فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست
سال هفتم، شماره ۲۵، زمستان۱۳۹۲

# امکان‌سنجی تاثیر (گسل آب‌شیرین و ده‌نار) بر ساختارنمکی مدفون نصرآباد کاشان جهت برپایی سایت ذخیره‌سازی گازطبیعی

**مریم کشاورز صفیئی[۱]، محمدعلی گنجویان[۲]، محمدعلی کاوسی[۳]، عباس بحرودی[٤]**

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشدزمین شناسی تکتونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرودMaryamkeshavarz42@yahoo.com
۲- استادیارگروه تکتونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود، ایران.
۳- دانشیار، مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران
٤- استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۸/۲۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۵/۱۳

## چکیده

ذخیره‌سازی گاز به‌منظور ایجاد تعادل بین تولید و مصرف گاز در فصول سرد که زمان اوج مصرف به‌شمار می‌رود، جزء روش‌های بنیادی و تضمین‌کننده تامین گاز کشور به‌شمار می‌رود. در این راستا ساختارنمکی نصرآباد کاشان به‌دلیل دارابودن پتانسیل مناسب می‌تواند به‌عنوان بزرگترین سایت ذخیره‌سازی گازطبیعی در محدوده ایران‌مرکزی مورد استفاده قرارگیرد. امکان‌سنجی ذخیره‌سازی با هدف تعیین سازوکار گسل‌های اطراف ساختارنمکی امری ضروری می‌باشد. جهت رفع ابهامات عملیات صحرایی به‌همراه تحلیل هندسه ساختاری و جنبشی گسل‌ها، انحراف راست‌بر آبراهه‌ها همچنین تحلیل‌های تصاویر استریوگرافیکی و تفسیرهای گرانی‌سنجی از جمله شواهد فعالیت امتدادلغز با مولفه معکوس گسل آب‌شیرین است. گسل آب-شیرین با طولی حدود ۱۰ کیلومتر و با فاصله تقریبی ۲-۳ کیلومتر در ساختارنمکی مستهلک شده، و با جدایشی حدود ۳/۵ کیلومتر نسبت به گسل ده‌نار به‌صورت آرایش الگوی راست‌پله قرارگرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده درنهایت مشخص شد که گسل‌های آب‌شیرین و ده‌نار تاثیر قابل توجهی بر سایت ذخیره‌سازی گاز ندارند.

**واژگان کلیدی:** ذخیره‌سازی گازطبیعی، ساختارنمکی نصرآباد کاشان، تفسیرهای گرانی‌سنجی، گسل آب‌شیرین و ده‌نار.

## مقدمه

گاز طبیعی به‌عنوان سوختی برتر برای مصرف کنندگان انرژی در جهان به‌شمار می‌رود. استفاده بی-رویه از این سوخت پاک در فصول سرد سال باعث افت فشار گاز و قطعی آن می‌گردد. تامین گاز در زمان اوج مصرف مستلزم ایجاد تعادل در عرضه و تقاضای گاز کشور است. ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ساختارهای نمکی علاوه‌بر پاسخگویی به تقاضای داخلی در بخشهای خانگی، تجاری، صنعت و پتروشیمی، نیروگاه‌ها می‌تواند حجم قابل ملاحظه‌ای از گاز طبیعی را نیز صادر کرد تا علاوه‌بر مصارف داخلی در تحقق اهداف رشد و توسعه اقتصادی در بخش صادرات نیز گام برداشت. ساختارهای نمکی یکی از پتانسیل‌های مناسب جهت برپایی سایت ذخیره‌سازی گاز به‌شمار می‌رود. عمده مزیت ساختارهای نمکی قابلیت بهره‌دهی بالا، زمان آماده-سازی و بهره‌برداری کوتاه آن است.

ولی نسبت به روش‌های دیگر، پرهزینه‌ترین روش است و دفن شورابه با مشکلات زیادی مواجه است. استفاده از ساختارهای نمکی نسبتا جدید می‌باشد و نخستین‌بار این روش در سال ۱۹٦۱ در ایالات متحده معمول گردید [۱۵]. ساختارنمکی نصرآباد کاشان (با ابعاد ۹ – ۱۰کیلومتر طول، عرض ٤/۵ – ۵ کیلومتر، عمق ۳/۵ کیلومتر با قابلیت ذخیره‌سازی ۹ میلیارد مترمکعب گازطبیعی)، به‌لحاظ حجم بالای نمک و شرایط ساختاری جز منحصر به فردترین ساختارهای نمکی مدفون در حوضه ایران مرکزی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

به صورت‌کلی یکی از ارکان اصلی در مطالعات جامع ساختارنمکی، ذخیره‌سازی گاز است. از این رو در این پژوهش امکان‌سنجی و تاثیر ساختارهای اطراف آن در سایت ذخیره سازی گاز است. ازاین رو دراین پژوهش بررسی عملکرد گسل آب‌شیرین و ده‌نار که با راستای شمال شمال‌غربی- جنوب جنوب‌شرقی در حوضه ایران مرکزی و ارتباط آن با ساختارنمکی پرداخته شده است.

در نهایت با توجه به تلفیق اطلاعات و چگونگی ارتباط آن با ساختارنمکی و امکان‌سنجی آن جهت ادامه پروژه در فازهای بعدی مطالعاتی پیشنهاد شده است.

## زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

ساختارنمکی نصرآباد کاشان براساس دیدگاه‌های مختلف (به‌عنوان مثال در تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری – رسوبی ایران قسمتی از زون ایران‌مرکزی به‌شمار می‌رود [۲] که ویژگی‌های کلی آن در نوشتار-های بسیاری به بحث کشیده شده است. زون ایران-مرکزی یکی از واحدهای اصلی و عمده‌ای است که به شکل مثلث در مرکز ایران قرار دارد و جزء بزرگترین و پیچیده‌ترین واحدهای زمین‌شناسی به‌شمار می‌رود. این منطقه ساختاری نسبت به دیگر مناطق از پیچیدگی‌های بیشتری برخوردار است [۷].

روند در ایران مرکزی در بخش جنوبی و باختری همان روند زاگرس می‌باشند (شمال‌باختری – جنوب-خاوری) این بخش را می‌توان از طرف شمال به گسل‌های دهشیر- بافت، قم – زفره و ادامه گسل ارومیه محدود نمود [٦].

سازندهای مورد مطالعه منطقه مشتمل بر سازند سرخ پایینی، سازند قم، سازند سرخ بالایی می‌باشد (شکل ۱).

سازندنمکی سرخ‌پایینی به سن (الیگوسن) است که از کنگلومرا، ماسه‌سنگ، ژیپس، سنگ‌نمک، گاهی گدازه، سیلت و رس تشکیل شده است، ولی نسبت این سنگ‌ها در برش‌های گوناگون بسیار متغیر است [۱۲].

در قسمت‌های زیرین این سازندنمک، انیدریت و گچ فراوان است و در قسمت‌های انتهایی آن لایه‌های آتشفشانی با ضخامت‌های متفاوت دیده می‌شود [٤]. لایه‌های آتشفشانی این حوضه با کمان ماگمایی از نوع آند شباهت دارد [۱۳].

به‌طور معمول مرز بین دو سازند سرخ‌پایینی و سازند-قم، ناگهانی است.

در جنوب قم (کهک)، ضخامت این سازند به ۱۰۰۰ متر می‌رسد. شایان ذکر است در شمال قم ضخامت آن افزایش می‌یابد.

سازندقم (الیگوسن - میوسن) که از سنگ آهک ستبر لایه به رنگ کرم تا خاکستری روشن همراه با مارن،

سنگ گچ همراه با مارن گچ‌دار، مارن، سنگ آهک همراه با میان لایه‌های سنگ‌گچ، سنگ آهک ماسه‌ای فسیل‌دار، ماسه‌سنگ‌آهکی، کنگلومرای قرمز و یا سبز رنگ، تشکیل شده است.

گانسر، فورر و سودر، ۱۹۹۵ (Gansser, Furrer, soder) در ناحیهٔ قم، این سازند را به شش عضو ( A, B, C, D, E, F) تقسیم کردند [۱۷و۱۸].

عضو C به چهار بخش ($C_1$- $C_4$) تقسیم می‌گردد و بدین‌ترتیب سازند قم، ۹ عضو دارد که با نشانه‌های f, e, d, $c_4$, $c_3$, $c_2$, $c_1$, b, a مشخص می‌شود درناحیهٔ قم، این سازند ۱۲۰۰ متر ضخامت دارد [۸].

به عضوهای گفته شده باید عضو تبخیری‌نهایی پیشنهادی را اضافه کرد که وجود آثار روزنداران پلانکتونی نشانگر منشاء دریایی آن است، که پایان پیشروی دریا را نشان می‌دهد.

واحد تبخیری متشکل از ژیپس و ناخالصی مارنی در روی این سازند مشاهده می‌گردد که به‌طور تدریجی به مارن‌ها و ماسه سنگ‌های سازند سرخ‌بالایی پایان می‌پذیرد. بررسی‌های اخیر به‌خوبی مشخص نموده‌اند که این مجموعه زون تدریجی بین سازندقم و سازند سرخ‌بالایی را مشخص می‌کند [۱۰].

سازند سرخ بالایی (میوسن بالایی) که تناوبی از ماسه-سنگ قرمز و سیلت سنگ همراه با رس و مارن گچ‌دار است در بردارنده‌ی دو زیر واحد پایینی ($M_1$) و زیر واحد بالایی ($M_2$) است.

رخساره قاره‌ای پلیوسن شامل کنگلومرا همراه با میان لایه‌های ماسه سنگ و رس، مارن ماسه‌ای، رس، کنگلومرا می‌باشد.

همانند دیگر نقاط ایران، توالی پلیوسن ایران‌مرکزی همچنان کنگلومرایی است که با دگرشیبی زاویه‌دار و یا هم‌شیب، بر روی سازندهای قدیمی‌تر نهشته شده است [۱۸].

## روش تحقیق

جهت بررسی سازوکار گسل‌های (آب‌شیرین و ده‌نار) و این که آیا آنها نقش موثری بر ساختارنمکی نصرآباد کاشان دارند یا نه، می‌توان امکان‌سنجی تاثیر گسل بر روی سایت ذخیره‌سازی گاز را مورد ارزیابی قرار داد. تحقیقات به‌عمل آمده در این پژوهش، دربرگیرنده سه بخش کلی مطالعات و برداشت‌های داده‌های سطحی، ترسیم مقاطع عرضی و مطالعات ژئوفیزیکی (گرانی-سنجی) است.

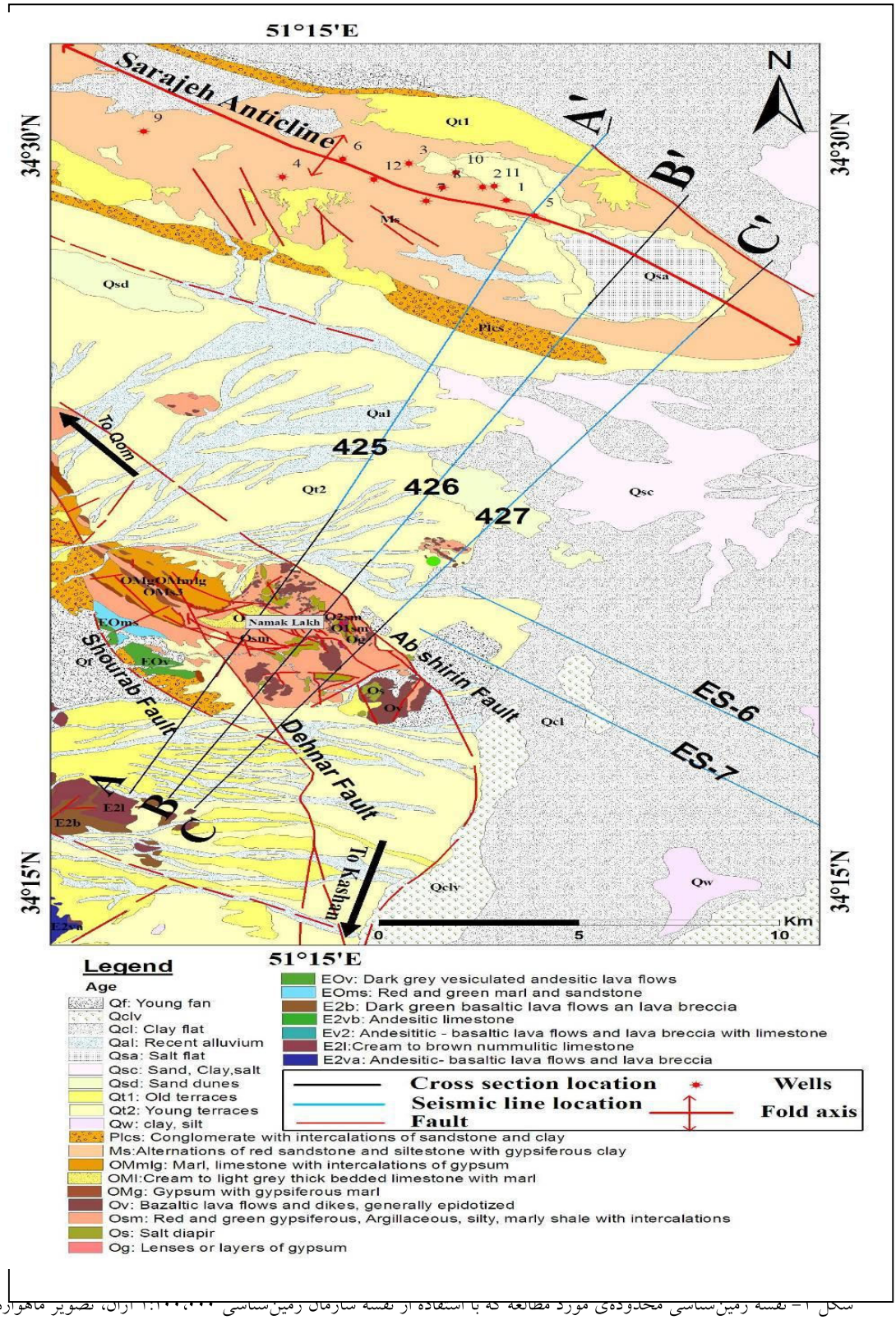
## برداشت‌های داده‌های سطحی

به‌جهت رفع ابهامات موجود از ساختارها، گسل‌ها و برداشتهای سطحی عملیات‌صحرایی انجام گردید. در هنگام بررسی گسل شواهد متعددی از جمله امتداد، شیب‌صفحه گسل، لرزه‌زایی و سازوکار گسل‌های مجاور مورد توجه قرار گرفت.

## ترسیم برش‌های عرضی ساختاری

به‌جهت تکمیل مطالعات و آگاهی دقیق‌تر از شرایط زیرسطحی با استفاده از تلفیق و نتایج حاصل از تفسیر داده‌های لرزه‌ای برش‌های عرضی ساختاری ترسیم شدند(شکل۲).بعدازترسیم برش‌های عرضی ساختاری و بالانس کردن آنها که محل آنها در(شکل۱) مشخص است.

این امکان فراهم شد تا امکان تاثیر گسل آب‌شیرین همراه با گسل‌شوراب در برش‌های ساختاری ساختار گل‌مانند مثبت (Positive Flower Structure) را در منطقه به‌وجود آورده‌اند. از آنجا که این دو گسل پی-سنگی می‌باشند، رسوبات ولکانیکی و سازند سرخ پایینی به همراه نمک را به سطح رسانده‌اند. در منطقه



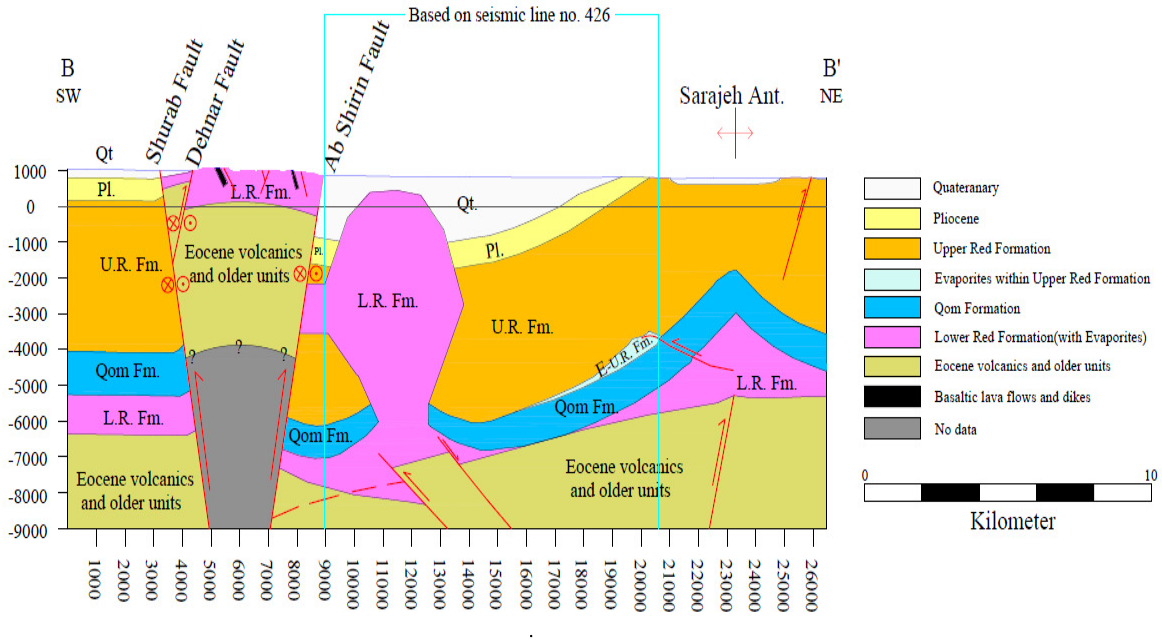

شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده‌ی مورد مطالعه که با استفاده از نقشه سازمان زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ اران، تصویر ماهواره‌ای Google Earth، تصویر ماهواره لندست ETM تهیه شده است.

فشارش حاصل از حرکت این گسل به خروج نمک و ایجاد غار و معدن نمک انجامیده است.

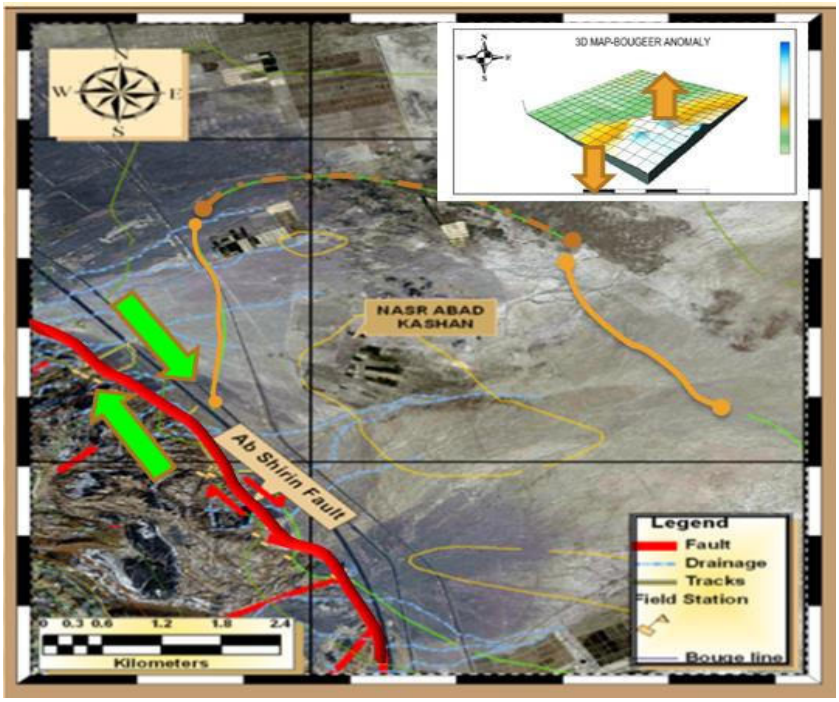
## مطالعات ژئوفیزیکی (گرانی‌سنجی)

هر تغییر در عمق تدفین پی‌سنگ، تغییرات واضحی را در اندازه‌گیری‌های گرانی‌سنجی به‌وجود می‌آورد. اثبات وجود گنبدهای نمکی، گسله‌ها و ساختارهای مرتبط اهمیت شایانی در زمین‌شناسی نفت و ذخیره-سازی گاز دارد. شناسایی ساختارهای زیرزمینی کمک موثری در پی‌جوییها و اکتشافات اولیه خواهد داشت. نفوذ یک گنبدنمکی در لایه‌های رسوبی، کاهش قابل توجهی را در شمارش‌های گرانی (در حد قابل اندازه-گیری) تولید خواهد کرد. زیرا چگالی نمک به مراتب کمتر از چگالی سنگ‌های رسوبی پیرامون خود می-باشد [۵].

با استفاده از گرانی‌سنجی می‌توان اثر روند هندسی و یا سازوکار گرانی یک گسل را مطالعه نمود [۱]. جابه-جایی‌های قائم توسط گسل‌های معکوس باعث بالا-آمدگی یا پایین‌افتادگی در سازندها می‌شوند که الگوی آنومالی‌های بوگه به‌صورت آنومالی‌هایی با فواصل خطوط کانتوری زیاد که توسط مرزهایی با فواصل کانتوری کم احاطه شده‌اند نمایش داده می‌شوند همچنین در اثر جابه‌جایی‌های ناشی از گسلش امتداد-لغز، تغییراتی در آنومالی‌های بوگه به‌وجود خواهد آمد. به‌گونه‌ای که آنومالی‌ها به‌طور ناگهانی بریده شده و در جایی دیگر در بلوک مقابل گسل تکرار می‌شود [۵]. ضمن بررسی و تعیین خاستگاه نمک و ساختار-های زیرسطحی و تفسیر آنها در داده‌های لرزه‌ای گسل‌های عمقی نیز تفسیر و محل آنها مشخص گردید. از جمله عواملی که در شروع صعود نمک نقش اساسی داشته وجود گسل‌های پی‌سنگی و در بعضی نقاط راندگی بوده که رخنمون واضحی از این گسل‌ها در سطح مشاهده نمی‌شود. فقط در داده‌های گرانی تفسیر گردیده است.موقعیت ساختارنمکی از داده‌های گرانی‌سنجی جهت تائید حضور نمک استفاده گردید که وجود گسل در اطراف این ساختارنمکی نیز مشاهده شد. از آنجا که ساختارهای نمکی چگالی متفاوتی با رسوبات اطراف دارد شناسایی آن با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی به راحتی امکان‌پذیر است. جهت شناسایی محل و سازوکار گسل آب‌شیرین پس از اعمال تصحیحات لازمه توسط کارشناسان با استفاده از روش اویلر مورد بررسی قرار گرفت. پردازش داده‌ها نیزبا استفاده از نرم‌افزارهای GeoSoft oasis montaj و Surfer و Modelvision انجام پذیرفت. با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی و انطباق آن با نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای بالاافتادگی و پایین-افتادگی و در برخی نقاط قطع‌شدگی خطوط کانتور تایید بیشتری بر حضور گسل و سازوکار امتدادلغز راستگرد با مولفه معکوس آن است (شکل ۳). وجود گسل‌های عمقی در تفاسیر داده‌های لرزه‌ای و وجود بالاافتادگی‌ها، پایین‌افتادگی‌ها و قطع‌شدگی خطوط-کانتورها در داده‌های گرانی‌سنجی مربوط به گسل‌ها در اطراف ساختارنمکی نصرآباد کاشان می‌باشد که در صعود نمک به سمت بالا نقش مهمی داشته است. همچنین تحلیل ریسک لرزه‌ای ساختار نمکی حاکی از عدم تاثیر گسل است [۳]. وجود گسل‌های عمقی در تفاسیر داده‌های لرزه‌ای و وجود بالاافتادگی‌ها، پایین‌افتادگی‌ها و قطع‌شدگی خطوط‌کانتورها در داده‌های گرانی‌سنجی مربوط به گسل‌ها در اطراف ساختارنمکی نصرآباد کاشان می-باشد که در صعود نمک به سمت بالا نقش مهمی داشته است. همچنین تحلیل ریسک لرزه‌ای ساختار-نمکی حاکی از عدم تاثیر گسل است [٤].




شکل۲- برش ساختاری ´cc. ساختار دم‌ماهی و ساختارگل مانند از نوع مثبت




شکل ۳- نقشه کانتوری گرانی‌سنجی به‌همراه تصویر ماهواره‌ای و الگوی اثر گسل آب‌شیرین در آنومالی‌های بوگه که در مجاورت ساختار نمکی نصرآبادکاشان قرار دارد. نقشه‌ی سه‌بعدی از حوضه‌ی رسوبی ساختارنمکی نصرآباد بر اساس مقادیر آنومالی بوگه.

## ابعاد و روند گسل‌های منطقه مورد مطالعه قطعه گسلی آب‌شیرین

گسل آب‌شیرین دارای روند متغییر° N۱۲۰ تا °N ۱٤٥ است که از انتهای ناحیه شوراب (شکل ٤) از کنار جاده قم – کاشان شروع و تا ابتدای جدایش گسل ده‌نار، ادامه دارد. عملکرد آن قرار دادن رسوبات کواترنر در کنار سازند سرخ‌پایینی قابل تشخیص است. همچنین سازند سرخ زیرین را در کنار دشت قرار داده که ارتفاع گرفتن سازند سرخ زیرین نتیجه عملکرد آن است.

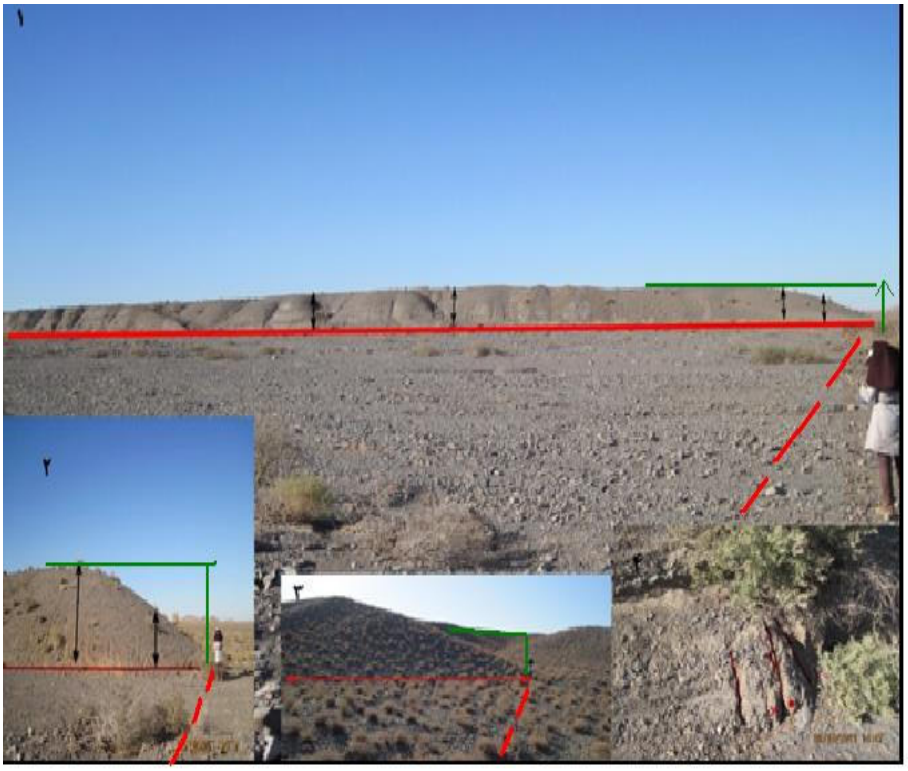
تغییرات در روند گسل می‌تواند نشانه تاثیر نمک و یا تغییرات نرخ استرس ناشی از تاثیر دگرشکلی پیشرونده و عوض‌شدن سازندها در اطراف گسل باشد (شکل ٥).

طول این گسل بدون احتساب پایانه‌های انتهایی حدود ۱۰کیلومتر، با فاصله تقریبی۲–۳ کیلومتر از ساختار-نمکی نصرآباد کاشان است. پس از عبور از کنار ساختارنمکی ظاهرا تغییراتی را نشان می‌دهد به-طوریکه در مسیر، نسبت به گسل ده‌نار یک حالت راست‌پله ایجاد می‌شود.گسل آب‌شیرین در طی روند خود رسوبات کواترنری (مخروطه افکنه‌ها، آبرفتها و پادگانه‌های آبرفتی جدید، پادگانه‌های آبرفتی کهن و در بعضی نقاط جریان‌های گدازه و دایک‌های بازالتی به سن الیگوسن (که عموما اپیدوتی شده‌اند)، را قطع کرده است. سن لایه‌های نمک و لایه‌های گچ رخنمون یافته در سطح قدیمی‌تر از جریان‌های گدازه و دایک-های بازالتی می‌باشد. با توجه به این‌امر، تصور عاملی جهت صعود نمک را تا حدودی می‌توان غیر مرتبط به‌شمار آورد. شاید بتوان فرض نمود که گسل آب-شیرین یک گسل قدیمی و پی‌سنگی است که در ابتدا با مولفه شیب‌لغز و در زمان حال با مولفه امتدادلغز راستگرد عمل کرده و سپس توسط آبرفت‌ها پوشیده شده است. از لحاظ چینه‌شناختی ساختاری جدیدترین فعالیت گسل مربوط به کواترنری و قدیمی‌ترین فعالیت آن به زمان قبل از ائوسن باز می‌گردد. گسل آب‌شیرین و گسل ده‌نار به‌همراه نقاط اندازه‌گیری شده روی این گسل‌ها در شکل (٦) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود گسل آب-شیرین با یک انحراف نسبت به گسل ده‌نار قرار گرفته است.

## قطعه گسلی ده‌نار

قطعه گسلی ده‌نار با روند°N۱۲۰ –°۱۱۰ N نسبت به گسل آب‌شیرین موازی و حالت راست‌پله دارد این گسل پس از جدایشی حدودا ۳/٥ کیلومتری در سمت چپ گسل آب‌شیرین با اختلاف ارتفاع توپوگرافی که بر اثر عملکرد این گسل پرتگاه‌های گسلی در امتداد آن (شکل ۷) ایجاد کرده و خمش آبراهه‌ها از همان روند امتدادلغز راست‌بر تبعیت می‌نماید. در مسیر آبراهه‌ها و پایین‌افتادگی دشت نسبت به ارتفاعات باعث ایجاد پرتگاه‌های گسلی که نشانه شیب‌لغز بودن گسل است؛ شده است. در ایستگاه ابتدای گسل ده‌نار تغییراتی در کانال آبراهه مشاهده گردید، حفر عمودی کانال آبراهه و افتادگی دشت که حالت پادگانه را در آبراهه ایجاد نموده است. شواهد یادشده نشانه نرخ لغزش، فرسایش و فعالیت گسل ده‌نار در منطقه است (شکل ٤و۷). در اطراف پرتگاه‌های گسل سنگ‌های آذرین و ولکانیکی افزایش می‌یابد که عملکرد اثر گسل در منطقه می‌باشد. وجود قطع‌شدگی در پادگانه-های آبرفتی و در بعضی نقاط جابه‌جایی آنها تحت تاثیر عملکرد جوان گسل ده‌نار با مولفه راستگرد را به

شکل ٤- قرارگیری واحدهای رسوبی به‌همراه واحدهای آتشفشانی در کنار رسوبات کواترنر دشت انتهای ناحیه شوراب. جهت دید به سمت غرب.



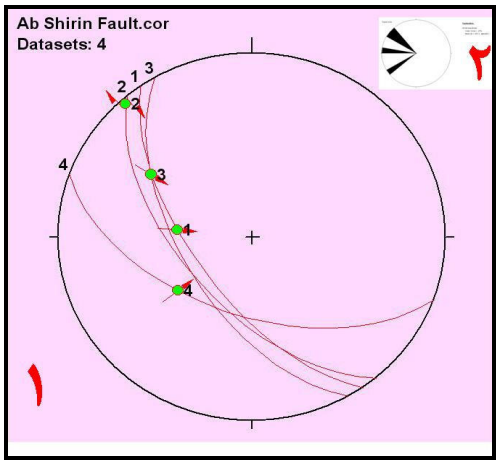

شکل ٥- نماهایی از گسل ده‌نار و پرتگاه گسلی.(جهت دید شمال‌غربی) ۲،۱و۳) اثر گسل ده‌نار خط چین، قسمت‌هایی که در اثر فرسایش ار بین رفته خط سبز. مرز بین دشت و کوه خط سرخ ممتد. ٤) در مسیر رودخانه که حالت زون خرد شده، سه خط موازی کنار پرتگاه‌گسلی که نشانه حرکت شیب‌لغز، از روی شواهد کنار بوته حرکت راستگرد گسل را نشان می‌دهد.

اثبات می‌رساند. انحراف آبراهه‌ها که در تصاویر ماهواره‌ای در (شکل ٦) نشان داده شده که نشانه واضح‌تر دیگری از عملکرد این قطعه گسلی است. در بین قطعه گسلی آب‌شیرین و گسل ده‌نار یک قطعه‌ای ایجاد شده که تحت تاثیر آن سازند سرخ زیرین به‌همراه نمک در سطح رخنمون یافته است.

## بحث

### تحلیل جنبشی گسل آب‌شیرین

از جمله شواهد گسل آب‌شیرین، رخنمون سازند سرخ زیرین به‌همراه واحدهای ولکانیکی در کنار رسوبات کواترنر می‌باشد که این امر دلیلی بر فعالیت همزمان گسل با تشکیل این سازندها می‌باشد. براساس برداشت های صحرایی و تحلیل‌های استریوگرافیکی جهت حرکت گسل به‌صورت شماتیک مشخص شده است (شکل ٦). همچنین در (شکل ٧) موقعیت گسل و خش‌لغزش گسل که بر روی ولکانیک‌ها در ارتفاع ٢٨ متری که بر روی سازند سرخ زیرین رانده شده را نشان می‌دهد. بالاآمدگی ناگهانی سازند سرخ زیرین ولکانیک‌ها و در بعضی نقاط همراهی آن با لایه‌های نمکی در کنار رسوبات کواترنری که این تغییرات توپوگرافی نیز نشانگر جنبش گسلش آب‌شیرین می باشد، شواهد حاکی از آن است که این سازندها همزمان با جنبش گسل شکل گرفته‌اند و در زمان رسوبگذاری در گذشته از شیب محل تشکیل، که می‌تواند از شیب فرابوم Horst و فروبوم Graben در پی‌سنگ و یا شیب پرتگاه گسلی که به‌سمت غرب است پیروی کرده باشند. سازوکار این گسل امتدادلغز راست‌بر با مولفه معکوس است. همچنین تغییرات توپوگرافی، ریخت‌شناسی، امتداد و شیب گسل، انحراف آبراهه‌ها و قطع‌شدگی ساختارها شاهد دیگری برای تغییرات عملکرد گسل آب‌شیرین در طول مسیر می‌باشد. فعالیت این گسل باعث قرارگیری و رانده‌شدن لایه‌های ژیپس بر روی سازند سرخ زیرین شده است که حرکت شیب‌لغز گسل را نشان می‌دهد.




شکل ٦- نمودار استریوگرافیکی برداشت‌های مربوط به گسل آب‌شیرین که سوی حرکت را نشان می‌دهد.

در مرز بین راستای گسل تغییرات شیب، جهت شیب لایه‌ها در مسیر پیمایش مشاهده گردید که این رفتار در اطراف بین گسل و رسوبات‌نمکی قابل مشاهده است که این تغییرات تحت تاثیر صعود ساختارهای نمکی و گسترش آن انتظار می‌رود. علاوه‌بر برداشت‌های مستقیم هندسه صفحه گسلی و خش‌لغزش‌های باقی‌مانده از حرکت گسل، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و انحراف آبراهه‌ها که شواهد دیگری در جهت تایید چگونگی روند حرکتی گسل و کینماتیک گسل بدست آمد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که گسل در گذشته یک حرکت معکوس داشته است که در زمان حال سازوکار گسل به امتدادلغز راستگرد تبدیل شده است. در طول مسیر عملیات صحرایی و پیمایش گسل و در مسیر آبراهه‌ها رسوبات و کفه‌های نمکی نیز قابل مشاهده بود که علاوه‌بر معدن نمک در طول مسیر با توجه به افزایش حجم نمک در مسیر رودخانه

فصلی یکی دیگر از شواهد راستگرد بودن گسل آب-شیرین است همچنین فعالیت جدید ساختارنمکی نصرآباد را نیز بیشتر به اثبات می‌رساند.

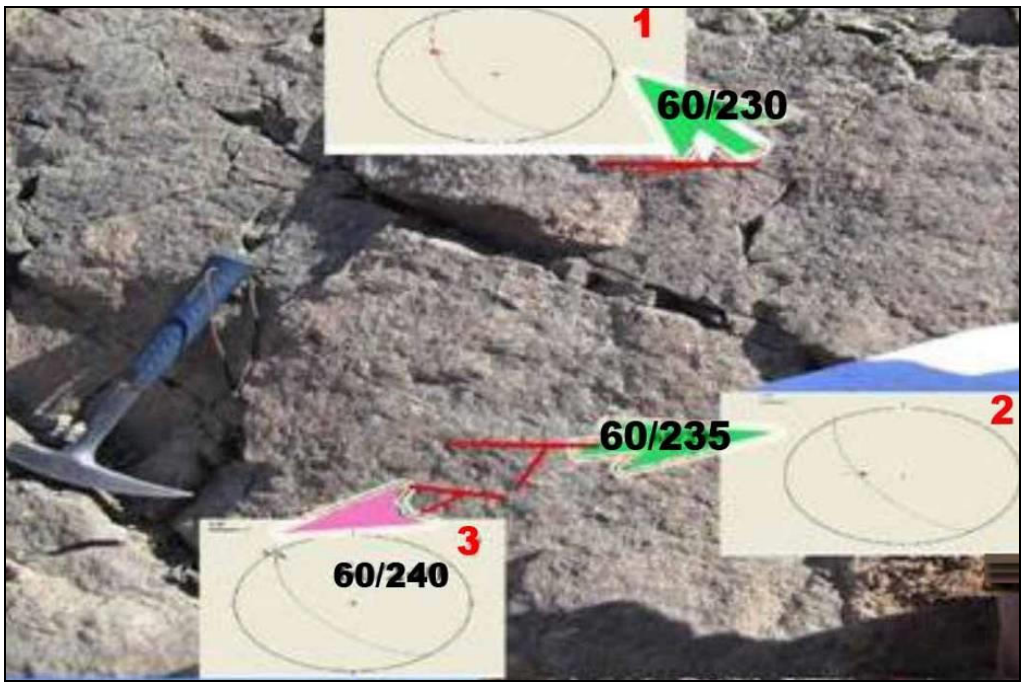
## تاثیر گسل آب‌شیرین بر روی تاقدیس سراجه

از جمله ساختارهای مهم که تقریبا به موازات گسل آب‌شیرین قرار دارد می‌توان به تاقدیس سراجه اشاره نمود که تحت تاثیر عملکرد راستگرد گسل قرارگرفته است. همانطور که در تصویر ماهواره‌ای مشاهده می-شود محور تاقدیس سراجه تحت تاثیر گسل آب-شیرین و گسل‌های اطراف تغییر جهت پیدا کرده و به-سمت راست انحراف یافته است. این خمیدگی در محور تاقدیس و حرکت راستگرد آن دلالت بر پیروی کردن آن از حرکت جدید گسل آب‌شیرین می‌باشد که تاییدی بر راستگرد بودن گسل نیز می‌باشد (شکل ۱ و۱۱).

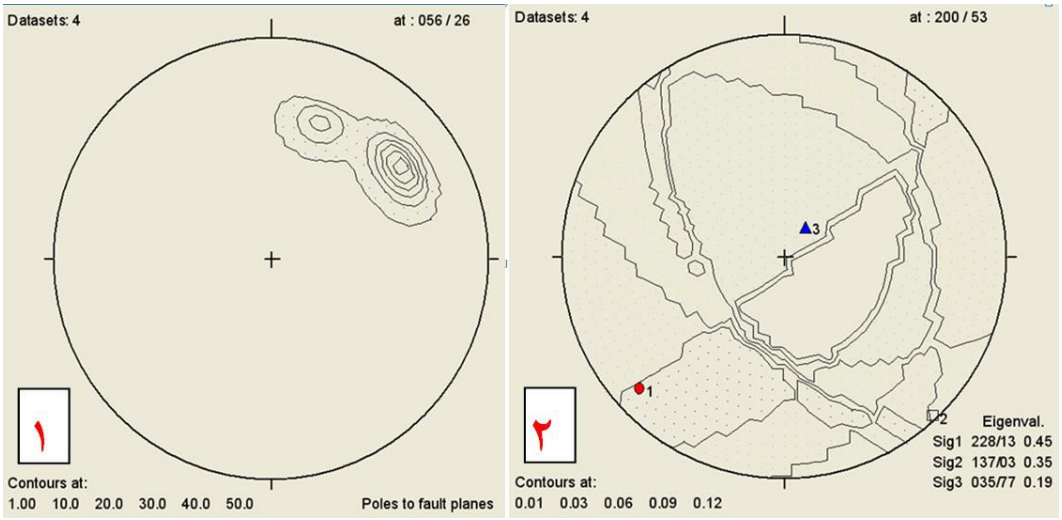
## بررسی و یافتن الگوی محورهای تنش ودگرشکلی در منطقه مورد بررسی:

خطواره‌های خش‌لغزش موازی با جهت جابه‌جایی بر روی گسل شکل می‌گیرند. تعیین مقدار جابه‌جایی از روی خش‌لغزها بسیار مشکل است. بطورکلی، خش لغزها زمانی بر روی سطوح گسلی رخنمون می‌یابند که یکی از بلوک‌های گسلی توسط فرآیند فرسایش از بین رفته باشد. جمع‌آوری داده‌ها خطاهایی را به‌همراه دارد و منجر می‌شود که پراکندگی در الگوهای تنش محلی رخ می‌دهد حرکات گسلی نیز به‌روی یکدیگر تاثیر گذارند. از این‌رو باید در عمل بهترین جورشدگی‌ها را در بین تمام داده‌های لغزش گسلی که متعلق به یک رویداد زمین‌ساختی هستند، جستجو کرد. شناخت جهت‌لغزش در منطقه اهمیت بسیاری دارد و تشخیص آن می‌تواند کمک شایانی در بررسی و یافتن محورهای تنش کند. در این راستا با توجه به پارامترهای برداشت صحرایی و اصول تشخیص سوی لغزش (Angelier, (1994, b)) و با استفاده از نرم‌افزار Tectonics FP نمودارها و تحلیل‌ها به‌همراه حرکت و جابه‌جایی صورت گرفته روی هر صفحه تعیین شده است [12]. بلورهای رشد یافته در خش‌لغزها زاویه کمی نسبت به سطح گسل می‌سازند و نیز تمایل دارند که یکدیگر را در امتداد فیبرها یا با یک زاویه زیاد نسبت به آنها قطع کنند، چنین سطح گسلی بافت پله-ای Stepped texture به‌خود می‌گیرند. جهت صیقلی ساختار جهت حرکت‌نسبی بلوک فرسایش یافته را نشان می‌دهد. موقعیت فضایی و جهات تقریبی استرس‌های اصلی با استفاده از خش‌لغزهای گسلیSlickenside موجود بر روی صفحه گسلی تعیین شده است، خش‌لغزها مولفه‌های استرس برشی و بیشینه استرس مربوط به سطح گسل را نشان می‌دهند که با توجه به آنها می‌توان جهت حرکت بلوک‌های گسلی را مشخص کرد . خش لغزهای برداشت شده روی صفحه گسل در (شکل ۷) نشان داده شده است. نوین‌ترین روش به‌منظور یافتن موقعیت تقریبی استرس‌های اصلی روش گرافیکی که روش مورد استفاده توسط (Allmendiner, 2011) ابداع شده است. این روش از برداشت‌های اولیه صحرایی که شامل شیب و امتداد گسل، زوایای ریک و پلانژ و روند خش‌لغزها هستند را دارد. براساس تحلیل انجام شده و بااستفاده از نرم‌افزار Tectonics FP درگسل آب شیرین میزان تنش ($\sigma_1$) ۲۲۸/۱۳، تنش ($\sigma_2$) ۱۳۷/۰۳ و تنش ($\sigma_3$) ۰۳۵/۷۷ بدست آمده است. همان‌گونه که در (شکل ۸) مشاهده می‌شود موقعیت قطب صفحات

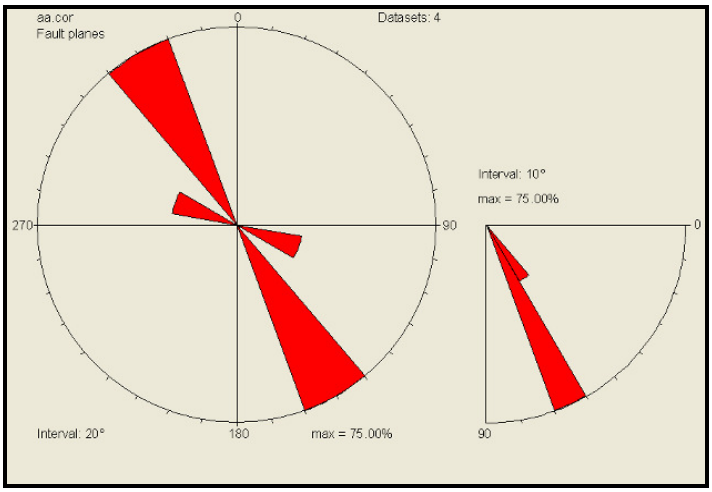
گسلی، روند تنش‌ها و ساختارهای ایجاد شده با یکدیگر همخوانی دارد که این امر تاییدی بر تحلیل‌ها و یافته های مربوط به محورهای اصلی تنش در منطقه است.در مرحله بعدی جهت ترسیم و ارائه الگوی مناسب‌تر نمودارهای گل‌سرخی نیز با استفاده از نرم-افزار Tectonics FP تهیه گردید (شکل ۹). نتایج حاصل از نمودارهای گل‌سرخی با روند گسل‌ها تاحدودی هم‌پوشانی دارد که این روند متغییر از N۱٤۰تا N۱٦۰ را نشان می‌دهد. که تقریبا بطور میانگین منطبق با روندهای گسل‌های منطقه است. نتایج حاصل از آنالیز داده‌ها که از جهات تنش‌های بدست آمده به‌همراه موقعیت تقریبی وموقعیت فضایی محورهای اصلی در (شکل ۱۰) نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده و جهت شیب گسل‌های اصلی و فرعی در منطقه مورد مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که گسل آب‌شیرین و گسل ده‌نار دارای شیب های همگرا در این منطقه می‌باشند که در عمق به یکدیگر می‌رسند. در بین گسل‌های آب‌شیرین و ده‌نار سازند سرخ‌زیرین به‌همراه جریان‌های گدازه و دایک های بازالتی به سن الیگوسن که عموما اپیدوتی شده-اند به‌همراه گسل‌های فرعی درسطح رخنمون دارند.




شکل ۷- قرارگیری واحدهای ولکانیکی به‌همراه خش‌لغزش‌های گسل آب‌شیرین بر روی سازند سرخ‌زیرین، شیب آنها از شیب زمان تشکیل که همان پرتگاه‌گسلی می‌باشد پیروی می‌کند. تصویرهای استریوگرافیکی دو سازوکار شیب‌لغز و امتدادلغز راستگرد را نشان می‌دهد. جهت دید به سمت شمال‌شرقی می‌باشد




شکل ۸- ۱) موقعیت قطب صفحات گسلي.۲) تحلیل جهت‌هاي تنش در گسل آب‌شیرین.




شکل ۹- نمودار گل‌سرخی از امتداد و شیب گسل آب‌شیرین.

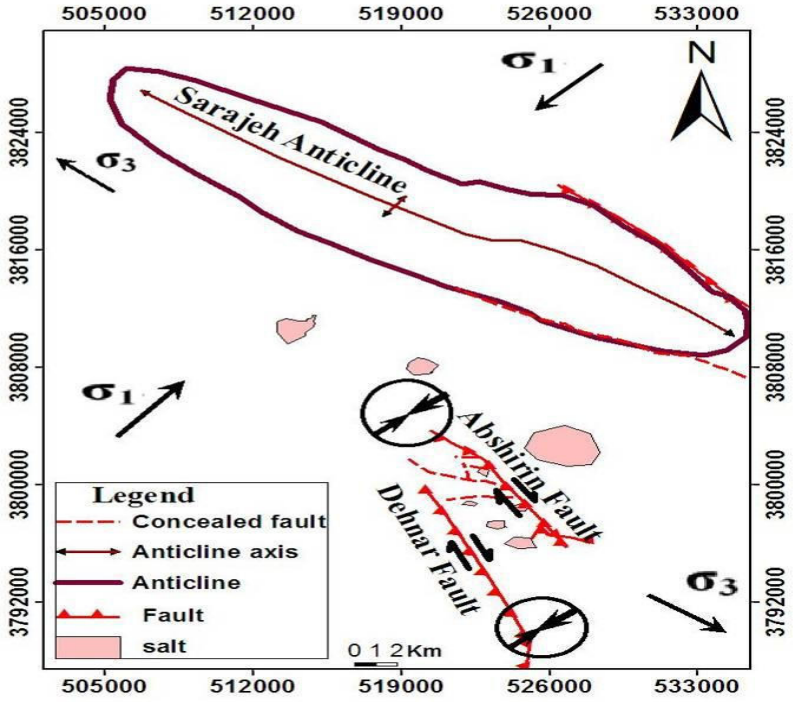
این مجموعه در سطح از نظر توپوگرافی از ارتفاعات منطقه بشمار می‌روند که این بالاآمدگی تحت تاثیر حرکت راست‌بر گسل و وجود فازفشارشی در منطقه به وجود آمده است. همچنین می‌توان با توجه به مقدار شیب گسل‌ها و هم جهت بودن همگرای شیب گسل آب شیرین و ده‌نار و قرار گیری گسل شوراب با آنها وجود ساختارگل‌گونه مثبت که این گونه ساختارها با الگوی ترافشارشی هم‌خوانی دارند را به اثبات رساند. با توجه به خمیدگی در محور تاقدیس سراجه و تغییر روند در بعضی قسمت‌های گسل‌ها الگوی پیچشی – چرخشی در حوضه ایران‌مرکزی که با نظر رژیم تکتونیکی (پیچشی- چرخشی wrenching) که در طی نئوژن در ایران‌مرکزی غالب بوده است، هم‌خوانی دارد. در انتهای گسل آب‌شیرین پایانه‌های گسلی که به‌صورت شاخه‌ای به گسل اصلی متصل است نیزمشاهده می گردد.

## تفسیر گرانی‌سنجی

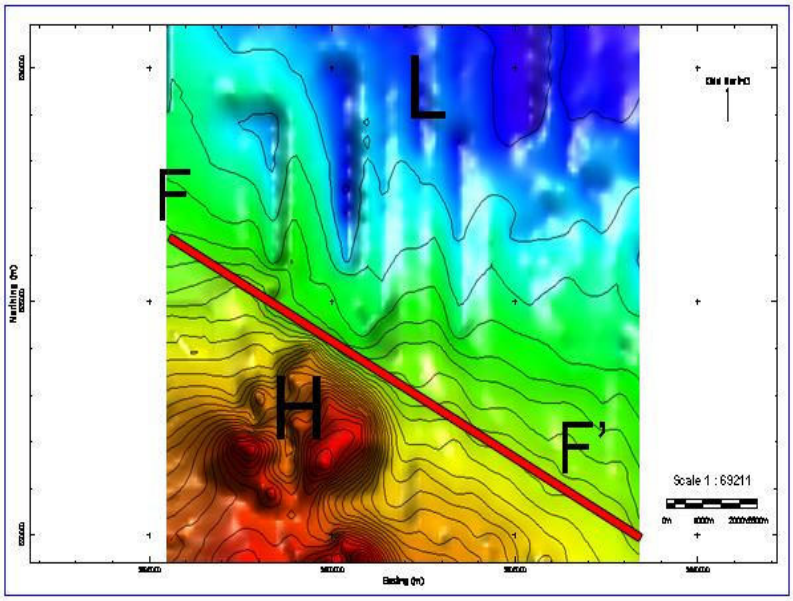
از جمله کاربردهای داده‌های گرانی‌سنجی اکتشاف آثار ساختارهای نمکی و تشخیص سازوکار گسل می باشد. همانگونه که در برش‌های ساختاری مشاهده گردید حضور ساختارنمکی مدفون نصرآباد کاشان رویت گردید که پس از بررسی‌های انجام شده و با توجه به اطلاعات ژئوفیزیکی، روش ژئوفیزیکی (گرانی سنجی) با هدف تشخیص حدود آنومالی و شناسایی وضعیت هندسه گنبدنمکی و تشخیص نوع گسل مناسب‌ترین روش برای رسیدن به اهداف ذکرشده می باشد. نقشه آنومالی بوگه در (شکل ۱۱) نمایش داده شده است. بنابراین بنظر می‌رسد این گسل حوضه شرق را از غرب جدا می‌نماید. زون‌شرقی (گرابن) این گسل شامل زون Low با رنگ آبی و زون High با رنگ سرخ در نقشه مشخص گردیده است. لذا با توجه به اینکه زون پائین‌افتاده تقریبا دریاچه نمک و ساختار نمکی را معین می‌نماید این زون توسط روند گسلی که تقریبا شمال‌غربی – جنوب-شرقی است از بلندای حاصله (کوه‌نمک لاخ) که این بلندا می‌تواند جزی از ساختارهای نمکی قدیمی در-نظر گرفته شود، جدا می گردد (شکل ۱) بنظر می‌رسد روند این گسل همان روند گسل آب‌شیرین می‌باشد. ساختمان سراجه و کوه غدیر اسب در حاشیه‌شرقی (کوله‌شرقی) گسل قرار می گیرند. بقیه ساختمانها در محدوده غرب روی زون بالا افتاده (Paleo High) قرار می‌گیرند. ساختارهای چین‌خورده غدیراسب و سراجه با روند شمال‌غرب – جنوب‌شرق و زون غرب (بلندا) شامل منطقه به شدت تکتونیزه و توده‌های نفوذی آذرین می‌باشد. همچنین روند گسل آب‌شیرین در برشی که از مدل گرانی‌سنجی بدست آمده به‌خوبی قابل مشاهده است (شکل ۱۲).

## بحث و بررسی امکان‌سنجی تاثیر گسل‌ها بر ساختارنمکی

با توجه به گسترش روز افزون ساخت و ساز سایت ذخیره‌سازی گاز به‌منظور استفاده از ساختارنمکی نصرآباد کاشان امکان‌سنجی تاثیر گسل‌ها و ساختار-های موثر بر این سایت ضروری به‌نظر می‌رسد. ساختارنمکی نصرآباد کاشان بین گسل آب‌شیرین و تاقدیس سراجه و گسل ده‌نار نیز در امتداد گسل آب-شیرین در کنار ساختارنمکی قرار دارد. با توجه به مطالعات انجام شده و براساس نحوه گسترش ساختار-نمکی،شرایط مستهلک شدن گسل در نمک و وضعیت مناسب این ساختار از لحاظ لرزه‌خیزی و ... به‌نظر می‌رسد که گسل‌های آب‌شیرین و ده‌نار با توجه به سازوکار امتدادلغز با مولفه معکوس تاثیر قابل توجهی بر ساختارنمکی ندارد. اما توجه به مخاطرات پس از بر



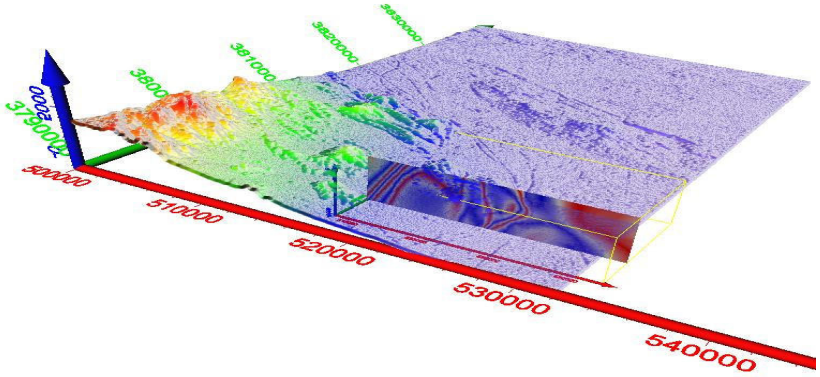

شکل ۱۰- نقشه ساختاري از الگوي تنش‌هاي موجود در منطقه




شکل۱۱- نقشه آنومالی بوگه. به‌همراه موقعیت تقریبی گسل آب شیرین

برپایی سایت غیرقابل پیش‌بینی می‌باشد توجه به این امر نیز ضروری به‌نظر می‌رسد.

در اصل گسل امتدادلغز تاثیر کمی بر روی لایه‌های نمک می‌گذارد. اگر چرخش‌ها و حرکات ایجاد شده توسط گسل مولفه‌ای از تنش‌های کششی و یا فشارشی باشند؛ ممکن است نمک جریان پیدا کند. بنابراین ساختارهای نمک – درگیر در خم یا بالای پلکان در سیستم گسل‌های امتداد لغز رخ می‌دهد همچنین ممکن است یک دیاپیر واکنش‌پذیر در یک سیستم پلکانی شکل بگیرد[ 19,20,21]. از جمله ساختارهایی که باعث خروج نمک و سازند سرخ پایینی در غرب ناحیه مورد مطالعه شده است می‌توان به گسل آب‌شیرین اشاره نمود. با استناد به تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین شناسی، داده‌های لرزه‌ای، داده‌های گرانی‌سنجی و در نهایت جهت رفع ابهامات اجرای عملیات صحرایی این گسل با توجه به هندسه و شیبی که در عمق دارد به عنوان گسل اصلی پی-سنگی درنظر گرفته می‌شود که به وسیله تغییرات شدید توپوگرافی در بین کوه و دشت در سطح قابل مشاهده است. توسعه این گسل در طی مراحل تکامل تکتونیکی باعث قطع‌شدگی آبراهه‌ها و بادزنهای قدیمی و جدید شده که به‌نظر می‌رسد جنبا باشد و در تصاویر ماهواره‌ای قابل مشاهده است. همچنین در اطراف گسل آب‌شیرین، زمین کاملا حالت مسطح دارد و خطری تجهیزات سایت را تهدید نمی‌کند احتمالا نمک در عمق کمی متوقف شده است با توجه به شرایط سطحی و زیرسطحی مناسب این مخزن جهت ذخیره‌سازی گاز مناسب می‌باشد. مگر اینکه پس از برپایی سایت نمک حرکتی داشته باشد که در آن زمان بر تجهیزات از قبیل چاه و به‌طورخاص به هنگام ورود به حاشیه ساختارنمکی تاثیر منفی می‌گذارد [17].نتایج حاصل از لرزه‌خیزی منطقه نیز دلالت بر عدم رویداد لرزه‌ای و فعالیت کم این گسل می‌باشد [٤] که رسیدن این گسل و توقف آن در نمک مانع از فعالیت لرزه‌خیزی آن شده است. اما این عدم فعالیت دلیلی بر غیرفعال بودن گسل نیز نمی‌باشد زیرا زمین-ساخت حاکم در منطقه به‌دلیل حضور نمک فعال به-شمار می‌رود. با توجه به این امر یک نکته مثبت برای برپایی سایت ذخیره‌سازی گاز به‌شمار می‌رود. اما این عدم فعالیت لرزه‌ای گواهی بر بی‌خطر بودن و یا عدم تهدید این گسله در آینده نیست بلکه امکان انباشته شدن انرژی در آن و با ایجاد سایت امکان زمین لرزه-های القایی نیز ممکن است. بنابراین در این تحقیق اصلی‌ترین عامل که تعیین سازوکار گسل و تا ثیر امکان‌سنجی آن بر ساختارنمکی مشخص ساخت که گسل‌ها بر ساختارنمکی تاثیر قابل توجهی ندارند. که با جمع‌بندی کلیه نتایج بدست آمده این ساختار جهت مطالعه در فازهای بعدی پیشنهاد می گردد.




شکل ۱۲- برش در جهت y که از مدل گرانی‌سنجی بدست آمده، اثر تقریبی گسل آب شیرین قابل مشاهده است

## نتیجه گیری

با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام شده به‌طور خلاصه نتایج زیر حاصل گردیده است:

۱-با استفاده از تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی که نتایج آن برای تشخیص سازوکار گسل آب‌شیرین بسیار تعیین کننده است. همچنین نتایج گرانی‌سنجی با نتایج شواهد صحرایی در منطقه کاملا تاییدکننده سازوکار امتدادلغز راستگرد با مولفه معکوس گسل آب‌شیرین می‌باشد.

۲-تصاویر ماهواره‌ای و شواهد پرتگاه‌های گسلی بیانگر حرکت امتدادلغز راستگرد گسل ده‌نار است.

۳-مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که با اجرای عملیات‌صحرایی و اعمال نتایج آن، در نهایت می‌توان به الگوی ساختاری و جهت تنش‌های اصلی ($\sigma_1$) ۲۲۸/۱۳، تنش($\sigma_2$) ۱۳۷/۰۳ و تنش($\sigma_3$) ۰۳۵/۷۷ در منطقه رسید.

٤-نتایج حاصل از امکان‌سنجی دلالت بر عدم فعالیت گسل و تاثیرآن بر ساختارنمکی دارد اما دلیل قانع کننده ای بر غیرفعال بودن این گسل در آینده نیست. بلکه توجه به مخاطرات فعالیت گسل در هنگام ایجاد و توسعه سایت‌ذخیره‌سازی گازطبیعی امری ضروری به شمار می‌رود.

## تشکروقدردانی

بدینوسیله از" پژوهش و توسعه شرکت محترم ملی گاز ایران" که این مقاله از حمایت و پشتیبانی آنان برخوردار بوده کمال قدردانی و تشکر را دارد. همچنین از شرکت محترم ذخیره‌سازی گاز طبیعی و مجری محترم پروژه ایران مرکزی جناب آقای مهندس رجبی به جهت همکاری ارزشمندشان، از جناب آقای دکتر قاسمی معاونت محترم سازمان زمین‌شناسی، جناب آقایان مهندس حیدرزاده ، مهندس گنجیان و مهندس باقری به جهت همکاری ارزنده شان،صمیمانه تشکرمی‌کنم.

## منابع

۱- ابراهیم‌زاده اردستانی،و.، (۱۳۸۹): گرانی‌سنجی کاربردی (اکتشاف کانی، زمین‌شناسی مهندسی)، موسسه انتشارات دانشگاه تهران،۲۳۰ ص.

۲- آقانباتی، ع.، (۱۳۸۹): زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ سوم، ٦٠٦ ص.

۳- امامی.، م.، ع.،(۱۳۷۵): نقشه زمین‌شناسی و گزارش پشت صفحه آران.، مقیاس۱:۱۰۰۰۰۰، برگه شماره ٦٢٥٨، سازمان زمین‌شناسی کشور.

٤- حیدرزاده، ق.، کشاورزصفیئی، م.،گنجویان، م،ع.، کاوسی،م.، بحرودی،ع.، باقری، ج.، (۱۳۹۰): برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی برای ساختارنمکی نصرآباد کاشان جهت بر پایی سایت ذخیره-سازی گازطبیعی. سی امین گردهمایی علوم زمین. سازمان زمین-شناسی و اکتشافات معدنی، ١٤٠-١٤٨ص.

٥- درویش‌زاده، ع.، (۱۳۸۵): زمین‌شناسی ایران (چینه‌شناسی، تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسم)، انتشارات امیرکبیر، تهران، ٤٣٤ ص.

٦- صفری،ح.، امیری بختیار،ح.، فولادوند،م.، (۱۳۸۸): زمین-شناسی تحت‌الارضی پایه‌ای، انتشارات روابط عمومی شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب،٤٢٤ ص.

۷- قرشی، م.، آرین، م.، (۱۳۸۹): تکتونیک ایران، انتشارات مربع آبی، ۳۳٦ ص.

۸- نبوی، م.ح.، (۱۳۵۵): دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.۲٤۳ص.

9- Amini, A., Anketell, H. M., (1996): Detrital opaque minerals. Source indicator in sandstone of the Upper Red Formation, Central Iran. BSRG annual meeting, Dublin, Republic of Ireland, Proceedings. 16 P.

10- Angelier, J., (1994): b- Fault slip Analysis & paleostress reconstruction In: Hancock, P. L. 1994. Continental Deformation, pergamon press Ltd. Chapter 4,. 53-100 pp.

11- Berberian, M; King, G. C. P., (1981): a, A paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian journal of earth science. V18. N2. 103-105 pp.

12- Berberian, M., King, G.C.P., (1981): b. Toward a paleogegraphy and tectonic evolution of Iran. Can. J. Eart. Sci., 18, 210-265 pp.

13- Bott, M., (1959): The mechanics of oblique slip faulting, Geological Magazine 96, 109-117

14- Chabrelie, M., et al., (2000): Underground Gas Storage: Technological Innovation for Increased Efficiency, CEDIGAZ, France P 79.

15- Talbot, C.J., Alavi, M., (1996): The past of a future syntaxis across the Zagros. In: Alsop, G.I., Blundell, D.J., Davison, I. (Eds.), Salt Tectonics. Geological Society London Special Publication, vol. 100,. 89–110 pp.

16- Talbot, C.J., Aftabi, P., (2004): Geology and models of salt extrusion at Qum. Kuh, central Iran. Geological Society London Journal 161, 321–334 pp

17- Wallace, R.E., (1951): Geometry of shearing stress and relation to faulting, Journal of Geology, Vol, 59,. 118-130 pp.