

## مقایسه نتایج برگردان دو بُعدی داده‌های مقاومت‌سنجی با شرایط زمین‌شناسی در مسیر حفاری قطعه ۳ و ۴ تونل قمروود

وحید جودکی\*<sup>۱</sup>، رسول اجل‌لوئیان<sup>۲</sup>، نرگس یزدخواستی<sup>۳</sup>

دریافت مقاله: ۹۷/۰۷/۰۸ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۰۳

### چکیده

محدوده مطالعاتی این تحقیق در پهنه زمین‌شناسی سنندج سیرجان قرار دارد. در این ناحیه، جنبش‌های متعدد تکتونیکی موجب ایجاد انبوهی از گسل خوردگی‌ها، زون‌های خرد شده و شکستگی‌های متعدد در توده‌سنگ‌ها شده است. در کاوش‌های ساختمانی قطعه ۳ و ۴ تونل قمروود، انجام مطالعات زیرسطحی با محدودیت مواجه بوده است و اطلاعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی، منجر به شناسایی شرایط زیرسطحی در مناطق بحرانی نشده است. شرایط نامساعد زمین‌شناسی، باعث چندین مورد توقف TBM و صرف زمان طولانی (مجموعاً ۶۰۰ روز توقف کامل) در روند حفاری شده است. عمده مشکلات به دلیل برخورد دستگاه حفار با زون‌های گسلی بوده است. در این پژوهش با برگردان دو بُعدی داده‌های مقاومت‌سنجی، قابلیت استفاده از مطالعات ژئوفیزیکی جهت شناسایی شرایط زیرسطحی در مسیر حفاری، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل‌های دو بُعدی که نحوه توزیع لایه‌ها بر اساس مقاومت ویژه آنها را ارائه کرده است حاکی از وجود چند زون با مقاومت ویژه پایین در مسیر تونل است که منطبق با محل زون‌های خرد شده گسلی و نیز تغییرات سنگ‌شناسی در مسیر حفاری می‌باشد. نتایج حاصل بیانگر این حقیقت است که پردازش دو بُعدی داده‌های مقاومت‌سنجی، امکان دستیابی به اطلاعاتی قابل توجه از شرایط زیرسطحی را فراهم آورده است که می‌توانست در مرحله مطالعات ساختمانی (جانمایی مناسبتر گمانه‌های اکتشافی و ...) و نیز در مرحله اجرای تونل مورد استفاده قرار گیرد.

**کلید واژه‌ها:** تونل قمروود، TBM، برگردان دو بُعدی داده‌های مقاومت‌سنجی، زون‌های گسلی.

۱. کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های زیرزمینی، شرکت مهندسی مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران، Joudaki\_vahid@yahoo.com

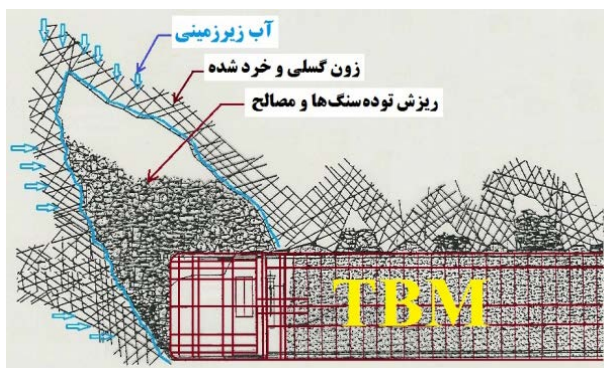
۲. استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۳. کارشناسی ارشد، گروه مطالعات پایه و زمین‌شناسی، شرکت مهندسی مشاور زاینده آب، اصفهان، ایران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

شده است. قطعه ۳ و ۴ با طول تقریبی ۱۷۷۰۰ متر، توسط یک دستگاه تلسکوپی ساخت شرکت ویرت آلمان (طراحی شده بر اساس اطلاعات ژئوتکنیکی و مطالعات مقدماتی پروژه قمرود) اجرا گردیده است. در این تحقیق داده‌های مقاومت‌سنجی در مسیر تونل قمرود با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV تحلیل گردیده و مقاطع به دست آمده ضمن مقایسه با شرایط زمین‌شناسی در مسیر حفاری، مورد تفسیر قرار گرفته‌اند.



شکل ۱. طرحی شماتیک از ریزش توده‌سنگها و توقف TBM در یک زون گسلی (بر گرفته از: Barla and Pelizza, 2000).

## ۲. زمین‌شناسی منطقه

ساختمان مورد مطالعه بر اساس تقسیم‌بندی کلی زمین‌شناسی ایران با توجه به شکل ۲، در زون زمین‌شناسی سنندج-سیرجان (آقائباتی، ۱۳۸۳)، قرار گرفته است. ساختارهای اصلی زمین‌شناسی این منطقه دارای روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی است. به دلیل دگرشکلی شدید که بر این پهنه حاکم بوده است، مشخصاً ساختار چین‌خورده چندان مشهودی در منطقه وجود ندارد، چراکه چین‌خوردگی‌ها در طی جنبش‌های تکتونیکی متعدد، ساختار اولیه خود را از دست داده‌اند. لذا به جز چند نمونه چین‌خوردگی میان مقیاس که بیشتر در رده چین‌های مرتبط با گسلش قرار می‌گیرند، ساختار چین‌خورده کاملی در منطقه دیده نمی‌شود. در این پهنه وقوع جنبش‌های تکتونیکی متعدد باعث ایجاد انبوهی از گسل‌ها و زون‌های خرد شده و شکستگی‌های متعدد در

در بین روش‌های ژئوفیزیکی، روش‌های ژئوالکتریک و به ویژه مقاومت‌سنجی دارای سابقه طولانی در شناسایی شرایط زمین‌شناسی هستند. با توجه به اینکه لایه‌های زمین به واسطه اختلاف جنس مواد تشکیل دهنده، شدت خردشدگی و نوع سیالات منفذی دارای مقاومت‌های ویژه الکتریکی متفاوتی هستند، با استفاده از روش‌های مقاومت‌سنجی می‌توان لایه‌های زمین را از نظر واحدهای مقاومت ویژه الکتریکی‌شان از یکدیگر تفکیک نمود. با توجه به اینکه مقاومت ویژه الکتریکی اغلب کانی‌ها زیاد می‌باشد در صورتی که سنگ کاملاً متراکم باشد، مقاومت ویژه الکتریکی زیادی خواهد داشت اما به لحاظ وجود خلل و فرج در سنگ‌ها و سیالات منفذی، میزان مقاومت ویژه الکتریکی آنها متغیر خواهد بود (Sirles, 2006; Kearey et al., 2002).

علاوه بر این وجود زون‌های گسلی و خرد شده، سبب افزایش میزان کانی‌های با رسانایی بالا، نفوذ سیالات منفذی و در نتیجه کاهش مقاومت ویژه می‌گردد. از این‌رو استفاده از روش مقاومت‌سنجی برای شناسایی شکستگی‌ها و زون‌های خرد شده در ساختگاه‌های زمین‌شناسی، به طور گسترده‌ای توسط محققین مختلف (Ganerot et al., 2006; Danielsen and Dahlin, 2009; Badpa et al., 2015) گزارش شده است.

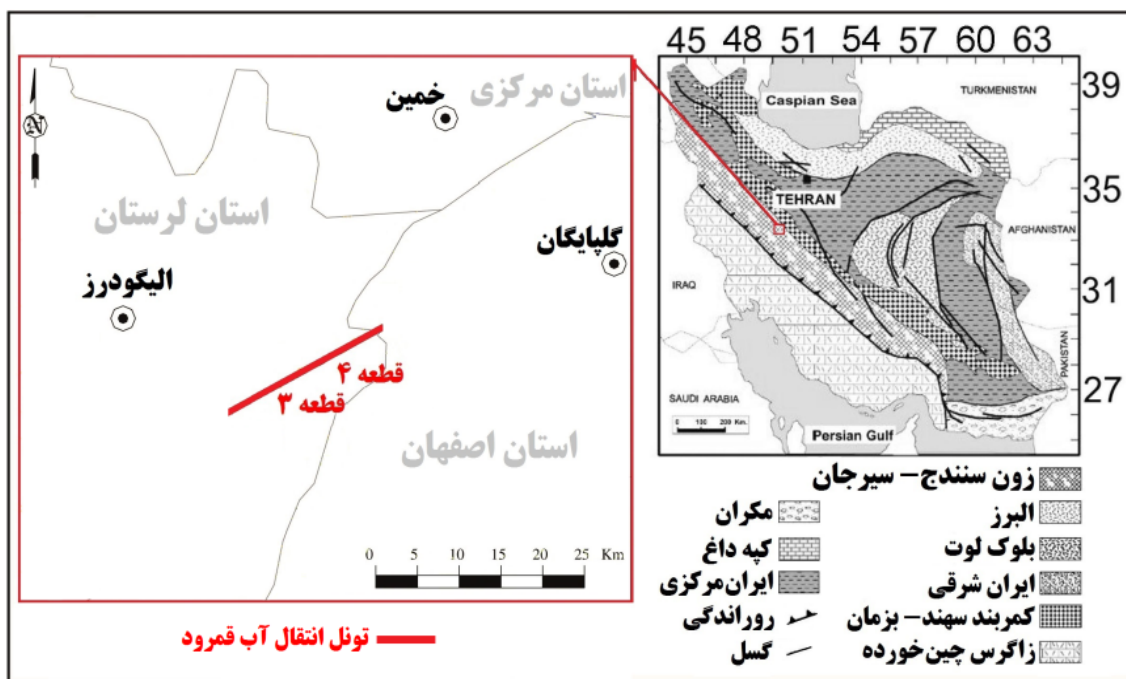
زون‌های خرد شده و گسلی به ویژه در حفاری‌های مکانیزه می‌توانند بسیار مخاطره‌آمیز بوده و منجر به توقف طولانی مدت عملیات حفاری شوند (شکل ۱). در قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود نیز دستگاه TBM به دلیل وقوع ریزش‌های وسیع و یا خزش توده‌سنگ‌ها (پدیده لهیدگی) در زون‌های گسلی، دفعات متعدد و طولانی‌مدتی (مجموعاً حدود ۶۰۰ روز) متوقف شده است. شرح کامل مخاطرات و توقفات دستگاه پروژه قمرود در پژوهشی از جودکی و اجل‌لوئیان (۱۳۹۴) ارائه شده است.

محدوده مربوط به این تحقیق بخشی از تونل بلند ۳۶ کیلومتری قمرود است که توسط دو دستگاه TBM حفاری

قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود به طول تقریبی ۱۷۷۰۰ متر است که در ۶ کیلومتر ابتدایی آن، به دلیل روباره زیاد تونل (تا حدود ۶۰۰ متر) حفاری گمانه‌های اکتشافی نیز با محدودیت مواجه بوده است. گمانه‌های اکتشافی حفر شده نیز در بیشتر مواقع به ترازای که تونل در آن واقع شده نرسیده‌اند. به عبارت دیگر دستگاه‌های مغزه‌گیری که در عملیات اکتشافی در این پروژه استفاده شده‌اند توانایی حفر گمانه‌های عمیق را ندارند. گمانه‌ها تا عمق حدود ۳۵۰ متر حفر شده‌اند.

سنگ‌ها شده است، از این‌رو مشخصه اصلی این پهنه وجود گسل خوردگی‌های فراوان می‌باشد (Alavi, 1994; Stocklin, 1977)

در قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود، تشکیلات سنگ‌شناسی منطقه به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. سازند کرتاسه شامل آهک‌های توده‌ای و دولومیت است. سازند ژوراسیک نیز شامل اسلیت، شیست، گرافیت‌شیست است که البته در میان این تشکیلات متورق، رگه‌های کوارتزیت و ماسه‌سنگ‌های دگرگون‌شده نیز بطور محدود (بصورت رگه‌ای و میان‌لایه) در برخی مقاطع وجود دارند (SCE, 2005).



شکل ۲. موقعیت زمین‌شناسی (برگرفته از Stocklin, 1977) و جغرافیایی قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود.

انجام گرفته است. در برداشت داده‌ها از آرایش الکترونی شلومبرژه مقارن استفاده شده است.

در مسیر قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود برداشت مقاومت‌سنجی در مجموع حدود ۲۰۰ نقطه بر روی سه خط برداشت A، B و C انجام گرفته است. خط A منطبق بر مسیر تونل و خطوط B و C به ترتیب به موازات و در سمت غربی و شرقی آن قرار

۳. برداشت داده‌های مقاومت‌سنجی در مسیر تونل قمرود در این پروژه محدودیت مطالعات زیرسطحی تنها مختص عملیات حفاری گمانه‌های اکتشافی نبوده است.

مطالعه ژئوفیزیکی نیز به دلیل روباره زیاد تونل در ۶ کیلومتر ابتدایی تونل صورت نگرفته است. در مطالعه حاضر مقاومت‌سنجی به روش سونداژ قائم و در طول پروفیل تونل

که در آن:  $J$ : ماتریس مشتقات جزئی،  $u$ : عامل میرایی،  $d$ : بردار انحراف مدل،  $g$ : بردار تفاضل،  $T$ : نشاندهنده پارامترهای محاسبه‌ای،  $f_x$ : فیلتر هموارسازی افقی،  $f_z$ : فیلتر هموارسازی عمودی، می‌باشد.

این برنامه ابزار جدیدی از روش حداقل مربعات بر اساس تکنیک بهینه‌سازی غیر خطی را به همراه دارد. در این برنامه ابتدا لایه‌های زمین به بلوک‌های مستطیلی شکل با مقاومت ویژه ثابت (برای هر بلوک) تقسیم می‌شود. ضخامت بلوک‌های نزدیک به سطح کمتر از بلوک‌های عمیق در نظر گرفته می‌شود، زیرا با افزایش عمق، تاثیر بلوک‌ها بر روی داده‌ها کمتر می‌شود. روند تغییرات ضخامت بلوک‌ها از سطح به عمق توسط فاکتور مربوط که در برنامه پیش‌بینی شده، انتخاب می‌گردد که هدف از این کار محاسبه مقاومت ویژه بلوک‌های مستطیلی و تطابق آن با مقادیر اندازه‌گیری شده است (Loke, 2000).

این نرم افزار با به حداقل رساندن میزان خطای جذر میانگین مربعات (Root Means Squared error) مابین مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده برای بلوک‌ها، به یک مدل دو بُعدی از زمین می‌رسد که طبیعتاً هرچه میزان خطای باقی مانده RMS کمتر باشد مقطع مقاومت ویژه مدل وارون، به واقعیت زمین‌شناسی نزدیکتر خواهد بود. برنامه مذکور طوری طراحی شده است که بتواند مجموعه داده‌های عظیم (حدود ۲۰۰ تا ۲۱۰۰۰ داده نقطه‌ای) جمع‌آوری شده توسط سیستم متشکل از تعداد زیاد الکترودها (حدود ۲۵ تا ۱۶۰۰۰ الکترودها) را معکوس سازد. مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و سایر داده‌های مورد نیاز (فواصل الکترودها، ارتفاع محل قرارگیری الکترودها) در فایل با پسوند داده‌ای (\*.dat) قالب بندی می‌شوند. پس از انجام تغییرات مناسب در مدل، گزینه معکوس‌سازی با روش حداقل مربعات انتخاب و اجرا می‌شود. در خروجی مدل، سه مقطع شامل: شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده، شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری محاسباتی و نهایتاً مقطع

دارند. فاصله هر یک خطوط برداشت از یکدیگر ۲۰۰ متر است. برای مطالعات مقاومت‌سنجی، از یک دستگاه فرستنده با مشخصات: "توان خروجی ۲۰۰۰ وات، حداکثر اختلاف پتانسیل خروجی ۱۰۰۰ ولت و حداکثر شدت جریان ۲ آمپر"، استفاده شده است. در طی برداشت داده‌ها با حفظ فاصله الکترودهای پتانسیل، فاصله الکترودهای جریان تا آنجا که مقادیر اختلاف پتانسیل الکتریکی دقت لازمه را داشته باشند افزایش داده شده است. هرگاه مقادیر اختلاف پتانسیل از حد دقت اندازه‌گیری دستگاه کوچکتر بودند، فاصله الکترودهای پتانسیل نیز افزایش داده شده است. در این پژوهش در هر خط برداشت، فواصل الکترودهای جریان از ۱۰۰ تا ۶۰۰ متر متغیر بوده است.

لازم به ذکر است که در پروژه قمرود مطالعات مقاومت‌سنجی دیگری نیز در راستای محور گزینۀ قبلی تونل (به موازات محور نهایی تونل) انجام گرفته است. در حقیقت پس از مطالعات اولیه طرح، محور انتخابی برای حفاری تونل تغییر کرده است. لذا در این پژوهش یکی از این خط‌های برداشت (که نزدیکترین فاصله را نسبت به محور نهایی دارد) برای پردازش انتخاب شد.

#### ۴. معرفی نرم‌افزار RES2DINV

در مطالعه حاضر به منظور برگردان دو بُعدی داده‌ها از برنامه کامپیوتری RES2DINV استفاده شده است. این برنامه برای انواع آرایش‌های الکترودهی از جمله ونر، پل-پل، داپیل-داپیل، شلومبرژه و غیره کاربرد دارد و قادر است یک مدل دو بُعدی تصویری الکتریکی از داده‌های مقاومتی زمین تهیه کند (Griffiths and Barker, 1993).

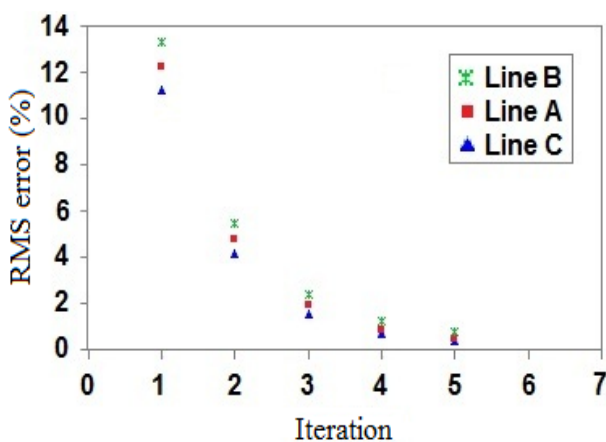
این برنامه برای مدل‌سازی مقاطع مقاومت ویژه از روش حداقل مربعات (deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Sasaki, 1992; Loke and Barker, 1996) استفاده می‌نماید که این روش بر اساس معادله زیر می‌باشد:

$$(J^T J + uF) d = J^T g \quad (1)$$

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$$

است. چنان که دیده می‌شود، میزان خطای باقی‌مانده نهایی ۰/۴۵٪ و تعداد چرخه تکرار ۵ می‌باشد.

شکل ۵ و ۶، نیز به ترتیب مقطع مقاومت ویژه مدل وارون در خطوط برداشت B و C را با در نظر گرفتن توپوگرافی مسیر برداشت نشان می‌دهند. مقادیر خطای باقی‌مانده نهایی برای این خطوط به ترتیب ۰/۶۷٪ و ۰/۳۷٪ و تعداد چرخه تکرار نیز در هر دو مقطع ۵ می‌باشد.



شکل ۳. نحوه کاهش خطای باقی‌مانده در هر چرخه تکرار

برگردان داده‌های مقاومت‌سنجی خطوط برداشت A، B و C.

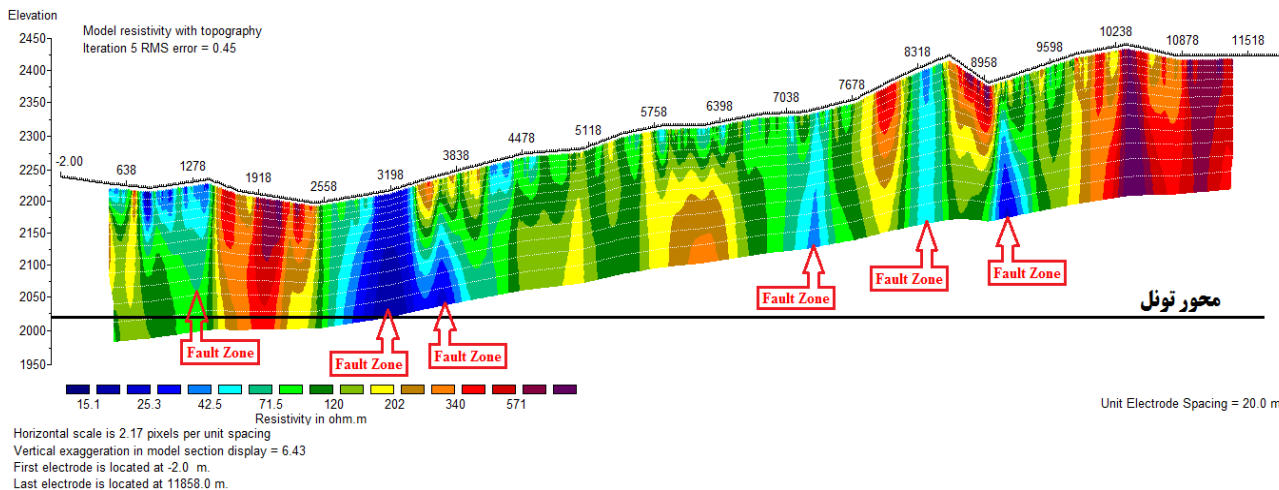
مقاومت ویژه مدل وارون (بر اساس آخرین نتیجه برگردان داده‌ها)، به صورت فایل تصویری ذخیره می‌شود.

#### ۵. برگردان داده‌های مقاومت‌سنجی در مسیر محور حفاری

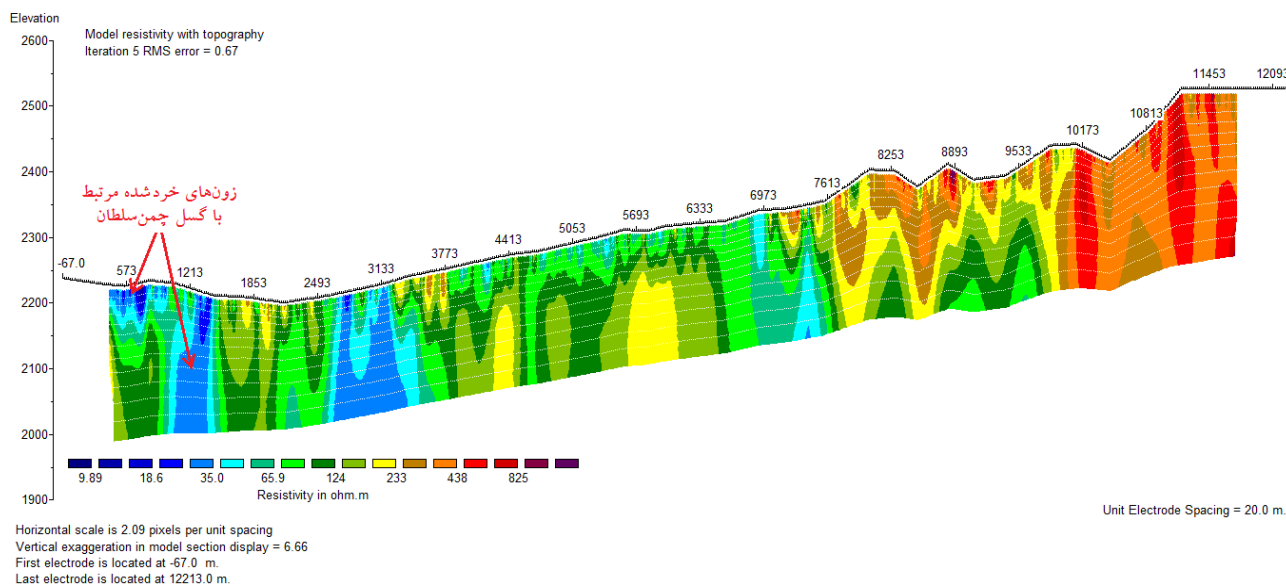
برگردان داده‌های حاصل از برداشت‌های مقاومت‌سنجی بر روی سه خط برداشت A، B و C در مسیر تونل قمرود با نرم‌افزار RES2DINV مورد تحلیل قرار گرفت. معیارهای مورد استفاده برای برگردان داده‌ها در نرم‌افزار RES2DINV، خطای باقی‌مانده RMS به میزان ۱٪ و یا تعداد حداقل ۸ چرخه تکرار است.

شکل ۳، نحوه کاهش خطای باقی‌مانده RMS در هر چرخه تکرار را برای خطوط برداشت داده‌های مقاومت‌سنجی در مسیر تونل قمرود نشان داده است. چنان که مشاهده می‌شود میزان خطای اولیه در خط C کمترین و در خط B بیشترین مقدار می‌باشد. با این حال در هر چرخه تکرار از مقادیر خطا کاسته شده و تقریباً پس از ۴ چرخه مقدار خطای موجود به مقدار ثابتی میل نموده است.

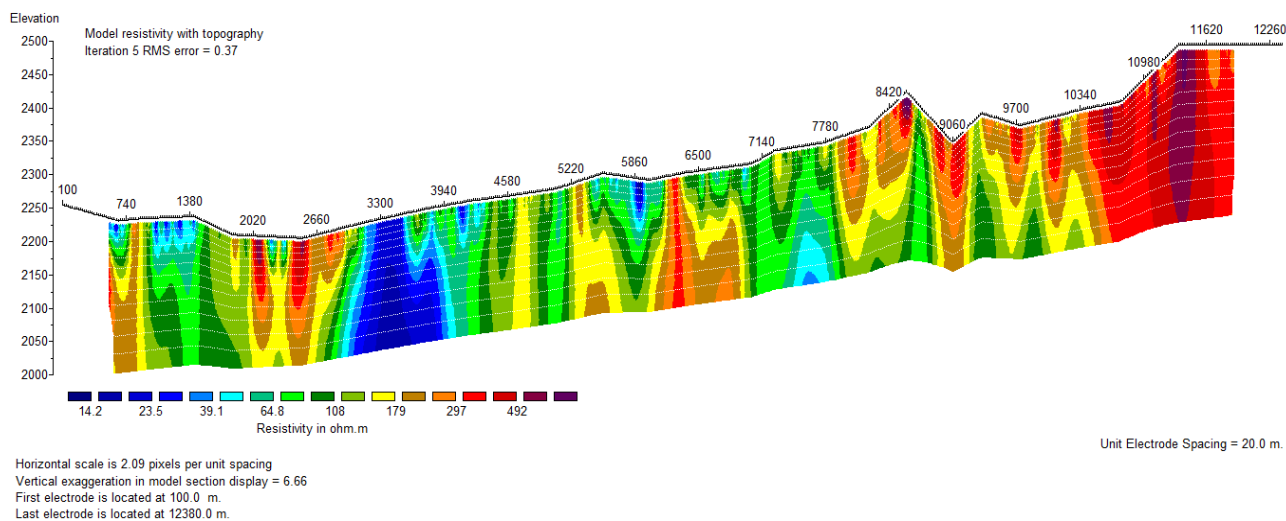
شکل ۴، مقطع مقاومت ویژه مدل وارون خط برداشت A مطابق بر مسیر تونل با در نظر گرفتن توپوگرافی را نشان داده



شکل ۴. مقطع مقاومت ویژه مدل وارون در خط برداشت A با در نظر گرفتن توپوگرافی، منطبق بر مسیر تونل.



شکل ۵. مقطع مقاومت ویژه مدل وارون در خط برداشت B با در نظر گرفتن توپوگرافی.



شکل ۶. مقطع مقاومت ویژه مدل وارون در خط برداشت C با در نظر گرفتن توپوگرافی.

اسلیتی و شیستی، دامنه تغییرات زیادی دارد. این تشکیلات در زون‌های متراکم، گاه مقاومتی در حدود ۶۰۰ تا ۹۰۰ اهم متر نیز نشان می‌دهند. مقاومت این تشکیلات در شرایط هوازده ۱۰۰ تا ۲۰۰ اهم متر و در زون‌های خرد شده و گسلیده حدود ۱۰ تا ۴۰ اهم متر می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل‌های نرم‌افزار RES2DINV که نحوه توزیع لایه‌ها بر اساس مقاومت ویژه مدل وارون آنها را نشان می‌دهد، با تغییرات و تناوب

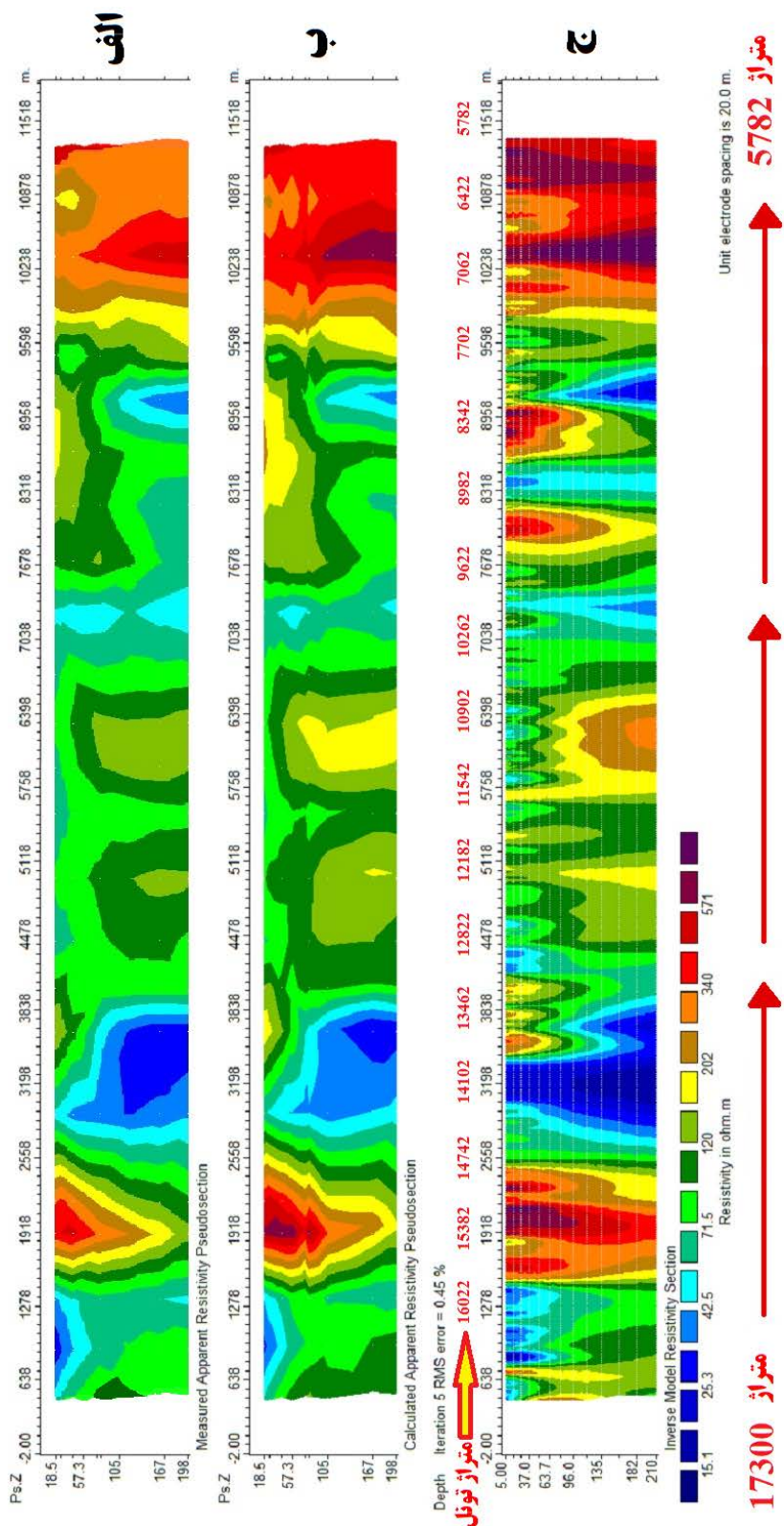
#### ۵-۱. تفسیر مقاطع A و B و C

مقاطع دو بُعدی حاصل از برگردان داده‌های مقاومت‌سنجی بر اساس تغییرات مقاومت ویژه تشکیلات مختلف زمین‌شناسی بر روی این مقاطع تفسیر می‌شوند. غالب لیتولوژی مسیر تونل اسلیت، شیست و گرافیت شیست (و البته بطور محدود در برخی مقاطع میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ نیز در این تشکیلات وجود دارد) بوده است. مقاومت ویژه الکتریکی تشکیلات



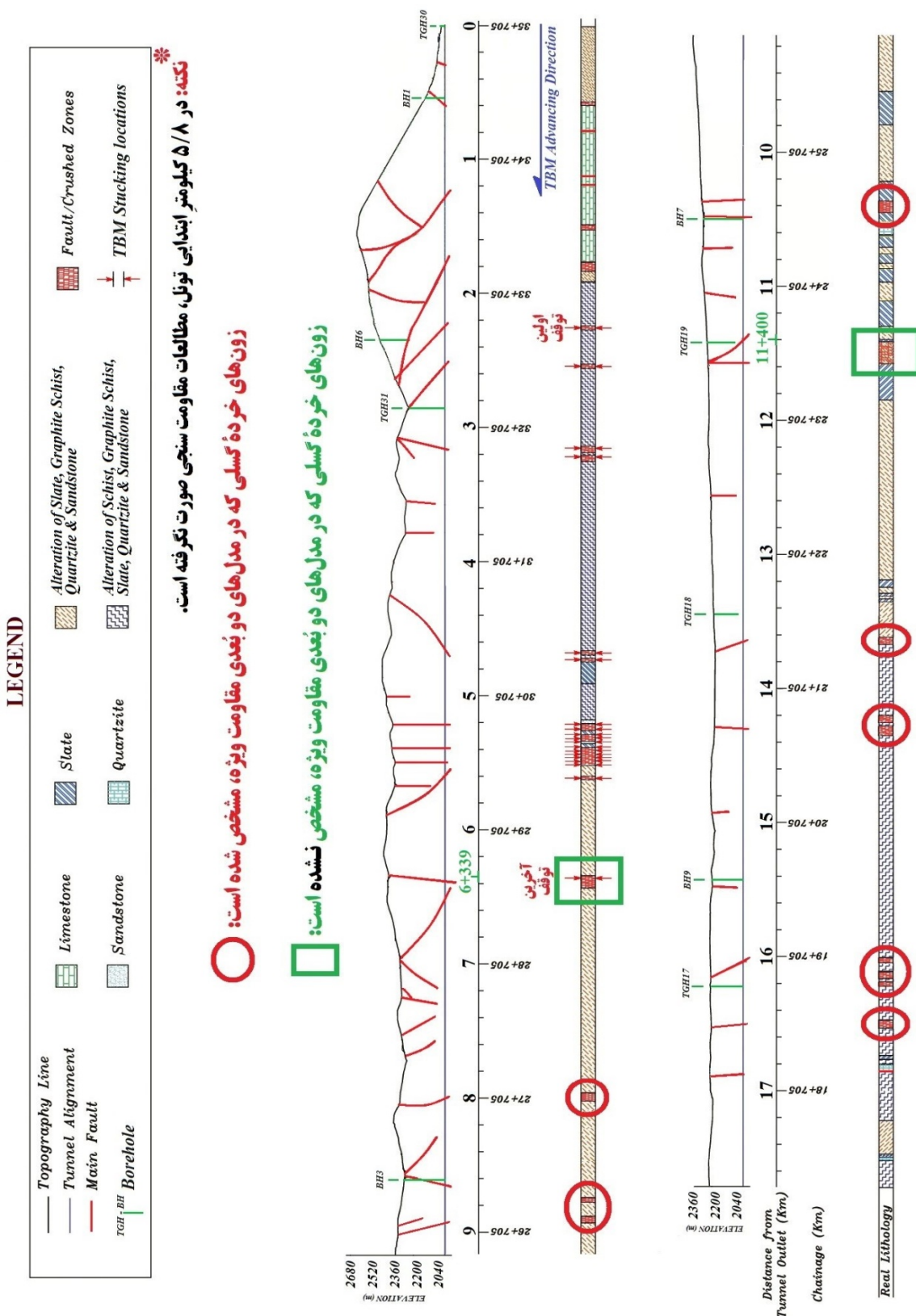
شکل ۸، موقعیت زون‌های گسلی و خرد شده در مسیر حفاری و انطباق آنها با زون‌های کم مقاومت در مقطع مقاومت ویژه خط برداشت A (شکل ۷)، را نشان می‌دهد. در شکل ۷، نواحی با مقاومت ویژه بالا (در کیلومترهای ۶، ۷ و ۱۵) نشانگر وجود زون‌های متراکم و نیز حضور میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی در میان تشکیلات شیست و اسلیتی است. اما مهمترین عوارض مورد مشاهده در مقطع مقاومت ویژه (شکل ۷)، وجود چند زون با مقاومت ویژه نسبتاً پایین می‌باشد. در صورتی که زون‌های گسلی و خرد شده در مقطع زمین‌شناسی واقعی تونل را با مقطع مقاومت ویژه خط برداشت A تطابق دهیم، مشخص می‌شود که موقعیت زون‌های گسلی (در شکل ۸) با "زون‌های کم مقاومت در کیلومتر ۸ تا ۹، زون کم مقاومت کیلومتر ۱۰ تا ۱۱، زون کم مقاومت کیلومتر ۱۳ تا ۱۴، زون کم مقاومت کیلومتر ۱۴ تا ۱۵ و زون‌های کم مقاومت کیلومتر ۱۶ تا ۱۷ (در شکل ۷-ج)"، تطابق نسبتاً قابل قبولی دارند.

تشکیلات اسلیت، شیست و گرافیت‌شیست در مسیر تونل هماهنگی دارد. در مقاطع دو بُعدی به دست آمده، اگرچه برخی تغییرات و تفاوت‌هایی در نتایج سه خط برداشت دیده می‌شود (شکل ۴ الی ۶)، اما با توجه به فاصله بین هر یک از خطوط برداشت (۲۰۰ متر) سازگاری نسبی بین نتایج حاصله وجود دارد و تفاوت‌های موجود نیز با توجه به شرایط پیچیده زمین‌شناسی منطقه قابل پیش‌بینی بوده است. البته به دلیل اینکه خط A منطبق بر محور تونل قرار گرفته است، لذا مقطع دو بُعدی مقاومت ویژه در این خط برداشت، علی‌القاعده می‌بایست تطابق بیشتری با شرایط واقعی حین حفاری نشان دهد. برای سهولت در تدقیق تحلیل‌ها با مقطع زمین‌شناسی واقعی تونل (که بر اساس ازبیلتهای حفاری تهیه شده)، مقطع مقاومت ویژه در خط برداشت A بدون در نظر گرفتن توپوگرافی و با درج مترژهای تونل در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷. الف- شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده، ب- شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری محاسباتی، ج- مقطع مقاومت ویژه مدل وارون در خط برداشت A بدون در نظر گرفتن توپوگرافی.



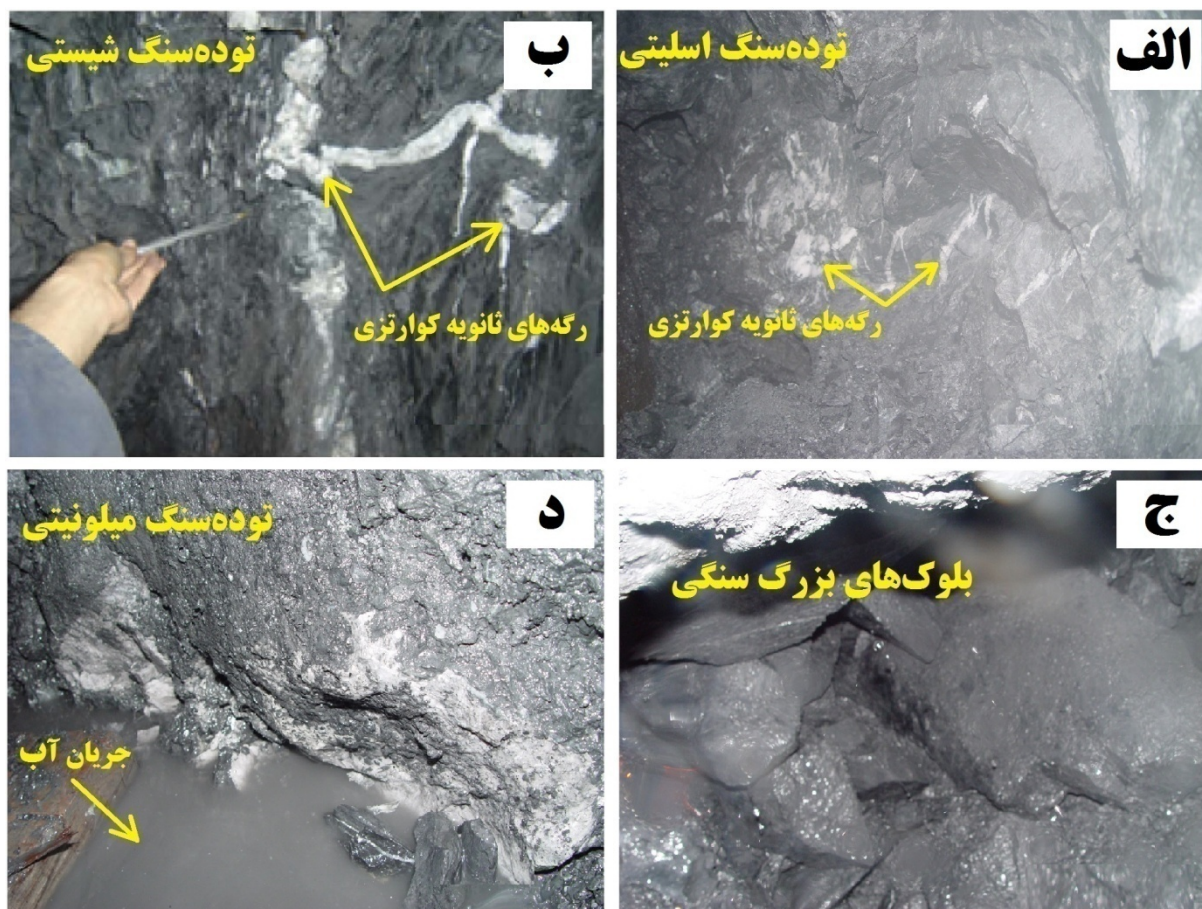


شکل ۸. موقعیت زون‌های گسلی و خرد شده در مقطع زمین‌شناسی تونل (بر اساس ازبیلتهای حفاری) و انطباق آنها با زون‌های کم مقاومت در مقطع مقاومت ویژه مدل وارون.

در مدل‌های دو بُعدی سه خط برداشت (شکل ۴ الی ۷) دامنه اُفت مقادیر مقاومت ویژه در محدوده زون‌های گسلی متغییر است چرا که شدت خردشدگی توده‌سنگ‌ها در این نواحی متفاوت است و عوامل زمین‌شناسی دیگری نیز نظیر حضور آب زیرزمینی، هوازدگی سنگ‌ها و... در این زون‌ها تأثیرگذار بوده‌اند. ضمن اینکه شرایط پیچیده زمین‌ساختی منطقه نیز موجب می‌شود که شدت و ضعف هر یک از پارامترهای زمین‌شناسی مذکور در نواحی گسلی متغییر باشد.

یکی از عوامل حضور کانی‌های ثانویه در زون‌های گسلی و خرد شده است. در توده‌سنگ‌های اسلیتی و شیستی، گاهاً قسمتی از فضاهای خالی درزه و شکاف‌ها با تبلور مجدد کانی‌های سیلیسی و تشکیل رگه‌های ثانویه کوارتزی پُر شده است و این عامل موجب ایجاد شرایط سینه‌کار مختلط (Mixed Face Condition)، در برخی از نواحی گسلی شده است (شکل ۹- الف و ب). اگرچه پُرشدگی شکستگی‌ها توسط کانی‌های ثانویه طبیعتاً تا حدی موجب بهبود وضعیت پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها در برخی نواحی گسلی شده، اما در این نواحی نیز به دلیل وجود عوامل دیگر (حضور پُرکننده‌ها و میان‌لایه‌های ضعیف گرافیتی در گرافیت‌شیست‌ها و...) حرکت توده‌سنگ‌ها حین حفاری به صورت ریزش و گاهاً خزش (پدیده لهیدگی) در امتداد سطوح گسستگی رخ می‌دهد است. در برخی نواحی از زون‌های گسلی، دسته درزه‌های متقاطع (با فواصل بیشتر از

۲۰ سانتی‌متر و با شیب ۶۰ تا ۸۰ درجه، با بازشدگی بدون مواد پُرکننده) موجب ایجاد و جابجایی بلوک‌های سنگی با ابعاد بزرگ شده است (شکل ۹- ج)، این در حالی است که در برخی نواحی دیگر تأثیر نیروهای تکتونیکی به حدی شدید بوده است که سنگ‌های اسلیتی-شیستی به شدت خُرد و ریز دانه شده‌اند و سپس در سیمانی از مواد دانه ریزتر به یکدیگر متصل شده و توده‌های میلونیتی را تشکیل داده‌اند (شکل ۹- د). از طرفی علی‌رغم نفوذپذیری بسیار پایین در تشکیلات ناتراوای اسلیتی و شیست‌ها (به عنوان لیتولوژی غالب در مسیر حفاری)، اما حوزه آبریز و شرایط پُر بارش منطقه موجب شده است که دسته شکستگی‌های حاصل از فعالیت‌های تکتونیکی، معبری جهت هدایت آب‌های سطحی به اعماق در نواحی گسلی باز نماید و این شرایط موجب انباشت آب در برخی از موقعیت‌ها در تراز حفاری گردد (شکل ۹- د). به نحوی که در حین حفاری شرایط آب زیرزمینی در موقعیت زون‌های گسلی از حالت قطره‌ای تا حالت جریانی (۱ تا ۶ لیتر بر ثانیه) متغییر بوده است (جودکی و همکاران، ۱۳۹۶). همگی این عوامل بر برداشت داده‌های مقاومت‌سنجی، در نواحی خردشده گسلی تأثیرگذار بوده‌اند، لذا در مدل‌های دو بُعدی (شکل ۴ الی ۷) نیز بی‌هنجاری‌های مقادیر مقاومت ویژه در محدوده زون‌های گسلی، دامنه‌ای کمتر از ۱۰ اهم متر (در خط برداشت B) تا بیش از ۴۰ اهم‌متر (در خط برداشت A) را نمایش می‌دهد.



شکل ۹. شرایط زمین‌شناسی متغییر سینه‌کار حفاری در زون‌های خرد شده و گسلی.

مجاورت تونل با زون رهایی انرژی، احتمال ایجاد آسیب در تونل وجود دارد (SCE, 2005). اگرچه نتایج تحلیل دو بُعدی داده‌های خط برداشت A، بیشترین سطح تطابق با موقعیت زون‌های گسلی در مسیر حفاری را دارد، اما بی‌هنجاری‌های مقاومت‌های ویژه در خط برداشت B (شکل ۵) شواهد بیشتری از خردشدگی توده‌سنگ‌ها در کیلومتر ۱۶ تا ۱۷ (مرتبط با گسل چمن‌سلطان) در تراز حفاری تونل ارائه می‌کند.

به طور کلی مقاطع مقاومت ویژه حاصل از تحلیل‌های دو بُعدی، تطابق نسبتاً قابل قبولی با مقطع زمین‌شناسی تونل نشان می‌دهند و تقریباً به جز دو زون خرد شده گسلی (در کیلومتر ۶ تا ۷ و در کیلومتر ۱۱ تا ۱۲)، شواهدی از سایر زون‌های گسلی در مسیر تونل را ارائه می‌دهد (شکل ۸).

با توجه به نبود ساختارهای چین‌خورده مشخص در منطقه، لذا در مقاطع دو بُعدی مقاومت ویژه نیز گسل‌ها اصلی‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی قابل تشخیص هستند که ارتباط سنگ‌چینه‌ای و ساختاری تشکیلات مختلف را از میان برده‌اند. مناطق کم مقاومتی که در کیلومتر ۱۶ تا ۱۷ (شکل ۷-ج) قرار گرفته‌اند با گسل چمن‌سلطان مرتبط هستند.

گسل چمن‌سلطان با راستای شمال‌غربی - جنوب‌شرقی، سازوکار راندگی و دارای طول حدود ۵۰ کیلومتر می‌باشد. شیب این گسل به سوی شمال‌شرق است. گسل مذکور خطواره‌ای ساده نبوده و متشکل از مجموعه‌ای از گسل‌های با خصوصیات مشابه با هم می‌باشد. این گسل از این جهت حائز اهمیت است که در محدوده کیلومتر ۱۶ تا ۱۷ راستای تونل را قطع می‌کند. در صورت فعالیت گسل چمن‌سلطان، علاوه بر گسلش مستقیم در برخی نقاط خاص، به دلیل





شکل ۱۰. وجود میان لایه‌های ماسه‌سنگی در توده سنگ اسلیتی.

### ۶. برگردان داده‌های مقاومت‌سنجی در مسیر محور گزینۀ قبلی تونل

پیش از انجام مطالعات مقاومت‌سنجی در مسیر محور تونل (سه خط برداشت A، B و C)، یک دسته مطالعات دیگر نیز در فاصله‌ای دورتر و به موازات محور تونل انجام شده است. نقاط برداشت در این دسته بر روی محور گزینۀ قبلی تونل (در طرح اولیه) آرایش یافته‌اند. پس از انجام مطالعات مقاومت‌سنجی، با جابجایی محور تونل (در طرح اصلاحیه)، این دسته برداشت‌ها عملاً بلااستفاده مانده است.

در این پژوهش از میان سه خط برداشت در مطالعات اولیه (محور گزینۀ قبلی تونل)، خط برداشتی که نزدیک‌ترین فاصله با محور حفاری (در طرح اصلاحیه) را دارد جهت پردازش با نرم‌افزار RES2DINV انتخاب شد. این خط برداشت (D) به فاصله تقریبی ۶۰۰ متر از خط برداشت B و حدود ۸۰۰ متر دورتر از محور حفاری تونل (خط برداشت A) قرار دارد. همانطور که گفته شد معیارهای مورد استفاده برای برگردان داده‌ها با برنامه کامپیوتری RES2DINV خطای باقی‌مانده RMS به میزان ۱٪ و یا حداقل ۸ چرخه تکرار است. با مدل‌سازی مقادیر مقاومت ویژه ظاهری در خط برداشت D، پس از ۸ چرخه تکرار داده‌ها، میزان خطای باقی‌مانده نهایی ۲/۳٪ بوده است (شکل ۱۱).

در مرحله اجرای این تونل، کیلومترهای ۶+۳۳۹ آخرین موقعیتی است که با ورود TBM به یک زون گسلی، عملیات حفاری به دلیل ریزش توده‌سنگ‌ها بر روی کله‌حفار دستگاه، متوقف شده است (در شکل ۸). در این مترهای آزادسازی دستگاه حدود ۸ روز زمانبر می‌شود. لیتولوژی در این زون گسلی شامل تشکیلات اسلیتی با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ است. در موقعیت توقف TBM، میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ به ضخامت ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در توده‌سنگ اسلیتی وجود داشته است (شکل ۱۰).

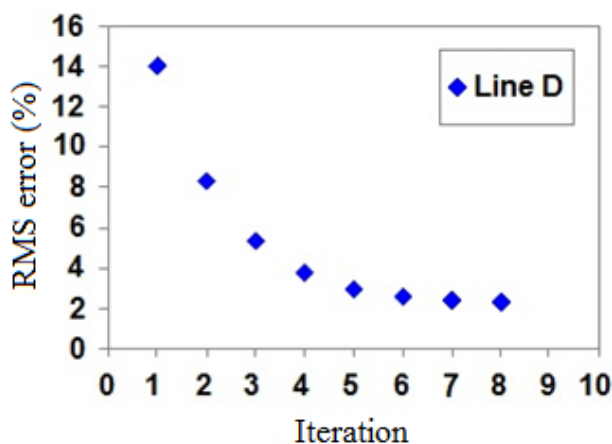
مقطع مقاومت ویژه مدل‌های وارون در موقعیت کیلومترهای ۶+۳۳۹ مقاومت‌های بیش از ۳۰۰ اهم متر را نمایش می‌دهند (شکل ۴ الی ۷). دلیل مشخص نشدن زون گسلی کیلومترهای ۶+۳۳۹ در تحلیل‌های دو بُعدی را می‌توان مربوط به پیچیدگی شرایط زمین‌شناسی و عامل مهم‌تر محدودیت روش‌های ژئوالکتریک در عمق‌های زیاد دانست چرا که روباره تونل در این ناحیه بیش از ۳۵۰ متر بوده است و شرایط این مقطع به لحاظ ساختارهای زمین‌شناسی نیز پیچیده بوده است. فشردگی تشکیلات تحت فشارهای محصور کننده زیاد (متأثر از روباره تونل و نیروهای تکتونیکی)، تناوب میان‌لایه‌های سنگی سخت مقاوم (ماسه‌سنگ) در میان سنگ‌های نرم نامقاوم (توده‌سنگ اسلیتی) و... یک محیط پیچیده‌ای را در زون گسلی ایجاد کرده است که طبیعتاً این عوامل بر مقادیر مقاومت ویژه در برداشت‌های مقاومت‌سنجی اثر گذار بوده است. لازم به ذکر است که در این مترهای علی‌رغم وجود میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی (که به لحاظ لیتولوژیکی پتانسیل ذخیره آب دارد)، اما جریان آبی حین حفاری وجود نداشته است و سینه‌کار حفاری در این زون تنها در برخی نقاط حالت مرطوب تا قطره‌ای داشته است.

مشخص نشدن زون خرد شده کیلومترهای ۱۱+۴۰۰ (در شکل ۸) در مقاطع مقاومت ویژه نیز می‌تواند به همین دلایل و سایر فاکتورهای تأثیرگذار نظیر: فاصله الکترودها، عوامل محیطی اثر گذار بر برداشت‌های مقاومت‌سنجی و... باشد.

موجود در برداشت داده‌ها، شرایط زمین‌شناسی منطقه و محدودیت‌های ناشی از تحلیل دو بُعدی می‌باشد.

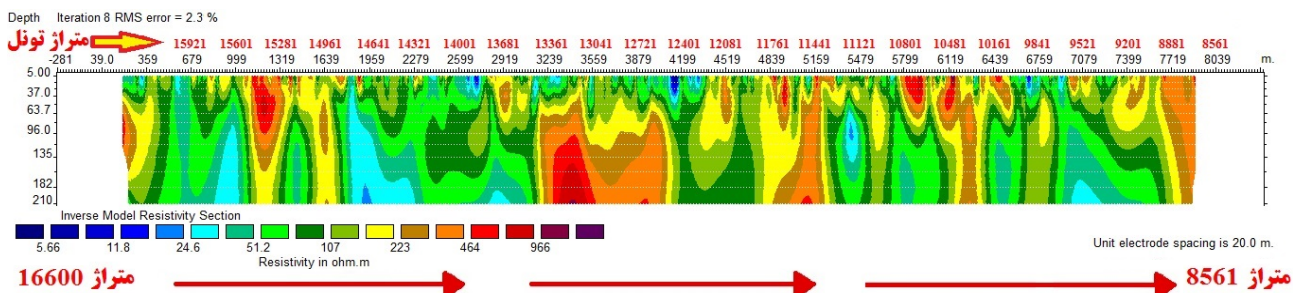
### ۶-۱. تفسیر مقطع D

نتایج برگردان دو بُعدی داده‌های مقاومت‌سنجی در این خط برداشت، با نتایج خط‌های برداشت قبلی (C,B,A) و مقطع زمین‌شناسی مسیر حفاری، از نظر موقعیت ساختارهای زمین‌شناسی (زون‌های خردشده و گسلیده) هماهنگی بالایی نداشته و تنها از لحاظ تغییرات لیتولوژی (اسلیت، شلیست، گرافیت‌شلیست، ماسه‌سنگ) با شرایط مسیر حفاری هماهنگی دارد. اگرچه شواهدی از چند زون کم مقاومت در این مقطع نیز مشاهده می‌شود (شکل ۱۲)، اما از لحاظ موقعیت، تطابق چندان زیادی با زون‌های کم مقاومت مقاطع قبلی (شکل ۴ الی ۷) ندارند.



شکل ۱۱. نحوه کاهش خطای باقی‌مانده در هر چرخه تکرار برگردان داده‌های مقاومت‌سنجی خط برداشت D.

همانطور که دیده می‌شود در خط D، تقریباً پس از ۶ چرخه مقدار خطای موجود به مقدار ثابتی میل نموده است. عدم کاهش خطا در چرخه‌های بعدی متأثر از خطاهای احتمالی



شکل ۱۲. مقطع مقاومت ویژه مدل وارون در خط برداشت D بدون در نظر گرفتن توپوگرافی.

تجهیزات حفاری در نقاط صعب‌العبور، تعدادی از گمانه‌های اکتشافی به ناچار در نقاطی دورتر از محور تونل حفاری شد. بطور مثال گمانه TGH23 تنها گمانه‌ای است که در تشکیلات آهکی منطقه حفاری شد اما به دلیل نبود راه دسترسی در فاصله‌ای به میزان ۹۰۰ متر دورتر از محور تونل حفاری شد. مشخصات این گمانه‌ها و فاصله آنها از محور حفاری تونل در جدول ۱، ارائه شده است.

نتایج برگردان دو بُعدی داده‌های مقاومت‌سنجی این خط برداشت (شکل ۱۲)، می‌تواند جهت تفسیر اطلاعات بخشی از مطالعات ژئوتکنیکی و گمانه‌های اکتشافی طرح، قابل تأمل باشد.

در مراحل نخست مطالعات ساختگاهی این پروژه، به دلیل شرایط کوهستانی و نبود راه‌های دسترسی (عدم امکان حمل



جدول ۱. مشخصات گمانه‌ها و فاصله آنها از محور تونل (SCE, 2004)\*

ردیف	شماره گمانه	عمق گمانه (متر)	فاصله گمانه تا محور حفاری تونل	موقعیت نسبت به محور تونل (کیلومتراژ)
۱	TGH20	۳۸۵	۵۵۰	۱۱+۱۵۰
۲	TGH21	۳۶۰	۶۰۰	۹+۶۵۰
۳	TGH22	۱۹۲	۷۵۰	۸+۰۵۰
۴	TGH23	۱۰۰	۹۰۰	۱+۵۰۰
۵	TGH24	۲۴۰	۱۶۰۰	۳+۵۰۰
۶	TGH25	۱۴۰	۱۰۰۰	۰+۴۰۰

\* با توجه به فاصله گمانه‌ها از محور تونل، در این تحقیق گمانه‌های مذکور در شکل ۸ ترسیم نشده‌اند. اگرچه در گزارشات فنی پروژه، این گمانه‌ها نیز بر روی مقطع زمین‌شناسی تونل ترسیم شده است.

به محور حفاری تونل (خط برداشت A) از ناهمگنی‌های کمتری برخوردارند و بی‌هنجاری‌های کمتری در مقطع مقاومت ویژه به لحاظ وجود زون‌های خرد شده، مشاهده می‌شود.

اگرچه ذکر این نکته لازم است که تونل بلند قمرود در چهار قطعه ۹ کیلومتری یکپارچه، در یک گستره ۳۶ کیلومتری اجرا شده است و جابجایی محور حفاری با ملاحظات زمین‌شناسی برای کل ۳۶ کیلومتر صورت گرفته است.

#### ۷. نتیجه‌گیری

تحلیل‌های دو بُعدی، تغییرات سنگ‌شناسی در مسیر تونل و نحوه گسترش لایه‌های ضعیف و گسل‌ها را در مسیر تونل نشان می‌دهند. مهمترین عوارض مورد مشاهده در مقاطع مقاومت ویژه مدل وارون (خطوط برداشت C, B, A)، حاکی از وجود چند بی‌هنجاری و زون با مقاومت ویژه پایین در ۸ تا ۹، ۱۰ تا ۱۱، ۱۳ تا ۱۴، کیلومتر ۱۴ تا ۱۵ و ۱۶ تا ۱۷ مسیر تونل می‌باشد. مناطق کم مقاومت مذکور دارای انطباق نسبتاً قابل قبولی با محل زون‌های خرد شده و گسلی در مقطع واقعی زمین‌شناسی هستند. همچنین نتایج تحلیل دو بُعدی داده‌های مقاومت سنجی در مسیر گزینه قبلی تونل (خط برداشت D)، عدم قابلیت تعمیم نتایج تعدادی از گمانه‌های اکتشافی (گمانه‌های خارج از محور تونل) به مسیر حفاری را تایید می‌کند. با توجه به نبود اطلاعات کامل و دقیق از شرایط زون‌های گسلی در مسیر حفاری، می‌توان اینگونه تحلیل کرد که توجه بیشتر

به نظر می‌رسد تعمیم اطلاعات این گمانه‌ها به محور حفاری، جهت پیش‌بینی مخاطرات در حین حفاری کار دشواری بوده است و نمی‌توانسته اثر بخشی چندانی داشته باشد. نتایج برگردان دو بُعدی داده‌های مقاومت سنجی در خط برداشت D، تغییر شرایط زمین‌شناسی در فاصله ۸۰۰ متری تونل (در محوری به موازات مسیر حفاری) را آشکار کرده است. لذا نتایج تحلیل خط برداشت D، نیز می‌تواند بُرهانی برای عدم کاربری نتایج ژئوتکنیکی این گمانه‌ها، محسوب شود.

اطلاعات حاصل از این گمانه‌ها اگرچه می‌توانسته تا حدودی راهنمای شرایط عمومی توده‌سنگ‌ها (وضعیت خردشدگی، آبگذری و ...) در منطقه باشد، اما با توجه به فاصله نسبتاً زیاد آن‌ها از محور تونل، برای پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی در مسیر حفاری تونل قابل استناد نبوده‌اند، چرا که شرایط زمین‌شناسی منطقه با توجه به سوابق تکتونیکی آن، بسیار پیچیده است و وضعیت توده‌سنگ‌ها به لحاظ پارامترهای ژئومکانیکی می‌تواند در فاصله‌های کوتاه به شدت تغییر کند.

مطلب قابل ذکر دیگر در نتایج تحلیل‌های دو بُعدی این است که پردازش اطلاعات در خط برداشت D (با ۸ چرخه تکرار و خطای باقی‌مانده RMS به میزان ۲/۳٪) و تفاوت آن نسبت به روند پردازش اطلاعات در سه خط برداشت قبلی (با ۵ چرخه تکرار و خطاهای باقی‌مانده RMS کمتر از ۱٪ با مقادیر ۰/۶۷٪، ۰/۴۵٪ و ۰/۳۷٪) می‌تواند عاملی برای برخی تفاوت‌ها در نحوه نمایش مدل وارون خط برداشت D (نسبت به خطوط قبلی) باشد. اما بطور کلی بر اساس مقادیر مقاومت ویژه، در محور خط برداشت D، تشکیلات زمین‌شناسی نسبت

## تشکر و قدردانی

از همکاری بی‌دریغ جناب آقای مهندس پرشین موسوی عضو محترم هیئت مدیره و از دیگر پرسنل محترم مهندسی مشاور صحراکاو، به جهت استفاده از اطلاعات این شرکت (فایل‌های اکسل داده‌های مقاومت‌سنجی قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود)، صمیمانه قدردانی می‌شود.

نسبت به مطالعات ژئوفیزیکی می‌توانسته در ارائه یک تصویر کلی از تشکیلات زمین‌شناسی و شناسایی بهتر شرایط زیرسطحی مسیر تونل کمک شایانی نماید. نتایج تحلیل‌های دوبعدی مقاومت‌های ویژه در این تحقیق، بیانگر این حقیقت است که مطالعات ژئوفیزیکی می‌تواند نقش مؤثری در شناخت مخاطرات در مسیر حفاری تونل‌های کوهستانی ایفا نماید.

## منابع

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ اول، ۵۸۶ صفحه.
- جودکی، و. و اجل‌لوئیان، ر. ۱۳۹۴. نقش شرایط زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی سازندها در رخداد مخاطرات حفاری (مطالعه موردی تونل قمرود)، فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، سال ۲۵، شماره ۹۷، صفحات ۱۶۲-۱۵۱.
- جودکی، و. کوهیان‌افضل، ف. عالی‌انوری، ع. اجل‌لوئیان، ر. و سهرابی‌بیدار، ع.، ۱۳۹۶. بررسی اشکال انحلالی سطحی و میزان توسعه آب زیرزمینی در ساختگاه قطعه ۴ تونل قمرود، فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، سال ۲۶، شماره ۱۰۳، صفحات ۴۰-۲۹.
- رادان، م.ی. و حفیظی، م.ک. ۱۳۸۶. وارون‌سازی ترکیبی داده‌های مقاومت ویژه با آرایه‌های شلومبرژه و دوقطبی-دوقطبی به منظور تعیین مسیر درز و شکاف‌های آبدار، فصلنامه علمی پژوهشی فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۳، شماره ۲، صفحات ۷۵-۶۹.
- Alavi, N.M., 1994. Tectonics of the Zagros Orogenic belt of Iran: New data and interpretation. *Tectonophysics*, Vol. 229 (3): 211 – 238.
- Badpa, M., Kamkar Rohani, A., Arab-Amiri, A.R. and Mohammadi-Vije, M., 2015. Application of resistivity data Inversion and Forward modeling in survey of hidden fault (case study: Khazar fault). *Second International Congress of Applied Geology, Mashhad-Iran*.
- Barla, G. and Pelizza, S., 2000. TBM tunneling in difficult ground conditions, *Proceedings of GeoEng 2000, Proceedings of the International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, November 19–24, 2000, Technomic Publishing Company, Lancaster: 329–354*.
- Danielsen, B.E. and Dahlin, T., 2009. Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hallandsås Tunnel: Sweden, *Engineering Geology* 107:118–129.
- DeGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models form magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Ganerød, G.V., Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmøy, K., Nilsen, B. and Braathen, A., 2006. Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65 (3), 231–243.
- Griffiths, D.H. and Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology: *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I., 2002. *An Introduction to Geophysical exploration*, Oxford: Blackwell Science Ltd, 3rd ed. ix, 262 pp.
- Loke, M.H., 2000. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys: RES2DINV Manual*.
- Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
- SCE (Sahel Consultant Engineers), (2004-2008). *Geotechnical studies and Technical reports of Ghomroud Tunnel*. (Unpublished).

- 
- Sirles, P.C., 2006. NCHRP Synthesis 357: Use of Geophysics for Transportation Projects, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2006. Available at [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_syn\\_357.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_357.pdf).
- Stocklin, J., 1977. Structural correlation of the Alpine range between Iran central Asia. Memoire Hors-Serve No.8 dela Societe Geologique de France, 8: 333-353.