

ارزیابی مخاطرات زمین شناسی مهندسی در تونلسازی با استفاده از تصویربرداری دو بعدی مقاومت

ویژه الکتریکی

علیرضا علیجانی^{*}، ابوذر ارباب^۲، مرتضی اشتری^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴

چکیده

احداث سازه‌های زیرزمینی به دلیل ارتباط مستقیم با ساختار توده سنگ، همواره دارای مخاطرات و مشکلات عدیده‌ای است که می‌تواند ایمنی جانی و مالی پروژه را به خطر انداخته و سازه را با چالش‌های زیادی روبرو نماید. ارزیابی و پیش بینی این مخاطرات در اجرای پروژه در تمام مراحل امکان سنجی و طراحی بسیار سودمند است. استفاده از روش‌های غیر مخرب ژئوفیزیک می‌تواند با هزینه‌های کم و صرف زمان اندک، اطلاعات زیرسطحی مناسبی در اختیار طراحان قرار دهد. پروژه مورد نظر در استان زنجان با استفاده از روش ژئوالکتریک، توموگرافی دو بعدی مقاومت الکتریکی (ERT) برای ارزیابی مشخصات لایه‌بندی و تعیین میان لایه‌های سازند سلطانیه مورد استفاده قرار گرفته و با تلفیق برداشت‌های زمین شناسی و مقاومت الکتریکی زمین، میزان کیفیت توده سنگ (RMR و RQD) محاسبه شده و با توجه به آنها مخاطرات زمین شناسی مهندسی پیش روی پروژه ارزیابی و پیش بینی شده است. نتایج حاصل از برداشت مقاومت الکتریکی، برداشت‌های سنگ چینه‌ای (ستون چینه شناسی) و ژئوتکنیکی (کیفیت توده سنگ) را به خوبی تایید و تدقیق نموده است و می‌تواند راهگشای مناسبی برای مطالعات زیرسطحی پروژه در مرحله شناخت و طرح ریزی باشد.

واژگان کلیدی: مقاومت الکتریکی، سازند سلطانیه، کیفیت توده سنگ، مخاطرات زمین شناسی.

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان Alirezaalijani2014@gmail.com

۲. کارشناس ارشد عمران، آزاد، تهران

۳. کارشناس ارشد ژئوفیزیک، آزاد، تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی یکی از مهمترین پروژه‌های مهندسی کشور بوده و نقش مهمی در جنبه‌های مختلف (حمل و نقل، معدنی، نظامی و غیره) دارند. اینگونه سازه‌ها به علت تماس مستقیم با ساختار توده سنگ، بیشترین تاثیر را از شرایط زمین شناسی و توده سنگ می‌گیرند. مخاطرات تونلسازی از جمله ریزش و لغزش و هجوم آب به داخل تونل، یکی چالش برانگیزترین مخاطرات مهندسی در مواجهه با احداث سازه‌های زیرزمینی می‌باشد و به خاطر عدم شناخت کامل از شرایط زیرسطحی، عدم قطعیت پروژه‌های تونلی بسیار زیاد است. وجود عدم تجانس موجود در توده سنگ (چین خوردگی، گسلش، درزه‌ها و غیره) می‌تواند باعث بروز چالش‌های زیادی در حین حفاری تونل‌ها بوده و باعث بروز مخاطرات زیادی در حین حفاری گردد شاو و همکاران (Shao et al 2021). لذا پیش بینی مخاطرات زمین شناسی مهندسی در طول تونل بسیار ضروری بوده باعث جلوگیری از خطرات جانی و صرفه جویی هزینه‌های مالی می‌گردد. مطالعات ژئوفیزیک یکی از نخستین ابزار غیر مخرب برای ارزیابی شرایط زیرزمینی و شرایط زمین شناسی پیچیده می‌باشد پانک و همکاران، آندراده، پرونه و همکاران (Anderade 2011, Panek et al 2008, Perrone et al 2014). با توجه به هزینه بر بودن عملیات مطالعات تفصیلی زمین شناسی (بازدیدهای صحرائی و حفاری مغزه‌گیری) لذا استفاده از تکنیک ژئوفیزیک می‌تواند یک روش غیر مخرب و ارزان برای ارزیابی شرایط زمین و شناخت عدم قطعیت های زمین شناسی باشد چمبرز و همکاران، شاو و همکاران، داستانبو و همکاران (Shao et al 2021, Chambers et al 2006, Dastanboo et al 2020).

روش‌های ژئوالکترونیک با استفاده از پتانسیل هدایت الکتریکی و مقاومت الکتریکی طبیعی مواد تشکیل دهنده زمین می‌توانند دید مناسبی از شرایط زیرزمینی در اختیار زمین شناسان قرار دهند. توموگرافی دو بعدی مقاومت الکتریکی (ERT) از مناسبترین روش‌ها برای شناسایی و تفکیک لایه‌های زمین

شناسی از نظر مقاومت الکتریکی و شناسایی زون‌های گسله و آبدار درون زمین می‌باشد پانک و همکاران، آندراده (Anderade 2011, Panek et al 2008). ارزیابی اولیه و پیش بینی ویژگی‌های مهندسی توده سنگ ساختگاه های تونل نیز یکی از فعالیت‌های مهم مهندسی است که تکنیک ژئوالکترونیک می‌تواند در این زمینه کارساز باشد که شاخص RQD و رده-بندی RMR از مهمترین اطلاعات پایه‌ای برای اندازه گیری دیگر ویژگی‌های توده سنگ می‌باشد حسن و همکاران، هنگ و همکاران (Hasan et al 2021, Hong et al 2017). گسل‌ها، زون‌های خردشده و هوازده، هجوم آب و غیره از مهمترین مخاطرات زمین شناسی در مواجهه به سازه‌های زیرزمینی است که همواره می‌توانند باعث تلفات جانی و اعمال هزینه‌های گزاف به پروژه شوند که استفاده از تکنیک مقاومت الکتریکی می‌تواند در پیش بینی آنها بسیار موثر باشد داستانبو و همکاران (Dastanboo et al 2020). از دیگر روش‌های غیر مخرب ژئوفیزیک برای شناسایی و ارزیابی مخاطرات زمین شناسی شامل پیش بینی لرزه‌ای تونل (TSP)، رادار نفوذی زمین (GPR)، روش الکترومگنتیک (TEM) و مونیتورینگ الکتریکی تونل (BEAM) که علاوه بر صرفه جویی اقتصادی می‌توانند به صورت سریع و کاربردی در ارزیابی‌های زمین شناسی مهندسی کارگشا باشند کانگ و همکاران (Kang et al 2023).

۲. زمین شناسی عمومی

محدوده مورد مطالعه در منطقه جنوب باختری زنجان (محدوده روستای جشن سرا) طول جغرافیایی $36^{\circ} 36' 19'' N$ و $48^{\circ} 13' 49'' E$ با تراز تقریبی ۲۲۵۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است. طبق بررسی‌های صحرائی و نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰، محدوده بر روی سازندهای باروت و سلطانیه قرار گرفته است (شکل ۱) (نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ زنجان سازمان زمین شناسی). برش الگوی سازند سلطانیه در این محدوده دارای ستبرای حدود ۱۱۰۰ متر بوده که شامل ۷ عضو (سه عضو شیلی و چهار عضو دولومیتی) می‌باشد که ستون چینه

نخودی با میان لایه‌های چرت در منطقه رخنمون اصلی را تشکیل داده است.

شیل بالایی (Sh3): این لایه شیلی که در برش الگو دارای ضخامت تقریبی ۱۷۵ متر می باشد، در منطقه مورد نظر به ضخامت حدود ۳۰ متر رخنمون دارد.

دولومیت انتهایی (D4): این عضو دولومیتی با ضخامت ۲۲۰ متر در برش الگو که در محدوده مورد مطالعه رخنمون ندارد.

سازند باروت با سن کامبرین پیشین بصورت تدریجی بر روی سازند سلطانیه قرار گرفته و عمدتاً شامل سیلتستون میکادار و آهک شیلی به ضخامت حدود ۷۰۰ متر در محدوده بوده که به صورت هم شیب بر روی سازند زاگون قرار گرفته است. شکل ۳ رخنمون سازند باروت و سلطانیه را در منطقه نشان می‌دهد. سازند سلطانیه همانطور که نقشه زمین شناسی نشان می‌دهد به صورت هم شیب و تدریجی بر روی سازند باروت قرار گرفته است.

شناسی آن در شکل ۲ نشان داده شده و عضوهای آن بدین قرار می‌باشد (فامرینی بزلوئی و همکاران ۱۳۹۹، زهدی و همکاران ۱۳۹۶) (شکل ۲).

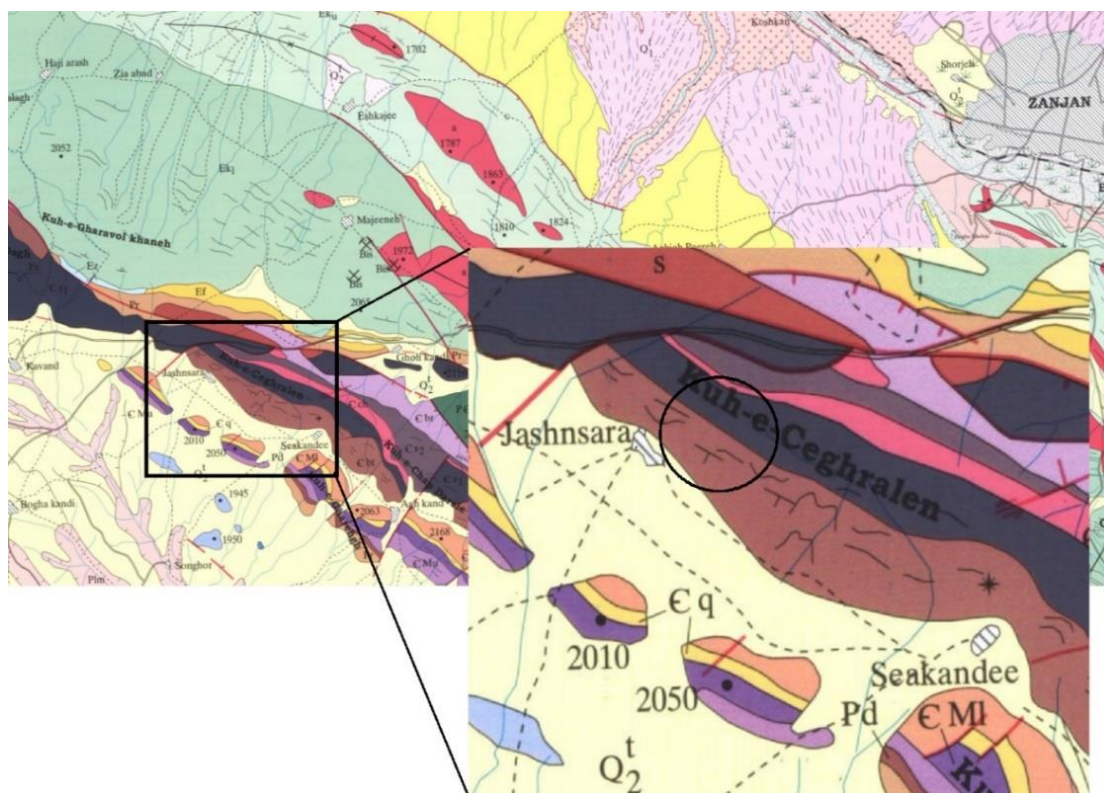
دولومیت زیرین (D1): دولومیت قائده‌ای سازند سلطانیه با ضخامت تقریبی ۷۰ متر که در منطقه مورد مطالعه رخنمون ندارد.

شیل زیرین (Sh1): این عضو شیلی که شیل چپقلو معروف است دارای ضخامت حدود ۲۰۰ متر بوده و در محدوده خارج از بخش پروژه مورد نظر رخنمون دارد.

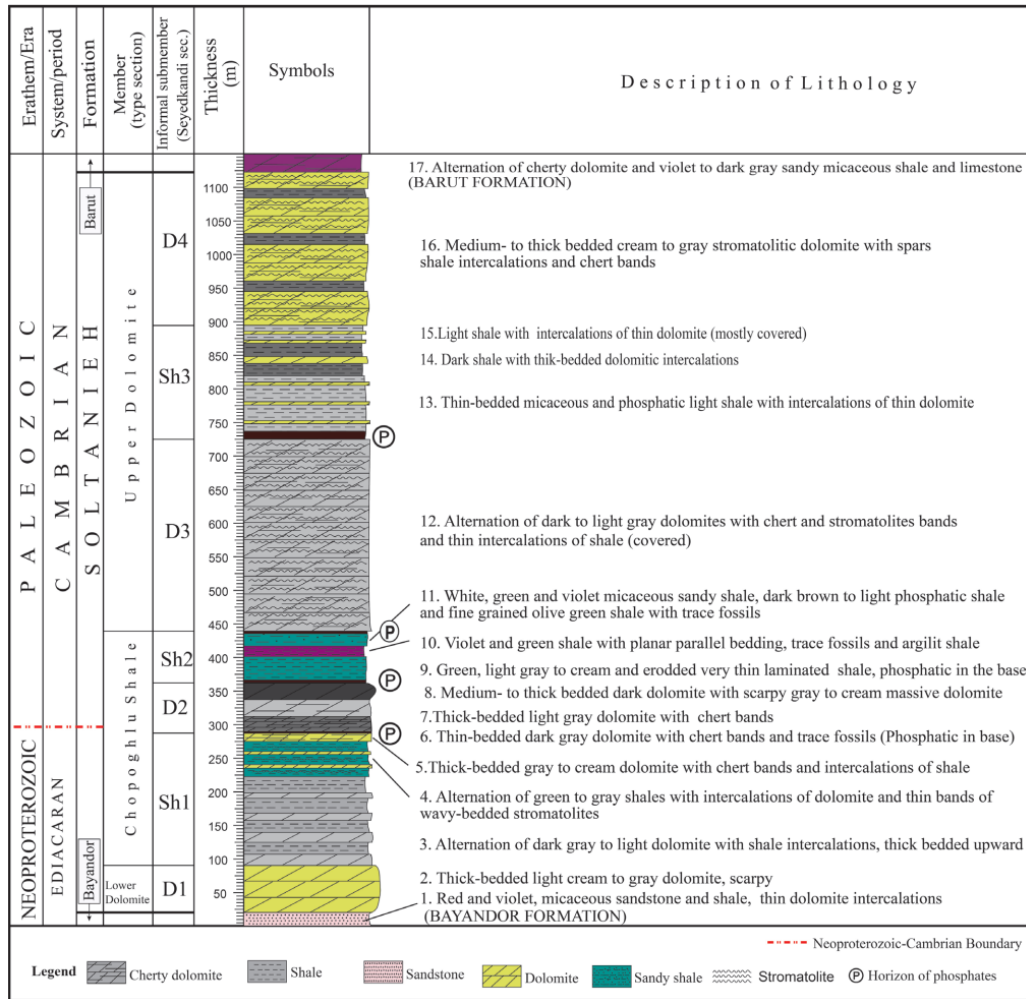
دولومیت میانی (D2): این عضو دولومیتی با ضخامت تقریبی ۷۰ متر همراه با باندهای نازک چرت در منطقه رخنمون دارد.

شیل میانی (Sh2): این واحد شیلی با ضخامت تقریبی ۷۵ متر که کاملاً هوازده و خرد شده می‌باشد در محدوده پروژه قرار گرفته است.

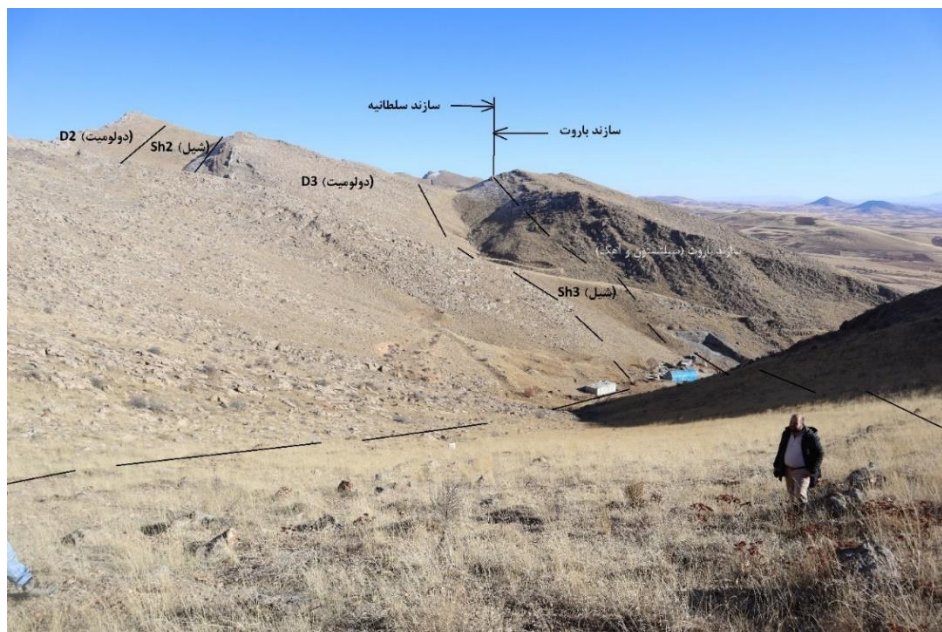
دولومیت بالایی (D3): این بخش با ضخامت حدود ۲۸۰ متر بخش اصلی پروژه را تشکیل داده و به رنگ خاکستری تا



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه بر روی نقشه زمین شناسی (نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰۰ زنجان، سازمان زمین شناسی)



شکل ۲. ستون چینه شناسی سازند سلطانیه (فامرینی بزچلوئی و همکاران ۱۳۹۹)



شکل ۳. رخنمون‌های سنگ چینه‌ای منطقه (سازندهای باروت و سلطانیه) (36° 36' 19" N و 48° 13' 49") دید به سمت غرب

دولومیت بالایی (D3)، شیل میانی (Sh2) و دولومیت میانی (D2) مربوط به سازند سلطانیه رخنمون دارد.

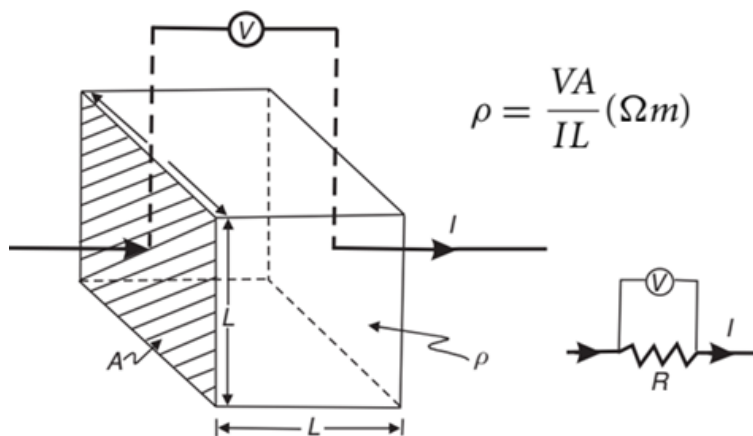
این روش بر اساس اختلاف ولتاژ در جریان عبوری از توده سنگ و محاسبه میزان مقاومت توده سنگ بر حسب Ωm بر اساس قانون اهم می باشد (شکل ۴) گریفیث و همکاران، رینولد (Griffiths et al 1981, Reynold 2011).

همانطور که شکل ۳ نشان می دهد، شیب عمومی لایه ها به سمت جنوب بوده و سازند باروت در سمت چپ تصویر وجود داشته و بعد از آن واحدهای سنگی شیل بالایی (Sh3)،

۳. مواد و روش ها

۳-۱. روش مقاومت الکتریکی

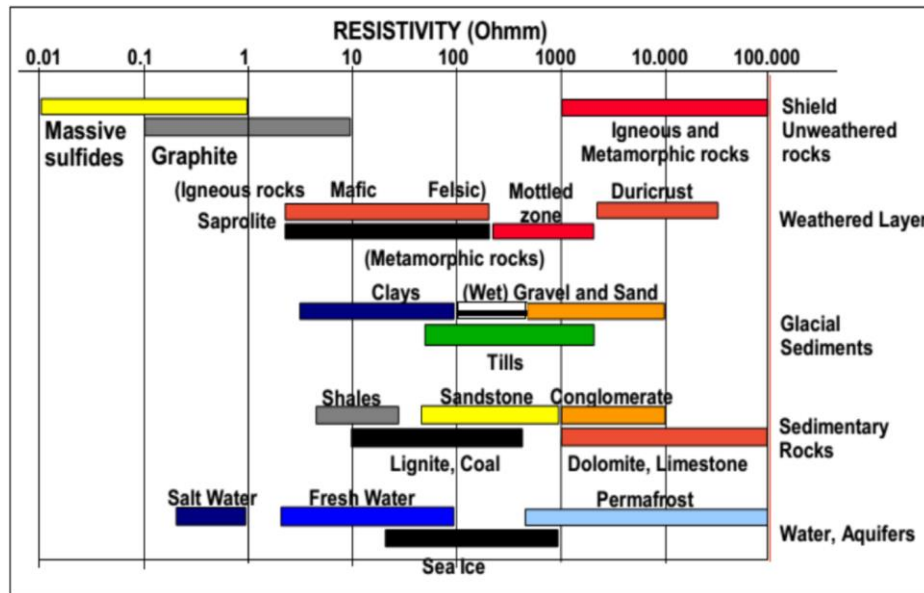
روش مقاومت الکتریکی طی سالهای ۱۹۷۰-۱۹۰۰ به شدت برای انجام مطالعات زمین شناسی زیرسطحی توسعه یافت.



شکل ۴. نمای کلی قانون اهم و اصول مقاومت الکتریکی (Reynold 2011)

(1981). سنگ های متبلور با شکستگی های اندک (گرانیت و مرمر) عموماً دارای بیشترین مقاومت الکتریکی و سنگ های آهکی و ماسه سنگ ها در درجه بعدی قرار می گیرند و سنگ های با میزان کانی های رسی زیاد و تخلخل بالا (مارن، رس، شیست و غیره) دارای پایین ترین مقاومت الکتریکی می باشند (شکل ۵ و جدول ۱) گریفیث و همکاران، رینولد (Griffiths et al 1981, Reynold 2011).

اساس این روش بدین صورت است که با ارسال جریان به درون زمین از طریق الکترودها، میزان اختلاف پتانسیل بین الکترودها به دست آمده و منحنی های میزان بر اساس میزان مقاومت الکتریکی محاسبه و پردازش می گردد. وجود کانی های رسی و آب موجود در درز و شکاف سنگ (میزان درجه اشباع) و هوازگی مهمترین عامل افزایش هدایت الکتریکی و کاهش مقاومت می باشد گریفیث و همکاران (Griffiths et al



شکل ۵. ویژگی‌های مقاومت الکتریکی برخی از سنگ‌ها (Griffiths et al 1981)

جدول ۱. میزان مقاومت الکتریکی برخی از مواد (Andrade 2011)

Electrical Resistance ($\Omega m.m$)	material
500-5000	granite
1000-1000000	Bazalt
600-4000000	Marbel
1000-25000000	Quartzite
4000-8000	Sandstone
400-5000	Limestone
20-100	Shale
1-100	Clay
10-800	Alluvial
10-100	Fresh water
0.2	Salt water

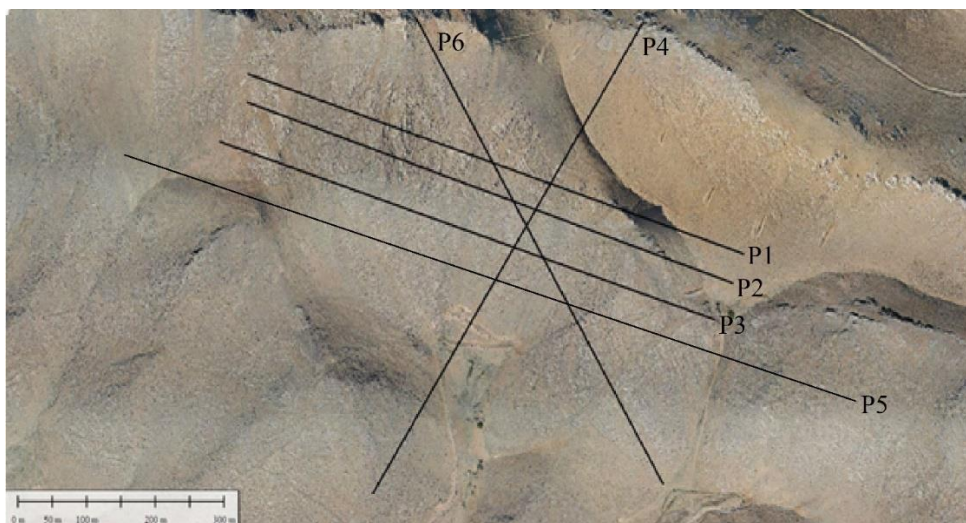
۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به وضعیت سنگ شناسی منطقه و عدم وجود اطلاعات زیرسطحی از وضعیت لایه بندی و به خاطر تناوب دولومیت و شیل، احتمال برخورد تونل به لایه شیلی Sh2 و Sh3 وجود داشته و ممکن است باعث ریزش‌های حجیم در تونل گردد. لذا از روش غیر مخرب مقاومت ویژه برای تفکیک لایه بندی و ارزیابی اولیه ویژگی‌های مهندسی توده سنگ استفاده شده است. بدین منظور تعداد ۶ پروفیل با طول کلی ۵۴۰۰ متر در منطقه (چهار پروفیل در راستای تقریبی لایه‌بندی، یک پروفیل در جهت شیب حقیقی و یک پروفیل در جهت شیب ظاهری لایه بندی) طراحی و قرائت شده

۳-۲. هدف از پروژه

این تونل با طول حدود ۱۳۰۰ متر (۴۰۰ متر دسترسی از ورودی T1 و ۴۵۰ متر دسترسی از ورودی T2 و ۴۰۰ متر بخش اصلی به موازات لایه) جهت دسترسی به لایه شیلی فسفات دار که معادل شیل میانی (Sh2) در ستون چینه شناسی است، می‌باشد. طی این پروژه حدود ۴۰۰ متر از طول پروژه باید در امتداد میان لایه شیلی فسفات دار حفاری گردد که با توجه به احتمال برخورد به لایه شیلی و ریزش‌های ناگهانی، دارای چالش‌های زیادی است. از این رو از روش غیر مخرب ژئوالکترونیک (RS) برای تعیین دقیق شیب و امتداد لایه شیلی و موقعیت آن نسبت به تونل استفاده شد.

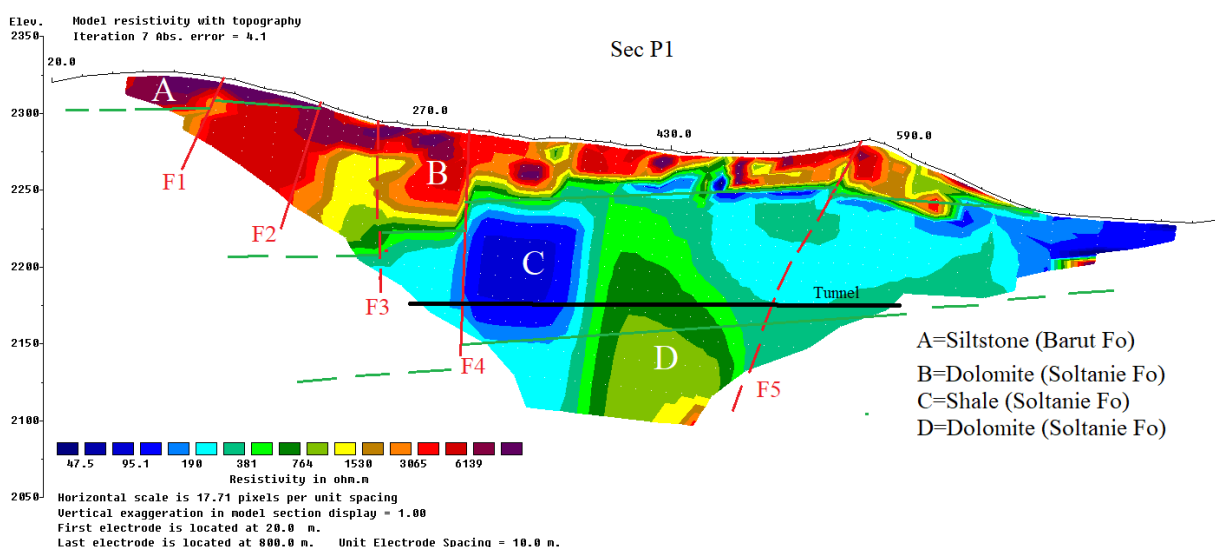
است (شکل ۶). نتایج حاصل از برداشت داده‌های مقاومت الکتریکی و تفسیر آنها مطابق اشکال ۷ تا ۱۲ می‌باشد.



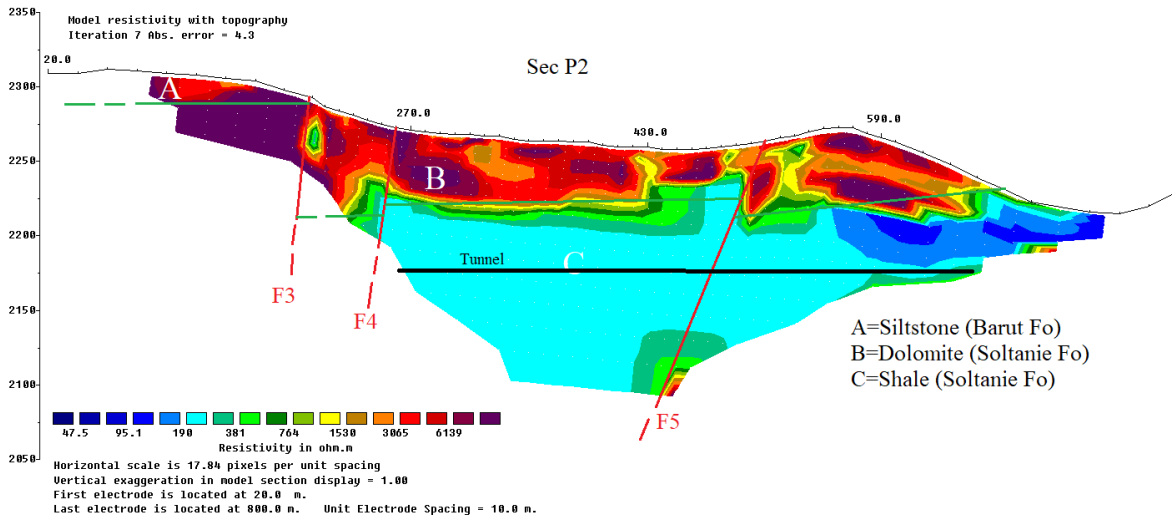
شکل ۶. تصویر هوایی محدوده مورد مطالعه و پروفیل‌های مطالعات ژئوالکتریک

گسل‌های سطحی جهت حفاری ایمن تونل طراحی و قرائت شده است. پروفیل P4 در جهت شیب لایه بندی (عمود بر امتداد) جهت تعیین دقیق شیب و کنترل ستون چینه شناسی با طول ۸۰۰ متر طراحی و قرائت شده است. پروفیل P6 نیز با طول حدود ۸۰۰ متر بمنظور کنترل پروفیل‌ها در جهت شیب ظاهری لایه بندی طراحی و قرائت شده است.

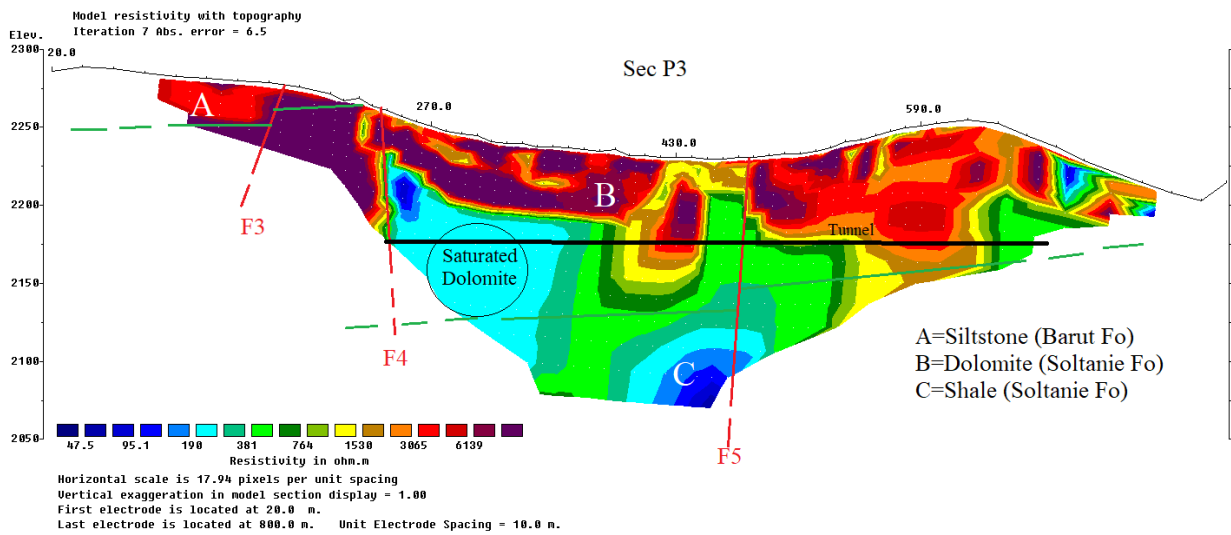
همانطور که شکل ۶ نشان می‌دهد، تعداد ۶ پروفیل با طول‌های متفاوت در منطقه به منظور ارزیابی وضعیت دقیق شیب و امتداد لایه بندی جهت طراحی تونل اجرا شده است. پروفیل‌های P1، P2، P3 (با طول ۸۰۰ متر و P5 (با طول ۱۲۰۰ متر) در امتداد لایه شیلی با فاصله‌های حدود ۲۰-۳۰ متر از یکدیگر به منظور ارزیابی شیب لایه بندی و پیگیری و کنترل



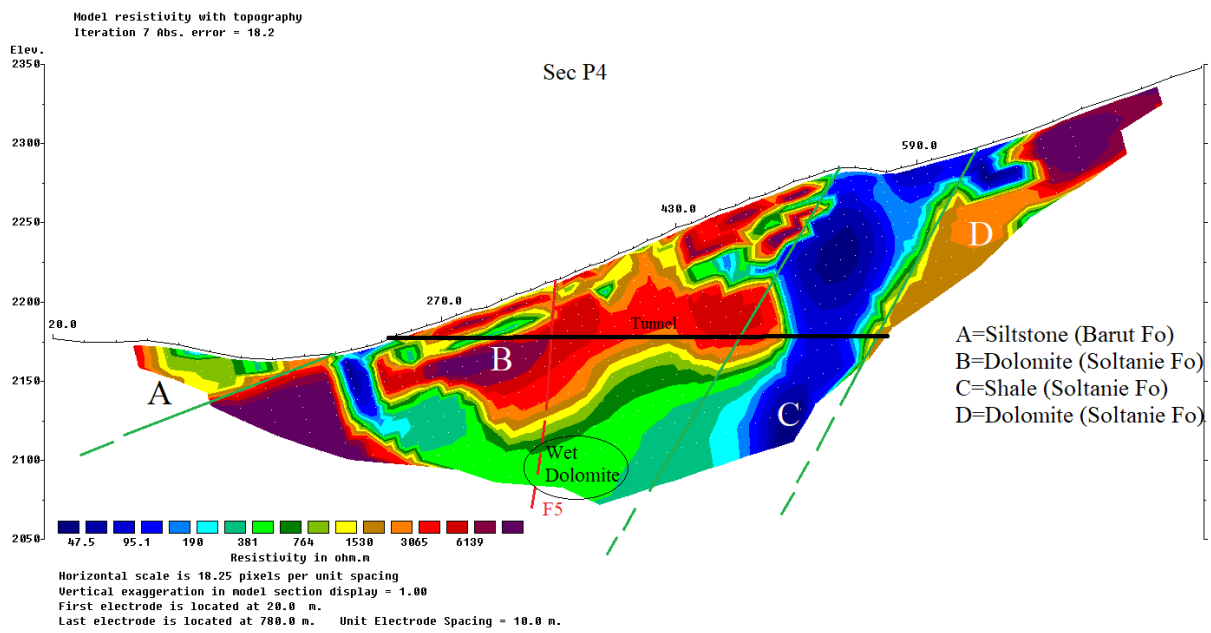
شکل ۷. مقطع مقاومت ویژه پروفیل P1



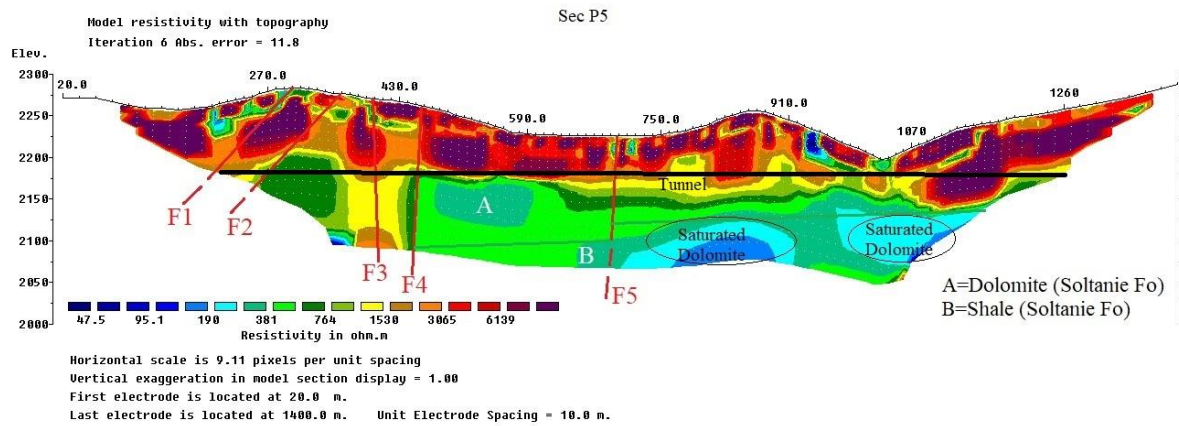
شکل ۸. مقطع مقاومت ویژه پروفیل P2



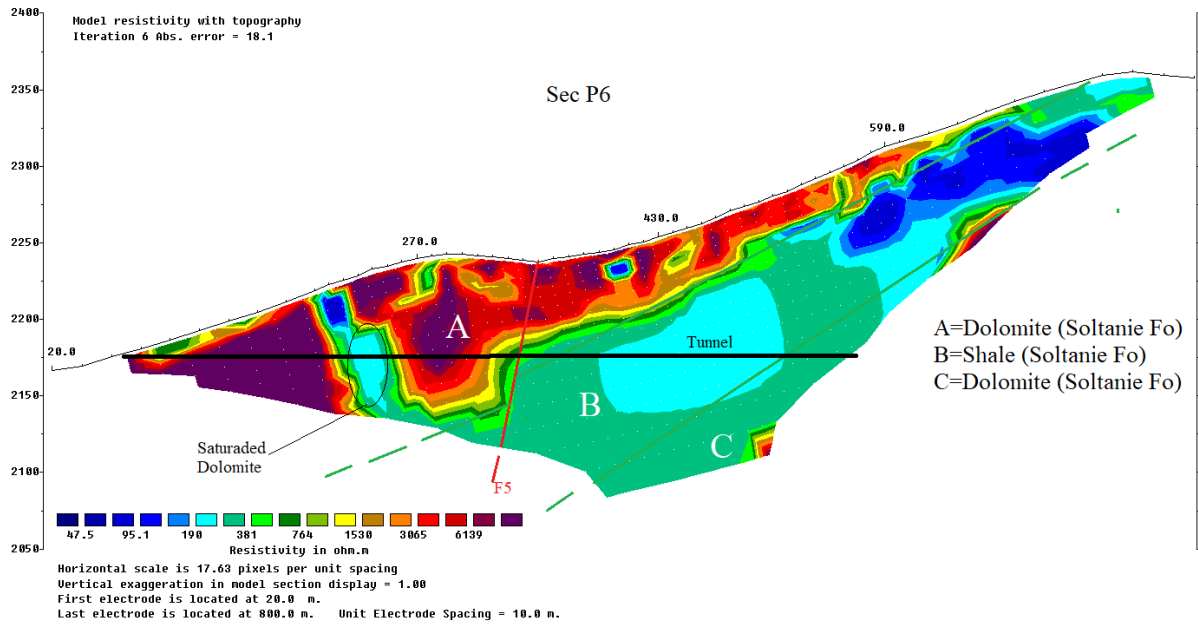
شکل ۹. مقطع مقاومت ویژه پروفیل P3



شکل ۱۰. مقطع مقاومت ویژه پروفیل P4



شکل ۱۱. مقطع مقاومت ویژه پروفیل P5



شکل ۱۲. مقطع مقاومت ویژه پروفیل P6

۱-۴. تفسیر پروفیل‌ها

همانطور که بیان شد پروفیل‌های P1, P2, P3 و P5 تقریباً به موازات لایه بندی بوده و قادر به تعیین موقعیت لایه شیلی از نظر تراز می‌باشد.

پروفیل P1: این پروفیل که در بالاترین ارتفاعات منطقه طراحی شده است، در بالا واحد دولومیت بالایی (D3) با ضخامت تقریبی ۴۰ متر دیده شده و زیر آن لایه شیلی فسفات دار با ضخامت تقریبی ۷۰-۸۰ متر بوده که حدود ۷۰ متر بالاتر از تراز تونل (۲۱۷۵ متر) قرار گرفته است و با توجه به وجود لایه شیلی و یک بخش کم مقاومت (مقاومت الکتریکی کمتر از $50 \Omega m.m$ که احتمالاً شیل مرطوب با زون گسله می‌باشد) احداث تونل در این مسیر باعث برخورد به لایه شیلی و ریزش می‌گردد لذا توصیه نمی‌شود.

پروفیل P2: این پروفیل نیز به موازات لایه شیلی بوده و با توجه به شیب لایه بندی شیل، تراز متوسط آن حدود ۲۲۱۰ بوده که در فاصله ۳۶ متر حدود ۴۰ متر کاهش یافته است، بنابراین میزان شیب آن حدود ۴۷ درجه می‌باشد. با توجه به اینکه حفاری تونل در این مسیر نیز به لایه شیلی برخورد شده

و باعث ناپایداری شدید می‌گردد، لذا احداث تونل در این مسیر توصیه نمی‌شود.

پروفیل P3: این پروفیل نیز به موازات لایه بندی بوده و با پروفیل P2 حدود ۵۵ متر فاصله دارد. تراز تقریبی لایه شیلی ۲۱۴۰ بوده بنابراین شیب لایه مطابق حدود ۴۷ درجه می‌باشد. در صورت احداث تونل در این مسیر، بخش اعظم تونل در بخش دولومیتی سازند سلطانیه قرار گرفته ولیکن با توجه به بخش کم مقاومت در محدوده کیلومتراژ ۲۷۰ این پروفیل (مقاومت کمتر از $180 \Omega m.m$) این بخش در دولومیت خردشده و اشباع می‌باشد که احداث تونل در این بخش می‌تواند چالش‌های ریزشی بودن تونل و نفوذ آب به داخل تونل را ایجاد نماید.

پروفیل P4: این پروفیل که در جهت عمود بر لایه بندی (در جهت شیب حقیقی لایه بندی) طراحی شده است، ابتدای پروفیل (بخش A) در بخش سازند باروت (طبق شواهد چینه شناسی و بررسی سطحی) و مرز سازندهای باروت و سلطانیه یک لایه کم مقاومت به ضخامت حدود ۳۰-۳۵ متر بوده که طبق مشاهدات صحرایی عضو شیل بالایی سازند سلطانیه

سلطانیه (دولومیت D2) با ضخامت نامشخص قرار گرفته است.

پروفیل P5: این پروفیل با فاصله ۱۹ متری از پروفیل P3 طرحی و قرائت شده و نتایج نشان می‌دهد تراز لایه شیلی حدود ۲۱۰۰ بوده تراز تونل در سنگ‌هایی با مقاومت الکتریکی بیشتر از $1000 \Omega.m$ بوده که دولومیت سالم و مرطوب یا خشک می‌باشد لذا دارای کمترین چالش در حین تونلسازی خواهد بود.

حفاری تونل عمدتاً شامل مناطق گسله و خرد شده (ریزش-های کلی، جزئی و بلوکی)، تغییر زون‌های زمین شناسی و لایه بندی (نفوذ آب، ریزش بلوکی و کلی)، حفرات کارستی یا گسلی پر شده با مواد ضعیف (ریزش و حجوم آب) و نفوذ آب به داخل تونل می‌باشد. جدول ۲ میزان مقاومت الکتریکی مخاطرات مختلف زمین شناسی و شرایط ضعیف را بیان نموده است.

(Sh3) می‌باشد (شکل ۳). پس از آن بخش B به ضخامت تقریبی ۳۰۰ متر دارای مقاومت بین $500-7000 \Omega.m$ بوده که مربوط به عضو دولومیت بالایی سازند سلطانیه (D3) است. بخش شیل میانی سازند سلطانیه (Sh2) با ضخامت تقریبی ۸۰ متر با شیب حدود ۴۰-۴۵ درجه با مقاومت الکتریکی کمتر از $100 \Omega.m$ در این بخش دیده می‌شود که مطابق ستون چینه شناسی و رخنمون‌های سطحی است. در انتهای این پروفیل بخش D (عضو دولومیتی بالایی سازند

۵. مخاطرات تونلسازی

ارزیابی مخاطرات تونلسازی پیش از طرح ریزی و اجرا یکی از مهمترین مطالعات زمین شناسی مهندسی در مرحله امکان سنجی می باشد. انجام این مطالعات به روش‌های غیر تخریبی (ژئوفیزیک) می‌تواند علاوه بر ارزان و سریع بودن دید کلی خوبی نسبت به شرایط زیرزمینی در اختیار قرار داده و زون-های خطر ساز را تفکیک نماید. بطور کلی مخاطرات در بخش

جدول ۲. محدوده میزان مقاومت الکتریکی شرایط زمین شناسی ضعیف و مخاطرات زمین شناسی مهندسی (Kang et al 2023,)

(Ammar et al 2018)

Weak Condition				Geological Hazards				Condition
Saturated Jointed limestone	Saturated crush limestone	Saturated crush limestone and shale lime	Shale and Lime shale	Filled voids	Geological transition zone	Water table and perched water	Fault and Fault zone	Electrical Resistance ($\Omega.m$)
50-60	20-50	10-20	0-23	100-150	150-200	5-30	100-150	

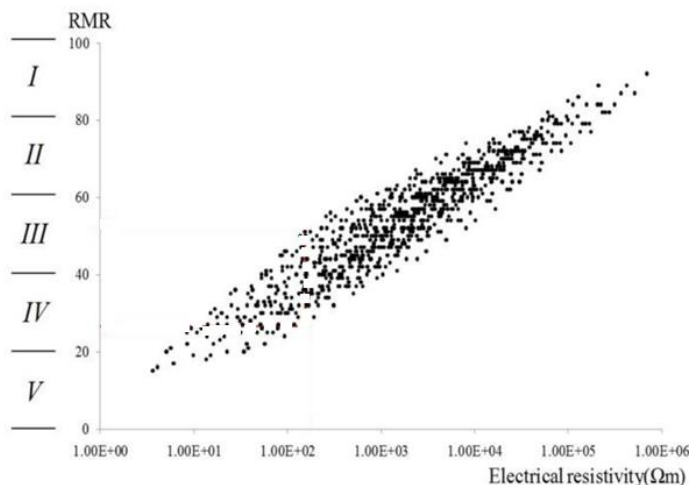
الکتریکی توده سنگ، میزان درزه داری آن و نوع و مقدار مواد پرکننده توده سنگ را مشخص می‌نماید که بر اساس آن می‌توان شاخص RQD و رده بندی امتیاز توده سنگ (RMR) را تخمین زد (جدول ۳ و شکل ۱۳).

۶. ارزیابی مخاطرات زمین شناسی

یکی دیگر از کاربردهای روش مقاومت الکتریکی در ارزیابی مخاطرات زمین شناسی، برآورد کیفیت توده سنگ از طریق محاسبه رده بندی توده سنگ می‌باشد. میزان مقاومت

جدول ۳. ارزیابی کیفیت توده سنگ از طریق مقاومت الکتریکی (Hasan et al 2021)

>3000	1000-3000	400-1000	100-400	<100	Electrical Resistivity ($\Omega\text{m.m}$)
90-100	75-90	50-75	25-50	<25	RQD %
Intact rock	Massive rock	Fair	Mostly crush and weathered	Completely crush and weathered	Rock Mass Description
Favorable	Favorable	Unfavorable	Unfavorable	Unfavorable	Quality Control



شکل ۱۳. ارزیابی میزان رده بندی RMR با استفاده از مقاومت الکتریکی (Hong et al 2017)

با توجه به مقادیر مقاومت الکتریکی از محدوده تونل به دست آمده و برداشت‌های صحرایی انجام گرفته به صورت سطحی از مسیر تونل، ارزیابی کیفیت توده سنگ در تراز تونل (۲۱۷۵ جدول ۴. ارزیابی ویژگی‌های مهندسی توده سنگ و مخاطرات زمین شناسی مهندسی در مسیر پروفیل‌ها (با برداشت‌های صحرایی و مقاومت الکتریکی)

Geological Hazards	Field Mapping Data		Evaluated by Electrical Resistance		Electrical Resistance ($\Omega\text{m.m}$)	Rock Unite	Km	Profile
	RMR	RQD	RMR	RQD				
Bedding Failure	25-30	40	30	25-30	100-150	Shale	Km 300-350	P1
Block Failure	35	45	40-45	40-55	200-700	Shale and Crushed Dolomite	Km 350-590	
Bedding Failure	30	40	35-40	30	200	Shale	Total	P2
Bedding Failure	30-35	40	35-40	30	200	Shale and Saturated Dolomite	Km 240-350	P3
Small Falling	55	75	40-50	50-75	400-1000	Wet	Km 350-660	

						Dolomite		
No Hazard	60	80	50-60	>75	1500-6500	Dolomite	Km 240-480	P4
Bedding Failure	25-30	40	25-40	25-30	50-200	Shale	Km 480-570	
Small Falling	50	75	40-50	60-80	700-1500	Dolomite	Total	P5
Small Falling	55	80	60	90	>6000	Siltstone	Km 60-110	P6
Bedding Failure	30-35	40	35-40	30	200	Shale	Km 110-240	
No Hazard	55	75	50-60	>75	1500-6500	Dolomite	Km 240-350	
Block Failure	35	40	35-40	35-55	200-500	Shale and Crushed Dolomite	Km 350-540	

۷. نتیجه گیری

همانطور که بیان شد، تونل به منظور دسترسی به لایه شیلی فسفات دار در سازند سلطانیه (واحد شیل میانی SH2) با طول حدود ۱۳۰۰ متر حفاری شده است. با توجه به تلفیق بررسی‌های سطحی (شواهد گسله، زون‌های خردشده و لایه بندی) و مطالعات ژئوالکتریک (مقاومت الکتریکی)، چهار زون زمین شناسی از نظر مقاومت الکتریکی قابل می‌باشد که شامل ۱- دولومیت سازند سلطانیه یا سیلتستون سازند باروت سالم با شکستگی‌های معمول و شرایط مرطوب با مقاومت الکتریکی بیشتر از $1500 \Omega m$ ($RMR > 45$) مناسب برای تونلسازی ۲- دولومیت خردشده و گسله و اشباع با مقاومت 400-1000

Ωm (RMR=40-45) که دارای پتانسیل ریزش و تخریب بلوکی است ۳- دولومیت شدیداً خرد شده و شیل خشک با مقاومت $200-400 \Omega m$ (RMR=30-40) که بخش اعظم مخاطرات تونل (نفوذ آب، ریزش بلوکی و واریزه‌ای و غیره) مربوط به این بخش می‌باشد و ۴- شیل مرطوب و اشباع با مقاومت کمتر از $200 \Omega m$ که کاملاً ناپایدار بوده و احتمال ریزش کلی و آبی و لهیدگی در سنگ وجود دارد و هدف اصلی انجام مطالعات عدم برخورد به این میان لایه در حین تونلسازی می‌باشد.

منابع

- زهدی، ا.، عاصمی، ف.، لکی روحانی، ع.، ۱۳۹۶، مدل دولومیتی شدن سازند سلطانیه در جنوب باختر زنجان، نشریه علوم زمین، شماره ۱۰۴، صفحه ۱۷-۲۸.
- فامرینی بزچلوئی، م.، عباسی، ن.، سلسانی، آ.، زهدی، ا.، ۱۳۹۹، مرز نئوپروتروزوئیک- کامبرین در سازند سلطانیه بر مبنای مطالعات ایکنولوژی، برش سید کندی، کوه‌های سلطانیه، شمال باختری ایران، نشریه علوم زمین، شماره ۱۱۷، صفحه ۱۶۳-۱۷۴.
- Ammar, A. I., Kamal, K. A., 2018, Resistivity method contribution in determining of fault zone and hydro-geophysical characteristics of carbonate aquifer, eastern desert, Egypt, Applied Water Science, 1, 1-28.
- Andrade R., 2011, Intervention of Electrical Resistance Tomography (ERT) in Resolving Hydrological Problems of a Semi-Arid Granite Terrain of Southern India, Journal Geological Society of India, 78, 337-344.

- Chambers, J. E., Kuras, O., Meldrum, P. I., 2006, Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site, *Geophysics*, 6, 231-239.
- Dastanboo, N., Li, X. Q., Gharibdoost, H., 2020, Comparison between electrical resistivity tomography and tunnel seismic prediction 303 methods for detecting the water zone ahead of the tunnel face: A case study, *Open Geosciences*, 12, 1094-1104.
- Griffiths, D. H., King, R. F., 1981, *Applied Geophysics for Geologists and Engineers*, Pergamon Press, New York, P 236.
- Hasan, M., Shang, Y., Shao, P., Yi, X., Meng, H., 2021, Geophysical Research on Rock Mass Quality Evaluation for Infrastructure Design, *Earth and Space Science*, 10, 1-17.
- Hong, C. H., Cho, G. C., Hong, E. S., Baak, S. H., 2017, Anomaly Prediction Ahead Tunnel Face Using Tunnel Electrical Resistivity Prospecting System (TEPS) in Danyang, *ScienceDirect*, 11, 855-861.
- Kang, M., Pham, K., Kwon, K., Yang, S., Choi, H., 2023, Predicting geological risks ahead of a tunnel face using electrical resistivity survey: A numerical and machine learning approach, *Tunneling and Underground Space Technology*, 1-35.
- Panek, T., Hradecky, J., Silhan, K., 2008, Application of Electrical Resistivity Tomography (ERT) in the Study of Various Type of Slope Deformation in Anisotropic Bedrock (Case Study: from the Flysch Carpathians), *Studio Geomorphological Carpatho Balacania*, 2, 57-73.
- Perrone, A., Lapenna, V., Piscitelli, S., 2014, Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review, *Earth-Science Reviews*, 135, 65-82.
- Reynold, J. M., 2011, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 712.
- Shao, P., Shang, Y., Hasan, M., Yi, X., Meng, H., 2021, Integration of ERT, IP and SP Methods in Hard Rock Engineering, *Applied Sciences*, 11, 1-15.