

# بررسی ساختاری گنبد نمکی خواجه در شمال خاور تبریز با هدف ارزیابی امکان‌پذیری ذخیره‌سازی گاز و مدل‌سازی تحلیلی دیاپیرسم

بهزاد زمانی ق. <sup>۱\*</sup>، محمد جلیل پور <sup>۲</sup>، محسن مؤید <sup>۳</sup> و محمد فریدی <sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
<sup>۳</sup> استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
<sup>۴</sup> دانشجوی دکترا، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور واحد شمال غرب، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۰۲

## چکیده

در این تحقیق گنبد نمکی خواجه در استان آذربایجان شرقی از دیدگاه ساختاری بررسی شده و سپس امکان ذخیره‌سازی گاز در این گنبد مورد ارزیابی قرار گرفته است. در اثر صعود این گنبد نمکی ساختارهای بسیار متنوعی همچون گسل‌های معکوس حاشیه‌ای، گسل‌های نرمال شعاعی، چین‌ها و کارست توسعه یافته‌اند. در بخش شمالی گسل تبریز زنجیره‌ای از ساختارهای حوضه و گنبد وجود دارد که همگی دارای کشیدگی با روند شمال باختری - جنوب خاوری هستند. گنبد نمکی خواجه نیز در حاشیه جنوبی یکی از همین حوضه‌ها تشکیل شده است. عوامل مختلفی در صعود این گنبد مؤثر بوده‌اند که از مهم‌ترین آنها رژیم تکتونیکی فشاری حاکم بر منطقه است که منجر به تشکیل این حوضه‌ها شده و در ضمن آن در محل تقاطع شاخه فرعی گسل تبریز و شاخه فرعی (شمال باختری - جنوب خاوری) گسل نهند پهنه ضعیف و مناسبی برای صعود و تشکیل گنبد نمکی خواجه فراهم کرده است. عوامل دیگری همچون نیروی شناوری، تداوم تنش‌های فشاری و بارگذاری تفاضلی نیز عامل تداوم صعود گنبد نمکی بوده‌اند. گنبد نمکی خواجه جوان بوده و امروزه نیز در حال صعود است و مدل‌سازی تحلیلی عمر آن را ۳۱۰۰۰ سال به دست داده است که این سن با آثار نئوتکتونیکی محدوده گنبد نمکی نیز سازگاری دارد. این گنبد نمکی از لحاظ میزان خلوص، دارای درصد NaCl بالا بوده و فاقد ناخالصی‌های KCl و MgCl<sub>2</sub> است و از این رو برای انجام فرایند انحلال جهت ایجاد فضای زیرزمینی برای ذخیره‌سازی گاز مناسب است. در ارتباط با ذخیره‌سازی گاز در این گنبد از نظر گسترش عمقی و برآورد حجم ذخیره‌سازی نیاز به بررسی‌های تحت الارضی است ولی از نظر دیگر عوامل مؤثر بر ذخیره‌سازی مناسب برای ذخیره‌سازی گاز به نظر می‌رسد.

**کلیدواژه‌ها:** گنبد نمکی خواجه، تحلیل ساختاری، گسل، چین، سیستم شکستگی.

\*نویسنده مسئول: بهزاد زمانی قره چمنی

E-mail: b.zamani@tabrizu.ac.ir

## ۱ - پیش‌گفتار

نیاز انسان به انرژی در تمدن امروزی بشر، لزوم تأمین انرژی پایدار را موجب می‌شود. در مناطق سردسیر کشور همچون آذربایجان، در فصل سرد سال نیاز بیشتری به انرژی گرمایشی است که عمدتاً توسط گاز طبیعی تأمین می‌شود. افزایش مصرف در زمستان و بالا بودن تولید در تابستان و همچنین نیاز کمتر به گاز در فصول گرم سال، شرکت ملی گاز ایران را بر آن داشته است تا در مناطق سردسیر کشور که عمدتاً فاقد ذخایر طبیعی گاز هستند به دنبال یافتن امکان ذخیره‌سازی گاز در مخازن طبیعی، در تابستان باشد. این تحقیق با مطالعه گنبد نمکی خواجه با دید تکتونیکی و از دیدگاه امکان ذخیره‌سازی گاز صورت گرفته است.

چندین روش برای ذخیره‌سازی گاز در مخازن زیرزمینی وجود دارد که در این ارتباط قبل از انتخاب هر نوع شیوه ذخیره‌سازی، مطالعات زمین‌شناسی اهمیت زیادی دارد. یکی از ساختارهای مهم زمین‌شناسی که قابلیت ذخیره‌سازی گاز را دارا است، گنبد‌های نمکی هستند. در این تحقیق هدف این است که مطالعات اولیه زمین‌شناسی بر روی گنبد نمکی خواجه در شمال خاور تبریز صورت گیرد تا در صورت دارا بودن پتانسیل ذخیره‌سازی گاز، در مراحل بعدی مطالعات بیشتری روی این گنبد و گنبد‌های نمکی دیگری که در شمال باختر کشور وجود دارند صورت پذیرد.

در این ارتباط ساختارهای موجود در منطقه مانند چین‌ها، گسل‌ها و سیستم شکستگی‌ها شناسایی، اندازه‌گیری و سپس تجزیه و تحلیل شده و ارتباط آنها با گنبدزایی مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی و تحلیل داده‌های مربوط به سیستم‌های گسلش و درز و شکاف ناشی از گنبدزایی در محدوده مورد مطالعه تأثیر گسل‌های موجود بر حرکت و جایگیری توده نمک و مارن در موقعیت فعلی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با نمونه‌گیری و انجام تجزیه‌هایی بر روی نمونه‌های

صحرایی گرفته شده از منطقه ترکیب شیمیایی نمک و درصد خلوص آن نیز مشخص شده است و با اطلاعات موجود وضعیت خلوص نمک در این گنبد پهنه‌بندی شده که در فرایند ذخیره‌سازی گاز یکی از فاکتورهای ضروری جهت برآورد امکان شستشو و تخلیه نمک به حساب می‌آید.

منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی و در ۱۵ کیلومتری شمال خاوری شهر تبریز، واقع شده است (شکل ۱). این منطقه به علت برونزد واحدهای سنگی میوسن (سازند قرمز فوقانی، Upper red formation)، که فرسایش‌پذیری زیادی دارند سیمای تپه‌ماهوری و توپوگرافی نسبتاً هموار دارد و تنها واحد سنگی برونزد یافته در منطقه همان سازند قرمز فوقانی است (شکل ۲)، که عمدتاً از نمک با میان‌لایه‌های مارن و تناوبی از ژیس و مارن که روباره گنبد نمکی را تشکیل می‌دهند و ماسه‌سنگ‌های سبتر لایه با میان‌لایه‌های مارنی که اطراف گنبد نمکی را پوشش داده تشکیل شده‌اند.

## ۲- زمین‌شناسی ساختاری

### ۲-۱. ساختارهای مرتبط با گنبدزایی

گنبد‌های نمکی در اثر ناپایداری ثقلی لایه‌های با چگالی کمتر (نمک) و صعود نمک، که توسط سنگ‌های با چگالی بیشتر پوشیده شده‌اند و در اثر نیروی شناوری به وجود می‌آیند (Twiss & Moores, 2007). عوامل مختلفی در جابه‌جایی و صعود گنبد‌های نمکی دخالت دارند، که شامل نیروی شناوری، بارگذاری دیفرانسیلی، چین خوردگی روباره در اثر فشارش و همچنین کشش در روباره نیز از مهم‌ترین عوامل صعود دیاپیر هستند (Waltham, 1996). در ضمن و پس از صعود گنبد نمکی

با رسم استریوگرام‌های لایه‌بندی در بخش‌های مختلف محدوده مورد مطالعه، امکان بررسی تأثیر صعود گنبد نمکی بر شیب لایه‌ها نیز به وجود آمده است، که این موضوع در شکل ۱۲ قابل بررسی است. زاویه شیب لایه‌ها با نزدیک شدن به گنبد نمکی افزایش پیدا کرده و در مرز تماس آنها با گنبد، شیب آنها نزدیک به قائم و در برخی نقاط به صورت برگشته است.

#### ۲-۵. تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به سیستم ناپوستگی‌های منطقه

در طی بازدیدهای صحرایی انجام شده، با اندازه‌گیری سیستم ناپوستگی‌های موجود و با ترسیم نمودارهای گل سرخی و استریوگرام مربوطه وضعیت ناپوستگی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل ۱۳ نمودار گل سرخی مربوط به شکستگی‌های کل منطقه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، در محدوده مورد نظر دو دسته کلی از شکستگی‌ها قابل تشخیص است. یکی از این سیستم‌های شکستگی دارای روند شمال‌خاوری - جنوب‌باختری بوده و عمده شکستگی‌های منطقه را تشکیل می‌دهد. دسته دیگر روند تقریبی شمال تا شمال‌خاوری و جنوب تا جنوب‌باختری دارد.

#### ۳- بررسی پتانسیل ذخیره‌سازی گاز طبیعی

پارامترهای مختلفی در فرایند ذخیره‌سازی گاز در داخل حفره‌ها و غارهای نمکی دخیل هستند. یکی از پارامترهای مؤثر در این امر میزان خلوص نمک و نوع ناخالصی‌های موجود در آن است. شکل غارهای ایجاد شده در داخل نمک به میزان و نوع ناخالصی‌های موجود در نمک بستگی دارد (Evans & Chadwick, 2009). شکل غار ایجاد شده در نمک به خوبی قابل کنترل است، اما وجود ناخالصی‌هایی از نمک‌های پتاسیم و منیزیم، می‌تواند منجر به نامنظم شدن شکل غار و در نتیجه ناپایداری غار گردد. به منظور تعیین میزان خلوص نمک، ۵ نمونه برای انجام تجزیه‌های کمی XRD به آزمایشگاه ارسال شد. با توجه به اینکه نتایج تجزیه‌های XRD نشان‌دهنده عدم وجود این ناخالصی‌ها در محدوده گنبد نمکی خواجه است، می‌توان چنین نتیجه گرفت که این گنبد نمکی از لحاظ خلوص، برای انجام فرایند انحلال و ایجاد غارهای مصنوعی به منظور ذخیره‌سازی گاز مناسب است (جدول ۱). البته در این رابطه وجود میان‌لایه‌های غیرقابل حل مارن در بین لایه‌های نمک، مشکل‌ساز می‌باشد چرا که اولاً ته‌نشست این مواد غیر قابل حل سبب کاهش حجم غار حاصل از انحلال شده و ثانیاً موجب ناپایداری غار می‌شود. برای حل این مشکل، محدوده گنبد نمکی از نظر میزان میان‌لایه‌های مارن، پهنه‌بندی شد تا نقاط با ناخالصی کمتر مشخص گردد. به منظور پهنه‌بندی منطقه، در ایستگاه‌های مختلف درصد میان‌لایه‌های مارن موجود در برنژدهای نمکی محاسبه شده و سپس خطوط هم‌ارزش خلوص نمک رسم شد (شکل ۱۴). بر اساس این پهنه‌بندی در بخش‌های شمال‌خاوری و جنوب‌باختری، خلوص نمک نسبت به بخش‌های میانی محدوده مورد مطالعه کمتر است.

از جمله پارامترهای دیگری که در ارتباط با ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز دارای اهمیت است، می‌توان به حجم و عمق مخزن اشاره کرد. اما با توجه به نبود داده‌های ژئوفیزیک در منطقه، نمی‌توان در رابطه با حجم و عمق مخزن اظهار نظر کرد و به همین دلیل انجام مطالعات ژئوفیزیک در آینده در این منطقه توصیه می‌شود. در چنین پروژه‌هایی برای انجام فرایند انحلال نیاز به وجود ذخایر زیاد آب شیرین است و با توجه به نزدیکی این گنبد به دریاچه سد شهید مدنی، می‌توان از آب دریاچه سد برای انجام فرایند انحلال استفاده کرد. نزدیکی به بازار مصرف نیز از دیگر مزایای ذخیره‌سازی در این گنبد است. چرا که همواره بخش‌های شمال‌باختری کشور در فصول سرد سال با مشکل کمبود گاز و افت فشار روبرو بوده‌اند و قرار گرفتن این گنبد در نزدیکی شهر تبریز و در قسمت‌های سردسیر کشور، این گنبد را مناسب برای چنین پروژه‌ای نشان می‌دهد.

ساختارهایی در ارتباط با آن شکل می‌گیرد که در ادامه در مورد آنها بحث می‌شود. گسل‌های معکوس محیطی یا حاشیه‌ای از جمله ساختارهایی هستند که در منطقه مورد مطالعه در چند نقطه مشاهده شده‌اند و همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، این گسل‌ها به وضوح از مرز تماس گنبد با لایه‌های مجاور تبعیت می‌کنند.

یکی دیگر از ویژگی‌های بسیار بارزی که در منطقه به وفور مشاهده می‌شود، تغییر در زاویه شیب و سمت شیب لایه‌ها، در مرز بین گنبد و رسوبات احاطه‌کننده آن است. این حالت خود می‌تواند در نتیجه تأثیر گسل‌های معکوس ایجاد شده باشد. چین‌های در ارتباط با گسل‌های معکوس حاشیه‌ای نیز در این محدوده مشاهده شده است. در شکل ۶ تصویر یک چین در ارتباط با گسل به نمایش گذاشته شده است. محور این چین به موازات گسل‌های معکوس حاشیه‌ای بوده و یال جنوبی آن که در تماس با این گسل‌ها است حالت برگشته دارد. مکانیسم چین‌خوردگی از نوع مکانیسم جریانیه بوده و در داخل لایه‌های ژئوسی که دارای خاصیت تغییر شکل پلاستیک هستند تشکیل شده است. ستبرای لایه‌ها در ناحیه لولای بیشتر از یال‌ها بوده و علت آن جریان پیدا کردن ژئوس از نواحی پر فشار (یال‌ها) به سمت نواحی کم فشار (لولای) است (شکل ۵).

#### ۲-۲. اثر مورفوتکتونیک گنبدزایی بر روی آجی‌چای (تلخه‌رود)

گنبد نمکی خواجه اثر مورفوتکتونیک بارزی بر روی رودخانه آجی‌چای (تلخه‌رود) گذاشته است. وجود این گنبد و صعود آن موجب تغییر فاحش در مسیر رودخانه شده است، که این تأثیرات در شکل ۷-A نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، مسیر رودخانه در این محدوده تقریباً به صورت خاوری - باختری است که در قسمت جنوب‌باختری این گنبد و درست در راستای گسل‌های معکوس حاشیه‌ای، این راستا تغییر کرده و به صورت شمال‌باختری - جنوب‌خاوری در آمده است (شکل ۷-A). از این تغییر مسیر می‌توان چنین برداشت کرد که رودخانه پس از بریدن گنبد نمکی و برخورد به این گسل‌ها، در امتداد این گسل‌ها، بستر مناسبی را برای ادامه حرکت خود فراهم دیده و تغییر مسیر داده است. در بخش دیگری از محدوده نیز، که گنبد نمکی توسط رودخانه بریده شده است، در اثر صعود گنبد، رودخانه به مرور از مسیر خود جابه‌جا شده و با تشکیل مئاندرهای تدریجی از گنبد نمکی فاصله گرفته است (شکل ۷-B). این امر نشان می‌دهد که گنبد نمکی امروزه نیز فعال بوده و در حال صعود است و در نتیجه این صعود ارتفاع در این بخش رفته رفته افزایش پیدا کرده و با تغییر سطح اساس رودخانه، مسیر رود به سمت جنوب مهاجرت کرده است که وجود آثار کانال‌های قدیمی رودخانه، هم در صحرا و هم در تصاویر دورسنجی قابل تشخیص است.

#### ۲-۳. آثار کارست مرتبط با گنبد نمکی

آثار کارستی مرتبط با گنبد نمکی خواجه شامل دولین (doline) و سینک هول (sinkhole) ها و غارها است. در شکل ۸-A یک نمونه از این دولین‌ها نشان داده شده است. دولین‌ها خود دارای انواع مختلفی هستند که دولین مشاهده شده در شکل ۸-B از نوع دولین‌های فروریخته است. این دولین‌ها اشکال بیضوی یا دایره‌ای داشته و شیب دیواره‌های آنها تند است و در اثر ریزش سقف حفره‌های نزدیک سطح زمین یا از ریزش چشمه‌های کارستی به وجود می‌آیند (احمدی، ۱۳۶۷).

#### ۲-۴. تجزیه و تحلیل داده‌های صحرایی لایه‌بندی

با اندازه‌گیری صحرایی موقعیت ساختارها در اطراف گنبد نمکی تغییرات وضعیت لایه‌بندی مورد بررسی قرار گرفته (شکل‌های ۹ و ۱۰). در شکل ۱۱ نمودار گل سرخی مربوط به لایه‌بندی در نقاط مختلف محدوده اطراف گنبد نمکی خواجه نمایش داده شده است. در ارتباط با لایه‌بندی منطقه، با توجه به نتایج ترسیم نمودارهای گل سرخی می‌توان گفت که، امتداد لایه‌ها به وضوح از مرز تماس گنبد نمکی با لایه‌های احاطه‌کننده آن تبعیت می‌کند، به طوری که روند غالب شاخه‌های نمودارهای گل سرخی با مرزهای گنبد نمکی در اغلب بخش‌ها همسو است.

#### ۴- مدل سازی تحلیلی

با توجه به اینکه اطلاعات لازم برای مدل سازی عددی در این تحقیق کافی نبوده، (عدم وجود مقاطع ژئوفیزیک و داده های تحت الارضی کافی جهت تهیه الگو و شبیه سازی برش ها و تهیه الگوی سه بعدی و همچنین محدودیت مالی پروژه جهت انجام یکسری از آزمایشات به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی نمک و سنگ های دربرگیرنده، از جمله ضرایب یانگ و پواسون و زاویه اصطکاک داخلی) اجباراً به مدل سازی تحلیلی اکتفا شده است. برای تحلیل مدل برای دیپایریسم نمک باید مدلی انتخاب گردد که با شرایط زمین شناسی سازندها و وضعیت و خواص سنگ نمک و سنگ های دربرگیرنده بیشترین سازگاری وجود داشته باشد و در عین حال بتوان با توجه به اطلاعاتی که در این تحقیق امکان گردآوری آنها وجود داشته است این مدل اجرا (run) شود. در این ارتباط مدل خطی (Linear) و دو لایه ای انتخاب شده است که برای حفظ پیوستگی مواد، شرایط مرزی که در زیر بیان می شود در نظر گرفته شده است (Turcotte and Schubert, 2002). اگر دو لایه در نظر گرفته شود که لایه پایینی نمک و لایه بالایی رسوبات روباره آن باشد، برای مرزهای نمک و رسوبات میوسن (سازند قرمز فوقانی) با در نظر گرفتن شرایط مرزی حرکت سنگ نمک به صورت سیالی با ویسکوزیته ( $\mu$ ) در نظر گرفته می شود که به سمت بی نهایت میل می کند، که این حرکت با معادله دیفرانسیل زیر بیان خواهد شد:

$$(\partial u / \partial x) + (\partial v / \partial y) = 0 \quad (1)$$

در این معادله، جمله اول نرخ سرعت سیال در جهت x و جمله دوم نرخ سرعت سیال در جهت yها را بیان می کند. اگر محور xها افقی باشد و معادلات خطوط جریان حرکت نمک را با  $\Psi$  نمایش دهیم، در این صورت برای معادلات سرعت در جهت x و y خواهیم داشت:

$$u = \partial \Psi / \partial y \quad (2)$$

$$v = \partial \Psi / \partial x \quad (3)$$

اگر روابط ۲ و ۳ را در رابطه ۱ جایگذاری کنیم و آنها را در رابطه فشار سیالات (رابطه ۴) قرار دهیم، نمایش آن با معادلات دیفرانسیل به صورت معادله ۵ خواهد بود:

$$P = p - \rho gh \quad (4)$$

که در این رابطه،  $P$  = فشار سیال،  $p$  = فشار اتمسفر و  $\rho gh$  = انرژی پتانسیل هستند.

$$p \rightarrow N/m^2; \rho \rightarrow gr/cm^3; g \rightarrow m/s^2; h \rightarrow m$$

$$(-\partial P / \partial y) + \mu ((\partial v^2 / \partial x^2) + (\partial v^2 / \partial y^2)) = 0 \quad (5)$$

در این صورت خواهیم داشت:

$$(-\partial p / \partial x) + \mu ((\partial \Psi^3 / \partial x^2 \partial y) + (\partial \Psi^3 / \partial y^3)) = 0$$

$$(-\partial p / \partial y) + \mu ((\partial \Psi^3 / \partial x^3) + (\partial \Psi^3 / \partial y^2 \partial x)) = 0$$

با حل این معادلات دیفرانسیل خواهیم داشت:

$$(\partial \Psi^4 / \partial x^4) + 2(\partial \Psi^4 / \partial x^2 \partial y^2) + (\partial \Psi^4 / \partial y^4) = 0 \quad (6)$$

که به این معادله، معادله دو آهنگ (Biharmonic) گفته شده و به طور ساده به شکل زیر بیان می شود:

$$\nabla^4 \Psi = 0 \quad (7)$$

معادله خط جریان ( $\Psi$ )، تابعی سینوسی به شکل زیر است (معادله ۸):

$$\Psi = \sin(2\pi/\lambda) \cdot y_{(y)} \quad (8)$$

در این معادله،  $\lambda$  = طول موج هارمونی ذکر شده است و y تابعی از y است، یعنی:

$$\Psi = \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \left( A e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} + B y e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} + C e^{\frac{2\pi y}{\lambda}} + D y e^{\frac{2\pi y}{\lambda}} \right) \quad (9)$$

که در این رابطه A، B، C و D ثابت های قراردادی هستند.

معادله ۸، معادله حرکت سیال (fluid equation of motion) است و به دلیل ماهیت سینوسی این معادله است که نمک به صورت موجی و هارمونی صعود می کند. برای

مدل ساده دولایه ای نمک و سنگ های روباره، شکلی مانند شکل ۱۵ را در نظر می گیریم. اگر معادلات جریان را بنویسیم،  $\Psi_1$  برای رسوبات میوسن و  $\Psi_2$  برای نمک حل خواهند شد.

$$\Psi_1 = \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \left( A_1 \cosh \frac{2\pi y}{\lambda} + B_1 \sinh \frac{-2\pi y}{\lambda} + C_1 \cosh \frac{2\pi y}{\lambda} + D_1 \sinh \frac{2\pi y}{\lambda} \right)$$

$$\Psi_2 = \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \left( A_2 \cosh \frac{2\pi y}{\lambda} + B_2 \sinh \frac{-2\pi y}{\lambda} + C_2 \cosh \frac{2\pi y}{\lambda} + D_2 \sinh \frac{2\pi y}{\lambda} \right) \quad (10)$$

وقتی که حرکت سنگ نمک آغاز شد، مرز لایه ها از حالت افقی خارج خواهند شد که دامنه مرز لایه ها با  $\omega$  بیان می شود که در این صورت اگر از  $\Psi_1$  بر حسب x مشتق بگیریم خواهیم داشت:

$$(\partial \Psi_1 / \partial x) \cdot \cos(\partial \omega / \partial t) = (2\pi A / \lambda) \cdot \cos(2\pi x / \lambda) \quad (10)$$

وقتی نمک به بالا جریان پیدا می کند، مرز لایه ها شروع به تداخل خواهند کرد که ناشی از عملکرد نیروی شناوری (buoyancy) است که به این موضوع ناپایداری (Rayleigh-Taylor) گفته می شود. نیروی شناوری فوق با رابطه زیر بیان می شود:

$$F_{(b)} = (f_1 - f_2) - gm \quad (11)$$

که در این رابطه، m (gr) جرم روباره، g ( $m/s^2$ ): شتاب ثقل زمین،  $f_1$  ( $N/m^2$ ) نیروی وارده از نمک به روباره و  $f_2$  ( $N/m^2$ ) نیروی وارده از روباره به نمک هستند. حرکت نمک و تداخل مرز لایه ها، شروع دیپایریسم است که اگر دامنه حرکت نمک و طول موج آن را بخواهیم بررسی کنیم، برای طول موج داریم:

$$\omega = \omega_0 (2\pi x / \lambda) \quad (12)$$

با ورود نیروی شناوری به معادلات دیفرانسیل و سپس مشتق گرفتن از این رابطه نسبت به زمان، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{(f_1 - f_2)gh}{4\mu} \cdot \frac{\left[ \left( \frac{\lambda}{2\pi b} \right)^2 \operatorname{tgh}^2 \frac{2\pi b}{\lambda} - \frac{1}{\sinh(2\pi b/\lambda) \cosh(2\pi b/\lambda)} \right]}{\left( \frac{\lambda}{2\pi b} \right) + \frac{1}{\sinh(2\pi b/\lambda) \cosh(2\pi b/\lambda)}} \cdot \omega \quad (13)$$

نتیجه حل این معادله دیفرانسیل به صورت معادله زیر است:

$$\omega = \omega_0 e^{\omega t} \quad (14)$$

در این معادله  $\omega_0$  دامنه حداکثری دارد و به صورت افزایشی است و معنی آن این است که نمک رشد کرده و دیپایریسم پس از شروع رشد، به رشد خود ادامه خواهد داد و متوقف نخواهد شد.  $\tau_g$  عدد ثابتی است که وابستگی به زمین شناسی ناحیه دارد و زمان رشد (grow time) دیپایریسم است و به شکل زیر بیان می شود:

$$\tau_g = \frac{4\mu}{(f_1 - f_2)gh} \cdot \frac{\left( \frac{\lambda}{2\pi b} + \frac{1}{\sinh(2\pi b/\lambda) \cosh(2\pi b/\lambda)} \right)}{\left[ \left( \frac{\lambda}{2\pi b} \right)^2 \operatorname{tgh}^2 \frac{2\pi b}{\lambda} - \frac{1}{\sinh(2\pi b/\lambda) \cosh(2\pi b/\lambda)} \right]} \quad (15)$$

به صورت عددی و با جایگذاری مقدار برای  $2\pi b/\lambda$  و رسم نمودار، (Torcote and Schobert 1976) نتیجه گرفته اند که مقدار  $\lambda = 2.568b$  (رابطه ۱۶) است.

است. بنابراین با جایگذاری آن در رابطه ۱۵ خواهیم داشت:

$$\tau_g = 13.04\mu / (\rho_1 - \rho_2)gb \quad (17)$$

که در این رابطه b (m) ستبرای لایه نمکی، g ( $m/s^2$ ) شتاب جاذبه زمین،  $\rho_1$  ( $gr/cm^3$ ) دانسیته لایه های روباره (در اینجا بخش های ماسه سنگی سازند قرمز فوقانی)،  $\rho_2$  ( $gr/cm^3$ ) دانسیته نمک،  $\mu$  (pas.s) ویسکوزیته نمک و  $\tau_g$  زمان شکل گیری گنبد نمکی هستند. به این ترتیب می توان با داشتن ستبرای دانسیته نمک و سنگ های روباره، سایر پارامترهای دیپایریسم را به صورت محاسباتی به دست آورد.

#### ۴-۱. نتایج مدل

در این بخش سعی شد، تا با تحلیل عددی و فرض قرار دادن اعداد و ارقام به دست آمده از روی اطلاعات صحرائی و همچنین از روی گزارشات و نقشه های

باید تنشهای فشاری حاکم بر منطقه و وجود گسلها را از عوامل آغاز دیاپیرسم و تداوم آن در نظر گرفت. نمونه گیری از نمک در بخشهای مختلف گنبد نمکی خواجه و اندازه گیری آزمایشگاهی چگالی نمک، مقدار متوسط  $2 \text{ gr/cm}^3$  را برای این گنبد نمکی به دست داده است.

همچنین در ارتباط با بارگذاری تفاضلی، روباره در تمام منطقه شامل بخشهای بالایی سازند قرمز فوقانی (شامل مارن، ژپیس، سیلت سنگ و ماسه سنگ می باشد) است و در نتیجه ترکیب نسبتاً یکنواختی را دارد. اما به نظر می رسد به دلیل عملکرد چین خوردگی و جابه جاییهای ناشی از عملکرد گسلها و همچنین توسعه غیر همگن سازند قرمز فوقانی بارگذاری تفاضلی نیز یکی دیگر از عوامل مؤثر بر دیاپیرسم باشد. همچنین رژیم تنش فشاری حاکم بر منطقه نیز از عوامل آغاز و تداوم دیاپیرسم در این گنبد نمکی است.

به طور خلاصه می توان چنین گفت که رژیم تکتونیکی فشاری وارد بر منطقه، محرک اولیه برای صعود نمک در راستای محور حوضه بوده است. اگر چه با توجه به لرزه خیز بودن منطقه، حتی یک زلزله با بزرگای متوسط نیز می تواند محرک لازم بوده باشد. تقاطع شاخه فرعی گسل تبریز در محور آجی چای با شاخه (شمال باختر - جنوب خاوری) گسل نهند، پهنه ضعیفی را در حاشیه جنوب باختری حوضه (basin) تکتونیکی به وجود آورده اند که محل مناسبی برای صعود گنبد نمکی است (شکل ۱۳) و ایجاد گسلش و شکستگی در سنگ پوشش از عوامل کلیدی و تعیین کننده در مکان و زمان صعود گنبد نمکی است (Koyi & Peterson, 1993) بنابراین نمک در این ارتباط در محل تقاطع گسلهای یاد شده شروع به صعود کرده است.

بررسی های Jackson (1992) در کویر بزرگ ایران منجر به ارائه تقسیم بندی برای گنبد های نمکی شده است که بر اساس الگوهای داخلی، شکل، اندازه و تنوع، گنبد های نمکی ایران را به ۶ گروه تقسیم کرده اند. مقایسه پارامترهای اندازه گیری شده در صحرا و مقایسه آنها با این تقسیم بندی گنبد نمکی خواجه را در رده C این رده بندی قرار می دهد که در این گروه دیاپیرهایی جای می گیرند که دارای هسته نمکی قدیمی و پوشش سطحی ناهماهنگ هستند. مانند گروه B، در این گروه نیز یک هسته نمکی قدیمی و دیاپیری وجود دارد، که به وسیله یک روباره سطحی احاطه شده است. ساختارهای داخلی کمی در این نوع دیاپیرها مشخص می باشد. این گروه از دیاپیرها، به جای اینکه سنگ های محلی چین خورده را جابه جا کنند، آنها را به صورت کاملاً ناهماهنگ قطع می کنند. کانتورهای ساختاری روباره در گنبد های نمکی گروه C، کج شده و به طور واضح به وسیله مرز نمک بریده می شوند، در حالی که همین کانتورها در اطراف گنبد های گروه B کاملاً موازی با مرز نمک هستند. در مطالعاتی که بر روی برش عمودی این دیاپیرها صورت گرفته است، مشخص شده که این ناهماهنگی بیشتر در قسمت های عمیق دیاپیرها قابل مشاهده است، در حالی که در رأس دیاپیرها، کانتورها هماهنگ با مرز نمک هستند. از این موضوع می توان چنین استنباط کرد که گروه C دیاپیرها نسبت به گروه B تا عمق بیشتری تداوم دارند.

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا با بررسی ساختاری و مورفوتکتونیکی محدوده گنبد نمکی خواجه شناختی عمومی از وضعیت گسترش و نوع ساختارهای متأثر به دست آمد. همچنین در جهت امکان ذخیره سازی گاز در این گنبد نمکی بررسی هایی با توجه به حداقل داده های موجود و درصد خلوص نمک و همچنین پهنه بندی ناخالصی های میان لایه صورت گرفت.

بررسی ساختارهای مرتبط با دیاپیرسم در این تحقیق نشان داد لایه های روباره متأثر از دیاپیرسم بوده و تحت تأثیر صعود دیاپیرسم، رو به بالا جابه جا شده، که این جابه جایی باعث ایجاد کشش در لایه های موجود در قله گنبد شده و گسل های

زمین شناسی، حالت های ممکن برای رخداد فرایند دیاپیرسم در شمال گسل تبریز، مورد بررسی و مدل سازی تحلیلی قرار گیرد.

با جایگذاری مقادیر  $g$ ،  $\rho_1$ ،  $\rho_2$  و  $\mu$  در معادله ۱۷، می توان معادله مربوط به گنبد نمکی خواجه را به دست آورد. در حالت اول به منظور برقراری ارتباط بین گنبد نمکی خواجه و تازه کند (که به فاصله  $7/3$  کیلومتری در شمال باختر گنبد نمکی خواجه قرار گرفته است) فاصله بین دو گنبد به عنوان طول موج  $(\lambda)$  در نظر گرفته شد. ستبرای لایه نمک نیز  $200$  متر در نظر گرفته شد. به دلیل عدم وجود داده های ژئوفیزیکی در منطقه، و با توجه به اینکه نمک های ناحیه ایران مرکزی مربوط به میوسن بوده (مربوط به بخش های زیرین سازند قرمز فوقانی هستند) و در محدوده مورد مطالعه نیز نمک ها دارای همین سن هستند و از طرفی با توجه به این که حوضه رسوبی که این نمک ها در آن تشکیل شده اند، همان حوضه ایران مرکزی است (Jackson, 1992)، بنابراین ستبرای لایه نمکی، مشابه به ناحیه ایران مرکزی و به پیشنهاد Jackson (1992)  $200$  متر در نظر گرفته شد.

در حالت دوم، مجدداً فاصله بین دو گنبد به عنوان طول موج فرض شد. سپس از طریق رابطه ۱۶، ستبرای لایه محاسبه شد. در هر دو حالت زمان شکل گیری گنبد نمکی  $(\tau_p)$  با استفاده از رابطه ۱۷ محاسبه شد. با توجه به غیر معقول بودن نتایج به دست آمده چنین نتیجه گیری شد که ارتباط معقول بین ستبرای لایه نمک و طول موج، برای گنبد های نمکی خواجه و تازه کند وجود ندارد. از این رو می توان چنین نتیجه گرفت که این دو گنبد از نظر شکل گیری، ارتباط دیاپیری با یکدیگر نداشته بلکه صرفاً در فضای بین گسل های مرتبط با خود صعود کرده اند. این نتایج، با نتایج به دست آمده در بخش ۲-۲، که با مطالعه بر روی تصاویر ماهواره ای منطقه به دست آمده بود، کاملاً مطابقت داشته و همانطور که ذکر شد، تقاطع شاخه فرعی گسل تبریز در راستای محور آجی چای با شاخه گسل نهند، نقطه ضعف مناسب برای صعود گنبد نمکی را فراهم آورده است.

در حالت سوم، مجدداً ستبرای لایه  $200$  متر در نظر گرفته شد و سپس با استفاده از رابطه ۱۶، مقدار  $\lambda$  محاسبه شد.

$$\lambda = 513.6 \text{ m} \quad \lambda = 2.568b$$

و بعد از آن نیز با قرار دادن مقادیر زیر در رابطه ۱۷، مقدار  $\tau_p$  محاسبه شد.

$$b = 200 \text{ m} \quad \text{Jackson (1992)}$$

$$\mu = 10^{17} - 10^{18} \text{ pas.s} \quad \text{Van Keken et al. (1993)}$$

$$\rho_1 = 2.68 \text{ gr/cm}^3 \quad \text{(معماریان، ۱۳۸۸)}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2; \rho_2 = 2 \text{ gr/cm}^3$$

$$\tau_a = 13.04\mu / (\rho_1 - \rho_2)gb \quad \tau_a = 30969 \text{ years}$$

در نهایت با قرار دادن ستبراهای مختلف در رابطه ۱۸، و به دست آوردن مقدار

$\lambda$ ، تغییرات  $\lambda$  بر حسب  $b$  مشخص شد.

$$\tau_a = \frac{4\mu}{(\rho_1 - \rho_2)gb} \cdot \left( \frac{2\pi b}{\lambda} \right) \quad (18)$$

در این حالت زمان رشد برای گنبد نمکی خواجه حدود  $31000$  سال به دست آمده است که در مقایسه با آثار مهاجرت ماندنهای مشاهده شده در جنوب گنبد (مانند های آجی چای) که در آبرفت های عهد حاضر و در تراس های آبرفتی این رودخانه مشاهده شده است، این زمان معقول به نظر می رسد.

## ۵- بحث

در محدوده مورد مطالعه مربوط به گنبد نمکی خواجه، با توجه به اینکه ژپیس و مارن تفاوت چگالی چندانی با نمک ندارند از این رو ماسه سنگ تنها سنگ روباره خواهد بود و این تفاوت چگالی با توجه به ستبرای کم لایه های ماسه سنگ ناچیز بوده و نمی توان گفت عامل اصلی صعود گنبد نمکی خواجه، نیروی شناوری است بلکه

شده‌اند و از طرفی عملکرد صعود گنبد نمکی موجب شده است، رودخانه گنبد نمکی را دور بزند و حالت مآندر گسترده به وجود آورد. همچنین صعود گنبد نمکی و افزایش ارتفاع تدریجی بخش جنوبی گنبد نمکی باعث شده است رودخانه آجی‌چای با تشکیل اولین مآندر به تدریج مهاجرت کرده و موقعیت مآندره‌های جدید نیز از گنبد نمکی به سمت جنوب جابه‌جا شده و مهاجرت نماید (شکل ۳ و ۴). در صورت امکان نمونه‌گیری از آبرفت‌های مآندره‌های یاد شده و امکان انجام آزمایش‌های سن‌سنجی از هر مآندر مهاجرت کرده امکان تخمین سن رشد دیپایر به وجود خواهد آمد.

در ارتباط با مناسب بودن گنبد نمکی برای ایجاد تأسیسات ذخیره‌سازی گاز چندین پارامتر در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت که از جمله میزان خلوص و نوع ناخالصی موجود در نمک بوده است. نتایج تجزیه‌های کمی XRD نشان داده که درصد خلوص نمک در گنبد نمکی خواجه بسیار بالا بوده و ناخالصی‌هایی از نمک‌های پتاسیم و منیزیم در آن وجود ندارد که این امر سبب شده که این گنبد برای فرایند ذخیره‌سازی گاز مناسب باشد.

پارامتر بعدی که در این رابطه دارای اهمیت است، نزدیکی گنبد نمکی خواجه به ذخایر آب شیرین (دریاچه سد شهید مدنی) برای انجام فرایند انحلال است. مهم‌ترین پارامتر در این رابطه حجم و عمق گنبد نمکی است، که در محدوده گنبد نمکی خواجه، به دلیل انجام نشدن مطالعات ژئوفیزیک اطلاعات دقیقی در این رابطه وجود ندارد. با توجه به مطالب ذکر شده به نظر می‌رسد ذخیره‌سازی گاز در این گنبد نمکی در صورت انجام آزمایشات ژئوفیزیک و برآورد دقیق حجم ذخیره‌سازی با مشکل خاصی روبرو نخواهد بود. ضمناً به موازات این مطالعات لازم است با توجه به لرزه‌خیزی بودن منطقه، مطالعات لرزه‌خیزی مجزایی برای برآورد خطر زلزله برای این مخزن گاز انجام گیرد.

### سیاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه تبریز انجام گرفته است که به این نحو از مسئولان این دانشگاه تشکر و قدردانی می‌شود.

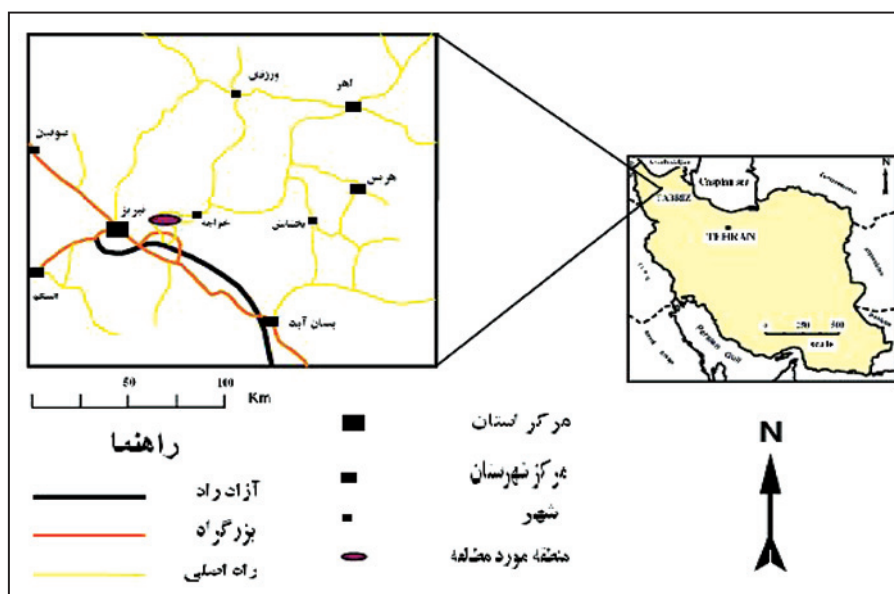
نرمال ایجاد کرده است. در صورتی که تنش‌های ناحیه‌ای حالت همگن در این منطقه می‌داشت، انتظار این بود که گسل‌های نرمال با الگوی شعاعی رشد کنند. اما در این منطقه میدان تنش ناحیه‌ای حالت غیر همگن دارد و از این رو الگوی گسلش مرتبط با دیپایریسم یک جهت‌گیری ترجیحی نشان می‌دهد. به نظر جابه‌جایی این گسل‌ها در مرکز گنبد نمکی بیشترین مقدار است و به سمت حاشیه گنبد کاهش می‌یابد و عمق این گسل‌ها نیز تا حاشیه توده نفوذکننده است. از این رو می‌توان گفت که گسل‌های نرمال اثر کنترل‌کننده زیادی در صعود گنبد نمکی ندارند. اما گسل‌های معکوس حاشیه‌ای گنبد‌های نمکی، در اثر صعود گنبد نمکی ایجاد می‌شوند و تا عمق زیادی (گاه تا منشأ سازند نمک) نفوذ دارند. بنابراین اهمیت زیادی در مدل‌سازی و تهیه برش‌های زمین‌شناسی دارند.

در ارتباط با مکانیسم صعود گنبد نمکی خواجه نیز سه مرحله کلی نتیجه شده است:

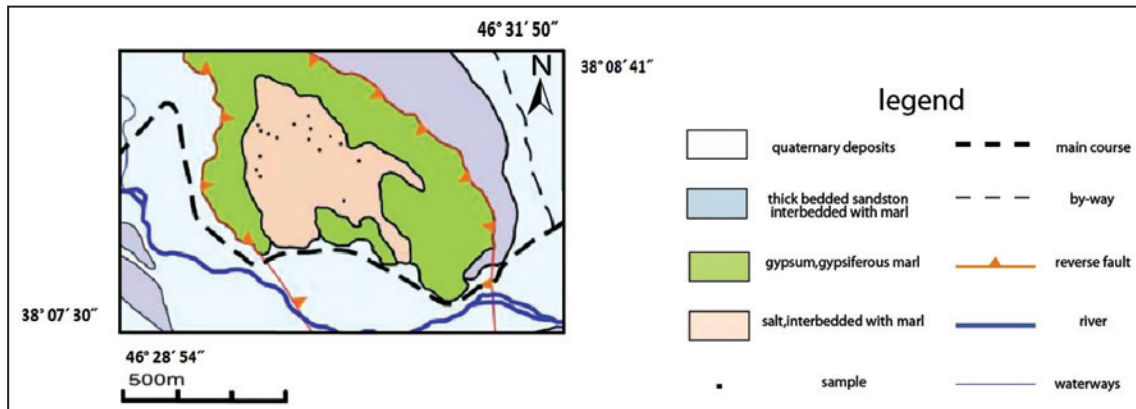
- تشکیل حوضه (تشکیل ساختار پهنه مثلثی) که در اثر رژیم تکتونیکی حاکم بر منطقه، رشته‌هایی از حوضه و گنبد در شمال گسل تبریز و به موازات آن تشکیل شده، که کشیدگی بیشتر این ساختارها در راستای NW-SE نشان از غالب و بزرگتر بودن تنش‌های عمود بر این روند است که با سیستم تنش ناشی از تصادم صفحه عربی با ایران انطباق دارد.

- عملکرد شاخه فرعی گسل تبریز و شاخه گسل نهند و ایجاد فضایی ضعیف در محل تقاطع این گسل‌ها و در نتیجه شروع دیپایریسم.

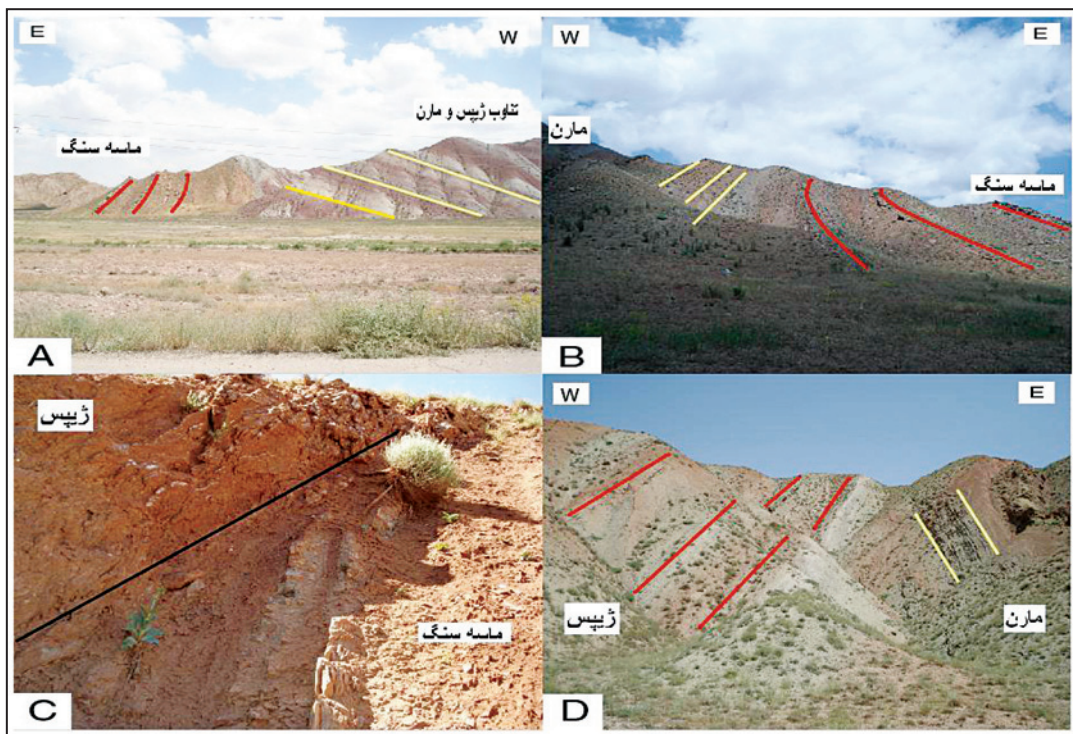
- تداوم تنش‌های فشارشی و تأثیر نیروی شناوری و ادامه صعود دیپایر. همچنین در مورد زمان جایگیری گنبد نمکی، باید گفت این گنبد نمکی بسیار جوان بوده و در حال حاضر نیز در حال صعود است و باید سن آن را کوتاه‌تر در نظر گرفت. برای اعلام زمان شروع دیپایریسم شواهد صحرائی کافی وجود ندارد، ولی با مدل‌سازی صورت گرفته در این تحقیق زمان شروع صعود دیپایر حدود ۳۱۰۰۰ سال قبل برآورد شده است. شواهد نئوتکتونیکی موجود نیز حاکی از تداوم رشد گنبد است. در حاشیه جنوب و جنوب باختری گنبد نمکی خواجه، آبرفت‌های جوان رودخانه آجی‌چای در اثر صعود گنبد نمکی خواجه شیب‌دار



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



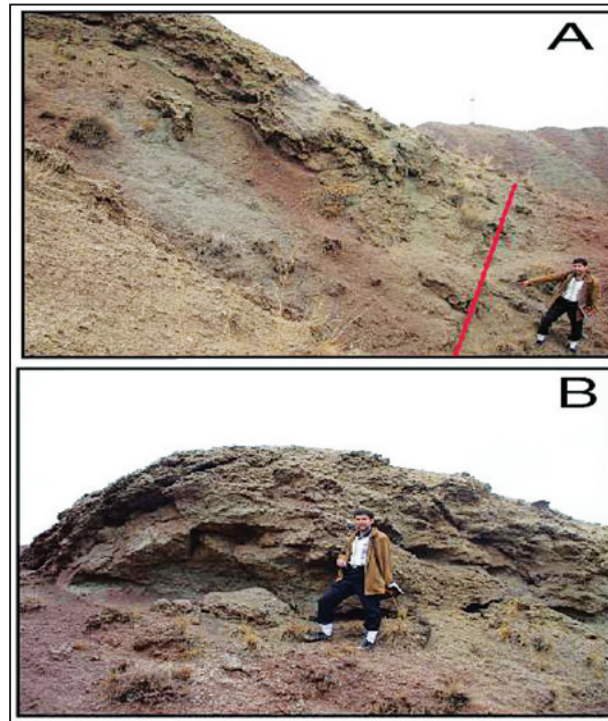
شکل ۲ - نقشه زمین‌شناسی گنبد نمکی خواجه و موقعیت نمونه‌گیری‌های انجام شده از نمک در منطقه



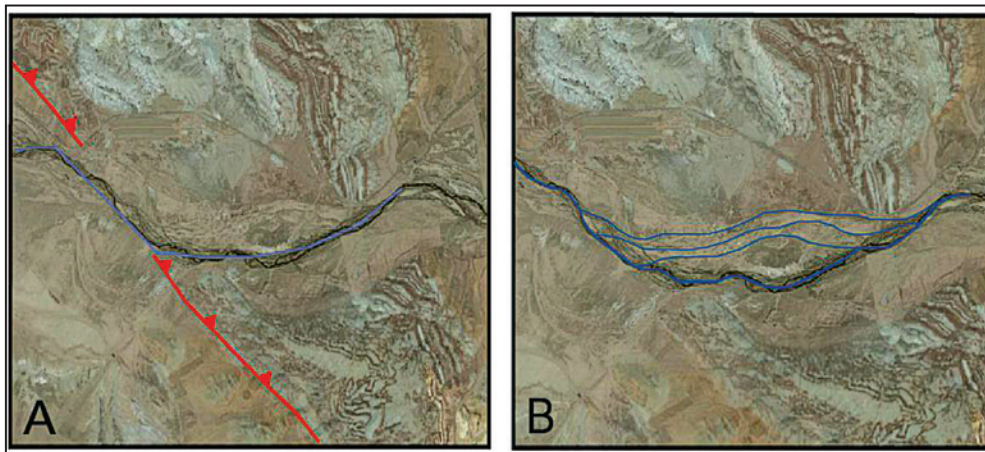
شکل ۳ و ۴ - تغییر در زاویه و سمت شیب لایه‌ها در مرز تماس گنبد با لایه‌های مجاور



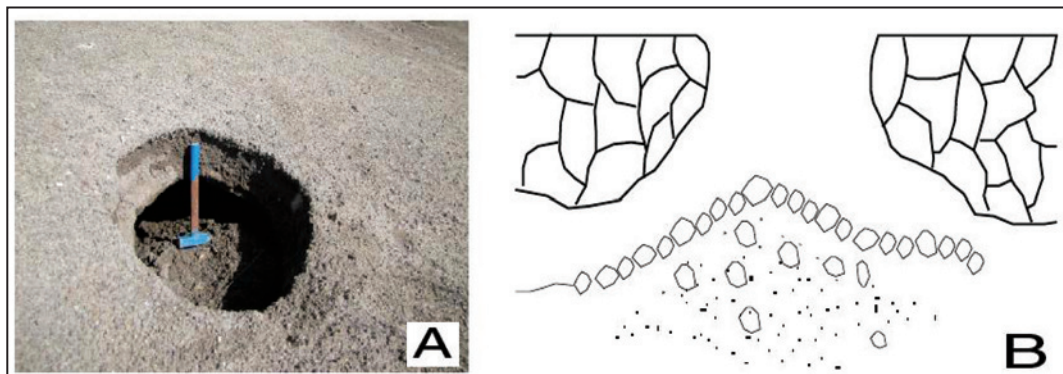
شکل ۵ - چین‌های ایجاد شده در لایه‌های ژیبسی، در اثر جذب آب



شکل ۶- تصویری از یک چین در ارتباط با گسل (A) گسل و یال جنوبی چین؛ (B) لولای چین (دید به سمت خاور).



شکل ۷- تغییر مسیر رودخانه آچی‌جای، در اثر جایگیری گنبد نمکی خواجه. (A) تبعیت رودخانه از راستای گسل معکوس حاشیه‌ای؛ (B) منادریهای قدیمی نشانگر مهاجرت رودخانه به سمت جنوب و فاصله‌گیری آن از گنبد نمکی خواجه، به دلیل صعود گنبد که نشانه فعال بودن این گنبد است.



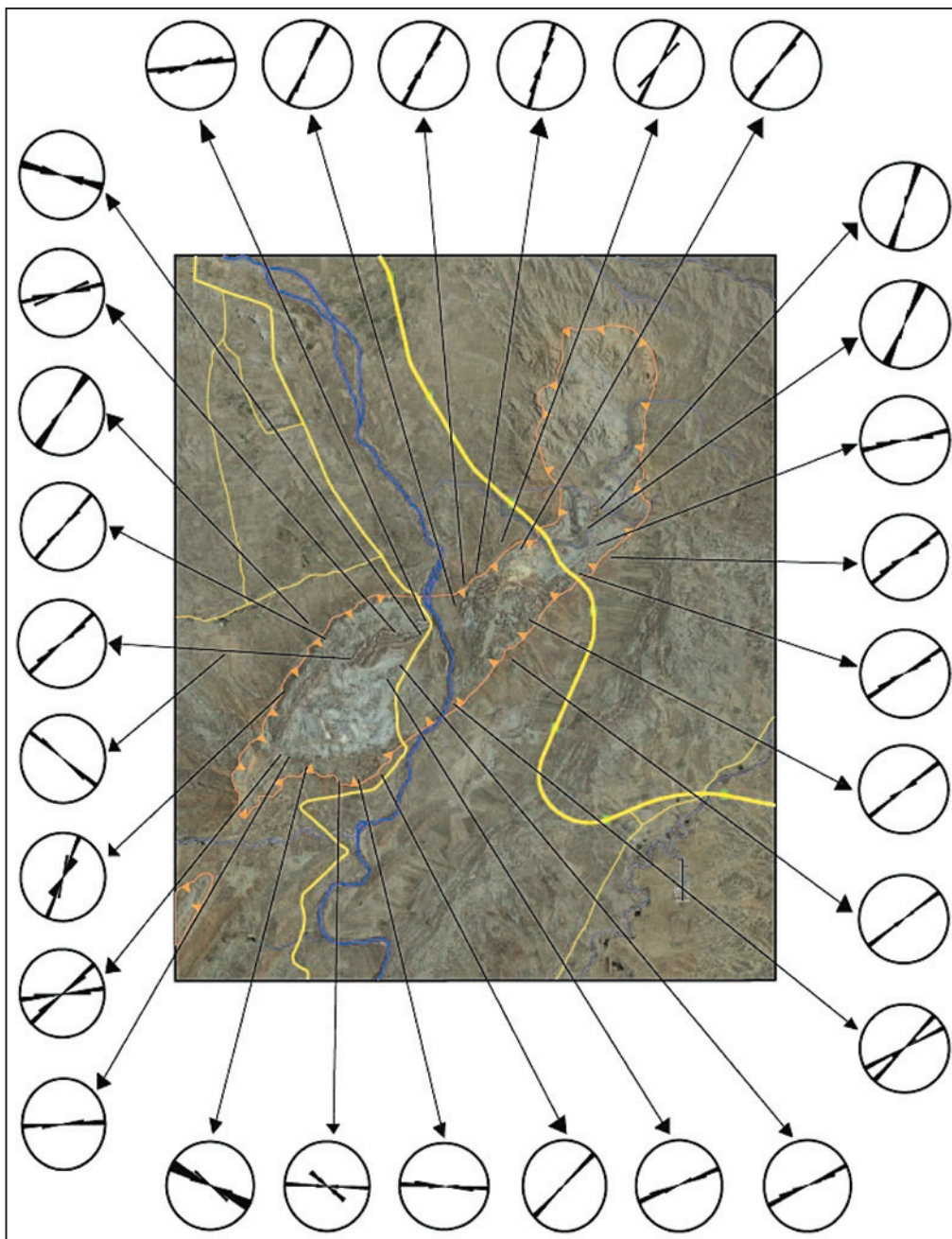
شکل ۸- (A) نمونه‌ای از دولین‌های موجود در محدوده مورد مطالعه؛ (B) تصویر شماتیک از دولین فروریخته (برگرفته از احمدی، ۱۳۶۷)



شکل ۱۰- نمونه‌ای از دره‌های کارستی موجود در محدوده گنبد نمکی خواجه.

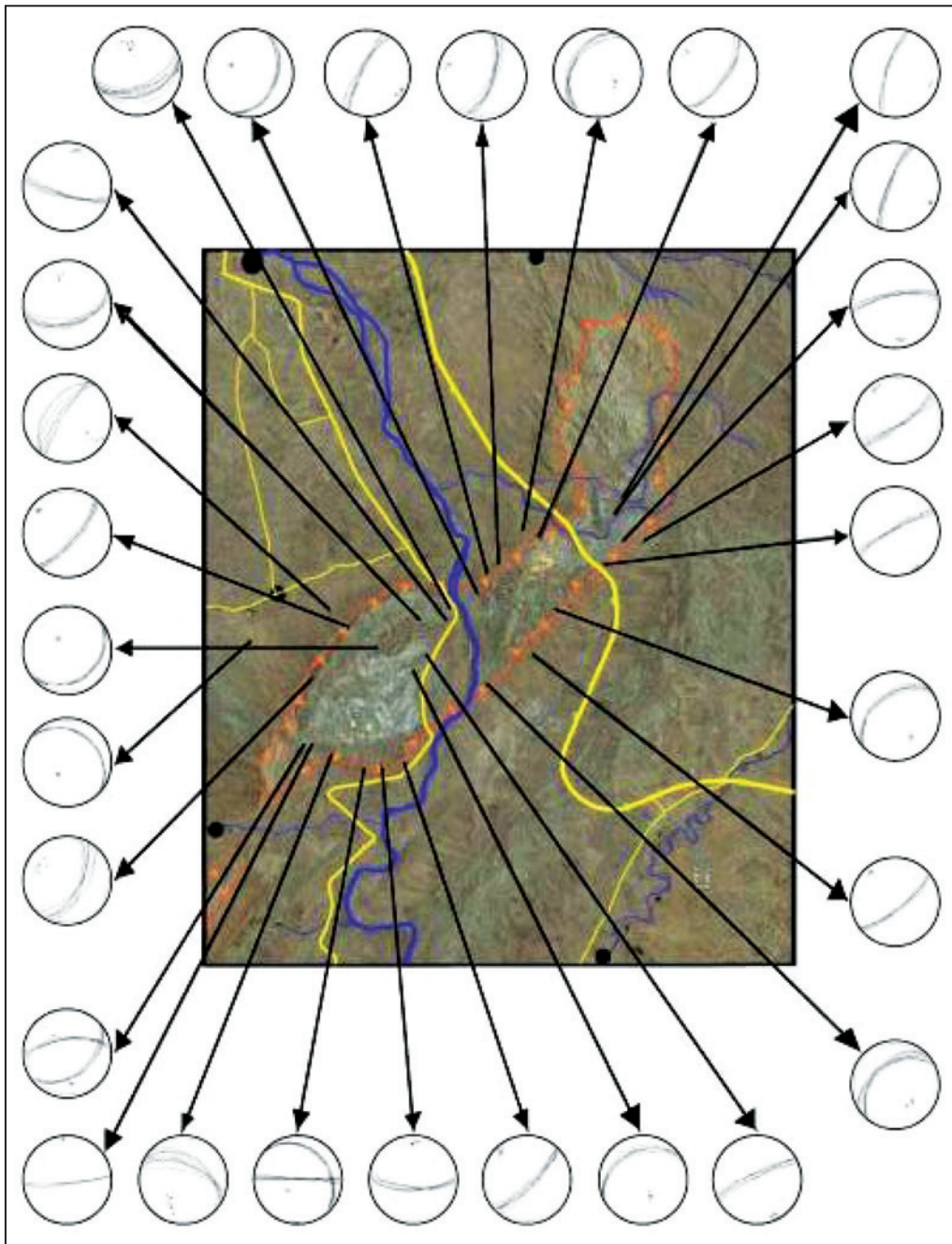


شکل ۹- نمونه‌ای از غارهای موجود در منطقه.

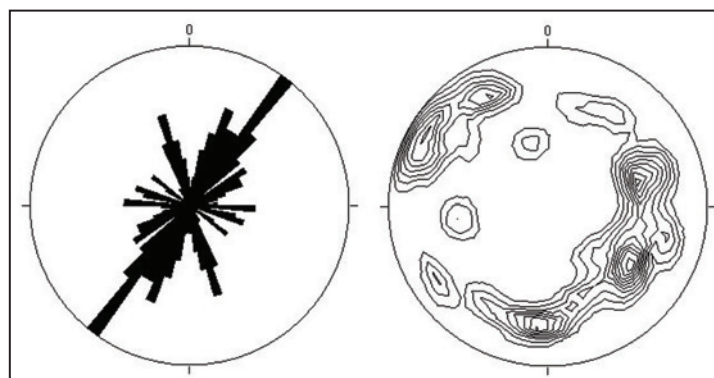


شکل ۱۱- نمودارهای گل سرخی مربوط به لایه‌بندی که نمایانگر تبعیت لایه‌های اطراف گنبد از مرز خارجی آن است.

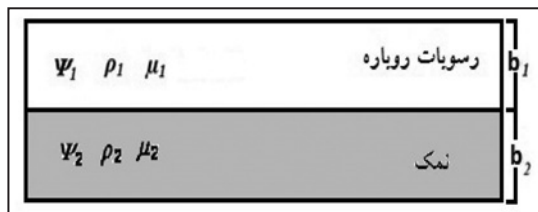




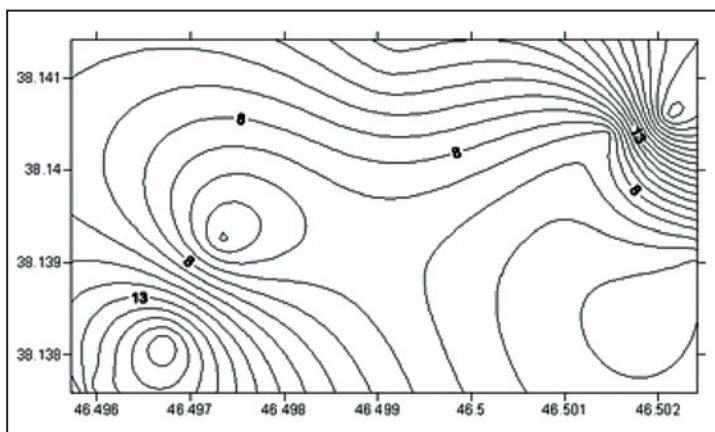
شکل ۱۲- استریوگرام مربوط به وضعیت لایه بندی در اطراف گنبد.



شکل ۱۳- نمودار گل سرخی و نمودار مربوط به تراکم شکستگی‌ها.



شکل ۱۵- مدل ساده دولایه‌ای نمک و سنگ‌های روباره



شکل ۱۴- پهنه‌بندی محدوده گنبد نمکی خواجه از نظر درصد ناخالصی مارن.

جدول ۱- نتایج آنالیزهای کمی XRD

شماره نمونه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	هالیت (NaCl)	ژیپس (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	کوارتز SiO <sub>2</sub>	انیدریت (CaSO <sub>4</sub> )
۱	۳۸/۱۳°	۴۶/۴۹°	٪۹۸/۵	٪۰/۳	-	٪۰/۸
۲	۳۸/۱۳°	۴۶/۴۹°	٪۹۸	٪۰/۳	-	٪۱/۳
۳	۳۸/۱۴°	۴۶/۴۹°	٪۹۵	٪۵	-	-
۴	۳۸/۱۳°	۴۶/۵۰°	٪۹۷	٪۰/۷	٪۱	٪۰/۸
۵	۳۸/۱۳°	۴۶/۵۰°	٪۹۸/۵	-	-	٪۱

### کتابنگاری

احمدی، ع، ۱۳۶۷- بررسی چینه شناسی سازند قرمزدر شمال شرق تبریز، پایان نامه کارشناسی ارشد. معماریان، ح، ۱۳۸۸- زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران.

### References

- Evans, D. J. & Chadwick, R. A., 2009- Underground Gas Storage: Worldwide Experiences and Future Development in the UK and Europe. Geological Society. London, Special Publications, 313.
- Jackson, J. A., 1992- Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey and Caucasus. J. Geophys. Res. 97, 12471-12479.
- Koyi, H. A. & Peterson, K., 1993- The influence of basement faults on the development of salt structures in the Danish Basin: Marine and Petroleum Geology, v. 10, p.82-94.
- Ramsay, J. G. & Huber, M. I., 1987- The Techniques of Modern Structural Geology, V.2 Folds and Fractures, London, Pergamon press.
- Suppe, J., 1984- Principles of Structural Geology, Department of Geological and Geophysical Sciences, Princeton University.
- Twiss, R. J. & Moores, E. M., 2007- Structural Geology, W.H. Freeman and Company, New York, 532p.
- Waltham, D., 1996- Why does salt start to move? Journal of Tectonophysics, 282. P. 117-128.
- Turcotte, D. L. & Schubert, G., 2002- Geodynamics, second edition, D. L. Cambridge University Press, Cambridge, England, 2002, 456 pp.
- Van Keken, P. E., Spirs, C. J., Van den Berg, A. P. & Muzert, E. J., 1993- The effective viscosity of rock salt implementation of steady state creep Laws in numerical models of salt diapirism. Tectonophysics, Vol, 225, No. 4, pp. 457-476.

# Structural Study of Khaje Salt Diaper in the NE of Tabriz, Research Possibility of Gas Storage Potential and Analytical Modeling of Diapirism

B. Zamani G.<sup>1\*</sup>, M. Jalilpour<sup>2</sup>, M. Moayyed<sup>3</sup> & M. Faridi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>M. Sc., Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

<sup>3</sup>Professor, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

<sup>4</sup>Ph.D. Student, Geological Survey of Iran, Tabriz, Iran

Received: 2011 November 02

Accepted: 2013 April 22

## Abstract

The Study area is located in 15km Northeast of Tabriz in East-Azarbaidjan province. The rock units in the study area are limited and consist of different members of the Upper red formation (Miocene). Salt bed (Miocene) that diapired is related to the base of the mentioned formation. Due to the rising of this salt diapir, various structures such as marginal reverse faults, radial normal faults, folds and karsts are developed. In the Northern part of the Tabriz fault, there are a set of basin structures and diapirs, which all have a NW-SE extension axis. The Khaje salt diapir is formed in the southern margin of one of these basins. The different parameters affecting the rising of this salt diapir from which the most important one is the tectonic regime of the study area. The compressional stress causes the formation of these basins. Furthermore, the contact between the Tabriz fault and Nahand (NW-SE) minor fault prepared a weak zone to rise the Khaje salt diapir. After the beginning of rising, other parameters such as buoyancy force, stability of compressional stresses and differential loading have caused the continuing and rising of the Khaje salt diapir. The Khaje salt diapir is young and still rising. In addition, analytical model analysis is evaluated diapirism initiation time about 31000 years. In terms of purity amount, NaCl percentage is very high; where there are no KCl and MgCl<sub>2</sub> impurities; therefore, it is suitable for dissolution process. The marly interbeds of salt would make some difficulties in dissolution process. From the gas storage point of view, the depth of salt diapir and the evaluation of the reservoir volume are essential for underground researches and in order to get the accurate results 2D and 3D seismic studies are needed.

**Keywords:** Khaje Salt Dome, Emplacement Mechanisms, Structural Analysis, Fault, Fold, Fracture System

For Persian Version see pages 217 to 226

\*Corresponding author: B. Zamani G.; E-mail: [b.zamani@tabrizu.ac.ir](mailto:b.zamani@tabrizu.ac.ir)