موازنه تفسیر مقاطع لرزه‌نگاری و استفاده از آن برای کاهش خطا در تفسیرهای لرزه‌نگاری، با مثالی از ایران

نوشته: حامد سعادت‌نیا*، عبدالرحیم جواهریان، ایرج عبداللهی فرد* و محمدرضا قاسمی*****

* شرکت ملی نفت ایران، مدیریت اکتشاف، تهران، ایران
** مؤسسهٔ ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
*** سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

Balancing of Interpretation of Seismic Sections and its Application to Decrease the Errors in Seismic Interpretations: an Example from Iran

By: H. Sa'adatnia*, A. Javaherian, I. Abdollahi Fard* and M. R. Ghassemi*****

*Exploration Directorate, National Iranian Oil Company, Tehran, Iran
**Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
***Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

تاریخ دریافت:۱۳۸۳/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۲/۰۸

چکیده

یکی از وظایف مفسر لرزه‌نگاری، تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی است که در اعماق زمین قرار دارند. این ساختارها معمولاً نقشی اساسی در اکتشاف و تولید ذخایر هیدروکربنی ایفا می‌کنند. از آنجا که داده‌های لرزه‌ای همیشه کیفیت خوبی ندارند باید به گونه‌ای تفسیر نهایی را معتبر و قابل قبول کرد. یکی از راه‌های بهبود کیفیت تفسیر لرزه‌ای ساختارهای زمین‌شناسی، به حالت اولیه باز گرداندن (restoration) تفسیر ساختار برای درک شکل آن قبل از دگرشکلی است. بهترین راه برای شرح این مطلب، استفاده از معادلات تبدیل است که انتقال و چرخش جسم صلب و همچنین دگرشکلی را با هم لحاظ می‌کند. یک مقطع لرزه‌ای (seismic section) قابل بازگشت به حالت اولیه، معمولاً می‌تواند به وسیله روش‌های مختلفی به حالت اولیه بازگردانده شود و روش‌های مختلف تا حدی هندسه‌های متفاوتی ارائه می‌دهد. این بدان معنی است که استفاده از هرکدام از روش‌های بازگرداندن، لزوماً هندسه پیش از دگرشکلی را به طور دقیق ارائه نمی‌دهد. اما به هر حال، بازگرداندن به هر شیوه‌ای انجام شود، می‌تواند تفسیر حاصل را معتبر و قابل اطمینان سازد. هدف از این مطالعه، معرفی موازنه تفسیر مقاطع لرزه‌نگاری و استفاده از آن برای کاهش خطا در تفسیرهای لرزه‌نگاری است. به همین منظور، بر روی تفسیر یک مقطع لرزه‌نگاری نمونه از داده‌های لرزه‌نگاری سه بعدی دو میدان نفتی در خاور خوزستان، عمل موازنه طولی و سطحی صورت گرفت. بر این اساس تفسیر اولیه بهبود یافت و در نهایت با تفسیر اولیه مقایسه شد. به دلیل وجود داده‌های سطحی، چاه‌های فراوان و مقاطع عمقی لرزه‌ای کنترل شده به وسیله اطلاعات چاه‌ها در میدان‌های نفتی مورد نظر، عمل موازنه پاسخ مناسبی ارائه داد. برای موازنه تفسیر مقاطع لرزه‌نگاری در این منطقه، سه روش طولی-خطی (line-length)، برش ساده قائم (vertical simple shear) و لغزش خمشی (flexural slip) مقایسه و بر اساس محاسبات، روش لغزش خمشی به عنوان روش بهینه انتخاب شد.

کلیدواژه‌ها: موازنه، روشهای موازنه، به حالت اولیه بازگرداندن، مقاطع لرزه‌نگاری سه‌بعدی، چین‌خوردگی، زاگرس

Abstract

One of the duties of seismic interpreter is interpretation of the geological structures likely to be found at deeper levels. Such

constructions form a key to the understanding of regional tectonics and they often play a vital role in industry. The exploration for oil and gas in particular requires the best possible control on underground structures in order to locate drill holes for exploration investigation or for producing wells. Because the primary data are always incomplete and may be in part contradictory, the final interpretation should be at least geometrically validated. A powerful and independent test for the validity of a structural interpretation is the restoration of the structure to the shape it had before deformation. Restoration is a fundamental test of the consistency of the interpretation. It is best described by transformation equations which incorporate rigid translation and rotation plus deformation. A map or cross section can usually be restored by methods based on more than one kinematic model, and different methods will produce somewhat different restored geometries. It follows that any given restoration doesn't necessarily represent the exact pre-deformation geometry. The internal consistency of the restoration by any technique constitutes a validation of the interpretation. In this study, the main aim is introducing the balancing of seismic interpretation and its application to decrease the errors of interpretation. For this purpose, length and area balancing were done at a sample seismic cross section from 3D seismic data of two oilfields at the East of Khuzestan (SW Iran). As a result, the primary interpretation was corrected and finally the corrected interpretation was compared with primary interpretation. For balancing of seismic sections in this area, the flexural slip technique is selected as optimum technique through testing line-length, vertical simple shear and flexural slip techniques.

Key words: Balancing, Balancing methods, Restoration, 3D-seismic sections, Folding, Zagros

۱–مقدمه

بازگرداندن تفسیر مقاطع لرزه‌ای و موازنه آن، ریشه در یک روش قدیمی برای محاسبه ژرفای جداشدگی و کوتاه‌شدگی دارد (Chamberlain,1910; Bucher,1933; Gougel,1962) که به‌وسیله Dahlstrom (1969) و Mitra & Namson (1989) تغییر یافت و برای لایه‌های منفرد در یک مقطع لرزه‌ای سازگار شد. روش موازنه مقاطع لرزه‌نگاری شیوه مناسبی برای مطالعه تاریخچه زمین‌ساخت حوضه‌های رسوبی است و کاربردهای متفاوتی دارد. این مسئله می‌تواند نقش بسزایی در اکتشاف و توسعه منابع هیدروکربنی داشته باشد. همچنین با بازگرداندن ساختارهای قدیمی، می‌توان تاریخچه پیدایش آن ساختارها را مطالعه کرد (Shiguo Wu et al., 2005). از طرفی، موازنه مقاطع لرزه‌نگاری یکی از ابزارهای مهم زمین‌شناسی برای تفسیر مناطق دارای کمربندهای روراندگی است (House, 2004).این فن، برای برآورد و محاسبه کوتاه‌شدگی پوسته نیز به کار گرفته شده است(Hindle et al., 2005). به دلیل اهمیت تفسیر دقیق مقاطع لرزه‌ای و ساختارهای زمین‌شناسی قدیمی در اکتشافات هیدروکربن‌ها، این مسئله همواره مورد توجه بوده است. بسیاری از مسائلی که در بازگرداندن تفسیر مقاطع لرزه‌ای پیش‌می‌آید، ناشی از محدودیت‌های هندسی است که این فرایند بر تفسیرهای زمین‌شناسی تأثیر می‌گذارد. به هر حال، نتیجه‌ای که از اهمیت مشابهی برخوردار است، این است که ساختار قدیمی به وسیله بازگرداندن مشخص می‌شود. یک ساختار قدیمی و تکامل آن در طول زمانی که مهاجرت هیدروکربن صورت می‌گیرد، می‌تواند در اکتشاف نفت و گاز اهمیت فراوانی داشته باشد. بازگرداندن از حالت دگرشکل شده آغاز می‌شود و حالت دگرشکل نشده گذشته را ایجاد می‌کند. از آنجا که داده‌های لرزه‌ای همیشه کیفیت خوب ندارند و از طرفی در حوزه زمان برداشت می‌شود و ممکن است دارای اشکالاتی باشند، باید به گونه‌ای تفسیر نهایی را معتبر و قابل قبول کرد.

یک راه مناسب برای دانستن میزان اعتبار یک تفسیر ساختاری، به حالت اولیه باز گرداندن ساختار برای درک شکل آن پیش از دگرشکلی است. یک مقطع قابل بازگشت به حالت اولیه هندسی، با اجزای آن قبل از دگرشکلی، به طور کامل یا تقریباً کامل همخوانی دارد. به حالت اولیـــه بازگرداندن تفسیر مقاطع، یک آزمایش اصولی برای دریافتن سازگاری و صحت تفسیر است. یک ساختار قابل بازگشت به حالت اولیه دارای یک سازگاری درونی و بنابراین یک تفسیر امکان پذیر از نظر هندسی و مکان شناسی جغرافیایی است (Groshong, 1999). بهترین راه برای شرح فرایند موازنه استفاده از معادلات تبدیل است که انتقال و چرخش جسم صلب و همچنین دگرشکلی را با هم در نظر می‌گیرد. به طور کلی تبدیل‌های خطی (مانند برش ساده) نمی‌توانند هم سطح و هم پیوستگی را در بازگرداندن تفسیر یک مقطع لرزه‌ای حفظ کنند. اگر سطح ثابت نگه‌داشته شود، بین قسمت‌های مختلف تفسیر مقطع لرزه‌ای بازگردانده، گسستگی یا همپوشانی به وجود می‌آید و اگر گسستگی‌ها و

همپوشانی‌ها حذف شود، در این صورت، سطح نمی‌تواند ثابت نگه‌داشته شود. هر روش بازگرداندن، باید فرض‌هایی را در مورد وضعیت نادگرشکل شده (شرایط مرزی) و مدل تبدیل ارائه دهد. مهم‌ترین آنها این است که لایه‌ها در حالت اولیه افقی نهشته می‌شوند و یک طرف لایه‌ها (خط ثابت مبنا) در حالت دگر شکل شده و نادگرشکل یک وضعیت را داراست. اگر شرایط مرزی از نظر زمین‌شناسی دقیق نباشد، تفسیر مقطع بازگردانده شده قابل اطمینان نخواهد بود و نمی‌توان اعتبار تفسیر را ارزیابی کرد. بیشتر روش‌های موازنه و به حالت اولیه بازگرداندن تفسیر مقاطع، یک مدل تبدیل خطی فرض می‌کنند. برای مثال در «برش ساده موازی لایه» این‌گونه فرض می‌شود که طول مرز لایه در تفسیر مقطع بازگردانده شده مشابه آن در تفسیر مقطع بازگردانده نشده است و هیچ گونه تغییر ستبرا ناشی از زمین‌ساخت وجود ندارد. یک تبدیل خطی به قدری محدود کننده است که حتی نمی‌تواند پیوستگی بین محدوده‌های مجاور را حفظ کند. لذا این مسئله باعث از شکل طبیعی افتادن تفسیر مقطع بازگردانده شده می‌شود، مگر این که دگرشکلی طبیعی از یک تبدیل خطی مشابه تبدیل استفاده شده پیروی کند که این امر در طبیعت بسیار نامحتمل است. اما در حالت کلی تبدیلات غیرخطی تنها مواردی هستند که می‌توانند پیچیدگی دگرشکلی طبیعی را به تصویر بکشـــند (شکل ۱) و همچنین ساده‌تر از تبدیلات خطی توانایی تکرار را دارند (Wickham & Moeckel, 1997).

۲- ذکر یک مثال از دو میدان نفتی در خاور خوزستان

شکل ۲ موقعیت میدان‌های نفتی مورد نظر در این مطالعه را نشان می‌دهد. به دلیل وجود سازند تبخیری گچساران در سطح، انرژی لرزه‌ای به میزان زیادی تحلیل می‌رود. همچنین به دلیل شیب به‌نسبت زیاد دو گسل اصلی که در مقطع دیده می‌شود و همچنین خردشدگی پهنه گسل، اطلاعات لرزه‌ای در این ناحیه بسیار ضعیف هستند. هدف این است که برای تکمیل تفسیر و بررسی صحت آن از زمین‌شناسی ساختاری کمک گرفته شود. یعنی سعی می‌شود با تلفیق فنون تفسیر و زمین‌شناسی ساختاری، افق‌های مورد نظر تا حد توان در قسمت‌های گسلیده پی‌گیری شود. شکل ۳ تفسیر یک مقطع مهاجرت داده شده پس از برانبارش در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. قسمت‌هایی که با علامت بیضی مشخص شده‌اند، دارای گسلیدگی هستند و داده‌ها کیفیت خوبی ندارند و در نتیجه نمی‌توان بازتابنده‌ها را دنبال کرد. پس از تفسیر و بازگرداندن لایه‌ها به حالت اولیه، مشاهده می‌شود که لایه‌ها از نظر طولی حالت موازنه نشان نمی‌دهنـــد (شکل ۴). همان‌طور که از ظاهر داده‌های لرزه‌نگاری مشخص است، به دلیل نبود داده در بسیاری از بخش‌های مقطع لرزه‌ای، مقطع از نظر طولی و سطحی موازنه نیست و تفسیر نیاز به اصلاح دارد (زیرا خط متحـرک (loose line) که در سمت راست مقطع قرار دارد، حالت مستقیم را نشان نمی‌دهد). اما با توجه به روند کلی گسل‌های منطقه و همچنین ثابت بودن روند کلی چین‌خوردگی می‌توان قسمت‌های فاقد داده را بازسازی کرده و سپس دوباره تفسیر مقطع را به حالت اولیه بازگرداند. در این حال، شرایط ساده در نظر گرفته می‌شود و در صورتی که تفسیر مقطع حالت موازنه را نشان دهد، با توجه به کاهش یا افزایش طول، ساختارهایی در تفسیر مقطع در نظر گرفته می‌شود تا این افزایش و کاهش را جبران کند و به عبارتی تفسیر قبلی اصلاح می‌شود تا تفسیر مقطع حالت موازنه را نشان دهد. در مرحله بعدی، قسمت‌های بدون داده، با توجه به مطالبی که ذکر شد تفسیر شده است (شکل ۵).

۲-۱- انتخاب روش مناسب

در عمل، روش‌های به حالت اولیه بازگرداندن یک ساختار بر اساس مدلی برای تکامل هندسی پایه ریزی شده است که مدل جنبشی نام دارد. تفسیر یک مقطع معمولاً می‌تواند به وسیله روش‌هایی که مبنی بر بیش از یک مدل جنبشی هستند به حالت اولیه بازگردانده شود. روش‌های مختلف تا حدی هندسه‌های متفاوتی ارائه می‌دهد. این بدان معنی است که هر بازگرداندنی معلوم نیست بتواند هندسه پیش از دگرشکلی را به طور دقیق ارائه دهد. اما بازگرداندن به هر شیوه‌ای انجام شود و با رعایت فرض‌ها و ملزومات آن شیوه، اعتبار و اطمینان آن شیوه تأمین شود، تفسیر حاصل را بهبود می‌بخشد. گرچه علاوه بر روش‌های کیفی، می‌توان با آزمایش روش‌های مختلف به صورت کمی، روش بهینه‌ای برای انجام موازنه تفسیر پیدا کرد. روش‌های مختلفی از جمله روش‌های بازگردانی جسم صلب(rigid-body restoration)، بازگرداندن طولی- خطی (line-length)، برش ساده مایل و قائم (oblique and vertical simple shear)، لغزش خمشی (flexural slip) و بازگرداندن سطحی (area restoration) برای بازگرداندن تفسیر مقاطع لرزه‌نگاری وجود دارد. با توجه به ویژگی‌های زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه که در منطقه زاگرس قرار دارد و همچنین با توجه به فرضیه روش‌های مذکور، روش‌های بازگرداندن طولی- خطی، برش ساده قائم و لغزش خمشی در این منطقه انتخاب شد. هدف، به کارگیری این سه روش و همچنین مقایسه نتایج آن با یکدیگر و انتخاب بهترین روش برای بازگرداندن تفسیر مقاطع لرزه‌ای در این منطقه است. پس از انجام محاسبات برای دو سازند نمونه a و b، همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با توجه به این که روش لغزش خمشی کمترین اختلاف را از نظر طولی و سطحی نشان می‌دهد، این روش برای موازنه تفسیر به کار گرفته شـد (سعادت‌نیا و همکاران، ۱۳۸۴). بازگرداندن به روش لغزش خمشی برای مواقعی مناسب است که لایه‌ها چین خورده‌اند و تغییرات ستبرای ساختاری کوچک است که این شرایط دگرشکلی در بسیاری از ساختارهای فشارشی وجود دارد. براساس آنچه از زمین‌ساخت منطقه زاگرس معلوم است، این شرایط در پهنه ساختاری زاگرس وجود دارد و استفاده از این روش برای منطقه مورد نظر مناسب است. یکی از نکات مهم در روش لغزش خمشی توجه به این مسئله است که آیا تغییرات

ستبرا ناشی از عوامل دگرشکلی زمین‌ساختی است یا خیر. با توجه به اطلاعات چاه‌های منطقه و همچنین گزارش‌های زمین‌شناسی موجود معلوم شد که در این منطقه از سمت جنوب باختر به سمت شمال خاور تغییرات ستبرا وجود دارد. این تغییرات ستبرا به طور عمده ناشی از عوامل دگرشکلی زمین‌ساختی نیست و به شرایط رسوبگذاری و عوامل اولیه زمین‌ساختی مربوط می‌شود. لذا زمانی می‌توان از آن صرفنظر نمود که مقدار آن ناچیز باشد. محاسبات نشان می‌دهد میزان تغییرات ستبرا در بیشترین حالت حدود ۱۵٪ است و مربوط به سازند شیلی پابده است که ماهیت شکل‌پذیر دارد. لذا بخشی از این تغییرات ستبرا ناشی از عوامل دگرشکلی زمین‌ساختی و بخشی مربوط به شرایط رسوبگذاری است. همچنین باید توجه داشت خطاهای ناشی از پردازش و تفسیر این لایه‌ها نیز می‌تواند نقش مؤثری در این تغییرات ستبرا داشته باشد. با توجه به مجموع این نکات می‌توان با دقت بسیار خوبی این تغییرات ستبرا را نادیده در نظر گرفت.

۲-۲ – موازنه تفسیر یک مقطع لرزه‌ای نمونه

برای نمونه یک مقطع لرزه‌ای مهاجرت داده شده پس از برانبارش از داده‌های لرزه‌ای سه بعدی در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد (شکل ۵). این مقطع بدون درنظرگرفتن مسائل زمین‌شناسی ساختاری تفسیر شد (شکل ۶). در شکل ۷ افق‌های آسماری، پابده، ایلام، سروک، کژدمی و یک لایه ژرف با نام افق ژرف (deep horizon) از شکل ۶ مشخص و تفسیر شده است (سعادت‌نیا، ۱۳۸۳). در این مقطع حضور گسل‌ها تفسیر افق‌های سروک و کژدمی را دشوار کرده است. در صورت بازگرداندن تفسیر این مقطع به حالت اولیه، افق‌های آسماری، پابده و ایلام که به دلیل مناسب‌تر بودن داده‌ها دقیق‌تر است، جابه‌جایی‌های یکسانی نشان می‌دهند، اما افق‌های سروک و کژدمی در دو طرف گسل همخوانی ندارند. عدم همخوانی میزان جابه‌جایی افق‌های مذکور در شکل ۷ با پیکان‌های زرد رنگ مشخص شده است. بر اساس میزان جابه‌جایی گسل b، تفسیر افق‌های ایلام و سروک اصلاح شده است. بدین ترتیب که تفسیر باید در این قسمت به گونه‌ای تغییر یابد که پس از حذف عملکرد گسل مذکور افق‌های مورد نظر در دو طرف گسل همخوانی داشته باشند. شکل ۸ حالت اصلاح شده تفسیر را نشان می‌دهد.

در مرحله بعدی باید تفسیر مقطع به حالت اولیه بازگردانده شود. یعنی جابه‌جایی گسل‌ها با توجه به زمان عملکرد آنها حذف شود. به ترتیب، ابتدا پدیده‌های جدیدتر و سپس پدیده‌های قدیمی‌تر از روی تفسیر مقطع برداشته می‌شوند تا تفسیر مقطع به حالت اولیه قبل از تأثیر عوامل زمین‌ساختی بازگردد. باید توجه داشت که پدیده‌های زمین‌ساختی باید به ترتیب زمانی بازگردانده شوند. در طبیعت، گسل‌ها ممکن است فعالیت همزمان داشته باشند، ولی برای ساخت مدل به‌نسبت ساده‌تر، حرکت گسل‌ها از نظر زمانی جدا فرض می‌شود. لذا هنگام بازگرداندن ابتدا گسل c به حالت قبل از جابه‌جایی بازگردانده می‌شود. از آنجا که گسل d کوچک و محلی است و تغییرات زیادی در تفسیر ایجاد نمی‌کند، لذا تقدم و تأخر آن تأثیری در تفسیر ندارد و ابتدا این گسل حذف می‌شود تا در مراحل بعدی روی بازگرداندن گسل‌های اصلی و کنترل آنها تمرکز شود. شکل ۹ تفسیر مقطع نهایی را که همه اصلاحات مذکور روی آن اعمال شده است و قرار است بازگردانده شود، نشان می‌دهد. شکل ۱۰ مراحل بازگرداندن و میزان جابه‌جایی گسل c را نشان می‌دهد. سپس گسل‌های b و a نیز به همین ترتیب بازگردانده می‌شوند. لازم به ذکر است که در بازگرداندن تفسیر مقاطع از نرم افزار 2DMove استفاده شده است.

در مرحله بعد، پس از یک بازبینی کلی، تغییرات مختصری در تفسیر ایجاد شده است. بدین ترتیب که با توجه به جابه‌جایی مختصر گسل a و همچنین با توجه به این که شواهد محکمی روی تفسیر مقطع لرزه‌نگاری اصلی مبنی بر عملکرد این گسل دیده نمی‌شود از این گسل صرفنظر شده است. از طرفی با توجه به امتداد گسل b، امکان این مسئله که این گسل لایه ژرف را قطع کرده باشد، بررسی و آثار گسل در لایه ژرف مشاهده شده است. در نتیجه این گسل امتداد داده شده تا افق مذکور را قطع کند.

نکته مهم دیگر، بررسی همخوانی افق‌ها در دوطرف گسل‌ها، پس از بازگرداندن تفسیر مقطع است. آنچه در شکل ۱۱ وجود دارد نشان دهنده عدم تطابق افق‌ها در دو طرف گسل‌ها می‌باشد. در نتیجه لازم است افق‌های مورد نظر بار دیگر در قسمت بدون اطلاعات لرزه‌نگاری اصلاح شود تا تفسیر مقطعی که قرار است به حالت اولیه بازگردانده شود دارای کمترین خطا باشد. این مراحل باید با دقت انجام پذیرد، زیرا اشتباه در هر مرحله باعث ایجاد خطا می‌شود و ممکن است این خطا به عوامل دیگری غیر از آنچه گفته شد، نسبت داده شود. در این مرحله لازم است تفسیر چندین بار اصلاح شود و پس از هر بار اصلاح، با انجام دوباره همه مراحل مذکور، جابه‌جایی گسل‌ها دوباره حذف شود و همخوانی افق‌ها در دو طرف گسل‌ها کنترل گردد تا حالت مطلوب به دست آید. پس از این‌که تفسیر به طور نهایی اصلاح شد تفسیر مقطع نهایی برای بازگرداندن به حالت اولیه و کنترل موازنه بودن مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱۲). برای اطمینان هرچه بیشتر از تفسیر انجام شده و صرفاً برای کنترل طول‌ها، ابتدا تفسیر مقطع به روش طولی- خطی به حالت اولیه باز گردانده شد (شکل ۱۳). پس از آن‌که از موازنه طول‌ها اطمینان حاصل شد، لازم است از موازنهٔ سطح‌ها نیز اطمینان حاصل شود، لذا از روش لغزش خمشی برای بازگرداندن استفاده شد که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. همانطور که آشکار است خط متحرک مقطع، حالت کاملاً مستقیم و یکنواخت را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده موازنه بودن تفسیر مقطع است. در شکل ۱۴ دیده می‌شود که پس از بازگرداندن افق آسماری به حالت کاملاً افقی، بقیه لایه‌ها تغییرات ستبرایی را نشان می‌دهند. دلیل این امر را

می‌توان این‌گونه توضیح داد که در هنگام چین‌خوردگی، بویژه در یال سمت راست مقطع، تغییرات ستبرایی ایجاد می‌شود. این تغییرات ستبرا با جنس لایه‌ها و در واقع شکل‌پذیر بودن یا نبودن آنها ارتباط مستقیم دارد. از طرفی در ابتدای زمان دگرشکلی فشارشی، نوعی کوتاه‌شدگی موازی با لایه‌بندی رخ می‌دهد که مقدار آن قابل محاسبه نبوده و به همین علت در مدل‌های ارائه شده از این مقدار صرفنظر شده است؛ در صورتی‌که در طبیعت، این کوتاه‌شدگی وجود دارد. عامل دیگر تغییرات ستبرا ناشی از شرایط رسوبگذاری است که این امر در گزارش چاه‌ها نیز تأیید شده است. با توجه به این مجموعه دلایل می‌توان تغییرات ستبرا را توجیه کرد. شکل ۱۵ تفسیر مقطع اولیه و مقطع موازنه شده را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که مقطع حاضر از نظر فیزیکی و زمین‌شناسی قابل قبول است، اما تنها حالتِ صحیح ممکن نیست. اگر بازگرداندن امکان‌پذیر باشد، نشان می‌دهد که ساختار ماهیتاً نامتناقض است، حتی اگر روش بازگرداندن مدل کاملی برای فرایند دگرشکلی نباشد. تفسیری که برمبنای داده‌های اضافی همچون داده‌های سطحی، چاه‌های فراوان و یا مقاطع عمقی لرزه‌ای کنترل شده به وسیله اطلاعات چاه‌ها پایه‌ریزی شده است، همواره قابل بازگشت هستند و در مقابل تفسیرهای مبتنی بر داده‌های ناقص و کم به ندرت قابل بازگشت هستند.

۴- بحث

یک نقشه یا مقطع لرزه‌ای قابل بازگشت به حالت اولیه، معمولاً می‌تواند به وسیله روش‌های متفاوتی به حالت اولیه بازگردانده شود و روش‌های مختلف تا حدی هندسه متفاوتی ارائه می‌دهد. این بدان معنی است که هر بازگرداندنی لزوماً هندسه پیش از دگرشکلی را به طور دقیق ارائه نمی‌دهد. همان‌طور که اشاره شد، بهترین راه برای شرح این مطلب استفاده از معادلات تبدیل است که انتقال و چرخش جسم صلب و همچنین دگرشکلی را با هم لحاظ می‌کند. این معادلات می‌توانند خطی یا غیرخطی باشند. کرنش، تابعی از ثابت‌های دگرشکلی است و معادلات دگرشکلی خطی کرنشی همگن تولید می‌کنند. به طور کلی، تبدیل‌های خطی (مانند برش ساده) نمی‌تواند هم سطح و هم پیوستگی را در بازگرداندن تفسیر یک مقطع لرزه‌ای حفظ کند. اگر سطح ثابت نگهداشته شود، گسستگی یا همپوشانی بین قسمت‌های مختلف مقطع لرزه‌ای بازگردانده به وجود می‌آید و اگر گسستگی‌ها و همپوشانی‌ها حذف شود، در این صورت سطح نمی‌تواند ثابت نگه‌داشته شود. تبدیلات غیرخطی تنها مواردی هستند که می‌توانند پیچیدگی دگرشکلی طبیعی را به تصویر بکشند و همچنین ساده‌تر از تبدیلات خطی توانایی تکرار را دارند. مهم‌ترین مزایای روش غیرخطی را می‌توان بدین صورت برشمرد:

۱- کنترل همزمان سطح و پیوستگی برای دگرشکلی زمین‌شناختی ناهمگن، با اطمینان قابل حصول است.

۲- تقسیم هر لایه به محدوده‌های چهارضلعی بدین معنی است که بازگرداندن می‌تواند در یک بلوک گسلی لایه به لایه انجام شود و این نسبت به حالتی که تمام گسل به یکباره بازگردانده شود، ترجیح دارد و دقیق‌تر است. تغییرات ستبرا در هر لایه می‌تواند بازگردانده شود. به علاوه، گسل‌های هم‌گذاشت و متباین قابل بازگرداندن هستند که این مسئله یک مشکل جدی در برنامه‌هایی است که شرایط را برش ساده و گسل‌ها را به عنوان خط ثابت مبنا به کار می‌برند.

۳- کرنش محدود، چرخش صلب و تبدیل می‌تواند در هر محدوده محاسبه شود. این مسئله کرنش لازم را برای تبدیل مقطع لرزه‌ای از حالت دگرشکل شده به حالت نادگرشکل نشان می‌دهد. معکوس این کرنش میزان دگرشکلی را که در مقطع لرزه‌ای دگرشکل جمع شده است نشان می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک شرط اضافی برای افزایش اعتبار و اطمینان تفسیر مقطع بازگردانده شده به کار رود. اگر کرنش محلی در یک محدوده چهارضلعی با کرنش مشاهده شده در سنگ تفاوت بسیاری داشت، بازگرداندن تفسیر مقطع در جایی دارای اشکال است که ممکن است شرایط مرزی فرض شده و یا مدل تبدیل عامل این مشکل باشد.

۴- به دلیل این که کرنش مجموع قابل محاسبه است، شرایط کمّی می‌تواند برای ارتباط دادن هندسه نادگرشکل شده در امتداد گسل‌ها اعمال شود.

۵- نتیجه‌گیری

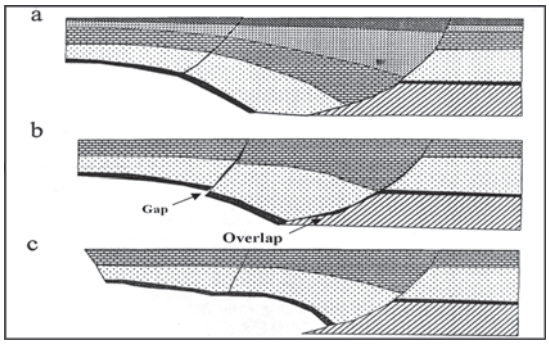
یک آزمایش خوب برای ارزیابی میزان اعتبار تفسیر ساختاری یک مقطع لرزه‌ای، کنترل موازنهٔ آن است. در نتیجه لازم است در قسمت‌های گسلیده که کیفیت داده‌های لرزه‌ای مناسب نیست، تا حد امکان موازنه صورت بگیرد تا تفسیر مقاطع لرزه‌ای دقیق‌تر شود. برای موازنه تفسیر مقاطع لرزه‌ای در دو میدان نفتی مجاور هم در خاور خوزستان، سه روش طولی- خطی، برش قائم و لغزش خمشی مقایسه و بر اساس محاسبات، روش لغزش خمشی به عنوان روش بهینه انتخاب شد. با موازنه تفسیر ساختاری مقاطع لرزه‌ای ناحیه مورد نظردر منطقه زاگرس می‌توان ادعا کرد محلی که برای حفاری در این منطقه ارائه شده است دارای اطمینان بیشتری است. همچنین تعیین محل حفاری‌های بعدی، محاسبه حجم ذخیره و درک صحیح از زمین‌ساخت منطقه‌ای دارای صحت بیشتری خواهد بود.

سپاسگزاری

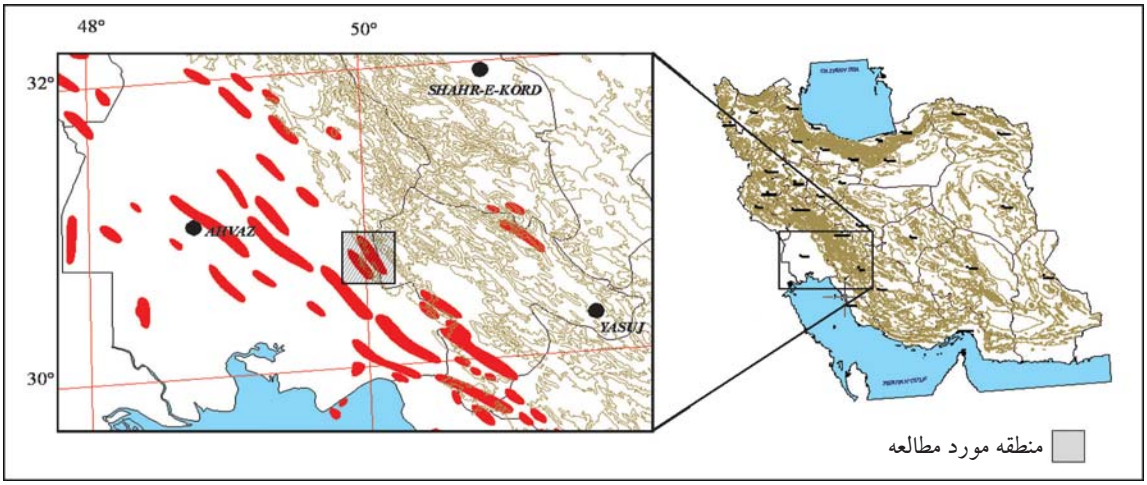
این مطالعه در قالب طرح پژوهشی مصوب شماره ۶۵۲/۱/۱۰۴۲ دانشگاه تهران انجام شده است. لذا از موسسه ژئوفیزیک و حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه تهران قدردانی می‌شود. همچنین از اداره کل ژئوفیزیک مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران و بویژه آقایان مهندس مجتبی محمد و خراسانی و مهندس مصطفی نائینی علابیگی که امکان استفاده از امکانات نرم افزاری و سخت افزاری آن اداره را فراهم نمودند، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

جدول ۱- مقایسه اختلاف طول و سطح نسبت به طول و سطح اولیه در روش‌های مختلف بازگرداندن در مقطع لرزه‌نگاری شکل ۳ که برای انتخاب روش بهینه مورد استفاده قرار گرفته است (سعادت‌نیا، ۱۳۸۳).

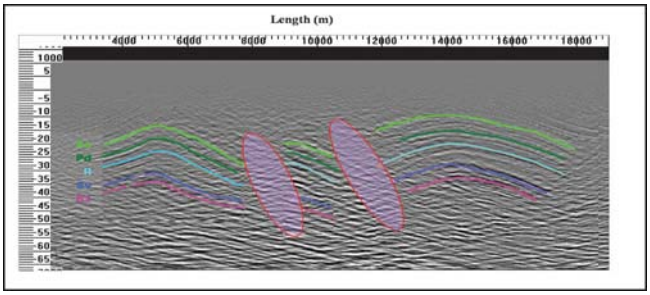
نام روش	اختلاف طول سازند As (کیلومتر)	اختلاف طول سازند Pb (کیلومتر)	اختلاف مساحت (کیلومتر مربع)	نتیجه
طولی- خطی	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۵۷	غیرقابل قبول
برش قائم	۰/۹۹	۰/۳۲	۰/۰۱	غیرقابل قبول
لغزش خمشی	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۰۲	قابل قبول



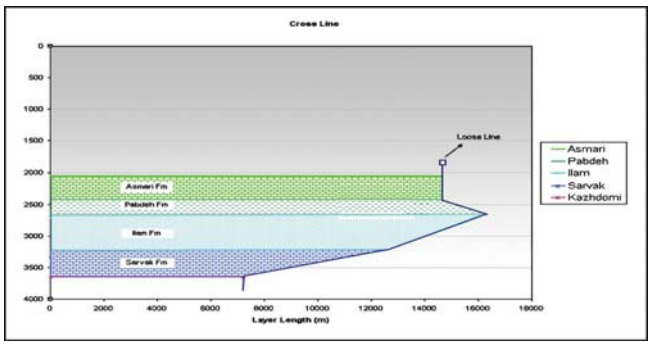
شکل ۱- مقایسه نتیجه بازگرداندن به دو روش تبدیل خطی و غیرخطی(Wickham & Moeckel, 1997). a) یک مقطع از یک خط لرزه‌ای تفسیرشده دریایی در نیجریه که یک گسل نرمال قاشقی، به همراه فرادیواره رشدی آن را نشان می‌دهد. گسل سمت چپ مصنوعی است و هیچ گونه جابه‌جایی ندارد و تنها باعث شده که مقطع به سه قسمت تقسیم شود. b) مقطع (a) که با به کارگیری برش ساده شیبدار، چرخش صلب و انتقال در هر سه ناحیه بازگردانده شده است. شکاف‌ها و همپوشانی‌ها با فلش مشخص شده است. شکافی که در گسل غیرواقعی سمت چپ، در مقطع بازگردانده شده، دیده می‌شود مصنوعی است و این اشتباه در اثر به کار گیری تبدیل خطی برش ساده جهت بازگرداندن مقطع ایجاد شده است. c) مقطع (a) که با به کارگیری معادلات تبدیل غیرخطی بازگردانده شده است. گسل غیرواقعی سمت چپ بدون هیچ گونه شکاف یا همپوشانی بازگردانده شده است. همچنین حاشیه سمت چپ مقطع که به عنوان خط متحرک در نظر گرفته شده شیبدار است و دارای طول کوتاه‌تری نسبت به مقطع در حالت‌های قبلی است.



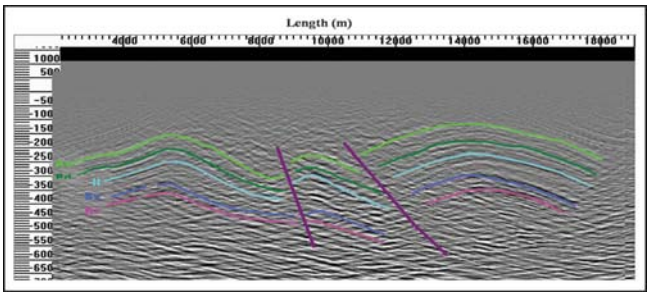
شکل ۲- موقیت میادین نفتی مورد نظر در بین میادین منطقه خاورخوزستان.



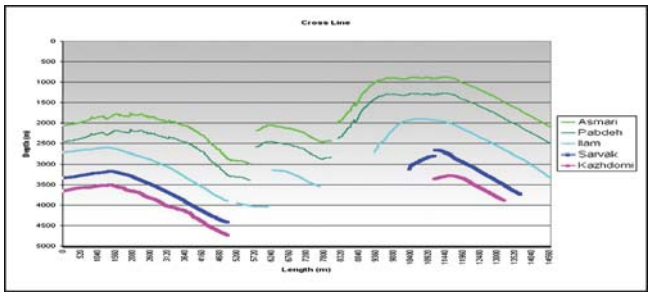
شکل ۳- یک مقطع مهاجرت داده شده پس از برانبارش از یک cross line در منطقه مورد مطالعه در خاور خوزستان. تفسیر در قسمتی که داده‌ها کیفیت خوبی دارند و بازتابنده‌ها پیوستگی مناسبی نشان می‌دهند انجام شده است. قسمت‌هایی که با علامت بیضی مشخص شده است به دلیل گسل خوردگی داده‌ها کیفیت خوبی ندارند و نمی‌توان بازتابنده‌ها را دنبال کرد. افق‌هایی که در شکل تفسیر شده‌اند به ترتیب از بالا: آسماری، پابده، ایلام، سروک و کژدمی هستند که برای موازنه به کار گرفته شده‌اند.



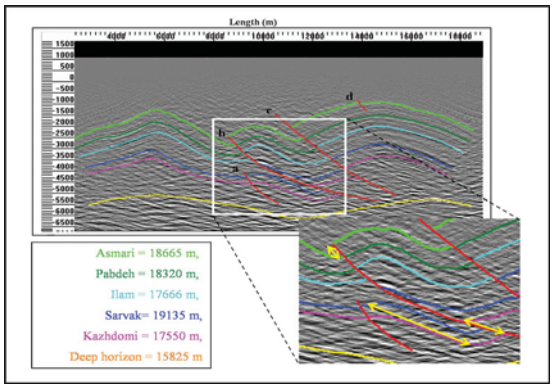
شکل ۴- افق‌های تفسیر شده در شکل ۳ که به حالت اولیه بازگردانده شده است. از شکل ظاهری خط متحرک (loose line) در سمت راست شکل معلوم می‌شود که تفسیر انجام شده در شکل ۳ حالت موازنه را نشان نمی‌دهد.



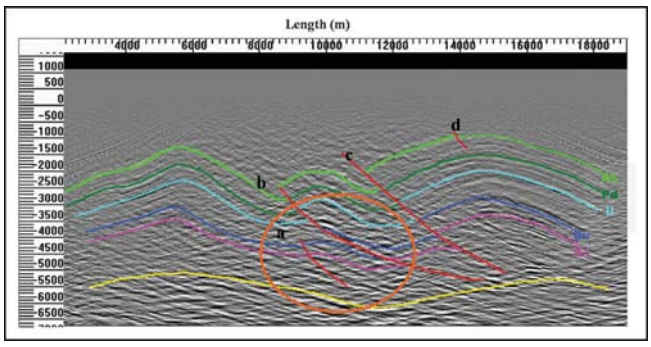
شکل ۵- بخش‌هایی از مقطع که در شکل ۳ به دلیل وجود گسل‌خوردگی تفسیر نشده است، با توجه به تفسیر افق آسماری که نسبتاً کامل است و همچنین سامانه گسلی منطقه، به طور حدودی تکمیل شده است.



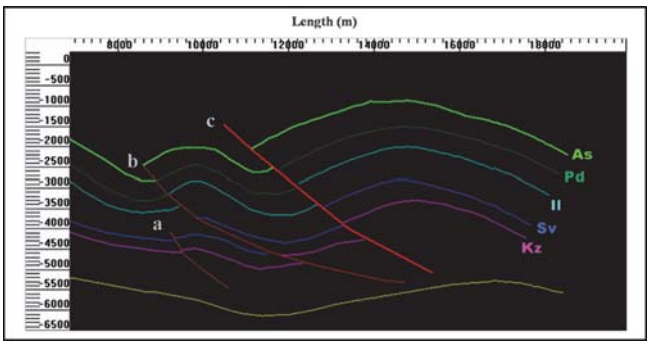
شکل ۶- تفسیر افق‌های انتخاب شده در مقطع لرزه‌نگاری شکل ۳. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل کیفیت نامطلوب داده‌ها در اثر گسل‌خوردگی، در برخی قسمت‌ها امکان تفسیر لایه‌ها وجود نداشته است.



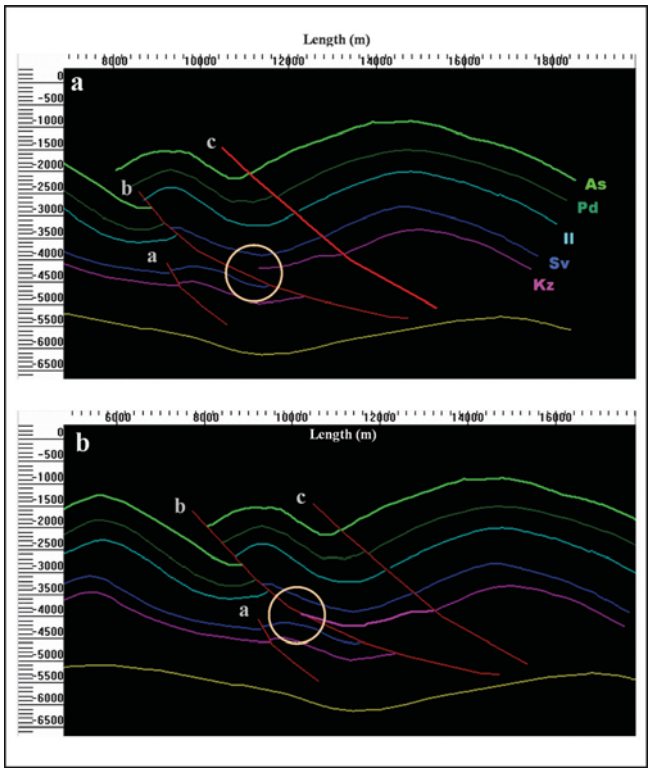
شکل ۷- تفسیر اولیه‌ای که از مقطع نمونه شکل ۵ در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است (اعداد ارائه شده بیانگر طول تفسیر شده لایه‌ها می‌باشند). در قسمتی که بزرگنمایی شده است مشاهده می‌شود با توجه به گسل b تفسیر افق‌های سروک و کژدمی از نظر ساختاری دارای اشکال است (زیرا میزان جابه‌جایی این افق‌ها در دوطرف گسل همخوانی ندارد).



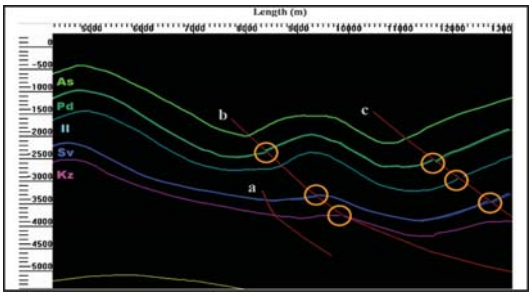
شکل ۸- در این شکل، عدم همخوانی در میزان جا به جایی در افق‌های سروک و کژدمی (که در مقطع شکل ۷ مشاهده شده بود) در اطراف گسل b اصلاح شده است و مقطع آماده بازگرداندن می‌باشد (دایره نارنجی نشان دهنده منطقه‌ای است که تفسیر از نظر همخوانی در دو طرف گسل b دارای اشکال بود و در این شکل اصلاح شده است).



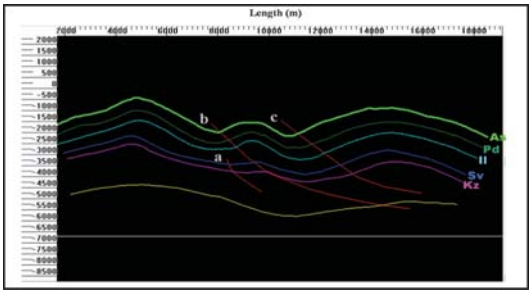
شکل ۹- تفسیر مقطع نهایی نمونه (شکل ۷) که اصلاحات مربوط به میزان جابه‌جایی گسل b و همخوانی افق‌ها در دوطرف این گسل، روی آن اعمال شده است و آماده انجام مرحله‌بعدی، یعنی حذف اثر گسل c است. برای سهولت در مشاهده و پیگیری کار، مقطع لرزه‌نگاری از شکل حذف شده است، اما تفسیر لایه‌ها در مختصات صحیح خود قرار دارند.



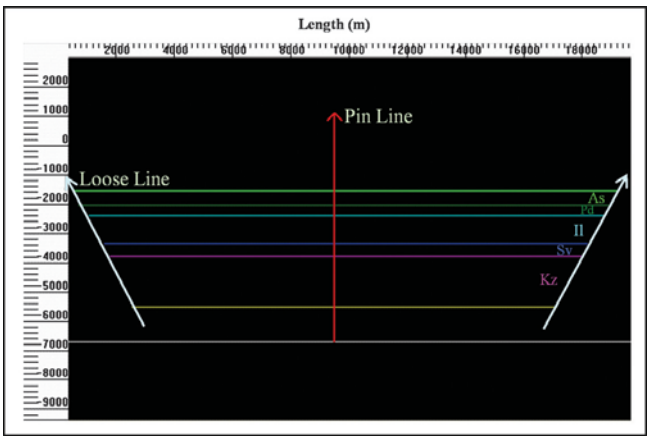
شکل ۱۰- در این شکل عملکرد گسل c از تفسیر مقطع حذف شده است. در شکل a مشاهده می‌شود که پس از بازگرداندن بلوک گسلی، افق کژدمی از نظر طولی دارای ناپیوستگی می‌شود که در شکل با علامت دایره نشان داده شده است. در شکل b دوباره تفسیر اصلاح شده است و در نهایت، افق اصلاح شده کژدمی و هندسه اصلاح شده گسل b نشان داده شده است.



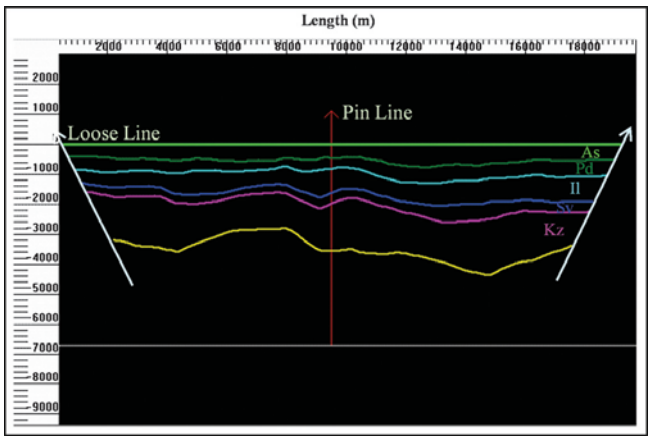
شکل ۱۱- تفسیر مقطع نمونهٔ مورد نظر در شکل ۷ پس از حذف جابه‌جایی گسل‌ها و انجام اصلاحات لازم برای هم‌خوانی افق‌ها در دو طرف گسل‌های موجود. مشاهده می‌شود در دوطرف گسل‌ها هنوز عدم تطابق افق‌ها به صورت جزئی وجود دارد که با دایره‌های نارنجی رنگ مشخص شده است. این بدان معنی است که تفسیر در منطقه نزدیک گسل‌ها معتبر نیست و باید دوباره اصلاح شود.



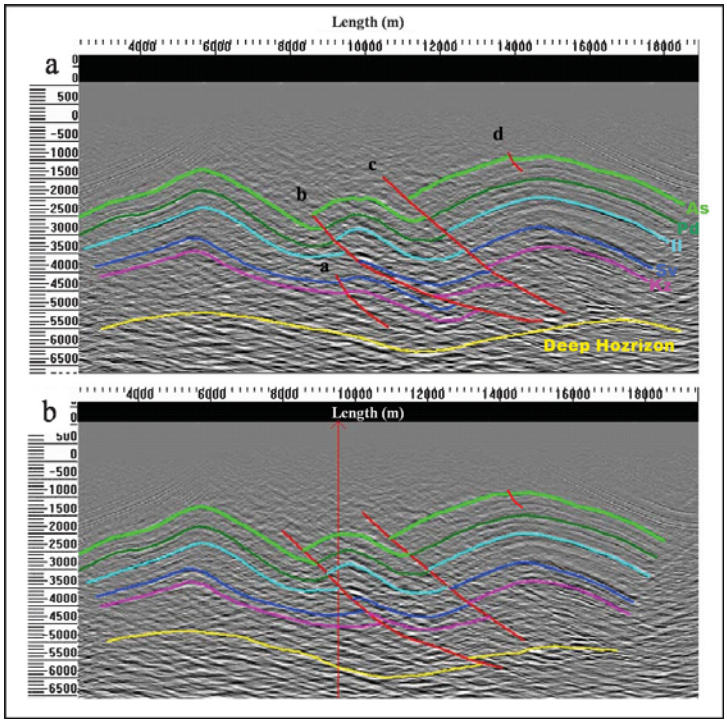
شکل ۱۲- تفسیر مقطع لرزه‌ای نهایی در شکل ۱۱ که تفسیر آن در جهت تطابق افق‌ها در دو طرف گسلها اصلاح شده است. پس از اصلاح تفسیر، در منطقه نزدیک گسل‌ها در افق‌های مورد نظر هیچ جابه‌جایی دیده نمی‌شود و آماده انجام مرحله بعد یعنی حذف اثر چین‌خوردگی است.



شکل ۱۳- تفسیر مقطع شکل ۱۲ که پس از بازگردانده شدن به حالت اولیه، کاملاً حالت موازنه را نشان می‌دهد (روش طولی-خطی). این روش صرفاً برای کنترل طول لایه‌ها انجام شده است تا از موازنه طولی لایه‌ها اطمینان حاصل شود.



شکل ۱۴- تفسیر مقطع شکل ۱۲ که پس از بازگردانده شدن به حالت اولیه، کاملاً حالت موازنه را نشان می‌دهد (روش لغزش خمشی). این روش هم طول و هم سطح را برای موازنه لحاظ می‌کند و چنانچه مشاهده می‌شود صحت تفسیر انجام شده را مورد تأیید قرار داده است.



شکل ۱۵- مقایسه تفسیرهای انجام شده برای تفسیر مقطع لرزه‌نگاری در شکل ۷ در دو حالت قبل از موازنه تفسیر مقطع (شکل a) و بعد از موازنه تفسیر مقطع (شکل b). پس از اتمام همه مراحل موازنه، دو مقطع با هم مقایسه شده‌اند تا تفاوت تفسیر ابتدایی با تفسیر نهایی (که از نظر طول و سطح حالت موازنه را نشان می‌دهد) مشاهده شود. با توجه به نتایج حاصل از موازنه می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱) به نظر می‌رسد وجود گسل a موضوعیت ندارد و در نتیجه حذف شده است. ۲) تفسیر گسل‌های سروک و کژدمی در شکل a دارای اشکال است و در نتیجه تفسیر آن در شکل b اصلاح شده است. ۳) گسل b باید لایه ژرف را قطع کند. ۴) تفسیر در محل گسل‌ها با دقت بیشتری انجام شده است.

کتابنگاری

سعادت‌نیا، ح.، ۱۳۸۳- بالانس طولی و سطحی تفسیر لرزه‌نگاری سه بعدی منطقه کرنج و پارسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک (گرایش لرزه شناسی)، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

سعادت‌نیا، ح.، جواهریان، ع.، عبداللهی فرد، ا. وکاظمی، ک.، ۱۳۸۴- انتخاب روش بهینه برای موازنه طولی و سطحی تفسیر لرزه‌نگاری سه بعدی دو تاقدیس نفتی در شرق خوزستان: فصلنامه علوم زمین، زمستان ۸۴، ۱۵ (۵۸)، ۴۶-۵۸.

References

Bucher, W. H., 1933- The deformation of the Earth's crust, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.Chamberlain, R. T., 1910- The Appalachian folds of Central Pensylvanian: Geol., 18, 228-251.

Dahlstrom, C. D. A., 1969- Balanced cross-sections: Canadian J. Earth Sci., 6, 743-757.

De Paor, D. G., 1990- Cross-section balancing in space and time. in: Petroleum and tectonics in mobile belts (J. Letouzey, Ed.) Editions Technips, Paris, 149-154.

Elliott, D., 1983- The construction of balanced cross-sections: J. Struct. Geol., 5, 101.

Endignaux, L. & Mugnier, J. L., 1990- The use of a forward kinematic model in the construction of balanced cross-sections: Tectonics, 9, 1249-1262.

Geiser, J., Geiser, P. A., Kligfield, R., Ratliff, R. & Rowan, M., 1988-New applications of section construction: strain analysis, local balancing and subsurface fault prediction: Mountain Geologist, 25 (2), 47-59.

Gougel, J., 1962- Tectonics, W. H. Freeman, San Francisco.

Groshong, R. H, 1999- 3-D structural geology: A practical guide to surface and subsurface map interpretation, Chapter 8, Springer-Verlag, Heidelberg, 324 p.

Hindlea, D., Kleyb, J., Onckenc, O., Sobolevc, S., 2005- Crustal balance and crustal flux from shortening estimates in the central Andes: Earth and Planetary Science Letters 230, 113– 124.

House, N., 2004- Depth reckoning speaks Volumes: AAPG Explorer (Geophysical Corner column, May 2004).

Mitra, S. & Namson, J., 1989- Equal-area balancing: J. Am. Sci., 289, 563-599.

Ramsay, J. G. & Huber, M. I., 1983- Techniques of modern structural geology, Vol. 1. Academic Press, New York.

Suppe, J., 1983- Geometry and kinematics of fault-bend folding: J. Am. Sci., 283, 684-721.

Wickham, J. & Moeckel, G., 1997- Restoration of structural cross-sections: J. Struct. Geol., 19, 975-986.

Woodward, N. B., Gray, D. R. & Spears, D. B., 1986- Including strain data in balanced cross-sections: J. Struct. Geol., 8, 313-324.

Wu, S., Yu, Z., Zhang, R., Han, W. & D., 2005- Mesozoic–Cenozoic tectonic evolution of the Zhuanghai area, Bohai-Bay Basin, east China, the application of balanced cross-sections: J. Geophys. Eng., 2, 158-168.