزله نشانگرهای سطحی یا ویژگی‌های محاسباتی



شکل ۱۳. نشانگر لرزه‌ای مقدار استخراج شده.



شکل ۱۴. نشانگر لرزه‌ای انرژی میانگین.



شکل ۱۵. الگوی گسلی به دست آمده برای منطقه مورد بررسی.

## ۷ بحث و نتیجه‌گیری

در بازه مورد بررسی این تحقیق، تحلیل نشانگرهای لرزه‌ای ابزاری بسیار کارآمد برای کنترل نشانگرها و همچنین تعیین محل چاه‌های تولیدی است. از میان انواع متفاوت نشانگرهای لرزه‌ای مورد استفاده که همگی بر مبنای افق زمانی مخزن تهیه شده بودند، نشانگر انحا به خوبی گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه را به نقشه در آورده است. از میان گروه نشانگرهای انحا که در این تحقیق مورد استفاده واقع شد، نشانگر آزمومت بیشترین انحا، ضمن کارایی بسیار زیاد در نمایش ویژگی‌های ساختمانی مدنظر، به خوبی اهداف تحقیق را با درجه اطمینان زیاد محقق ساخت. همچنین نشانگر جذر میانگین مربعی دامنه که همواره به منزله یک نشانگر کارا شناخته می‌شد، باز هم نقشه‌های نشانگری با قدرت تفسیر عالی تولید کرد. نشانگر شیب که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، در حوزه عملیاتی موجود، نسبت به دو نشانگر انحا و جذر میانگین مربعی دامنه، به مراتب کارایی کمتر و نتایج ضعیف‌تری داشت. پس از به انجام رسیدن محاسبات کامل، گروه نشانگرهای انحا به منزله یکی از بهترین و قابل اطمینان‌ترین نشانگرهای مورد استفاده در تعیین گسل‌ها و شکستگی‌ها معرفی می‌شود. این نشانگرها می‌توانند ویژگی‌های ساختمانی متنوعی را که قطعاً در مقاطع لرزه‌ای دیده نمی‌شوند، به خوبی و با وضوح زیاد نمایان کنند (شکل ۱۵).

چالش بعدی تعیین یک مدل آماری به منظور تعیین شکستگی‌ها و ریز گسل‌ها با استفاده از نشانگر انحا است. در این مسیر استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تولید یک ترکیب منطقی بین چند نشانگر لرزه‌ای می‌تواند راه‌گشا باشد.

## تشکر و قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از مساعدت‌های بخش

تحقیق و توسعه شرکت نفت و گاز پارس از بابت در اختیار گذاشتن اطلاعات لرزه‌نگاری موردنیاز، تقدیر و تشکر ویژه کنند.

## منابع

- Chopra, S. and Marfurt, k., 2007, Curvature attributes and their applications to 3D surface seismic data, *The Leading Edge*, **26**, 404-414.
- Dalley , R. M., Gevers, E. C. A., Stampfli, G. M., Davies, D. J., Gastaldi, C. N., Ruitenberg, P. A. and Vermeer, G. J. O., 1989, Dip and azimuth displays for 3D seismic interpretation, *First Break*, **7**(3), 86-95.
- Flynn, P. J. and Jain, K. J., 1989, On reliable curvature estimation, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Diego, pp. 110-116.
- Lisle, R. J., 1994, Detection of zones of abnormal strains in structure using Gaussian curvature analysis, *AAPG Bulletin*, **78**, 1811-1819.
- Hart, B. S., 2002, Validating seismic attributes, Beyond statistics, *The Leading Edge*, **21**, 1016-1021.
- Roberts, A., 2001, Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons, *First Break*, **19**, 85-100.
- Stewart, R. and Podolski, S. A., 1998, Curvature analysis of gridded surfaces, in: Structural Geology in Reservoir Characterization (eds Coward, M. P., Dalaban, T. S. and Johnson, H.), Geological Society Special Publications, London, **127**, 133-147.
- Taner, M. T., 2001, Seismic attributes, Canadian Society of Exploration Geophysics Recorder, **26**(9), 48-56.