شناسایی مخاطرات تونل‌زنی در نواحی مشکل‌دار و پیچیده زمین با تلفیق مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوفیزیک (مطالعه موردی تونل سبزکوه)

مجید طارمی
دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر.
پست الکترونیک:
majid.taromi@yahoo.com

امیرحسین اقبالی*
استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر.
پست الکترونیک:
eghbali@iiau.ac.ir

تونل‌زنی در ناحیه زاگرس ایران به‌دلیل پیچیدگی‌های فراوان زمین‌شناسی، همواره با مخاطرات زیادی روبرو بوده است. وجود گسل‌های فراوان، زمین‌لغزش‌ها، سطح بالای آب زیرزمینی از جمله مهم‌ترین این مخاطرات هستند که فرآیند تونل‌زنی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور به طول حدود ۱۱ کیلومتر در رشته کوه‌های زاگرس در جنوب غربی ایران با استفاده از روش تونل‌زنی سنتی و مکانیزه، حفاری شده است. مطالعات اولیه در ساختگاه تونل نشان می‌دهد که حدود ۳۵۰ متر از تونل در آبرفت قرار دارد. پس از حفاری ۳۷ متر از تونل به روش سنتی، مشکلات زمین‌شناسی و روش نامناسب حفاری تونل باعث ریزش تونل و گسیختگی دهانه ورودی آن شده است. به‌منظور عبور از ناحیه ریزشی و حفاری ایمن، باتوجه‌به پیچیدگی مسیر تونل و محدود بودن نتایج مطالعات اولیه ژئوتکنیک در شناسایی مخاطرات پیش رو در بخش ابتدایی تونل سبزکوه، یک برنامه جامع مطالعات شامل مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی، برداشت‌های صحرایی و بررسی‌های ژئوفیزیک انجام شد. مطالعات ژئوتکنیک شامل برداشت‌های صحرایی و نمونه‌برداری برجا بود. مطالعات ژئوفیزیک نیز شامل ژئوالکتریک و لرزه‌نگاری انعکاسی کم‌عمق بوده است. تلفیق این مطالعات، وجود زون‌های گسله آبدار و همچنین سطح لغزش را در مسیر نشان می‌دهد. بنابراین مشاهده می‌شود که در نواحی پیچیده و مشکل‌دار زمین، تلفیق مطالعات، سطح گسترده و کامل‌تری از اطلاعات مربوط به ناحیه مورد مطالعه را به‌دست می‌آورد که منجر به تصمیم‌گیری آگاهانه و بهتری از شناسایی مخاطرات و در نهایت تهیه یک مدل زمین‌شناسی با حداقل ریسک می‌شود.

واژگان کلیدی: تونل سبزکوه، مدل زمین‌شناسی، مخاطرات، ژئوفیزیک.

۱- مقدمه

روش‌های حفاری و نمونه‌برداری ژئوتکنیک به‌طور مستقیم، زمین را مورد بازدید و شناسایی قرار می‌دهند. درحالی‌که، در روش‌های ژئوفیزیکی، مشخصات زمین براساس ارتباط بین خواص خاک، سنگ و خصوصیات امواج فیزیکی حاصل می‌شود. بر همین اساس، اطمینان کمتری نسبت به حفاری وجود دارد. از طرف دیگر، اطلاعات حاصل از حفاری از نقاط پراکنده‌ای به‌دست می‌آید که با اضافه کردن قضاوت مهندسی و تحلیل‌های مبتنی بر تجربه، تغییرات لایه‌های زیرسطحی در بین این نقاط، تخمین زده می‌شود. به‌طورکلی، با وجود کاستی‌هایی که روش‌های ژئوفیزیک در بیان دقیق خواص لایه‌های زمین دارند؛ ولی به‌دلیل اینکه نتایج را به‌طور پیوسته ارائه می‌دهند، می‌توانند به‌عنوان مکمل روش‌های ژئوتکنیک و برداشت‌های صحرایی به‌کار گرفته شوند [۱ و

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۱۰، بازنگری ۱۳۹۶/۰۵/۲۸، پذیرش ۱۳۹۶/۰۶/۰۳.
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22091/cer.2017.2031.1081

۲]. مهم‌ترین کاربرد روش‌های ژئوفیزیک در اکتشاف ساختگاه تونل‌ها، تعیین موقعیت غیرعادی است که باید به‌وسیله روش‌های مستقیم و دقیق‌تر بررسی شود.

معمولا در یک برنامه جامع مطالعات ژئوتکنیک، کاوش‌های ژئوفیزیک قبل و بعد ار حفاری‌ها کارایی دارند. ترکیب و تلفیق این مطالعات، باعث می‌شود که سطح گسترده و کامل‌تری از اطلاعات مربوط به ناحیه مورد مطالعه به‌دست آید. بنابراین، طرح‌ریزی یک برنامه جامع مطالعات شامل بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوفیزیک در شرایط پیچیده و مشکل‌دار زمین‌شناسی، شرط اصلی و اساسی برای طراحی و ساخت یک فضای زیرزمینی با حداقل ریسک است [۳- ۷].

تونل انتقال آب سبزکوه به طول ۱۰۶۱۷ متر به دو روش سنتی و مکانیزه در ایران و در استان چهارمحال و بختیاری در ناحیه زاگرس مرتفع حفاری شده است. مطالعات اولیه نشان می‌دهد که حدود ۳۵۰ متر از تونل در آبرفت قرار دارد. باتوجه‌به طول کم این ناحیه و مسائل اقتصادی در انتخاب ماشین حفار، این بخش از تونل به شیوه سنتی حفاری شد.

پس از حفاری و تحکیم دهانه ورودی و پیش از آغاز حفاری تونل، نشانه‌هایی از ناپایداری در شیب‌ها مشاهده شد. پس از حفاری ۳۷ متر از تونل به‌روش سنتی، شیب زیاد لایه‌ها، مشخصات ضعیف ژئوتکنیکی لایه‌های خاکی، برخورد به سطح لغزش قدیمی، زهکشی نامناسب تونل، ترانشه و روش نامناسب حفاری تونل باعث ریزش در تونل، گسیختگی دهانه ورودی تونل و ایجاد حفره‌ای به قطر ۲۲ متر در آن گردید.

پس از ریزش اتفاق افتاده با در نظر گرفتن شرایط مشکل‌دار و پیچیده زمین‌شناسی پیش رو، رویکرد طراحی و اجرا مورد بازبینی قرار گرفت. باتوجه‌به پیچیدگی مسیر تونل و محدود بودن نتایج مطالعات اولیه ژئوتکنیک در شناسایی مخاطرات موجود در بخش ابتدایی تونل سبزکوه، برنامه جامع مطالعات در این ناحیه طرح‌ریزی شد. این برنامه شامل ترکیب مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی، برداشت‌های صحرایی و ژئوفیزیک بود.

مطالعات ژئوتکنیک تکمیلی شامل حفاری و نمونه‌برداری از داخل حفره ایجاد شده در دهانه ورودی و بازبینی نتایج لاگ گمانه‌های حفاری شده می‌باشد. برداشت‌های صحرایی نیز شامل حفاری ترانشه در دو طرف دهانه ورودی به عمق ۵ و طول ۲۰ متر و همچنین برداشت‌های سطحی بود. روش‌های ژئوالکتریک در ۳۵۰ متر ابتدایی تونل و لرزه‌نگاری انعکاسی کم‌عمق در سه کیلومتر مسیر تونل، از جمله اقداماتی بود که برای مطالعات ژئوفیزیک انجام گرفت. تلفیق و ترکیب این مطالعات، منجر به اصلاح و بازبینی پروفیل زمین‌شناسی و ارائه یک مدل زمین‌شناسی با مشخص کردن مخاطرات به‌منظور اصلاح روش حفاری و پیش‌بینی تمهیدات بهسازی در حفاری بخش ابتدایی تونل سبزکوه شد.

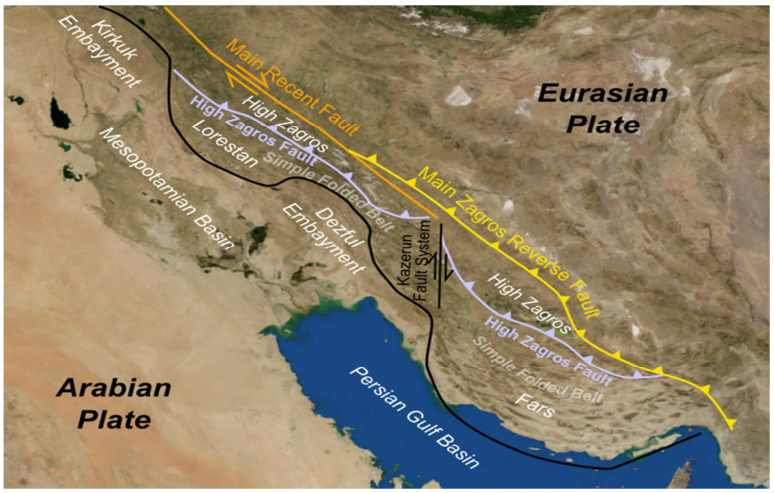
۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

ناحیه مورد بررسی از نظر تقسیمات کشوری در استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است. ورودی تونل در بخش جنوبی دریاچه سد چغاخور و شمال رشته کوه‌های کلار است که این ناحیه در بخش زاگرس مرتفع قرار دارد. زاگرس مرتفع، باریکه‌ای از کمربند راندگی زاگرس در جنوب غربی ایران است که عرض آن به ۸۰ کیلومتر می‌رسد. این منطقه از شمال به گسل راندگی اصلی (MZF[1])، از جنوب توسط گسل زاگرس مرتفع (HZF[2]) و از نظر ارتفاعی، بلندترین نقطه زاگرس محسوب می‌شود [۸]. همچنین فعالیت لرزه‌ای در این ناحیه نسبت به قسمت‌های دیگر، بیشتر است (شکل ۱).

در محدوده مورد مطالعه، گسل سولقان[3]، روی برش ساختاری با شیب حدود ۴۰ تا ۶۵ درجه و در فاصله ۰+۳۸۰ (کیلومتراژ ۱۰+۲۳۷) متری از دهانه ورودی تونل

[1]- Main Zagros Fault
[2]- High Zagros Fault
[3]- Solaghan

قرار دارد. گسل راندگی سولقان با حدود ۱۳۸ کیلومتر درازا و راستای شمال غربی- جنوب غربی با شیب به سوی جنوب غرب در مجاورت شهرستان کوهرنگ در غرب شهرکرد قرار گرفته است. این گسل، سبب رانده شدن شیل و سنگ ماسه کامبرین بر روی سنگ دولومیت‌های پرمین و سنگ آهک‌های کرتاسه شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت گسل‌های زاگرس [۸].

شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ناحیه مورد مطالعه.

در بخش ابتدایی تونل سبزکوه، گسل سولقان دارای انشعاباتی است که از عمق به سمت سطح، گسترش یافته و تحت نام STF[۴] نامگذاری شده‌اند. در راستای این گسل، چشمه‌های متعددی از جمله چشمه ساکی‌آباد (آلوقره) رخنمون دارد. عملکرد این گسل باعث بهم‌ریختگی و پیچیدگی لایه‌های زمین‌شناسی منطقه شده است (شکل ۲). گسل STF1، اولین گسل از بخش ورودی تونل، یکی از انشعابات گسل سولقان است. هیچ شاهد سطحی از این گسل در ناحیه بخش ورودی تونل وجود ندارد. شناسایی این گسل برمبنای مطالعه گمانه‌ها و اطلاعات به‌دست آمده از عملیات ژئوفیزیک گرانی‌سنجی است. این اطلاعات، بیانگر آن است که این گسل نیز دارای شیبی نزدیک به گسل سولقان و در جهت آن می‌باشد و در فاصله ۰+۲۳۵ متری از دهانه شمالی تونل با پهنه گسلی آن برخورد خواهد نمود. این گسل بر روی برش ساختاری، دارای شیب حدود ۲۵ تا ۶۰ درجه است.

۳- زمین‌شناسی مهندسی

[4]- Solaghan Trust Fault

در دهانه ورودی تونل انتقال آب تونل سبزکوه، دو حلقه گمانه (BH-A، BH-C) حفاری شده بود. با توجه به جدول ۱، مشخصات ژئوتکنیک خاک براساس نتایج آزمایشات انجام گرفته، جهت استفاده در تحلیل پایداری شیب و تونل در نظر گرفته شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک ترانشه.

جنس مصالح	$\gamma(gr/cm^3)$	$\phi(\deg.)$	$C(Kg/cm^2)$
ML	۱/۹۶	۱۷	۰/۲۸
SC-SM	۱/۹۹	۲۹	۰/۰۵
CH-CL	۱/۸۰	۱۷	۰/۸

باتوجه‌به شواهد محلی و نتایج گمانه حفاری شده در دهانه ورودی، زمین‌شناسی این محدوده شامل آبرفت‌ها و واحدهای واریزه‌ای حاشیه ارتفاعات است. براساس مشاهدات انجام شده و موقعیت گمانه‌های حفاری شده، ساختار زمین‌شناسی در بخش دشت سیلابی با بخش پای دامنه متفاوت بوده و ساختار زمین‌شناسی محدوده دهانه ورودی از واحدهای با ترکیب ماسه، رس و سیلت تشکیل شده است. همچنین سطح آب زیرزمینی با توجه به گمانه‌ها و پایش‌های سطحی، بالا است.

۴- ناپایداری دهانه ورودی و ریزش تونل

مطابق با نتایج مطالعات ژئوتکنیک انجام شده، تحلیل پایداری دهانه ورودی تونل با لحاظ کردن مشخصات ژئوتکنیک جدول ۱ انجام شد. نتایج تحلیل پایداری تونل نیز پایداری جبهه کار تونل را با حفاری تمام مقطع و گام ۱/۵ متر نشان می‌داد. پس از اتمام حفاری و تکمیل پوشش بتنی ترانشه و پیش از آغاز حفاری تونل، ترک‌هایی در سطوح اسلب بتنی و در کانال جمع‌آوری آب‌های سطحی سرترانشه مشاهده شد. این زنگ خطر برای مهندسان ژئوتکنیک باعث شد که یک سیستم رفتارنگاری با استفاده از نقاط نقشه‌برداری را برای پایش ترانشه در نظر بگیرند. به همین منظور، تعداد ۹ نقطه در امتداد مسیر تونل و در پله‌های دهانه ورودی تونل قرار داده شد. نتایج رفتارنگاری انجام شده، جابه‌جایی‌هایی را در دو راستای Y و Z نشان داد که حاکی از ناپایداری دهانه ورودی تونل بود [۹].

در متراژ ۳۷ از حفاری تونل، برخورد با لایه‌های خاکی با مشخصات ژئوتکنیک ضعیف، شیب زیاد لایه‌ها، برخورد به سطح لغزش قدیمی، لایه‌بندی با شرایط پیچیده زمین‌شناسی و زهکشی نامناسب تونل و ترانشه، باعث ریزش در جبهه کار حفاری تونل (شکل ۳) و گسیختگی ترانشه و ادامه ریزش‌ها باعث ایجاد حفره‌ای به قطر ۲۲ متر در دهانه ورودی تونل شد (شکل ۴).

شکل ۳- ریزش تونل سبزکوه.

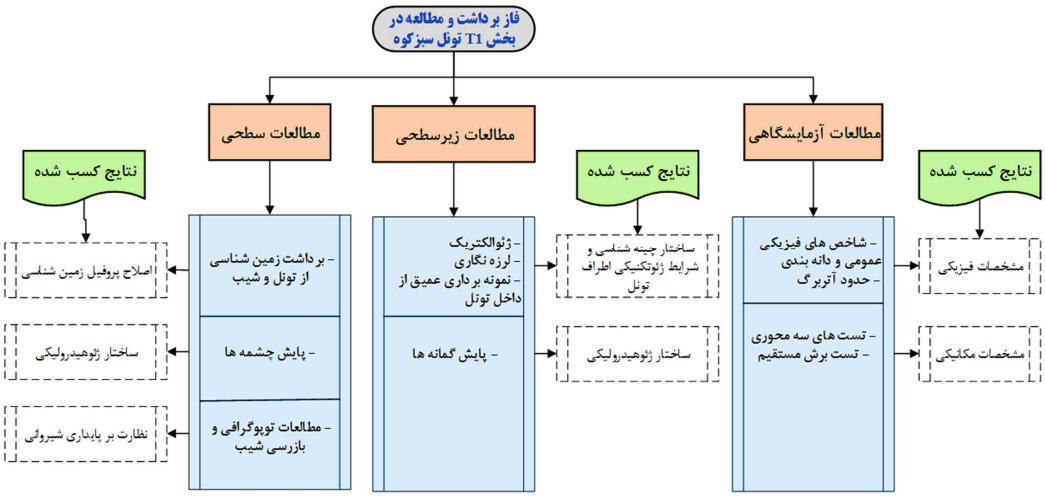
شکل ۴- حفره ایجاد شده در دهانه ورودی.

۵- روش تحقیق

درصورتی‌که فرآیند طراحی و اجرای یک سازه زیرزمینی براساس مدیریت آگاهانه و بهره‌گیری از یافته‌های به‌دست آمده از مطالعات پیش از اجرا و حین اجرا باشد که بتواند رفتار یک سازه زیرزمینی را از ابتدای

کار حفاری کنترل کند؛ دیگر مهم نیست که شرایط ژئوتکنیک، زمین‌شناسی و همچنین محدودیت‌های زیست‌محیطی و معماری پروژه، چگونه در نظر گرفته شود. این رویکرد، تنها روشی است که می‌تواند در تمام انواع زمین‌ها و محدودیت‌ها با موفقیت همراه باشد [۱۰].

ارزیابی محیط پیرامونی نسبت به عملیات حفاری تونل، مبتنی بر نتایج درست مرحله برداشت و مطالعه است. بنابراین، ضروری است که نتایج به‌دست آمده از این مرحله، در قالب «حس همکاری متقابل بین زمین‌شناس و مهندس طراح» مورد بحث و مطالعه قرار گیرد. با این رویکرد، مهندس طراح تصویری دقیق از شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیک منطقه خواهد داشت و مرحله تشخیص عیب، شناسایی چالش‌ها، مشکلات و رفع آنها را با اطمینان خاطر بهتری دنبال خواهد کرد. این در حالی است که به این موضوع در مراحل حفاری بخش ابتدایی تونل سبزکوه پیش از ریزش اهمیت داده نشده بود و ریزش تونل و توقف حفاری را به دنبال داشت. شکل ۵، برنامه مطالعات جامع پیش‌بینی شده در فرآیند حفاری تونل سبزکوه پس از ریزش را نشان می دهد.

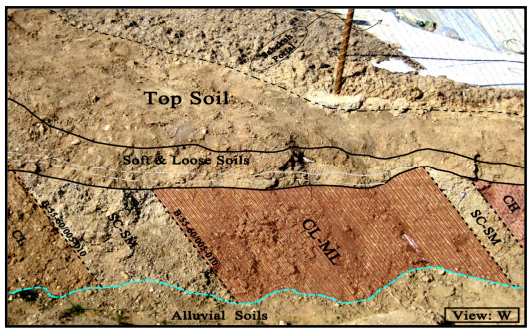


شکل ۵- فرآیند برنامه جامع مطالعات در بخش ابتدایی تونل سبزکوه.

۵-۱- مطالعات سطحی

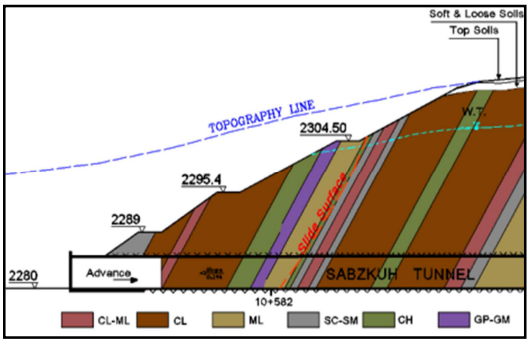
به‌منظور بررسی دقیق‌تر و بازبینی مطالعات ژئوتکنیک قبلی انجام شده و تحلیل مجدد پایداری شیب با استفاده از داده‌های به‌روز شده و واقعی، در مرحله اول، برداشت‌هایی از داخل حفره ایجاد شده روی دهانه ورودی صورت گرفت. همچنین باتوجه‌به تنوع لایه‌بندی مشاهده شده، درون حفره ایجاد شده، در دهانه ورودی، نمونه‌برداری از لایه‌های خاک انجام شد و پروفیل زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه، بازبینی و اصلاح شد.

همان‌طورکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، به‌منظور تکمیل این مطالعات، در دو سمت شرق و غرب ترانشه، کانال‌هایی حفاری و شیب و تناوب لایه‌ها بررسی گردید.



شکل ۶- لایه‌بندی ترانشه حفر شده در دو سمت ترانشه.

براساس شکل ۷، نتایج برداشت‌های سطحی، لایه‌های متناوبی از رسوبات آبرفتی با شیب بین ۷۵ تا ۸۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل ۷- پروفیل زمین‌شناسی اصلاح شده ترانشه.

۵-۲- مطالعات زیرسطحی

در بررسی‌های کم‌عمق، روش‌های الکتریکی و لرزه‌نگاری شکست مرزی، از تنوع و کاربرد بیشتری برخوردارند. مواردی از قبیل سهولت، سرعت انجام عملیات و هزینه پایین، موجب کاربرد بیشتر این روش‌ها در بررسی‌های کمی و کیفی مطالعات مهندسی محدوده ساختگاه تأسیسات، سازه‌های بزرگ و زمین‌لغزش‌های خطرزا شده است [۱۱].

تجربه چندساله مطالعات ژئوفیزیک نشان داده است که تلفیق نتایج روش‌های ژئوفیزیک، منجر به جواب‌های پایدارتر و قابل‌اعتمادتر برای حل مسائل موردنظر می‌شود. به‌عنوان نمونه می‌توان به مطالعات آزادی و همکاران برای شناسایی گسل کهریزک با استفاده از روش‌های ژئوفیزیک اشاره کرد [۱۲]. هدف اصلی این مطالعه، بررسی کارایی مجموعه‌ای از روش‌های ژئوفیزیک، شامل روش ژئوالکتریک و روش لرزه‌نگاری در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، به‌ویژه محاسبه سطح لغزش و حجم توده‌های ریزشی در حاشیه مسیر راه‌آهن می باشد.

به‌طورکلی، علت استفاده از روش ژئوالکتریک، قدرت تفکیک بالای این روش برای شناسایی لایه‌های آبدار در گستره لغزش است که موضوعی مهم در تسریع رانش توده‌های ناپایدار به‌شمار می‌رود. ژئوالکتریک از کاربردی‌ترین روش‌های کاوش ژئوفیزیک است که علاوه‌بر کاربرد در مطالعات مهندسی، کارایی قابل‌توجهی در شناسایی و بررسی عوارض مختلف زمین‌شناسی از جمله زمین‌لغزش‌ها به لحاظ دقت و سرعت انجام روش دارد. از طرف دیگر، استفاده از روش لرزه‌نگاری، به دلیل دقت زیاد، توان تفکیک بالا و نفوذ قابل‌توجه، بسیار کارآمد می‌باشد.

در برنامه مطالعات تکمیلی، برداشت‌های ژئوالکتریک به روش آرایش متقارن شلومبرژه انجام شده است. این مطالعات، در ۵۰۰ متر ابتدایی تونل و در چهار پروفیل انجام شد (شکل ۸). درحالی‌که برداشت‌های لرزه‌نگاری، با گیرنده‌های قائم موج تراکمی به روش لرزه‌نگاری شکست مرزی با استفاده از چشمه (P) انرژی ترکیبی چکش و مواد ناریه انجام شده است.

شکل ۸- پلان پروفیل‌های برداشت ژئوالکتریک.

در روش لرزه‌نگاری به‌منظور تعیین لایه‌ها، تشخیص شکستگی‌های احتمالی و روند آنها، تعداد ۹ خط برداشت با طول رکورد ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه، با فواصل نمونه‌گیری ۶۲/۵ میکروثانیه و حداکثر پوشش ۲۴۰۰٪ برداشت شده است.

در جدول ۲، پارامترهای عملیاتی برداشت لرزه‌نگاری انعکاسی کم‌عمق در امتداد خطوط برداشت محل تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور نشان داده شده است.

براساس پردازش‌های انجام شده بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزارهای مدل‌سازی، وضعیت لایه‌بندی و سطح لغزش به‌صورت پروفیل دوبعدی نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات و پارامترهای مورد استفاده در روش لرزه‌نگاری.

دستگاه	GEOD
فرمت ثبت داده‌ها	SEG2
طول رکورد (ms)	۱۰۰۰
فواصل نمونه‌گیری (ms)	۰/۰۶۲۵
پوشش	۲۴
طول هر پروفیل (m)	۵۹۴
تعداد کانال	۲۴
فواصل گیرنده‌ها (m)	۱۸
نوع چشمه	Dynamite
فواصل چشمه‌ها (m)	۹ و ۱۸
تعداد برانبارش	۱
نوع ژئوفون	GEOSPACE, 28HZ

۶- نتایج و بحث

۶-۱- لرزه‌نگاری

پروفیل‌های شماره ۱ و ۲ در شکل ۹، در محدوده‌ی ۲۰۷- الی ۶۰۷ متری دهانه ورودی تونل واقع شده‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده در پروفیل ۱، سرعت موج طولی، حداکثر ۳۰۰۰ متر بر ثانیه است. محدوده‌ی با سرعت کمتر از ۲۰۰۰ متر بر ثانیه نشان‌دهنده روند رسوبات آبرفتی است. حداکثر عمق این محدوده، حدود ۸۰ متر می‌باشد. در داخل این محدوده، کاهش سرعت در محل ۴۷-صفر، ۱۴۰-۹۰ و ۲۷۰-۲۲۰ متری دهانه ورودی تا عمق حدود ۵۰ متری دیده می‌شود که به وجود شکستگی‌های محلی در آن مرتبط است. در ابتدای پروفیل نیز تغییرات جانبی سرعت از سطح تا عمق دیده می‌شود.

در ۳۵۰ الی ۳۸۰ متری دهانه ورودی تونل، تغییرات شدید جانبی سرعت از حدود ۲۵۰۰ به ۳۵۰۰ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود. این تغییرات، به‌دلیل وجود گسل سولقان ایجاد شده است (شکل ۹). از حدود ۳۵۰ متری دهانه ورودی، سرعت افزایش یافته و ضخامت لایه با سرعت کمتر از ۲۰۰۰ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی سطحی و مقطع لرزه‌نگاری انعکاسی نیز تفسیر شد؛ در این موقعیت، زمین‌شناسی سطحی از رسوبات آبرفتی به دولومیت برشی تغییر می‌کند.

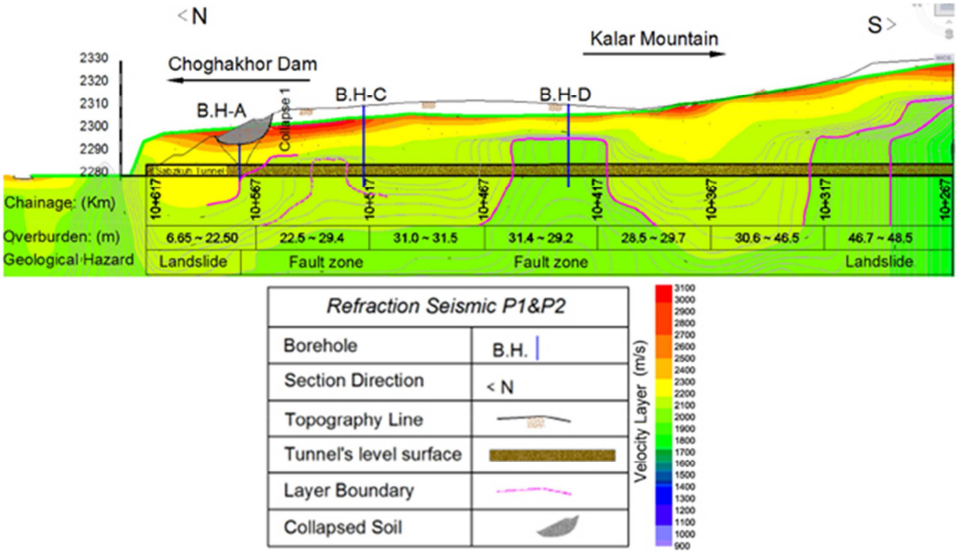
۶-۲- ژئوالکتریک

در متراژ حدود ۲۴۰ تا ۲۸۰ متر یک زون گسله احتمالی SFTF[5] دیده شده است. باتوجه‌به نتایج به‌دست آمده در بخش های (الف) و (ج) در شکل ۱۰، از متراژ حدود ۲۴۰ متر به بعد، ادامه تونل در داخل بستر کم مقاومت الکتریکی خواهد بود که این مقاومت الکتریکی کم، تحت تأثیر شیل یا لایه‌ای کم‌مقاومت است.

در پروفیل لرزه‌نگاری و همچنین مطالعات ژئوالکتریک (شکل‌های ۹ و ۱۰)، در متراژ ۴۰ مسیر تونل، یک گودافتادگی و تغییر در نوع لایه‌بندی مشاهده می‌شود که وجود سطح لغزش را در تونل تأیید می‌کند. همچنین براساس قسمت های (الف) و (ج) در شکل ۱۰، در پروفیل مسیر A و C نیز گسل F4 مشاهده می‌شود که دلیل بر وجود ناپیوستگی و شکستگی در این ناحیه است. در متراژ بین ۷۰ تا ۹۰ متر تونل نیز در پروفیل لرزه‌نگاری و ژئوالکتریک شواهدی بر وجود گسل F3 وجود دارد. مطابق با پروفیل‌های ژئوالکتریک در شکل ۱۰، مسیر تونل از متراژ ۸۰ تا ۱۹۰ و ۲۵۰ تا ۳۱۰ در ناحیه ماسه‌ای آبدار

[5]- Solaghan Fault Trust Fault

قرار دارد و در متراژ بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر تونل، یک زون گسله مشاهده می‌شود. در متراژ بین ۲۳۰ تا ۲۵۰ متر در پروفیل ژئوالکتریک، در مسیر A در بخش (الف) و B در بخش (ب) شکل ۱۰، یک زون گسله وجود دارد. مطالعات سطحی وجود زون گسله مذکور و احتمال برخورد آن با گسل سولقان را در مسیر تونل مورد توجه قرار داده است. در متراژ ۳۱۰ نیز در پروفیل‌های لرزه‌نگاری و ژئوالکتریک گسل F2 و سطح لغزش مشاهده می‌شود.



شکل ۹- مقطع عرضی برداشت لرزه‌نگاری انعکاسی کم‌عمق.

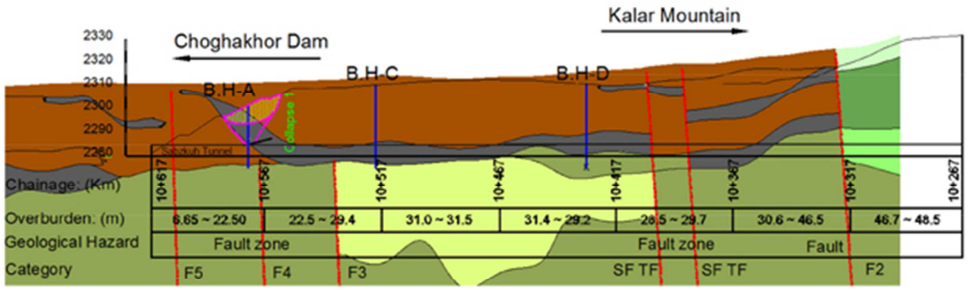
در فاصله ۷۰ تا ۲۲۰ متراژ تونل، مقاطع عرضی از مسیر تونل و عمود بر پروفیل‌های A ،B و C برداشت شد. همان‌طور که در قسمت های (الف) و (ب) در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نتایج برداشت‌ها در پروفیل‌های X11 و X12، برخورد گسل‌های F3 و F4، در متراژ بین ۷۰ تا ۸۵ متر با تونل را تأیید کرد. همچنین در بخش های (ج) و (د) مقاطع X1 و X2 (متراژ ۲۰۰ تا ۲۲۰) وجود گسل سولقان، با فاصله کمی از تونل را نشان می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

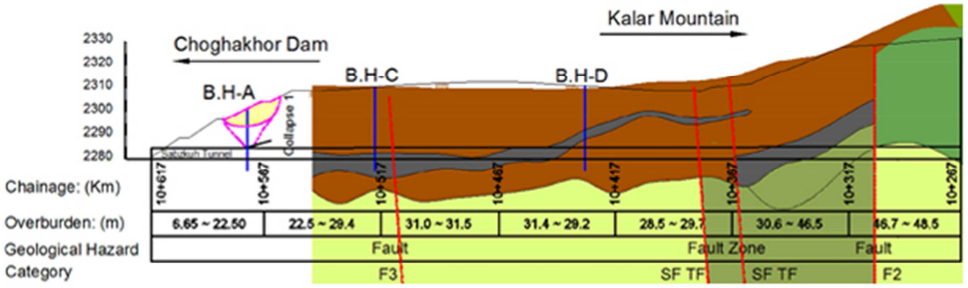
از روش‌های ژئوفیزیک، به‌دلیل اینکه نتایج را به‌طور پیوسته ارائه می‌دهند، قبل از حفاری گمانه‌ها به‌منظور کسب اطلاعات اجمالی از وضعیت ساختگاه، جنس لایه‌ها، عمق سنگ کف و بعد از حفاری گمانه‌ها برای اطمینان از عدم وجود یک عارضه غیرمنتظره، استفاده می‌شود. علاوه‌براین، روش فوق‌الذکر باعث بالا رفتن دقت نتایج حفاری، مطالعات آزمایشگاهی و تهیه مدل زمین‌شناسی می‌شود.

با تلفیق مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوفیزیک در بخش ابتدایی تونل سبزکوه، پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل با شناسایی مخاطرات احتمالی ارائه شد. مطابق با شکل ۱۲، حفاری بخش ابتدایی تونل سبزکوه در یک ناحیه گسله و با سطح آب زیرزمینی بالا قرار دارد. بنابراین لزوم استفاده از روش‌های بهسازی و پیش‌نگهداری در این ناحیه به‌منظور افزایش ایمنی و کاهش ریسک ضروری است.

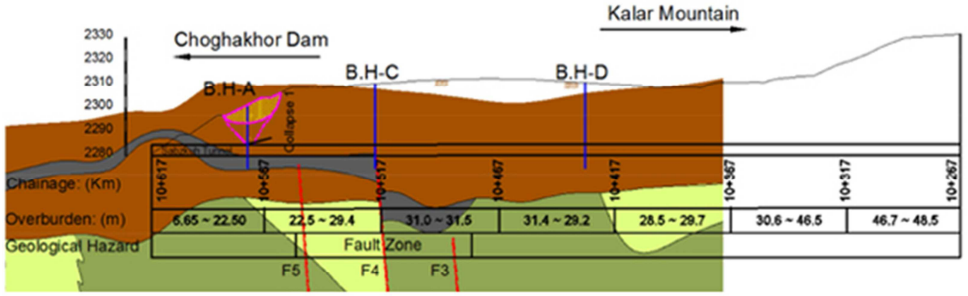
رفتارنگاری عملیات حفاری و همچنین مطالعات حین اجرا به‌منظور تدقیق و به‌روزرسانی مدل زمین‌شناسی نیز از اهمیت بسزایی برخوردار است. بدیهی است که برخی از اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی و شناسایی مخاطرات در این مرحله، قابل تشخیص نیستند. بنابراین لازم است با رفتارنگاری عملیات حفاری و همچنین مطالعات حین اجرا، مدل زمین‌شناسی تدقیق و اطلاعات آن به‌روزرسانی شود.



(الف) مسیر A



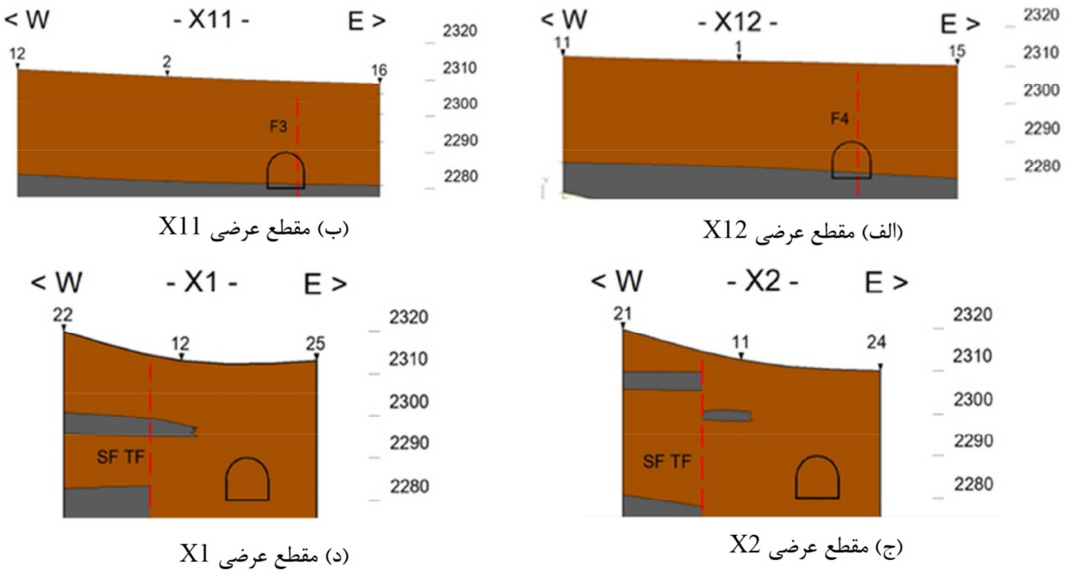
(ب) مسیر B



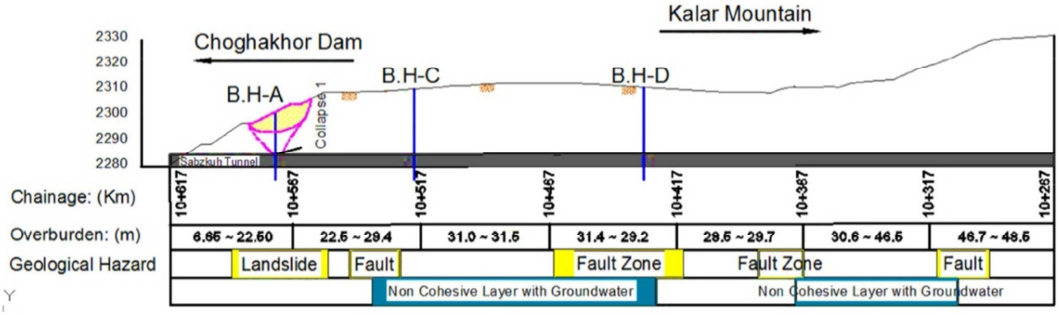
(ج) مسیر C

Geoelectric Section CRP	
Section Name	- 1 -
Sounding Number	22
Section Direction	< W
Layer Boundary	
Fault	
Collapsed Soil	
Borehole	
Alluvial Terrace	
Sandy Clay	

شکل ۱۰- پروفیل‌های طولی برداشت ژئوالکتریک.



شکل ۱۱- مقاطع عرضی برداشت ژئوالکتریک.



شکل ۱۲- مدل زمین‌شناسی پس از تلفیق مطالعات ژئوفیزیک و ژئوتکنیک.

مراجع

[1] Lehmann, B., Orlowsky, D., & Misiek, R. (2010). “Exploration of tunnel alignment using geophysical methods to increase safety for planning and minimizing risk”, *Rock mechanics and rock engineering*, *43*(1), 105-116.

[2] An, Z., Di, Q., Wu, F., Wang, G., & Wang, R. (2012). “Geophysical exploration for a long deep tunnel to divert water from the Yangtze to the Yellow River, China”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *71*(1), 195-200.

[3] Solberg, I. L., Hansen, L., Rønning, J. S., Haugen, E. D., Dalsegg, E., & Tønnesen, J. F. (2012). “Combined geophysical and geotechnical approach to ground investigations and hazard zonation of a quick clay area, mid Norway”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *71*(1), 119-133.

[4] Srinivasamoorthy, K., Chidambaram, S., Vasanthavigar, M., Anandhan, P., & Sarma, V. S. (2014). “Geophysical investigations for groundwater in a hard rock terrain, Salem district, Tamil Nadu, India”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *73*(2), 357-368.

[5] Lesparre, N., Boyle, A., Grychtol, B., Cabrera, J., Marteau, J., & Adler, A. (2016). “Electrical resistivity imaging in transmission between surface and underground tunnel for fault characterization”, *Journal of Applied Geophysics*, *128*, 163-178.

[6] Bin, L., Zhengyu, L., Shucai, L., Lichao, N., Maoxin, S., Huaifeng, S., & Yonghao, P. (2017). “Comprehensive surface geophysical investigation of karst caves ahead of the tunnel face: A case study in the

Xiaoheyan section of the water supply project from Songhua River, Jilin, China", *Journal of Applied Geophys-Geophysics*, *144*, 37-49.
[7] Gan, F., Han, K., Lan, F., Chen, Y., & Zhang, W. (2017). "Multi-geophysical approaches to detect karst channels underground—A case study in Mengzi of Yunnan Province, China", *Journal of Applied Geophysics*, *136*, 91-98.
[8] Berberian, M. (1995). "Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics", *Tectonophysics*, *241*(3-4), 193197199-195224.
[9] Eftekhari, A., Taromi, M., & Saeidi, M. (2014). "Uncertainties and complexities of the geological model in slope stability: a case study of Sabzkuh tunnel", *Int. Journal of Mining & Geo-Engineering*, *48*(1), 69-79.
[10] Lunardi, P. (2008). Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS). Springer Science & Business Media.
[11] Donnelly, L. J., Culshaw, M. G., Hobbs, P. R. N., Flint, R. C., & Jackson, P. D. (2005). "Engineering geological and geophysical investigations of a slope failure at Edinburgh Castle, Scotland", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *64*(2), 119-137.
[12] Azadi, A., Hessami, K., & Javan-Doloei, G. (2010). "Integrated geophysical methods for determining geometry of the Kahrizak Fault, Tehran, Iran", *Natural hazards*, *54*(3), 813-825.

M. Taromi

M.Sc. Student, Department of Civil & Geotechnical Engineering, Islamic Azad University Islamshahr Branch.

e-mail: majid.taromi@yahoo.com

A.H. Eghbali*

Assistant Professor, Department of Civil & Geotechnical Engineering, Islamic Azad University Islamshahr Branch.

e-mail: eghbali@iiau.ac.ir

Study of Tunneling Hazards in Difficult and Complex Ground with the Combination of Geological and Geophysical Surveys (Case Study of Sabzkuh Tunnel)

Tunneling in the Zagros region of Iran has been encountered with lots of risks due to many geological complications. Many faults, landslides, groundwater levels are among the hazards that affect the tunneling process. The Sabzkuh -Choghakhhor Water Transfer Tunnel is about 11 km long in the Zagros Mountains has been excavated by conventional and mechanized tunneling techniques. Initial studies showed that about 350 meters from the tunnel in the alluvium. After excavation 37 m from the tunnel in a conventional method, geological problems and inappropriate tunnel excavation method has caused the collapse of tunnel and the tunnel portal failure. In order to cross the collapse zone and continue the safe excavation, due to the complexity of the tunnel route and the limited results of the early geotechnical studies in identifying the leading hazards in the elementary part of the Sabzkuh tunnel, a comprehensive program of these issues, presence of faults and landslide level in the path has been illustrated. Thus, these matters in complicated and problematic ground, combination of comprehensive studies about related information of studies have turned to informative, logical decision and better understanding of risks and finally providing a geological model with minimal hazardous.

Keywords: *Sabzkuh tunnel, Geological model, Hazard, Geophysic.*

* Corresponding author