

چهارمین همایش ملی زمین ساخت و زمین شناسی ساختاری ایران

دانشگاه پیر جند

۱۳۹۵ آذر ۲۳

بررسی ساختار درونی پهنه‌ی گسلی با استفاده از توموگرافی مقاومت الکتریکی



فاطمه سهرابی مطلع، دانشجوی کارشناسی ارشد زمین ساخت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان

امیربیروز کلاهی آذر، استادیار زمین ساخت - دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان



چکیده:

در این پژوهش از توموگرافی دو بعدی مقاومت الکتریکی برای بررسی ساختار درونی پهنه‌ی گسلی استفاده شده است. برای این منظور برداشت‌های صحرایی در طول ۶ مقطع عمود بر برش آشکار گسل آستانه در محدوده چشمی علی دامغان انجام پذیرفت. نتایج حاصل از محاسبات و پردازش داده‌های بدست آمده جهت ارزیابی کمی ساختار پهنه‌ی گسلی مورد استفاده قرار گرفت. یافته‌های تحقیق نشانگر شرایط ترکیبی سد و مجرأ برای این مقطع از گسل آستانه می‌باشد. همچنین در این مطالعه قابلیت منحصر به فرد روش توموگرافی مقاومت الکتریکی در مطالعه شرایط زیر سطحی یک زون گسلی از لحاظ قابلیت هدایت هیدرولیکی ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: گسل آستانه؛ چشمی علی؛ دامغان؛ هسته گسل؛ زون خرد شده؛ هدایت هیدرولیکی



The investigation of fault zone inner architecture by using electrical resistivity tomography



F. Sohrabi , A. P. Kolahi-Azar



Abstract: In this research 2D electrical resistivity tomography (ERT) has been utilized for investigation of inner architecture in a fault zone. For this aim field data gathered from 6 profiles

چهارمین همایش ملی زمین ساخت و

زمین شناسی ساختاری ایران

دانشگاه پیر جند

۱۳۹۵ آذر ۲۳

perpendicular to the scarp of Astaneh fault in Cheshmeh – Ali area. Results obtained from the calculation of field data have been used for quantitative investigation of the fault zone. Findings suggest a combined conduit- barrier condition for this portion of the fault. Also, a unique ability of ERT in investigating a fault zone permeability condition has been presented

Keywords : Astaneh fault; Cheshmeh-Ali; Damghan; fault core; damage zone; hydraulic conductivity



مقدمه :

یک زون گسلی در حالت ایده‌آل از سه بخش تشکیل شده است که عبارتند از: پروتولیت (Protolite)، زون خرد شده (Damage zone) و هسته گسل (Fault core). پروتولیت یا سنگ میزبان در برگیرنده هسته گسل و زون خرد شده می‌باشد و در اثر فعالیت گسل دچار تغییر نشده است. در پروتولیت می‌توان لایه بندی و سایر ساختهای رسوبی و ساختمانی را تشخیص داد. زون خرد شده شامل سنگ‌هایی است که تحت تاثیر گسل‌ها و درزهای دچار خرد شدگی شده‌اند. سطوح لایه‌بندی و ساختارهای اولیه موجود در سنگ‌هایی که در زون خرد شده وجود دارند به میزان خیلی کم حفظ شده‌اند. هسته‌های گسلی بخش‌هایی هستند که حداکثر تغییر شکل برشی در زمان گسلش در آن‌ها رخ داده است و در موقعی که گسل دارای جابجایی قابل توجهی باشد، تشکیل می‌شود (Billi & Salvini, 2003). مقاومت الکتریکی یکی از ویژگی‌های بنیادین مواد است. بر این اساس مواد گوناگون دارای مقاومت الکتریکی متفاوتی هستند و این مقاومت برای یک ماده در شرایط محیطی مختلف می‌تواند متفاوت باشد. یکی از شیوه‌های ژئوفیزیک اکتشافی به منظور بی‌جویی‌های زیرسطحی استفاده از روش مقاومت سنجی الکتریکی است. در این روش برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌های زیرسطحی جریان الکتریکی مستقیم یا متناوب با بسامد پایین توسط یک سری الکترود با چینش هندسی خاص از سطح زمین تزریق شده و اختلاف پتانسیل به وجود آمده اندازه‌گیری می‌گردد. با توجه به مقدار شدت جریان تزریق شده و اختلاف پتانسیل ناشی از آن میزان مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌ها با توجه به آرایه‌ی مورد استفاده محاسبه می‌گردد. مقاومت ویژه الکتریکی اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌ها و همچنین تخمینی از چگونگی توزیع مقاومت ویژه در زیر سطح زمین را ارائه می‌دهد. روش مقاومت سنجی الکتریکی ابزار مناسی برای مطالعه ساختارهای زیر سطحی می‌باشد. مقاومت ویژه زمین به عوامل مختلفی هم‌چون کانی‌ها، آب محتوی، تخلخل و درجه اشباع آب در سنگ بستگی دارد. ایجاد شکستگی و یا جابجایی لایه‌ها می‌تواند تغییراتی در مقاومت ویژه الکتریکی مرز و یا طرفین شکستگی ایجاد نماید. بطوری که شکستگی‌ها اگر همراه با آب باشند سبب کاهش مقاومت ویژه خواهند شد. زون‌های بسیار خرد شده و هوازده نیز چنین پاسخی خواهند داشت. برای مطالعه شرایط زیر سطحی گسل‌ها از روش‌های مختلف ژئوفیزیکی استفاده شده است. به عنوان مثال، آریامنش و همکاران (۱۳۸۸)، با استفاده از تفسیر داده‌های ژئوفیزیک هواپی، گسل‌های پنهان استان قم را مورد بررسی قرار داده‌اند. از این میان روش‌های ژئوالکتریک جایگاه خاصی را دارند. جهان‌بین و پیروز (۱۳۸۷)، با استفاده از روش مقاومت سنجی الکتریکی با آرایه

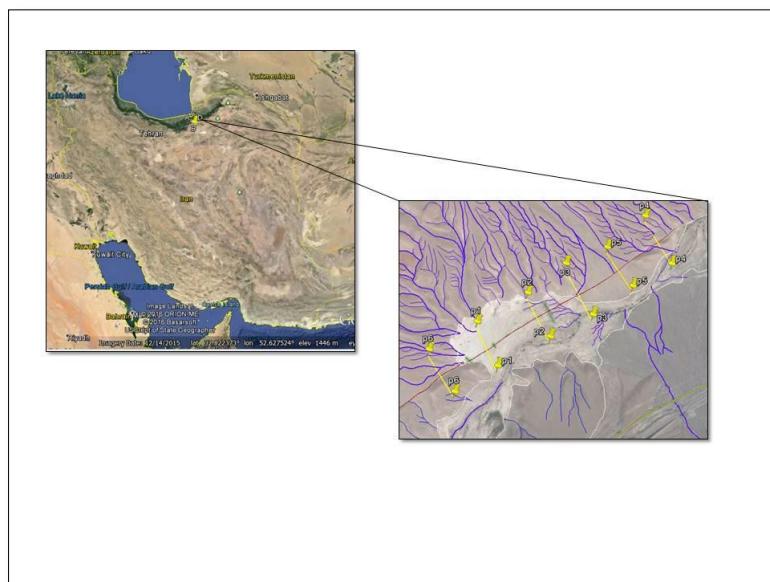
چهارمین همایش ملی زمین ساخت و

زمین شناسی ساختاری ایران

دانشگاه پیر جند

۱۳۹۵ آذر ۲۳

قطبی دو قطبی به بررسی موقعیت و تعیین شیب گسل پنهان شاهروド در منطقه کال قرنو پرداخته‌اند. ترکمنچه و پیروز (۱۳۸۶)، با استفاده از آرایه ونر-اشلامبرگر و لی‌پارتیشن به اکتشاف گسل پنهان شاهروود در محدوده دره کال قرنو پرداختند. در این پژوهش سعی شده است تا ساختار درونی گسل آستانه در محدوده چشم‌های دامغان با استفاده از تکنیک مقاومت سنجی الکتریکی به روش توموگرافی مقاومت الکتریکی (Electrical Resistivity Tomography، ERT) مورد بررسی قرار گیرد. گسل آستانه با درازای بیش از ۷۵ کیلومتر بین نهشته‌های دولومیتی و آهکی ژوراسیک (سازند لار) و رسوبات رودخانه‌ای جوان در سوی شمالی گسل (فرودیواره) و شیل و ماسه‌های ژوراسیک و دولومیت توده‌ای تریاس در سوی جنوبی گسل (فرادیواره)، در شمال باختری دامغان قرار دارد. مطالعات ریخت‌زمین‌ساختی در راستای آن نشان می‌دهد که رسوبات کواترنری بطور آشکار و بصورت چپ‌بر توسط گسل بریده شده‌اند که خود دلیلی بر فعال بودن آن است (قرشی و همکاران، ۱۳۸۶). محدوده‌ی مورد نظر در این پژوهش بین طول‌های جغرافیایی $54^{\circ} 0' E$ و $54^{\circ} 0' E$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $25^{\circ} 36' N$ و $27^{\circ} 36' N$ شمالی واقع شده است.



شکل ۱: موقعیت پروفیل‌های ۱ تا ۶ در تصویر ماهواره‌ای



روش تحقیق:

۱- توموگرافی مقاومت الکتریکی

در این شیوه ویژگی‌های مقاومت الکتریکی برشی (مقطعی) از زمین اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور مقطع مورد کاوش به تعدادی سلول تقسیم شده و مقاومت ویژه الکتریکی متناظر با هر سلول اندازه‌گیری می‌شود. توزیع فضایی

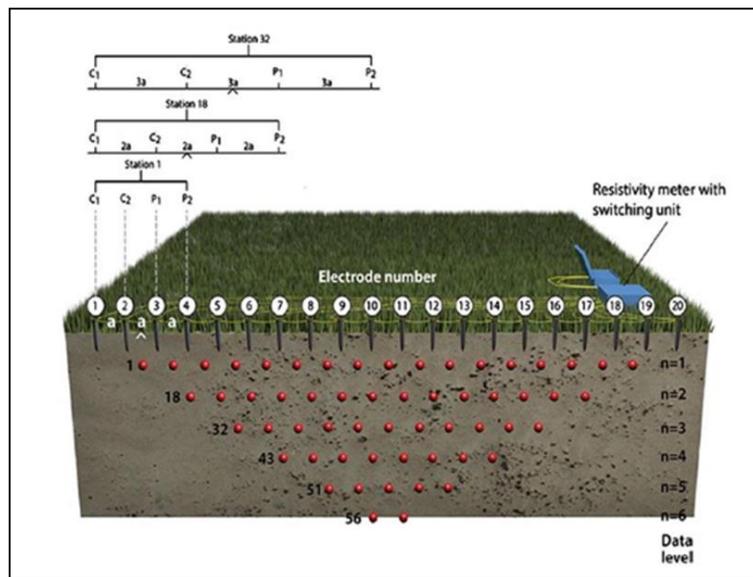
چهارمین همایش ملی زمین ساخت و

زمین شناسی ساختاری ایران

دانشگاه پیر جند

۱۳۹۵ آذر ۲۳

مقاومت ویژه الکتریکی مقطع مورد نظر به صورت جانبی و عمقی برداشت شده و تصویر مقاومت الکتریکی زیرسطحی مربوطه بدست می‌آید. در این روش فرض شده است که تغییراتی در مقاومت الکتریکی محیط کاوش در جهت عمود بر خط برداشت وجود ندارد (کلاهی آذر، ۱۳۹۴). برای این منظور تعدادی الکترود بر روی زمین در امتداد مقطع مورد نظر و با فواصل مساوی (فاصله الکترودی) کوبیده می‌شود. برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی متناظر با هر سلول از دو الکترود برای تزریق جریان (الکترودهای فرستنده) و دو الکترود برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل به وجود آمده بطور هم زمان استفاده می‌شود (شکل ۲). جهت برداشت داده در این روش از آرایه‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این مطالعه با توجه به برخی از مزایای آرایه‌ی دوقطبی- دوقطبی نسبت به دیگر آرایه‌ها، از آن استفاده شده است. در این آرایه میزان قدرت تغییریکه پذیری جانبی به نسبت بالا بوده و اثر کوبلینگ الکترومغناطیسی (Electromagnetic Coupling Effect) به نسبت پایین است (کلاهی آذر، ۱۳۹۴). در این مطالعه از دستگاه مقاومت سنج ۱- WDDS استفاده شده است. برداشت صحرایی در امتداد شش خط با روند تقریباً عمود بر راستای برش آشکار گسل آستانه به طول ۲۰۰ متر و با فواصل الکترودی ۱۰ و ۲۰ متر انجام پذیرفت (شکل ۱). پس از برداشت داده‌ها با استفاده از نرم افزارهای Res2DInv و ZOND اطلاعات بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مقاطع مقاومت الکتریکی در راستای مسیرهای ششگانه بدست آمد.



شکل ۲: طرح شماتیک از آرایه دوقطبی- دوقطبی با اقتباس از (Loke et al, 2013)

۱- تحلیل کمی ساختار درونی گسل

کاین و همکارانش (۱۹۹۶) برای تحلیل کمی چینش درونی زون گسلی و ساختارهای ایجاد شده مرتبط با آن از سه اندیس fa و Fm و Fs استفاده کرده‌اند. این سه اندیس با توجه به اجزای ساختاری تشکیل دهنده زون‌های گسلی و با

چهارمین همایش ملی زمین ساخت و

زمین شناسی ساختاری ایران

دانشگاه پیر جند

۱۳۹۵ آذر ۲۳

استفاده از مدل تئوری ارائه شده در مورد ارتباط بین زون‌های گسلی و ساختارهای ایجاد شده توسط آن‌ها، بدست آمده‌اند. در زیر هریک از اندیس‌ها ارائه شده است.

اندیس ساختار زون گسلی (F_a): (*Fault zone architectural index*)

مقدار اندیس بین صفر و یک تغییر می‌کند و از تقسیم ضخامت زون خرد شده به مجموع ضخامت هسته گسل و زون خرد شده بدست می‌آید. در حالت ایده‌آل، زمانی که F_a برابر صفر باشد زون خرد شده وجود ندارد. در این حالت نفوذ پذیری پایین است و هسته گسل سبب می‌شود که منطقه گسلی به عنوان یک سد در مقابل جریان سیالات عمل کند. در حالت ایده‌آل دیگر زمانی که برابر با یک باشد هسته گسل وجود ندارد و حضور یک زون خرد شده با نفوذ پذیری بالا سبب می‌شود که زون گسله بصورت یک مجرابه جریان سیالات عمل نماید.

اندیس (F_m):

این اندیس میانگینی از F_a ‌های اندازه گیری شده بر روی زون گسلی در یک امتداد مشخص است و نشان دهنده هندسه و نفوذ پذیری کلی زون گسلی است.

اندیس (F_s):

مقدار این اندیس از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(1) \quad F_s = (F_a)_{max} - (F_a)_{min}$$

این اندیس که تحت عنوان ضریب تغییرپذیری مکانی (Spatial variability index) نیز نامیده می‌شود نشانگر میزان تغییرات اندیس F_a در طول یک زون گسلی است.

تحلیل کمی ساختار درونی زون گسلی آستانه

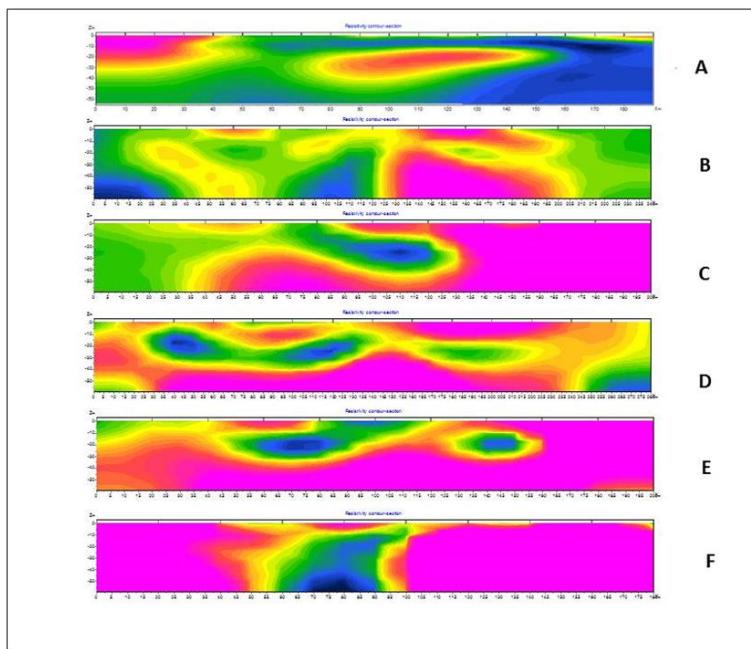
نتایج حاصل از توموگرافی مقاومت الکتریکی در طول شش مقطع عمود بر زون گسلی آستانه در محدوده چشمی علی (شکل ۲) در (شکل ۳) ارائه شده است. در مقاطع مذکور جهت نمایش مقاومت ویژه الکتریکی از مقیاس رنگی استفاده شده است، به گونه‌ای که رنگ‌های گرم نشان دهنده نواحی با مقاومت بالا و رنگ‌های سرد نشان دهنده نواحی با مقاومت پایین‌تر هستند. از آنجا که گسل‌ش باعث ایجاد گوژ گسلی در هسته گسل و در نتیجه آن باعث جذب رطوبت می‌شود، لذا در مقاطع مقاومتی هسته گسل به صورت نواحی با مقاومت کم دیده می‌شوند. این در حالی است که مناطق خرد شده با توجه به میزان کمتر رس و در نتیجه رطوبت کمتر نسبت به هسته، دارای مقاومت الکتریکی به نسبت بیشتری بوده و در مقاطع مقاومتی دارای رنگ‌های گرمتری است. سنگ میزان (سنگ آهک) بدلیل عدم تاثیر پذیری از گسل‌ش دارای مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به مناطق تحت تاثیر گسل بوده و بنابراین در مقایسه به آنها، در مقاطع مقاومت الکتریکی با رنگ‌های گرم نمایان شده است. برای اندازه گیری کمی ساختار درونی زون گسل در مقاطع فوق پهنهای

چهارمین همایش ملی زمین ساخت و زمین شناسی ساختاری ایران

دانشگاه پیر جند

۱۳۹۵ آذر ۲۳

هسته گسل و پهنهای زون خرد شده اندازه گیری شد و با استفاده از معیار ارائه شده توسط کاین و همکاران (۱۹۹۶) اندیس‌های مربوطه محاسبه شد. نتایج حاصله در (جدول ۱) ارائه شده است.



شکل ۱: (A) مقطع مقاومتی در راستای پروفیل ۱، (B) مقطع مقاومتی در راستای پروفیل ۲، (C) مقطع مقاومتی در راستای پروفیل ۳، (D) مقطع مقاومتی در راستای پروفیل ۴، (E) مقطع مقاومتی در راستای پروفیل ۵، (F) مقطع مقاومتی در راستای پروفیل ۶

جدول ۱: اندیس‌های F_a , F_m و F_s تعیین شده برای ۶ پروفیل

پروفیل	F_a	F_m	F_s	فاصله الکتروودی
۱	0.75	0.76	0.4	۱۰
۲	0.71	0.76	0.4	۲۰
۳	1	0.76	0.4	۲۰
۴	0.81	0.76	0.4	۲۰
۵	0.75	0.76	0.4	۲۰
۶	0.6	0.76	0.4	۲۰

بالا بودن مقدار اندیس F_a نشان دهنده ضخامت زیاد زون خرد شده است در نتیجه با افزایش ضخامت زون خرد شده به میزان نفوذ پذیری زون گسلی افروده می‌شود. با توجه به مقدار اندیس F_a در هر ۶ پروفیل ذکر شده، با توجه به مدل

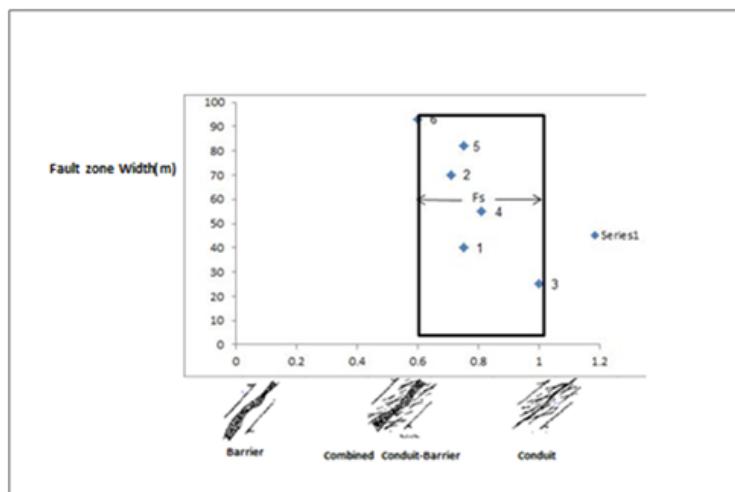
چهارمین همایش ملی زمین ساخت و

زمین شناسی ساختاری ایران

دانشگاه پیر جند

۱۳۹۵ آذر ۲۳

ارائه شده توسط کاین (1996)، این منطقه از زون گسلی آستانه بصورت ترکیبی از مجراء و سد در مقابل جریان آب زیرزمینی رفتار می‌کند. با رسم نموداری که در آن مقدار اندیس Fa در برابر ضخامت کل زون گسلی هر پروفیل نشان داده می‌شود می‌توان اطلاعاتی در خصوص نحوه توزیع استرین در منطقه گسلی در زمان گسلش، نحوه لغزش رخ داده در زون گسلی، هندسه زون گسلی و ویژگی‌های نفوذپذیری مربوط به یک زون گسلی را بدست آورد (Caine et al., 1996). در شکل مقدار Fa ‌های بدست آمده برای ۶ پروفیل در مقابل ضخامت زون زون گسلی در هر پروفیل رسم شده است. در این نمودار قرارگیری پروفیل‌ها در یک محدوده نشان دهنده شرایط تقریباً یکسان هندسه این ۶ پروفیل است. هم چنین در این شکل اندیس Fs که نشان دهنده محدوده تغییرات Fa است نیز نشان داده شده است.



شکل ۴: اندازه‌گیری عددی ساختار گسلی آستانه بر اساس نمودار (Caine et al., 1996).



بحث و نتیجه‌گیری:

در پروفیل‌های مقاومت الکتریکی دو بعدی، همبسته با شواهد زمین شناسی، بازه احتمالی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی با توجه به لیتوژئی منطقه تعیین شد. پس از برداشت، تصحیح، پردازش و مدل سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه و تهیه مقاطع مقاومت الکتریکی، ساختار درونی گسل آستانه در محدوده‌ی چشمۀ علی مورد تحلیل کمی قرار گرفت. گسل آستانه در محدوده مورد مطالعه بین ساختار مرکب سد- مجراء و مجراء قرار می‌گیرد. این گسل با داشتن یک هسته گسلی به ضخامت متوسط $14/25$ متر، سبب ایجاد یک سد ریز دانه از جنس گوژگسلی در مقابل جریان آب-های زیرزمینی شده است. این سد مانع از عبور جریان آب‌های زیرزمینی از بلوك شمالي آستانه به سمت بلوك جنوبي می‌شود. زون خرد شده این گسل با ضخامت متوسط 32 متر سبب بالا رفتن تراوایی و نفوذپذیری در امتداد گسل شده

چهارمین همایش ملی زمین ساخت و

زمین شناسی ساختاری ایران

دانشگاه پیر جند

۱۳۹۵ آذر ۲۳

است. اختلاف کم بین مقادیر اندیس Fa در ۶ پروفیل، همچنین مقدار کم اندیس Fs نشان دهنده‌ی این است که هندسه زون گسلی آستانه در منطقه مورد مطالعه دارای ساختاری تقریباً یکنواخت است.



منابع فارسی :

- آریامنش م، منتظری م، عکاشه ب. (۱۳۸۸). مطالعه گسل‌های پنهان استان قم با استفاده از تفسیر داده‌های ژئوفیزیک هوایی. *فصل نامه زمین*. سال چهارم، شماره ۲، صفحه ۱۱۵-۱۱۱.
- ترکمنچه ح، پیروز ا. (۱۳۸۶). اکتشاف گسل پنهان شهرود در محدوده دره کال قرنو با استفاده از روش ژئوالکتریک، پایان نامه.
- جهان‌بین م، پیروز ا. (۱۳۸۶). تعیین موقعیت و شیب گسل پنهان شهرود، واقع در منطقه کال قرنو با استفاده از دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن، پایان نامه.
- شکری م. ع، فرشی م.، نظری ح.، سلامتی ر.، طالبیان م.، ژان فرانسو ر.، محمدخانی ح.، شاه پسند زاده ح.، (۱۳۸۶). داده‌های مقدماتی از حفاری‌های دیرینه لرزه شناسی بر روی گسل آستانه. *مجله علوم زمین*، زمستان ۸۷، سال هجدهم، شماره ۷۰.
- کلاهی آذر ا. پ.، (۱۳۹۴). پی‌جوبی کانسار مس با استفاده از توموگرافی الکتریکی دو بعدی در منطقه ایوند، آذربایجان شرقی. *هفتمین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران*.



References:

- Billi, A., Salvini, F., (2003). Fault-related solution cleavage in exposed carbonate reservoir rocks in – the southern Apennines, Italy. *Jornal of petroleum Geology* 24, 147- 169
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* 11, 1025-1028.
- Loke M. H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkison P.B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 95, pp. 135-156.