ارزیابی فرسایش تونلی در محدودهٔ روستای چشمه‌لی در استان گلستان

آیدین مرادی: *کارشناس گروه مخاطرات زیست محیطی و بلایای جوی، پژوهشکدهٔ سوانح طبیعی، تهران*
سمیه عمادالدین*: *استادیار گروه جغرافیا، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان*
علیرضا صداقت‌دهقی: *کارشناس گروه مخاطرات زیست محیطی و بلایای جوی، پژوهشکدهٔ سوانح طبیعی، تهران*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۲۹)

چکیده

یکی از انواع فرسایش‌ها، فرسایش تونلی است که با توجه به عملکرد پیچیدهٔ تشکیل و مشکلات اندازه‌گیری، در مقایسه با فرسایش‌های سطحی کمتر مطالعه شده‌است. فرسایش تونلی از جمله فرسایش‌های آبی است که وقوع آن به تغییرات بارزی در چشم‌انداز زمین و تخریب محیط زیست منجر می‌شود. روستای چشمه‌لی در ۴۵ کیلومتری شمال شرق کلاله و در ۲۷ کیلومتری جنوب غرب مراوه‌تپه در استان گلستان واقع شده‌است. مطالعات ژئوالکتریک در محدودهٔ روستای چشمه‌لی، با هدف مطالعهٔ فرسایش تونلی، چهار پروفیل به نام‌های AB، CD، EF و GH در این روستا طراحی شد و پس از برداشت داده‌های صحرایی، پردازش داده‌های به دست آمده از این مطالعات انجام شد. پژوهش حاضر با استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های ژئوالکتریک و ژئوتکنیک به منظور آشکارسازی، ارزیابی و تحلیل بخش زیرسطحی زمین انجام شد. همچنین با توجه به اینکه مطالعهٔ سطوح زیرین زمین در صورت کند و کاو هزینهٔ بالایی دارد؛ استفاده از سایر تکنیک‌های دقیق از نیازهای اساسی به نظر می‌رسد. به همین دلیل، در پژوهش حاضر از تکنیک ژئوالکتریک از شاخه‌های ژئوفیزیک استفاده شد و داده‌های به دست آمده با اطلاعات ژئوتکنیکی مورد ارزیابی و دقت‌سنجی قرار گرفت. داده‌های مربوط به مقاومت الکتریکی پس از برازش و پردازش، در نرم‌افزار تخصصی RES2dinv تحلیل و نتایج آن به صورت مقاطع ژئوالکتریکی و نقشه‌های هم‌مقاومت ارائه شد. مقادیر مقاومت ویژهٔ به دست آمده در پروفیل‌های مورد مطالعه، عمدتاً متأثر از واحدهای لسی منطقه است. روند تغییرات مقاومت الکتریکی در برخی مقاطع، به طور متناوب با افزایش یا کاهش همراه است. با توجه به میزان مقاومت ویژهٔ به دست آمده و مقایسهٔ آن با نتایج داده‌های ژئوتکنیکی، افزایش مقدار مقاومت ویژه اغلب با واحدهای سنگی (آهکی) در ارتباط است و در تحتانی‌ترین عمق مورد مطالعه آشکار می‌شود. مقاطع مقاومت الکتریکی و نقشه‌های هم مقاومت نشان داد که قرارگیری سطوح میانی با کمترین میزان مقاومت الکتریکی در بین بخش‌های نسبتاً تحکیم‌یافتهٔ سطحی و واحدهای سنگی سطوح تحتانی، شرایط را برای ایجاد فرسایش‌های تونلی فراهم نموده است. توزیع شیب توپوگرافی، با جریان‌های زیرسطحی هم سو بوده و با توجه به مهیا بودن شرایط زمین، از عوامل مهم در رخداد پایپینگ و فرسایش تونلی است. روش ژئوالکتریک با توجه به حساسیت مقدار مقاومت الکتریکی به تغییرات ساختاری در سطوح زیرین، قابلیت مناسبی دارد و در صورت استفاده، به کاهش هزینه‌ها در سایر مطالعات اجرایی منجر می‌شود.

واژگان کلیدی: روستای چشمه‌لی، ژئوتکنیک، ژئوالکتریک، فرسایش تونلی.

* نویسنده مسئول: s.emadodin@gu.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

۱ـ مقدمه

خاک یک منبع طبیعی گرانبهاست (Kudrow, 2009) و در عملکرد اکوسیستم نقش کلیدی ایفا می‌کند (Pimentel and Kounang, 1998). فرسایش خاک، فرایندی ژئومورفیک و مشکلی زیست محیطی است (Veerasingam et al, 2012 & Tosic et al, 2011) که ممکن است نتیجهٔ فعالیت‌های انسانی باشد (Dotterweich, 2008). تشدید فعالیت‌های کشاورزی، جنگل‌زدایی، تخریب یا تغییر کاربری زمین و تغییرات آب و هوایی از عوامل مهم فرسایش است (Yang et al, 2003 & Routschek et al, 2014). همچنین فرسایش خاک، یکی از تهدیدهای مهم برای اکوسیستم محسوب می‌شود (Lal, 2001)؛ زیرا در طول زمان‌های زمین‌شناسی و در سراسر جهان، نه تنها به فرسایش خاک از حوضه‌های فوقانی و انباشت رسوبات در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها منجر می‌شود (Bhattarai, 2006)، بلکه موجب از دست دادن مواد مغذی در محل فرسایش‌یافته می‌شود و انتقال مواد موجود در خاک‌های سطحی مانند آفت‌کش‌ها، مواد شیمیایی و ... ، به آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی منجر می‌شود (Marsh et al, 1996). تخمین زده شده‌است که حدود ۵۶ درصد از خاک جهان، شکل خود را در اثر فرسایش شدید آب از دست می‌دهد و اشکال مختلف این پدیده رابه وجود می‌آورد (Oldeman, 1991) که‌نه تنهابه مشکلات حوضه آبریز رودخلنه‌ها منجر می‌شود (Woodward and Foster, 1997)، بلکه به صورت موانعی برای دستیابی به اهداف توسعهٔ پایدار سازمان ملل عمل می‌کند (Keesstra et al, 2016). از سوی دیگر، فروچاله‌ها[1] فرایندهای تغییر شکل زمین است که اشکال مخروطی با ابعاد مختلفی را در مناطق کارستی و لسی به وجود می‌آورد و در صورت وقوع زیاد آن‌ها در یک منطقه، توپوگرافی خاصی را شکل می‌دهد. ایجاد فروچاله‌ها در لس‌ها به دلایل مختلفی صورت می‌گیرد و علت اصلی آن، پدیدهٔ رمبندگی در لس‌ها است که به دلیل تحکیم آبی[2] صورت می‌گیرد. وقوع فرایندهایی مانند انحلال ساختارهای سطوح زیرین و ریزش سطوح فوقانی در لس‌ها به همراه افزایش دامنهٔ رگ‌آب با افزایش درزه‌های عمودی به دلیل جریان آب در این سطوح، باعث شستگی شده و از محیط خارج می‌شود و در مراحل بعدی با توسعهٔ این فرایند، تونل‌های فرسایشی به وجود می‌آید و با ریزش سقف این تونل‌ها، فروچاله‌ها شکل می‌گیرد (Bell, 2007). سپس فروچاله‌ها پس از ایجاد و تغییرات بعدی در سطح زمین، چشم‌انداز ویژهٔ خود را به وجود می‌آورد (Giahi, 2000).

در ایران سالیانه به دلایل مختلف، مقدار زیادی از خاک‌های با ارزش به وسیلهٔ پدیده فرسایش از دسترس خارج می‌شود؛ به طوری که میزان خاک از دست رفته توسط این پدیده، حدود دو میلیارد تن تخمین زده شده‌است که ۷.۶ درصد کل فرسایش جهان را در بر می‌گیرد و هر ساله مقدار قابل‌توجهی از خاک‌ها به صورت رسوب به رودخانه‌ها وارد می‌شود (Talebi, 2011). فرسایش تونلی با توجه به عملکرد پیچیدهٔ تشکیل و مشکلات اندازه‌گیری در مقایسه با فرسایش سطحی، کمتر مطالعه شده‌است. فرسایش تونلی از جمله فرسایش‌های آبی است که وقوع آن به ایجاد تغییرات بارزی در چشم‌انداز زمین و تخریب محیط زیست منجر می‌شود. این نوع فرسایش عبارت است از: مجرای زیرسطحی رواناب که غالباً در اثر انحلال ایجاد می‌شود و چنانچه در دامن زیر شیب‌دار تشکیل شود با فروریزی سقف تونل‌ها، آبکند ایجاد می‌شود (Yamani and Akbarian, 2013).

[1] Sinkholes
[2] Hidroconsolidation

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

در این زمینه مطالعاتی با روش‌های متفاوت در مقیاس‌های مختلف انجام شـده‌اسـت. Zhu بر اسـاس مطالعه‌ای که (2002) انجام داد، بیان کرد که توان ایجاد فرسایش تونلی تحت‌تأثیر بافت خاک قرار دارد و اغلب در خاک‌های لسی ـ که از سیلت غنی می‌باشد ـ گسترش می‌یابد. شایع بودن رخداد فرسایش تونلی در خاک‌های غیر شور مانند خاک‌های لسی نیز توسط Vilson و همکاران (2015) بررسی شد که دلیل آن، تغییرات کاربری اراضی از جنگل به زمین‌های کشاورزی بود. Jakiel Bernatek و همکاران (2016)، عوامل دخیل در فرسایش تونلی را بررسی کردند؛ از جمله بافت خاک، ساختمان و مقاومت خاک، تخلخل، شیب دامنه، وزن مخصوص ظاهری و خواص شیمیایی مانند اسیدیته و نسبت جذب سدیم. آنها عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش تونلی را به فعالیت بیولوژیکی و خواص فیزیکی خاک مانند بافت و ساختمان، وزن مخصوص ظاهری کم، تخلخل بالا همراه با نفوذ آب و رواناب سطحی شدید نسبت دادند. Karim and Tucker-Kulesza (2017)، به مطالعه‌ای با عنوان نمایهٔ دوبعدی فرسایش خاک با استفاده از بررسی مقاومت الکتریکی در شرق کانزاس ایالت متحده پرداختند. در این مطالعه با استفاده از روش ژئوالکتریک، ساختارهای سطوح زیرین زمین در مناطقی که فرسایش تونلی رخنمون دارد و بزرگراه منطقه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد، بررسی شد. همچنین در این پژوهش برای مطالعهٔ فرسایش، روش‌ها و دستگاه‌های متعددی معرفی شد؛ اما توصیه شد از روش ژئوالکتریک به دلیل حساسیت پارامترهای این روش به جنس ساختارهای زمین استفاده شود. سپس مقدار مقاومت هر یک از ساختارهای خاک، شناسایی و از نظر حساسیت به فرسایش رتبه‌بندی شد. Servati و همکاران (2009) در مطالعهٔ لس‌های منطقهٔ یلی بدراق واقع در شمال شرق استان گلستان دریافتند که تراس‌های فوقانی لسی و شیلی با شیب کمتر از ده درصد، پوشش خاکی عمیق دارد. Barami و همکاران (2016)، به بررسی نقش فرسایش تونلی در تشکیل فروچاله‌های شمال کلاله در استان گلستان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بخش زیادی از فروچاله‌ها در مناطقی تشکیل شده که سنگ کف آنها غیر کارستی است. شواهد صحرایی نیز نشان داد که فرسایش تونلی در این منطقه، به شدت توسعه یافته‌است و می‌تواند عاملی برای تشکیل این فروچاله‌ها باشد. یکی از خاک‌های مستعد تشکیل فرسایش تونلی، خاک‌های لسی رمبنده است. آزمایش‌های رمبندگی انجام شده نیز نشان داد که این لس‌ها جزو نهشته‌های رمبنده است. فروچاله‌های تشکیل شده، با تشکیل و توسعهٔ فرسایش تونلی در منطقه هماهنگی کاملی دارد و به نظر می‌رسد که این فروچاله‌ها حاصل فروریزش سقف تونل‌های فرسایشی است. Kariminejad و همکاران (2020) به پایش مکانی فرسایش تونلی با استفاده از تصاویر هوایی پهپاد در اراضی بادرفت استان گلستان پرداختند. در این پژوهش با استفاده از پهپاد، فرسایش تونلی در ۲۷۰۰ هکتار از زمین‌های بادرفت شرق استان گلستان مشخص شد. تحلیل پستی و بلندی نشان داد که بیشینهٔ تراکم فرسایش تونلی در ارتفاع ۳۵۰-۳۰۰ متر، در دامنه‌های شرقی با شیب بیش از ۳۰٪ ، طول شیب کمتر از پنج متر و در نیمرخ طولی و عرضی مقعر رخ داده‌است.

مطالعات بین‌رشته‌ای و تلفیقی امروزه، در پاسخگویی به سؤالات و ابهامات پروژه‌های مهندسی نقش مهمی ایفا می‌کند. این موضوع به ویژه در حلت‌هایی که مطالعات متنوع هم‌افزایی دارند و کاستی‌های یکدیگر را برطرف می‌کنند، بسیار کارگشا است. با تلفیق مطالعات ژئومورفولوژیکی، زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی، شناسایی پدیده‌های زیرسطحی با اهداف و مقیاس‌های مختلف در تحقیقات متعدد گزارش شده‌است (Erfan, 2019). در زمینهٔ موضوع مورد مطالعه، محققان دستگاه‌های آزمایشی متعددی را برای اندازه‌گیری مستقیم فرسایش خاک در آزمایشگاه و میدان ایجاد

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

کردند و توسعه دادند. برخی از دستگاه‌های اخیر برای اندازه‌گیری فرسایش عبارتند از: فلوم نرخ فرسایش رسوب[1]، دستگاه تست فرسایش جت[2] و دستگاه عملکرد فرسایش[3]؛ در حالی که اندازه‌گیری‌های فرسایش خاک با استفاده از این دستگاه‌ها و سایر دستگاه‌ها ارزشمند است، اما اغلب زمان‌بر می‌باشد (Karim and Tucker-Kulesza, 2017). اندازه‌گیر ی مقاومت الکتریکی در مقایسه با آزمایش فرسایش، از نظر زمان و صرف هزینه سریع‌تر است و بین مقاومت الکتریکی و فرسایش خاک چندین عامل مشترک وجود دارد (Abu-Hassanein et al, 1996 & Kibria and Hossein, 2012 & Grabowski et al, 2011).

نخستین بار اشلومبرگر، استاد فیزیک مدرسهٔ عالی معدن پاریس، استفاده از روش مقاومت‌سنجی الکتریکی را در سال ۱۹۱۲ ابداع کرد و پس از آن به تدریج توسعه یافت (Telford et al, 1990). در روش ژئوالکتریک یک منبع مصنوعی، جریان الکتریسیتهٔ DC را برای عبور آن در داخل زمین به وسیلهٔ الکترودهای نقطه‌ای به کار می‌برد و هدف از این روش، ثبت اختلاف پتانسیل ناشی از ارسال جریان مستقیم به داخل زمین است (Habberjem and Watkins, 1967). آرایه‌های الکترودی متنوعی برای برداشت‌های مقاومت ویژه وجود دارد که هرکدام دارای مزایا و معایب خاص خود است. انتخاب آرایهٔ مناسب، به فضای موجود برای گسترش آرایهٔ به کار گرفته شده و سختی و کارایی آن در کاربرد مورد نظر بستگی دارد. همچنین حساسیت آرایه‌ها به ناهمگنی‌های جانبی و فصل مشترک‌های شیب‌دار نیز اهمیت به سزایی دارد (Reynolds, 1997).

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی فرسایش تونلی با استفاده از مطالعات ژئوالکتریک و ژئوتکنیکی در محدودهٔ روستای چشمه‌لی در استان گلستان است.

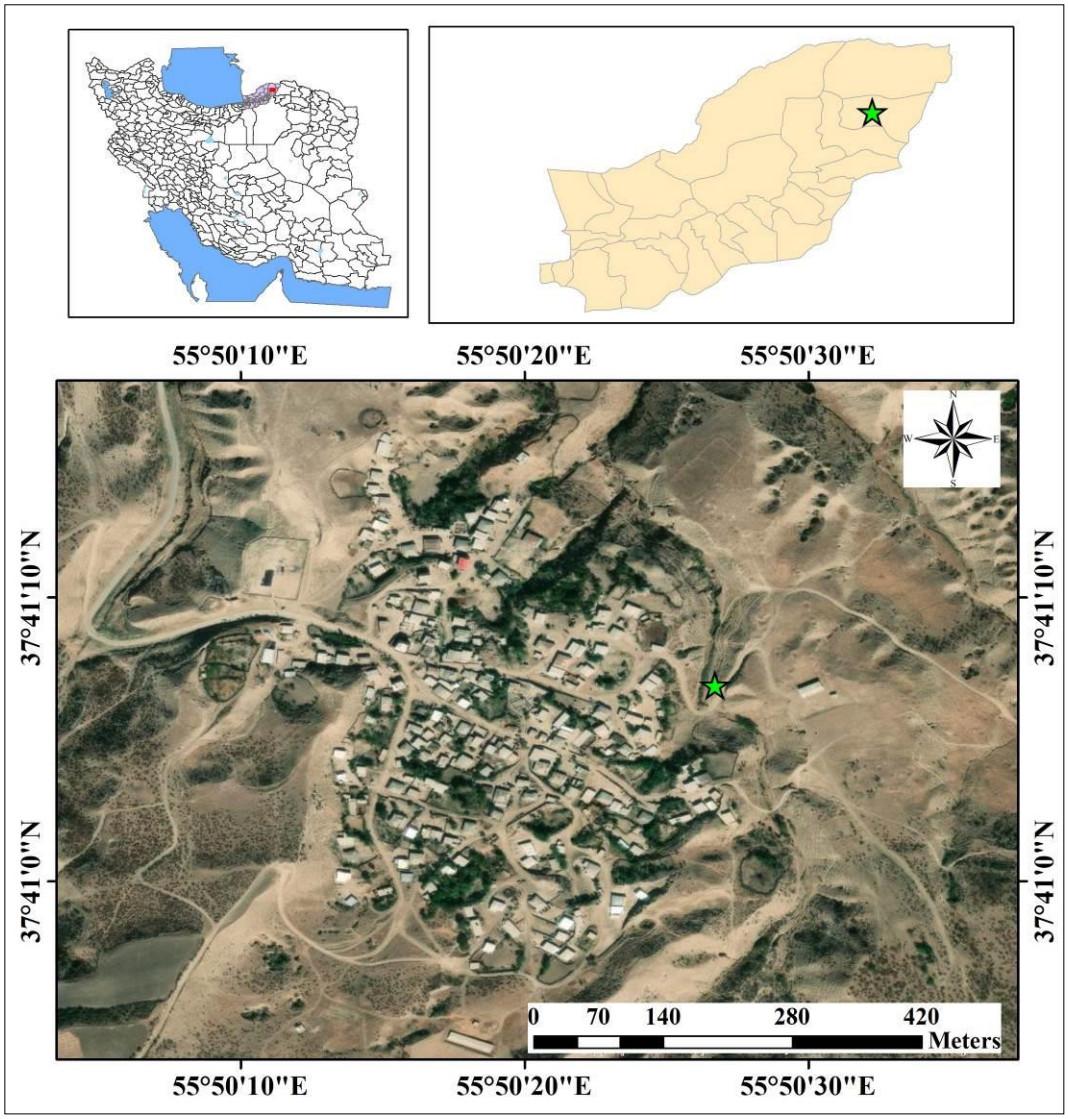
۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، روستای چشمه‌لی است. روستای چشمه‌لی از توابع دهستان شلمی، بخش گلیداغ، شهرستان مراوه‌تپه و استان گلستان است (مرکز ملی آمار، ۱۳۹۵) که در ۴۵ کیلومتری شمال شرق کلاله و در ۲۷ کیلومتری جنوب غرب مراوه تپه در استان گلستان واقع شده‌است. موقعیت این روستا در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

[1] Sediment Erosion Rate Flume (SERF, FELUM)
[2] the Jet Erosion Testing (JET) Apparatus
[3] Erosion Function Apparatus (EFA)

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]



شکل ۱: نقشهٔ موقعیت محدودهٔ مورد مطالعه (روستای چشمه‌لی)

روستای چشمه‌لی بر اساس نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ ـــ که توسط سازمان زمین‌شناسی ارائه شده ـــ در پهنهٔ پوشیده از لس واقع شده‌است که بر مبنای مشاهدات به عمل آمده، به نظر می‌رسد ضخامت نسبتاً زیادی دارد. آخرین دورهٔ نهشتگی رسوبات لسی استان گلستان با ضخامت ۱۳۰ سانتی‌متر، به دو تا سه هزار سال قبل بازمی‌گردد که با به وجود آمدن یک دوره از نوسانات نامطلوب اقلیمی همراه بوده‌است (Kiani et al.,2005). به طور کلی، هفده دوره رسوب‌گذاری لس و شانزده دورهٔ تکوین پارینه خاک در افق‌های کواترنر استان گلستان شناسایی شده است. رسوب‌گذاری لس‌ها بر روی بستر اولیهٔ زمین‌شناسی با ژئومورفولوژی معین، بدون هیچ‌گونه اختلاطی انجام شد و توالی لس ـ خاک قدیمه در اثر تغییر اقلیم مکرر شکل گرفت (Pashaei, 2003).

بر اساس پیمایش میدانی، توپوگرافی محدودهٔ روستا در شیبی حدوداً بین ده تا پانزده درصد و ارتفاع ششصد تا هفتصد متر ــ که از جهت جنوب به شمال کاهش می‌یابد ــ واقع شده‌است. در بخش‌هایی از جهت غربی و جنوبی و در خارج از بافت مسکونی روستا، میزان شیب با توجه به شکل هندسی سطح زمین به ۳۵ درصد نیز می‌رسد. در محدودهٔ

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

روستا و پیرامون آن، پدیدهٔ فرسایش با اشکال متفاوت وجود دارد. فرسایش‌های خندقی، تونلی و کنار آبراهه‌ای به طور معمول رخنمون دارند که در محدودهٔ مسکونی روستا خطرهایی را به وجود می‌آورند. مهم‌ترین عوارض مورفولوژیکی محدودهٔ روستا، وجود مسیل‌ها در جهت‌های شرقی و غربی است که با امتداد کلی جنوب به شمال به آبراهه شمالی منتهی می‌شود. جنوب روستا به ارتفاعات با زمین‌های کشاورزی محدود می‌شود. امتداد تونل‌های ایجاد شده به همراه رخنمون‌های فروچاله‌ها، در جهت شیب و منطبق بر توپوگرافی است. همچنین روستای چشمه‌لی در محدوده‌ای با اقلیم معتدل کوهپایه‌ای قرار دارد. در شکل ۲، تصاویری از محدودهٔ روستا به همراه رخنمون‌هایی از فروچاله و فرسایش تونلی در محدودهٔ مسکونی و پیرامون آن آورده شده‌است.

شکل ۲: تصاویری از موقعیت روستا، فرسایش تونلی و فروچاله‌ها

۳ـ مواد و روش

مطالعات ژئوالکتریک در محدودهٔ روستای چشمه‌لی با هدف مطالعهٔ فروچاله‌ها، کانال‌های ایجاد شدهٔ احتمالی پنهان و مسیر آنها، افق‌های خاک و واحدهای زمین‌شناسی، شکستگی‌های احتمالی، آب‌های سطحی و زیرزمینی و سنگ بستر

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

صـــورت گرفت. در مجموع، چهار پروفیل به نام‌های AB، CD، EF و GH در این روســـتا طراحی، ســـپس داده‌ها با استفاده از آرایش دو قطبی ـــ دو قطبی، با فاصلهٔ الکترودی ده متر به ازای گام‌های جدایش مختلف برداشت شد. از سال ۱۹۵۰، از آرایش‌های مختلف دوقطبی ـــ دوقطبی در اکتشافات الکتریکی به طور گسترده استفاده شد؛ به ویژه زمانی که آلپین[1]، تئوری‌های لازم را توسعه داد. در آرایش‌های دو قطبی ـــ دو قطبی، فاصلهٔ بین الکترودهای پتانسیل M و N و الکترودهای جریان A و B ثابت در نظر گرفته شد و به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از فاصلهٔ بین مراکز دو قطب، یعنی r است. با ثابت نگه داشتن فاصلهٔ الکترودی در پروفیل‌زنی مقاومت ویژه، کل آرایه روی یک مسیر مستقیم جابه‌جا می‌شود. با این شیوه، اطلاعاتی از تغییرات جانبی مقاومت ویژهٔ الکتریکی متناسب با عمق کاوش به دست می‌آید. روش‌های پروفیل‌زنی ـــ که تا حد ممکن در راستای عمود بر امتداد ساختارهای زمین‌شناسی اجرا می‌شود ـــ تغییرات مقاومت ویژه را در دو بعد به تصویر می‌کشد. برای تفسیر و مدل‌سازی داده‌های این روش، از روش‌های مدل‌سازی پیشرو و وارون استفاده می‌شود (Kolagari, 1992). مشخصات پروفیل‌های تعیین شده، برای مطالعهٔ ژئوالکتریک در جدول ۱ آورده شده‌است.

جدول ۱: مشخصات پروفیل‌های مطالعهٔ ژئوالکتریک

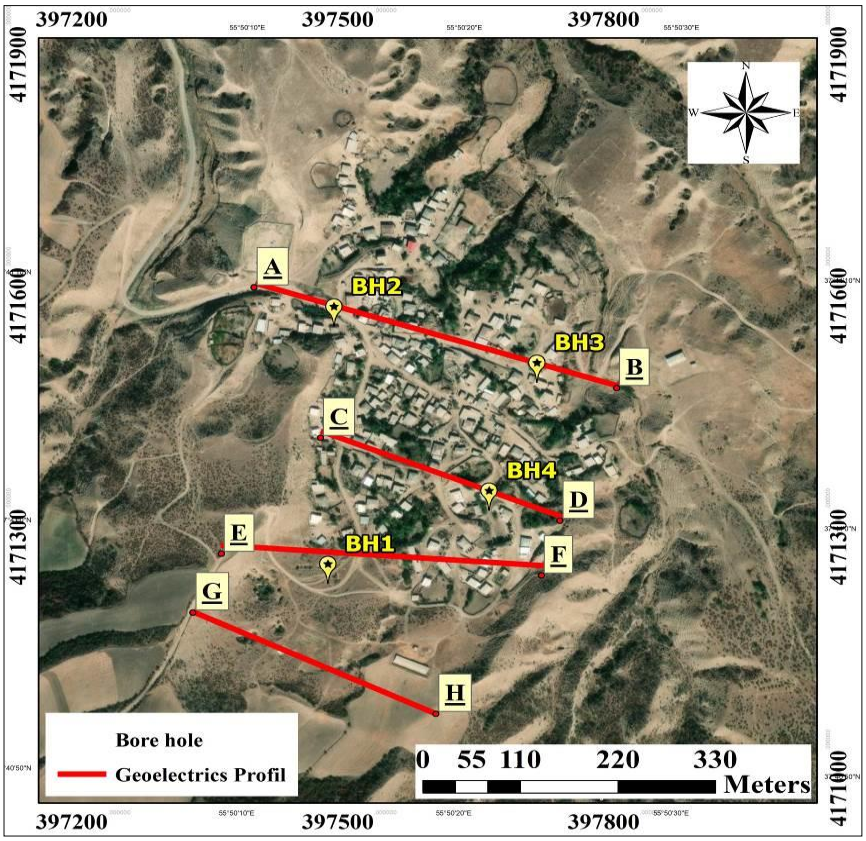
Profile	Length (m)	Electrode Spacing	X1	Y1	X2	Y2
AB	420	10 m	397393	4171610	397802	4171485
CD	280	10 m	397468	4171423	397738	4171320
EF	360	10 m	397356	4171279	397717	4171252
GH	310	10 m	397324	4171206	397598	4171080

پس از برداشت داده‌های صحرایی، برازش و پردازش داده‌های به دست آمده انجام شد. موقعیت پروفیل‌های مطالعهٔ ژئوالکتریک به همراه نقاط انتخابی حفر گمانه به منظور مطالعات ژئوتکنیکی در شکل ۳ آورده شده‌است. نتایج مطالعات انجام شده، به صورت مقاطع ژئوالکتریکی برای داده‌های مقاومت ویژه با استفاده از معکوس‌سازی داده‌ها به کمک نرم‌افزار تخصصی Res2Dinv ارائه شد. Res2Dinv نرم‌افزای است که با استفاده از برداشت الکتریکی، یک مدل مقاومت ویژهٔ دو بعدی را برای زیر سطح زمین ایجاد می‌کند و یک برنامهٔ تحت ویندوز است. برای تخمین داده‌های ظاهری، از یک سابروتین مدل‌سازی مستقیم و برای مدل‌سازی معکوس، از روش بهینه‌سازی کمترین مربعات غیر خطی استفاده می‌شود. این برنامه از هر دو روش مدل‌سازی مستقیم اجزای محدود و تفاوت محدود پشتیبانی می‌کند. از این برنامه برای مدل‌سازی داده‌های حاصل از برداشت به روش‌های ونر، قطبی ـ قطبی، قطبی ـ دو قطبی، ونر شولومبرگر و دو قطبی ـــ دو قطبی استفاده می‌شود. علاوه بر این، آرایش‌های معمول این برنامه از آرایش‌های نامعمول حاصل از جابه‌جایی تعداد بیشماری از الکترودها نیز حمایت می‌کند. در این نرم‌افزار، تصحیح توپوگرافی بر اساس روش المان محدود انجام می‌شود. این روش توسط تانگ و یانگ در سال ۱۹۹۰ ابداع شد و لوک در سال ۱۹۹۶، آن را در نرم‌افزار

1 Alpin

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

Res2Dinv به کار برد. در این روش به دلیل ماهیت روش المان محدود، امکان انطباق شبکه‌بندی‌ها بر سطح توپوگرافی واقعی وجود دارد. این روش می‌تواند توپوگرافی ناهموار را به صورت مستقیم با مدل معکوس تلفیق کند؛ بنابراین، پس از اجرای آن دیگر به استفاده از یک روش تصحیح توپوگرافی جداگانه نیازی نیست (Loke, 1999).



شکل ۳: موقعیت پروفیل‌های ژئوالکتریک در محدودهٔ روستای چشمه لی

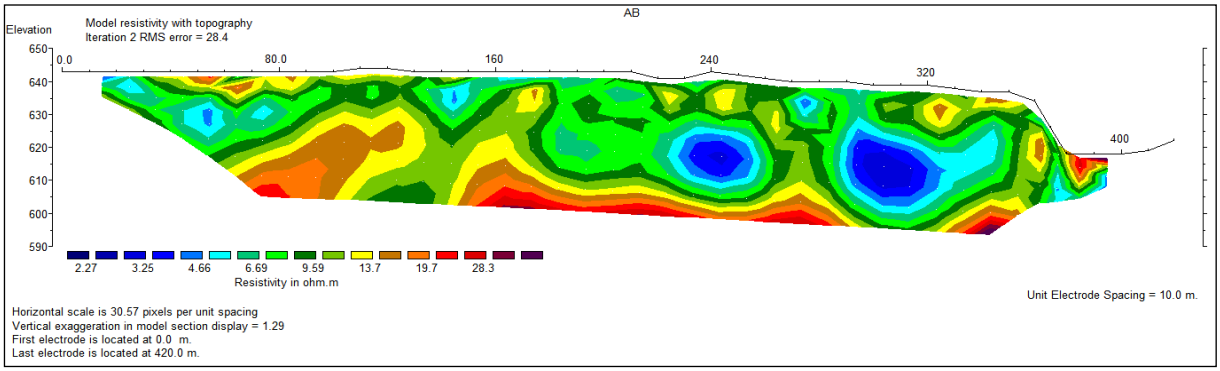
شکل ۴: نمونه تصاویری از برداشت‌های ژئوفیزیکی در محدودهٔ روستای چشمه لی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

۴ـ یافته‌ها

ـ پروفیل AB

شـکل ۵، مقطع حاصـل از نتایج معکوس‌سـازی داده‌های مقاومت ویژهٔ الکتریکی مربوط به پروفیل AB را نشـان می‌دهد. به طور کلی، دامنهٔ تغییرات مقدار مقاومت ویژه در سـرتاسـر مقطع به دسـت آمده زیاد نیسـت و تمایز در مقطع، عمدتاً بواسطهٔ تغییر در مقیاس عددی ــ رنگی است؛ به عبارت دیگر، تغییرات مقدار مقاومت ویژه بیانگر تغییرات اندک در جنس لایه‌های زمین‌شناسی است که اغلب با لس‌های منطقه در ارتباط است. در برخی قسمت‌ها، مقدار مقاومت ویژه اندکی افزایش یا کاهش یافته‌است؛ به عنوان مثال، مقدار مقاومت ویژه در حوالی ایستگاه ۷۰ تا ۱۱۰ از مبدأ مختصات، از عمق حدود ۱۲ متری به پایین و در عمق‌های پایینی مقطع در فاصلهٔ ۱۵۰ متری از مبدأ مختصات تا انتهای آن، با افزایش نسبی همراه بوده‌است. همچنین مقدار مقاومت ویژه در برخی قسمت‌های مقطع کاهش یافته‌است؛ همانند آنچه در فاصلهٔ ۲۲۵ تا ۲۵۵ متری از مبدأ مختصات و در فاصلهٔ ۲۹۰ تا ۳۴۰ متری از مبدأ مختصات و در عمق حدود ۱۰ تا ۲۵ متری قابل مشاهده است. افزایش مقدار مقاومت ویژه احتمالاً با فشردگی (تراکم) واحدهای لسی در ارتباط است و کاهش مقدار مقاومت ویژه می‌تواند ناشی از وجود رطوبت، نمک (با توجه به مشاهدهٔ آن در چشمه‌های پایین‌دست) یا افزایش رس باشد. تناوب اندیس کم و زیاد مقاومت الکتریکی ــ که متأثر از ساختار زیر سطحی است ــ به نوعی شکل‌گیری انواع فرسایش را نشان می‌دهد. گسترش دامنهٔ فرسایش به همراه انتقال آن به سطح زمین می‌تواند مورفولوژی منطقه را به مرور تغییر دهد.



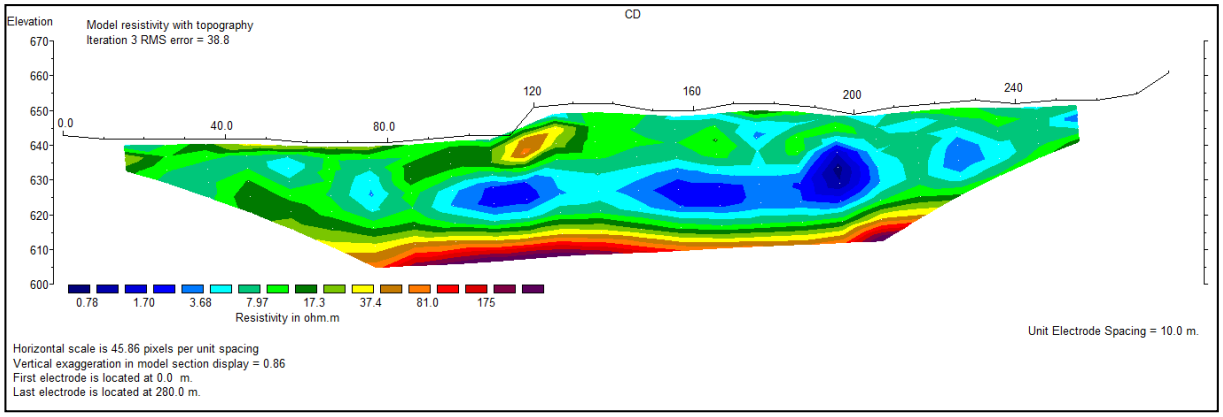
شکل ۵: نتایج مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژهٔ پروفیل AB همراه با توپوگرافی

ـ پروفیل CD

نتایج حاصل از معکوس‌سازی داده‌های مقاومت ویژهٔ الکتریکی مربوط به پروفیل CD، در شکل ۶ ارائه شده‌است. روند مشابهی به لحاظ تغییر در مقدار مقاومت ویژه در این پروفیل با پروفیل AB وجود دارد. مقدار مقاومت ویژه، تحت‌تأثیر واحدهای لسی منطقه تغییر کرده‌است. در برخی قسمت‌های مقطع به دست آمده نیز می‌توان افزایش یا کاهش مقدار مقاومت ویژه را مشاهده کرد. مقدار مقاومت ویژه در حوالی ایستگاه ۱۱۰ تا ۱۳۰ متری از مبدأ مختصات، در عمق‌های اولیه با افزایش همراه است که این افزایش با چاه فاضلاب موجود در این قسمت در ارتباط است. مقدار مقاومت ویژه در عمق‌های متوسط به ویژه در وسط مقطع، کاهش یافته‌است که به دنبال آن و در عمق‌های بالاتر (بیش از سی متر)، این مقدار روند افزایشی می‌یابد که با توجه به میزان مقاومت به دست آمده احتمالاً شروع سنگ کف در

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

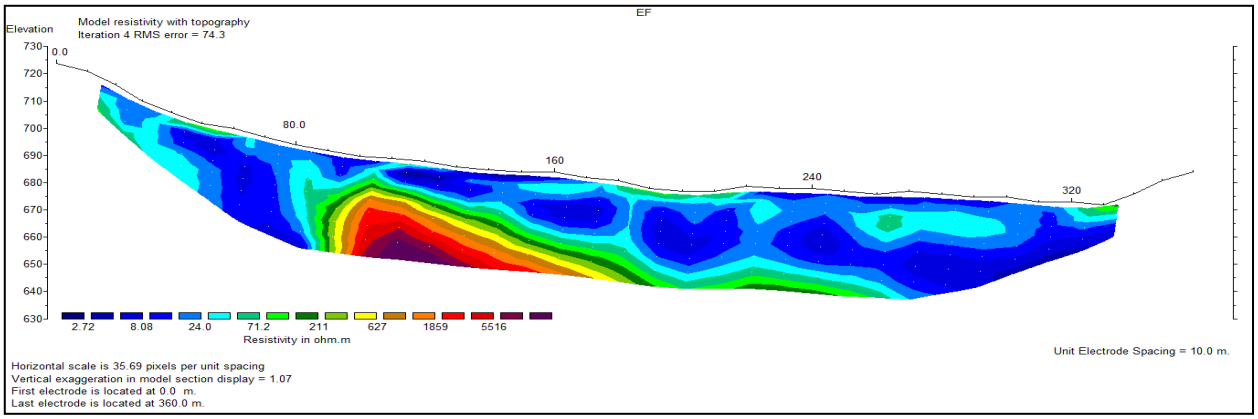
این بخش را آشکار می‌کند. وجود میان‌لایه با میزان مقاومتی کم، در واقع وجود رطوبت با دانه‌بندی سیمانی شدهٔ کم را ــ که در میان دو لایهٔ متراکم سطحی و تحتانی محبوس شده‌است ــ نشان می‌دهد. در برخی نقاط و در بخش سطحی نیز کاهش مقدار مقاومت ویژه مشاهده می‌شود؛ بدین‌صورت که در سطوح میانی تونل‌های فرسایشی ایجاد شده و در مرحلهٔ بعد، با مهاجرت به سمت بالا و سطح زمین با ایجاد شکل‌هایی مانند فروچاله‌ها و خندق‌ها مورفولوژی منطقه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد.



شکل ۶: نتایج مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژهٔ الکتریکی پروفیل CD همراه با توپوگرافی

ـ پروفیل EF

شکل ۷، مقطع حاصل از نتایج معکوس‌سازی داده‌های مقاومت ویژهٔ الکتریکی پروفیل EF را نشان می‌دهد. مقدار مقاومت ویژه در سراسر پروفیل، متأثر از واحدهای لسی منطقهٔ اندیس پایینی است. آنچه بیشتر در این پروفیل چشمگیر است، وجود مقاومت ویژهٔ بسیار بالا در فاصلهٔ حدود ۹۰ تا ۱۸۰ متری از مبدأ مختصات است. احتمال دارد این روند در عمق‌های بالاتر به سمت شرق کشیده شود. افزایش مقدار مقاومت ویژه در این فاصله و در سمت غرب، در عمق حدود ده متری شروع می‌شود و با یک شیب حدود ۴۵ درجه نسبت به سطح افق، به سمت شرق مقطع امتداد می‌یابد. بیشترین مقدار مقاومت ویژه نیز در عمق‌های بالاتر توزیع یافته‌است. افزایش مقاومت ویژه می‌تواند بیانگر شروع عمق سنگ کف در این قسمت باشد. با توجه به افزایش و کاهش مقدار مقاومت ویژه در حوالی ایستگاه ۹۰ متری از مبدأ مختصات، می‌توان یک شکستگی احتمالی پنهان را در این بخش انتظار داشت.

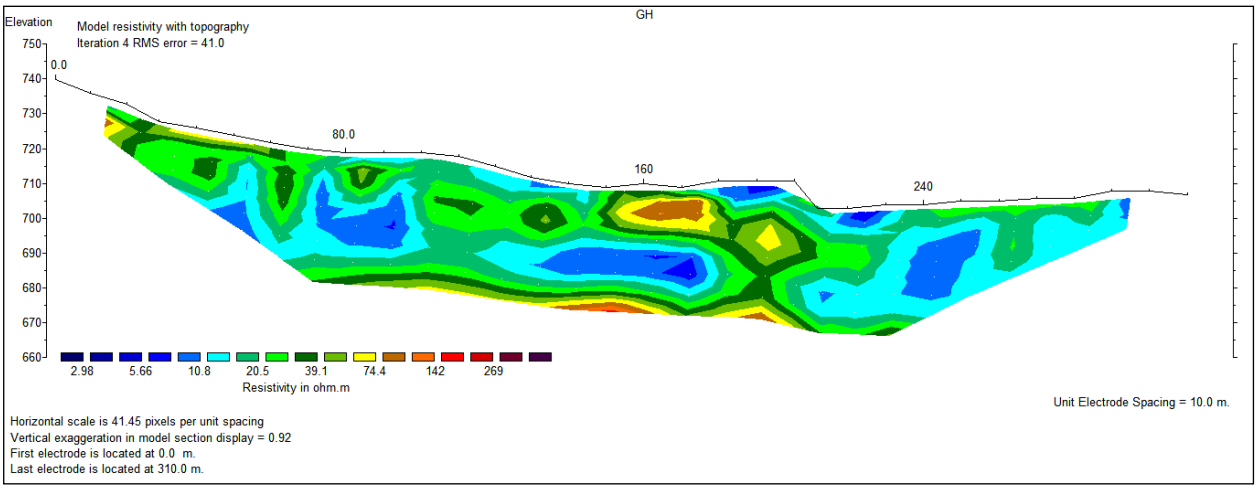


شکل ۷: نتایج مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژهٔ الکتریکی پروفیل EF همراه با توپوگرافی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

ـ پروفیل GH

نتایج حاصل از معکوس‌سازی داده‌های مقاومت ویژهٔ الکتریکی مربوط به پروفیل GH، در شکل ۸ آورده شده‌است. همانند پروفیل‌های قبلی، در این پروفیل نیز عمده تغییرات مقاومت ویژه در ارتباط با واحدهای لسی منطقه است که گاه در برخی قسمت‌ها، افزایش یا کاهش در مقدار مقاومت ویژه نیز دیده می‌شود؛ به عنوان مثال، مقدار مقاومت ویژه در حوالی ایستگاه ۱۵۰ تا ۱۸۰ متری از مبدأ مختصات، برای عمق‌های اولیه افزایش یافته‌است. همچنین مقدار مقاومت ویژه در وسط مقطع و برای عمق‌های بالاتر، در بخش‌های انتهایی مقطع روند افزایشی داشته‌است که می‌تواند بیانگر شروع عمق سنگ کف باشد. کاهش در مقدار مقاومت ویژه نیز به رنگ آبی به صورت متناوب در برخی قسمت‌های مقطع دیده می‌شود که احتمالاً این کاهش مقاومت ویژه عمدتاً به دلیل رطوبت یا افزایش ذرات رسی است. جریان آب در عمق‌های زیرسطحی، مواد سیلتی با مقاومت کم را حمل می‌کند و اشکال فرسایشی را به صورت تونل یا لانهٔ روباهی در می‌آورد. ادامهٔ روند فرسایش تونلی نیز به صورت فروچاله و خندق نمایان می‌شود. می‌توان مورفولوژی آتی را با افزایش دامنهٔ فرسایش به شکل نمایان در سطح زمین تصور کرد.



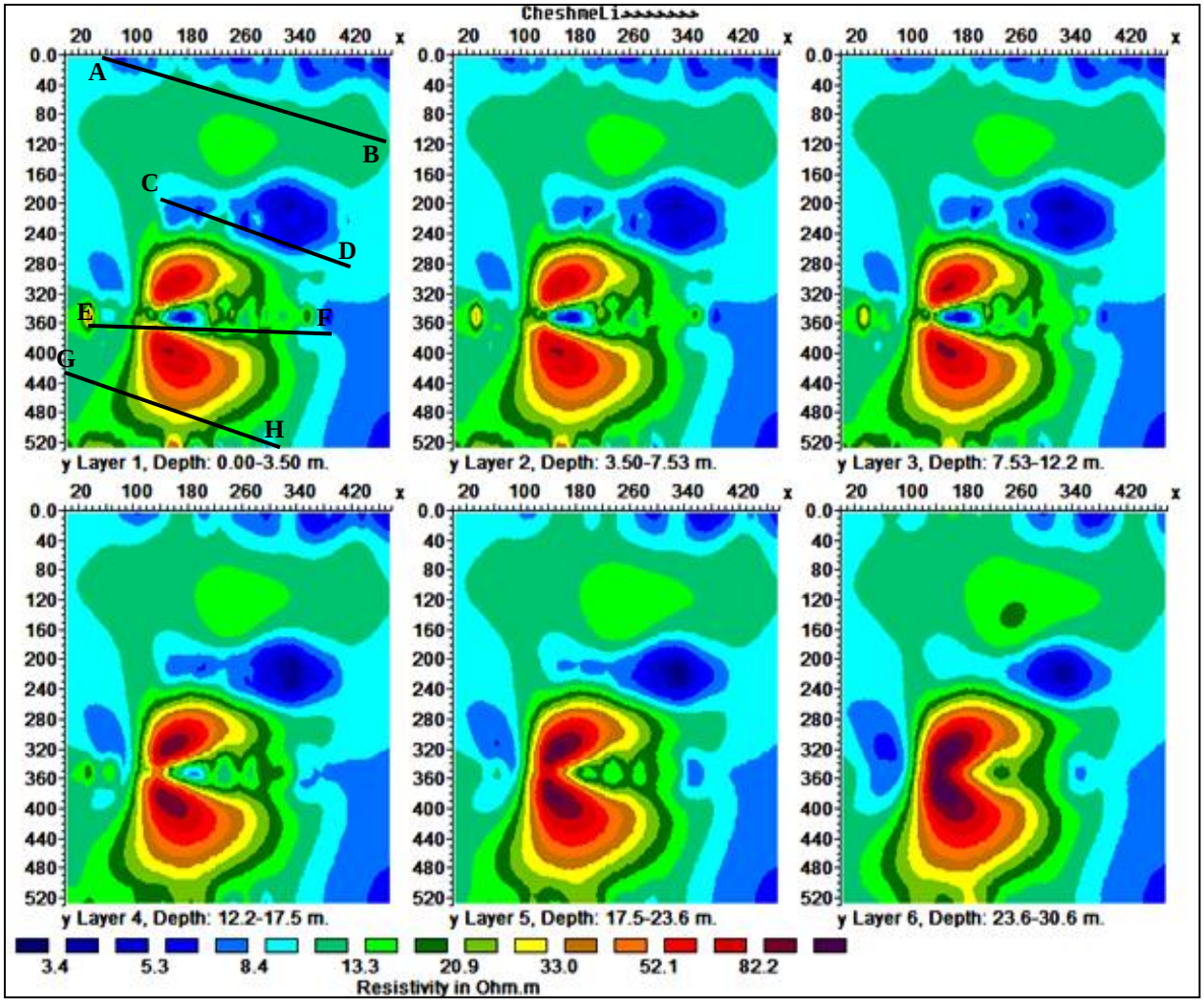
شکل ۸: نتایج مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژهٔ الکتریکی پروفیل GH همراه با توپوگرافی

ـ نقشه‌های هم‌مقاومت

در ادامه به منظور شناخت تغییرات در سطوح زیرین، نقشه‌های هم‌مقاومت در شش سطح و در جهت عمق تهیه شد (شکل ۹). لایه اول میانگین مقاومت ویژه، در محدودهٔ عمقی از سطح تا ۳/۵ متری را شامل می‌شود. مقاطع بعدی نیز به ترتیب میانگین مقاومت ویژه برای عمق‌های ۳.۵ تا ۷.۵، ۷.۵ تا ۱۲.۲، ۱۲.۲ تا ۱۷.۵، ۱۷.۵ تا ۲۳.۶ و ۲۳.۶ تا ۳۰.۶ متری را شامل می‌شود؛ بدین صورت که تغییرات در سطوح زیرین و در عمق‌های ذکر شده ـــــ که در واقع بیانگر تغییرات ساختاری سطوح زیرین، رطوبت و جریان زیرسطحی است ـــــ نمایان می‌شود. افزایش مقدار مقاومت ویژه، به صورت رنگ قرمز قهوه‌ای در بخش جنوبی محدودهٔ مورد مطالعه به صورت چشمگیری دیده می‌شود که در جهت شمال در همهٔ عمق‌های ذکر شده با کاهش همراه است. افزایش مقدار مقاومت ویژه به طور تقریبی از میان مقاطع شروع شده و به بخش جنوبی کشیده می‌شود. با افزایش عمق مورد مطالعه ملاحظه می‌شود که مقدار مقاومت ویژه نیز با مقاومت بالا نسبت به سطح زمین پیوستگی بیشتری دارد. روند به دست آمده از توزیع مقاومت الکتریکی، احتمالاً بیانگر یک واحد

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

سنگی در بخش تحتانی است. افزایش مقاومت ویژه در این بخش،با نتایج حاصل از مدل‌سازی دو بعدی برای پروفیل‌های EF و GH همخوانی مناسبی دارد. همچنین کاهش مقدار مقاومت ویژه در بخش مرکزی و جنوب شرقی نیز دیده می‌شود که می‌تواند بیانگر افزایش رطوبت و میزان رس در این بخش‌ها باشد. در سایر بخش‌ها به ویژه در بخش شمالی، مقدار مقاومت ویژه عمدتاً متأثر از واحدهای لسی منطقه تغییر کرده‌است. وجوده توده‌ای با مقاومت ویژۀ بالا با روند تونل‌های فرسایشی به طور قابل ملاحظه‌ای معنی‌دار است؛ به طوری که عمده‌ترین تونل‌های ایجاد شده در دو طرف شرقی و غربی توده با مقاومت بالا ایجاد شده‌است. به نظر می‌رسد افزایش مقاومت الکتریکی در اعماق بالا ــ که به طور یکنواخت آشکار شده‌است ـــ احتمالاً مقاومت زمین را در برابر ایجاد تونل‌های فرسایشی در این سطوح نشان می‌دهد؛ به عبارتی دیگر، می‌توان دریافت که تونل‌های فرسایشی در عمق‌های زیاد نمی‌توانند گسترش یابند و تنها به سمت سطح زمین مهاجرت می‌کنند که در مراحل بعدی به شکل‌های فروچاله و خندق نمود می‌یابند. عمق‌های نقشه‌های هم‌مقاومت نیز در زیر هر یک آورده شده‌است.



شکل ۹: نقشۀ هم‌مقاومت ویژۀ الکتریکی در شش بخش سطوح زیرین. عمق‌های هر یک از نقشه‌ها نیز در زیر آن آورده شده‌است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

بررسی نتایج به دست آمده از مطالعهٔ ژئوالکتریک نشان می‌دهد که آنومالی تغییرات از سطح زمین تا عمق‌های پایین به صورت متناوب بوده‌است. این روند با احتمال زیاد، به دلیل تناوب لایه‌های رسی با ریزدانه‌های رسی و جریان‌های زیر سطحی بوده‌است. همچنین مقاطع به دست آمده نشان داد که یک لایه با مقدار مقاومت الکتریکی بالا، در تحتانی‌ترین عمق مورد مطالعه وجود دارد. این بخش تحت‌تأثیر سایر عوامل همانند توپوگرافی سطحی با ناهمواری همراه بوده که بر توزیع و تراکم انباشت بخش سطحی تأثیر گذاشته‌است؛ به عبارتی دیگر، ضخامت نهشته‌ها و گروه لس به صورت متغیر انباشت شده؛ به طوری که در برخی مناطق با ضخامت بالا و در برخی مناطق با ضخامت نسبتاً کمتری انباشته شده‌است.

در مرحلهٔ بعدی با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعهٔ ژئوالکتریک و در نظر گرفتن موقعیت مسکونی روستا به همراه رخنمون‌های فروچاله‌ها و تونل‌های فرسایشی ایجاد شده، چهار نقطه‌به منظور حفر گمانه برای مطالعات ژئوتکنیکی انتخاب و معرفی شد. در جدول ۲، محل نقاط انتخابی برای حفر گمانه به منظور مطالعات ژئوتکنیکی نشان داده شده‌است. همچنین پیشتر در نقشهٔ جانمائی پروفیل‌های ژئوالکتریکی، نقاط گمانه‌ها نشان داده شده‌است. نقاط انتخابی، به منظور حفر گمانه با در نظر گرفتن پروفیل‌های ژئوالکتریکی و تونل‌های فرسایشی بود. این بخش از گزارش شامل عملیات صحرایی نظیر حفاری گمانه‌ها، اجرای آزمایش‌ها در محل و اجرای آزمایش‌ها در آزمایشگاه بود. همچنین این بخش از پژوهش با اهداف تعیین نوع خاک و ضخامت لایه‌های خاک، تعیین لایه‌بندی و شرایط ژئوتکنیکی خاک محل، طبقه‌بندی یونیفاید خاک و بررسی مشخصات و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک انجام شد.

جدول ۲: مختصات نقاط انتخاب شده برای حفر گمانه به منظور مطالعات ژئوتکنیکی

Point	X	Y	Depth
BH1	397476	4171259	26.5
BH2	397483	4171579	16
BH3	397712	4171509	11.2
BH4	397658	4171350	15.5

ـ گمانهٔ BH1

عمق گمانهٔ BH1، ۲۶.۵ متر است که نتایج مطالعه ژئوتکنیکی در جدول ۳ آورده شده‌است. مهم‌ترین دست آورد گمانهٔ BH1، تغییرات ارقام به دست آمده تا عمق دوازده متری است. وجود لایه‌های سست و نامتراکم تا عمق دوازده متری است که در میان لایه‌های متراکم سطحی و تحتانی قرار گرفته‌است. نوع خاک در این بخش، مربوط به سیلت رس‌دار به رنگ قهوه‌ای روشن با تراکم کم است. بخش سطحی، مربوط به خاک‌های لسی مختلط با سیلت و رس متراکم و بخش تحتانی، مربوط به دانه‌های سیلتی و رسی با درصد قابل توجه آهک است. از عمق دوازده متری تا عمق تحتانی، اعداد SPT بیشترین تعداد را دارد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

جدول ۳: نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در گمانهٔ BH1

BH1												
γ kn/m3		رده‌بندی خاک	حدود اتربرگ			طبقه بندی خاک یونیفاید	SPT					
γdry	γsat		PI	PL	LL		۱ ۱۵ سانتیمتر اول	۲ ۱۵ سانتیمتر دوم	۳ ۱۵ سانتیمتر سوم	NSPT	عمق (m)	ردیف
		dense					17	18	19	37	2/55	1
		dense					17	18	22	40	4/00	2
		Very dense					17	27	28	>50	6/00	3
			10.7	19.00	29.7	CL					8/00	4
		loose					6	7	8	15	8/25	5
		dense					17	22	26	48	10/54	6
		Very dense	9.9	18.9	28.8	CL	19	34	46	>50	12/00	7
			13.2	19.1	32.3	CL					13/50	8
		Very dense					34	50	50/10	>50	14/00	9
15.75	20										14/50	9
			19.9	17.6	37.5	CL					15/50	10
18.40											15/60	10
16	20										17/00	11
		Very dense					35	50/14		>50	17/12	11
			10.9	21.1	31.9	CL					17/40	12
			17.1	18.6	35.8	CL					19/20	13
		Very dense					41	50/13		>50	19/75	14
		Very dense	30.2	29.2	59.4	CH	37	50/11		>50	23/00	15
		Very dense					50	50/5		>50	24/50	16

ـ گمانهٔ BH2

عمق حفاری در گمانهٔ BH2، شانزده متر است که نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در جدول ۴ آورده شـده‌اسـت. در عمق ۳.۸۵ متری، یک لایه با تراکم کم و تحکیم‌نیافته وجود دارد که با عمق تونل‌های فرسـایشـی دارای

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

همخوانی است. مشخصات خاک در این عمق، شامل سیلت رس‌دار با نودول آهکی سفید رنگ قهوه‌ای روشن رطوبت متوسط است. میزان SPT در سطح زمین، تا اعماق دوازده متری کمتر از سطوح پایینی است. احتمالاً تغییرات جریانی زیرسطحی در ادامه به از دست دادن میزان تراکم در سطوح بعدی منجر می‌شود.

جدول ۴: نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در گمانهٔ BH2

BH2												
γ kn/m3		رده بندی خاک	حدود اتربرگ			طبقه بندی خاک یونیفاید	SPT					
γdry	γsat		PI	PL	LL		۱ ۱۵ سانتیمتر اول	۲ ۱۵ سانتیمتر دوم	۳ ۱۵ سانتیمتر سوم	NSPT	عمق (m)	ردیف
			11	19	30	CL					1/50	1
		medium					15	16	12	28	1/92	2
		loose					8	10	12	22	3/85	3
17.8	20										4/50	3
			14	20	34	CL					5/50	4
		dense					14	18	20	38	5/85	5
			11	19	30	CL					7/00	6
		dense					10	20	24	44	8/10	7
		dense					14	16	29 or 19	45	9/00	8
			14	16	30	CL					10/00	9
			15	24	39	CL					12/00	10
		dense					10	18	24	42	12/20	11
			13	19	32	CL					13/00	12
		Very dense					24	35	44	>50	14/43	13
		Very dense					17	25	37	>50	16/00	14

ـ گمانهٔ BH3

عمق حفاری در گمانهٔ BH3، دوازده متر است که نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در جدول ۵ آورده شده‌است. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این گمانه، در عمق‌های مختلف با تغییرات کمتری همراه بوده و بیشترین آنومالی در عمق چهار متری و مربوط به پارامتر NSPT است. این عمق با توجه به مشاهدات میدانی، با عمق پدیدهٔ تونل‌های فرسایشی همخوانی دارد. با توجه به اعداد سایر پارامترهای مورد مطالعه می‌توان گفت عامل رخداد تونل فرسایشی، تحکیم‌یافتگی نسبتاً کم خاک در عمق چهار متری است. سطوح فوقانی و تحتانی عمق مذکور نیز تراکم بالاتری دارد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

جدول ۵: نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در گمانهٔ BH3

BH3												
γ kn/m3		رده‌بندی خاک	حدود اتربرگ			طبقه بندی خاک یونیفاید	SPT					
γdry	γsat		PI	PL	LL		۱ ۱۵ سانتیمتر اول	۲ ۱۵ سانتیمتر دوم	۳ ۱۵ سانتیمتر سوم	NSPT	عمق (m)	ردیف
			19	16	35	CL					1/50	1
		Very dense					25	47	37	>50	2/00	2
			13	18	3	CL					2/50	3
			19	16	35	CL					3/50	4
		dense					14	16	20	36	4/00	5
		Very dense					20	30	45	>50	6/00	6
		Very dense					50	50/14		>50	8/00	7
			15	18	33	CL					8/50	8
		Very dense					31	44	45	>50	9/17	9
		Very dense					35	40	50	>50	11/12	10

ـ گمانهٔ BH4

تغییرات پارامترهای انجام شده در گمانهٔ BH4 تا عمق ۱۰.۱۵ متری قابل ملاحظه است. در سطوح ۲.۲، ۵.۹۵ و ۱۰.۱۵ متری، خاک از نوع تحکیم‌نیافته و با مقاومت کم توزیع شده‌است. در عمق ۸.۲۳ متری، تراکم خاک به طور نسبی افزایش می‌یابد. بیشترین تراکم خاک نیز در سطوح تحتانی است. اعداد NSPT در گمانهٔ BH4، تا سطوح ۱۲.۳ متری به طور متناوب با تغییر همراه بود و نسبت به سطوح تحتانی میزان کمتری داشت. تناوب اعداد در پارامترهای مورد مطالعه، متأثر بودن خاک در برابر انرژی جریان را نشان می‌دهد و از سوی دیگر، حداکثر عمق احتمالی رخداد فرسایش را آشکار می‌کند. اطلاعات به دست آمده از مطالعات ژئوتکنیکی در گمانهٔ BH4 با عمق ۱۴.۵ متر، در جدول ۶ ذکر شده‌است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

جدول ۶: نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام یافته در گمانهٔ BH4

BH4												
γ kn/m3		رده‌بندی خاک	حدود اتربرگ			طبقه بندی خاک یونیفاید	SPT					
γdry	γsat		PI	PL	LL		۱ ۱۵ سانتیمتر اول	۲ ۱۵ سانتیمتر دوم	۳ ۱۵ سانتیمتر سوم	NSPT	عمق (m)	ردیف
		loose	14	18	32	CL	6	9	14	23	2/20	1
											3/00	2
		loose					2	3	3	6	5/95	3
			11	18	29	CL					6/70	4
		medium					8	13	16	29	8/23	5
			21	20	41	CL					8/50	6
15.75	20										10/00	6
		loose					9	11	13	24	10/15	7
			34	19	53	CH					11/00	8
		dense					10	16	20	36	12/30	9
			18	18	36	CL					12/50	10
		Very dense					18	26	38	>50	14/20	11
			19	18	37	CL					14/50	12

ـ مقایسهٔ داده‌های ژئوالکتریک و ژئوتکنیک

تونل‌های فرسایشی ایجاد شده در محدودهٔ روستای چشمه‌لی به طور کامل منطبق بر توپوگرافی و شکل هندسی نیست؛ با وجود اینکه شیب توزیع شده در محور میانی روستا از جهت شمال به جنوب به صورت مقعر است، اما عمده‌ترین تونل‌های فرسایشی در دو طرف این محور شکل یافته‌است. بدین منظور، آگاهی از نوع دانه‌بندی و مدل‌سازی توزیع مقاومت الکتریکی ـــ که بیانگر تغییرات دانه‌بندی و توزیع آنها در سطوح زیرین است ـــ می‌تواند در تحلیل و ارزیابی چرایی ایجاد تونل‌های فرسایشی مؤثر واقع شود؛ بدین منظور در این بخش، نتایج مطالعات ژئوالکتریک و ژئوتکنیک مقایسه شد. برای این مورد، ابتدا نتایج مطالعات ژئوتکنیک به صورت آشکارسازی نوع خاک به صورت جدول برای گمانه‌های موجود تهیه شد. سپس مقدار مقاومت ویژهٔ الکتریکی در عمق‌های همسان یا نزدیک به عمق‌های مورد تحلیل مطالعات ژئوتکنیکی، بارزسازی و در ادامه، نمودار مربوط به آنها ترسیم شد. بدین شکل، بین مقادیر

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

مقاومت ویژهٔ الکتریکی و اطلاعات خاک حاصل از مطالعهٔ ژئوتکنیکی ارتباط معناداری ایجاد شد و به تفسیر نتایج تحلیل و ارزیابی خاک‌های زیرسطحی منجر شد.

ـ گمانهٔ BH1 و پروفیل EF

مقدار مقاومت ویژهٔ الکتریکی‌به دست آمده در پروفیل EF و در محل گمانهٔ BH1 تا عمقی حدوداً ۹ متری، بین سه تا سیزده اهم‌متر متغیر است؛ به طوری که در بخش سطحی و تا اعماق ۱.۷۳ متری، میزان مقاومت ویژه سیزده اهم‌متر است که پس از این عمق تا عمق پنج متری با کاهش همراه می‌شود و در حدود سه اهم‌متر توزیع می‌یابد. سپس تا عمق حدوداً ۹ متری دوباره به مقدار سیزده اهم‌متر می‌رسد. با افزایش عمق مطالعه، از محدودهٔ عمق ۹ متری به پایین میزان مقاومت به دست آمده افزایش می‌یابد که تحکیم خاک سطوح زیرین را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات ژئوتکنیکی نیز نشان داد که خاک سطوح سطحی تا اعماق ۱۱.۲ متری، مربوط به سیلت رس‌دار به رنگ قهوه‌ای روشن با تراکم کم است که با افزایش عمق بر میزان آهک با چسبندگی و رطوبت زیاد همراه می‌شود. تعادل رطوبت به همراه افزایش آهک در سطوح زیرین می‌تواند به افزایش مقاومت در برابر انرژی‌های جریان زیرسطحی منجر شود. افزایش ماسه و آهک‌های دانه‌ای و به عبارتی دیگر، سنگ آهک ــ که احتمالاً هوازده است ــ به افزایش میزان مقاومت الکتریکی در سطوح زیرین منجر می‌شود. بنابراین، دو لایهٔ نسبتاً متراکم سطحی و تحتانی با میان‌لایهٔ کم مقاوم در برابر انرژی جریان زیر سطحی، ایجاد فرسایش تونلی را توجیه می‌کند. در این رابطه، تحلیل الگوی بارندگی از دو بعد مقدار و زمان، لازم به نظر می‌رسد. افزایش ناگهانی دبی رواناب سطحی و نفوذ آن در زون‌های کم مقاومت، از عوامل مؤثر در ایجاد تونل‌های فرسایشی به نظر می‌رسد. طبق اطلاعات به دست آمدهٔ ژئوتکنیکی و ژئوالکتریکی در بالادست روستا، لایه‌های دارای حساسیت بیشتر در برابر فرسایش، در عمق‌های نزدیک به سطح زمین قرار دارد؛ به عبارتی، اصلی‌ترین محدودهٔ نفوذ آب به لایه‌های با حساسیت بالا، در بخش جنوبی (بالا دست) روستا واقع و مربوط به پروفیل‌های GH و EF است. جدول ۷، نوع خاک و شکل ۱۰، نمودار مقاومت ویژهٔ الکتریکی را در محل گمانهٔ BH1 و پروفیل EF نشان می‌دهد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

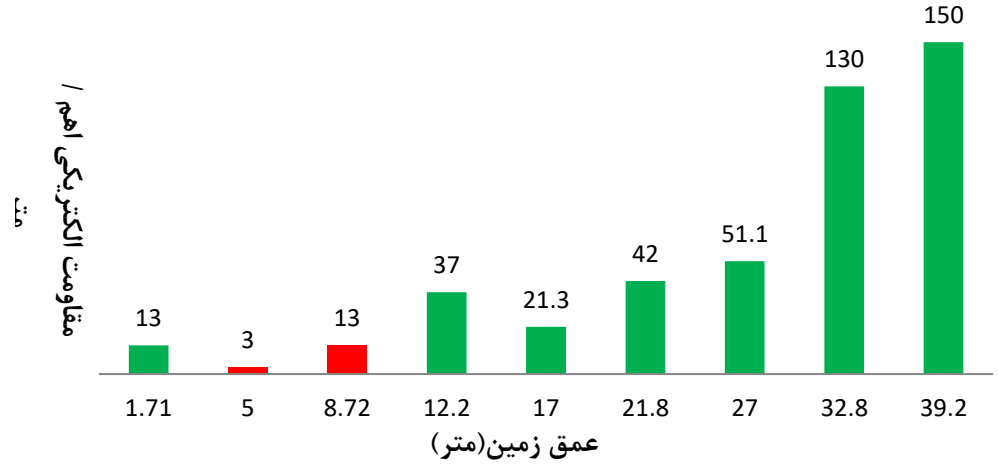
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

جدول ۷: نوع خاک در گمانهٔ BH1 پروفیل EF

ردیف	عمق (m)	مشخصات خاک
1	0– 0/30	خاک نباتی
2	0/3 – 11/2	سیلت رس‌دار به رنگ قهوه‌ای روشن با تراکم کمتر
3	11/2 – 13	سیلت رس‌دار تراکم خیلی زیاد رنگ قهوه‌ای روشن دارای چینه‌بندی (تورق)
4	13/ – 13/8	سیلت با چسبندگی زیاد و درصد رطوبت زیاد به رنگ قهوه‌ای تیره
5	13/8 – 16/8	سیلت حاوی رگه‌های آهک با چسبندگی زیاد و درصد رطوبت بالا به رنگ قهوه‌ای روشن
6	16/8 – 18/2	سیلت و رس به رنگ قهوه‌ای روشن متمایل به نخودی و رگه‌های سفید آهک و درصد رطوبت متوسط
7	18/2 – 19/4	سیلت رسی به رنگ قهوه‌ای تیره متمایل به قرمز و درصد رس زیاد و چسبندگی زیاد
8	19/4 – 21/4	سیلت ورقه‌ای متراکم چسبندگی متوسط تا نسبتاً زیاد حاول نودول (قلمبه) و رگه‌های آهکی به رنگ قهوه‌ای تیره
9	21/4 – 21/8	رس سیلتی با آهک زیاد به رنگ قهوه‌ای متمایل به زرد (قهوه‌ای روشن) چسبندگی زیاد و درصد رطوبت زیاد
10	21/8 – 23/3	رس سیلتی به آهک دانه‌ای نودول به رنگ قهوه‌ای تیره چسبندگی زیاد و درصد رطوبت زیاد
11	23/3 – 24/5	آهک، ماسه، رس و سیلت (خاک سیلت رس‌دار) حاوی مقادیر زیادی آهک دانه‌ای و ماسه و به احتمال زیاد سنگ آهک هوازده
12	24/5 – 24/9	سنگ هوازدهٔ آهکی به همراه مقادیری سیلت و رس
13	24/9 – 26/5	رس سیلت و آهک (نودول) به رنگ قهوه‌ای روشن و آهک به رنگ سفید شیری دارای چسبندگی متوسط و درصد رطوبت متوسط

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]



شکل ۱۰: نمودار تغییرات مقاومت ویژهٔ الکتریکی در جهت عمق در محل گمانهٔ BH1 پروفیل EF

ـ گمانهٔ BH2 و پروفیل AB

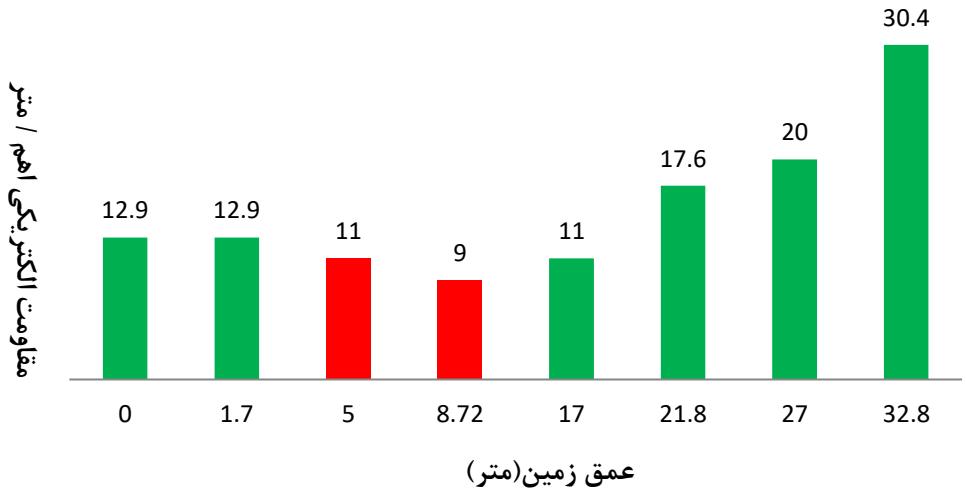
مقایسهٔ نتایج جدول اطلاعات ژئوتکنیکی و اعداد مربوط‌به میزان مقاومت ویژهٔ الکتریکی متناظر آن در نمودار، حکایت از آن دارد که وجود سیلت بیشتر و درصد کم رس در خاک عمق ۳/۸۵ متر و رطوبت متوسط خاک، به کم شدن عدد SPT و بالا رفتن نسبی مقاومت ویژهٔ الکتریکی خاک منجر می‌شود که بیانگر کاهش مقاومت این بخش در برابر انرژی جریان زیر سطحی است. در مقابل، وجود درصد بالای رس در خاک‌های عمق ۸.۱ و ۹ متری در گمانه و رطوبت بالای خاک، به زیاد شدن عدد SPT و کم شدن مقاومت الکتریکی منجر می‌شود (افزایش درصد رس و درصد رطوبت، با عدد SPT رابطهٔ مستقیم و با مقاومت الکتریکی خاک رابطهٔ معکوس دارد). در واقع، در این بخش با وجود اینکه با افزایش رس مقدار مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد، در مقابل انرژی جریان مقاوم است و دچار فرسایش نمی‌شود. علت این مورد می‌تواند افزایش چگالی خاک به دلیل پر شدن فضاهای بین ذرات با ذرات دانه ریزتر رس و آب باشد. در جدول ۸ نوع خاک و در شکل ۱۱، نمودار مقاومت الکتریکی پروفیل AB در محل گمانهٔ BH2 نشان داده شده‌است. با توجه به اینکه درصد آهک در سطوح بالایی و پایینی با افزایش همراه است و لایه‌ها در برابر انتقال رسوبات نسبتاً مقاوم است، فراوانی سیلت در عمق یاد شده می‌تواند توجیه مناسبی در رویداد تونل‌های فرسایشی در بخش‌های میانی باشد.

جدول ۸: نوع خاک در گمانهٔ حفر شدهٔ BH2 پروفیل AB

BH2		
ردیف	عمق (m)	مشخصات خاک
1	0 – 0/3	خاک دستی
2	0/3 – 0/6	سیلت متراکم قهوه‌ای روشن با درصد رطوبت کم و تراکم زیاد
3	0/6 – 5/1	سیلت رس‌دار با نودول آهکی سفید رنگ قهوه‌ای روشن و رطوبت متوسط

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

4	5/1 – 6	سیلت رس‌دار با نودول سفید آهکی (درصد آهک بیش از قبل) به رنگ قهوه‌ای روشن و درصد رطوبت متوسط
5	6 – 7/9	سیلت به همراه رس به رنگ قهوه‌ای تیره با نودول‌های آهکی و چینه‌بندی مشخص
6	7/9 – 11	سیلت با نودول‌های خیلی کم (آهک کمتر) و درصد رس بیشتر به رنگ قهوه‌ای روشن و درصد رطوبت بالا
7	11 – 11/8	خاک سیلتی با چسبندگی و رطوبت متوسط به رنگ قهوه‌ای روشن
8	11/8 – 12/5	خاک سیلتی رسی به رنگ قهوه‌ای تیره چسبندگی نسبتاً زیاد و رطوبت زیاد
9	12/5 – 14	خاک سیلتی به رنگ قهوه‌ای روشن حاول رگه‌های آهکی سفید شیری چسبندگی و رطوبت نسبتاً زیاد
10	14 – 16	خاک سیلتی به رنگ قهوه‌ای روشن درصد رگه‌های آهکی کمتر از لایه‌های قبل و رطوبت نسبتاً زیاد



شکل ۱۱: نمودار تغییرات مقاومت ویژهٔ الکتریکی در جهت عمق در محل گمانهٔ BH2 پروفیلAB

ـ گمانهٔ BH3 و پروفیل AB

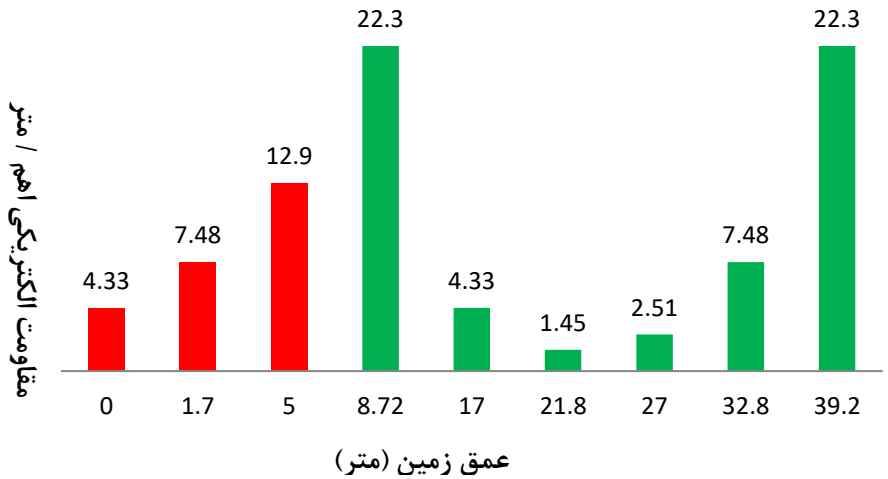
نتایج مطالعات ژئوتکنیکی نشان می‌دهد که چسبندگی و درصد رطوبت زیاد در خاک‌های سیلتی رس‌دار، به افزایش چگالی و تراکم خاک (افزایش عدد SPT) منجر شده است. مقدار مقاومت ویژهٔ الکتریکی به دست آمده، با میزان افزایش رس و درصد رطوبت رابطهٔ معکوس دارد که به کاهش مقاومت الکتریکی در عمق بخش سطحی تا پنج متری (نمودار برداشت مقاومت) منجر می‌شود. در گمانهٔ BH3، توزیع خاک در افق‌های مختلف به صورت یکنواخت بوده و تنها تفاوت موجود، مربوط به تراکم میزان خاک در عمق حدوداً سه تا چهار متری است که توسط خاک‌های متراکم سطوح بالا و پایین احاطه شده‌است (جدول ۹). در واقع، با توجه به این امر که سطوح فوقانی و تحتانی متراکم است؛ به نظر می‌رسد میزان تراکم خاک، مجرای مناسبی برای حرکت جریان زیرسطحی می‌باشد. تراکم بالای خاک سطحی در محدودهٔ مسکونی اغلب به دلایل انسانی بود؛ اما در خارج از بافت مسکونی به ویژه در جنوب محدودهٔ روستا، مواردی از قبیل خلل و فرج‌های خاک سطحی ــ که رطوبت (در زمان برداشت داده) کمتری دارد ــ در بالا رفتن مقادیر مقاومت الکتریکی به طور نسبی اثرگذار بود. این مورد در ارزیابی و تحلیل رخداد فرسایش قابل تأمل است؛ زیرا در مواقع بارندگی، زون مورد نظر جریان‌های سطحی را جذب و در جهت عمق هدایت می‌کند. مقاومت کم سطوح میانی در برابر

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

انرژی جریان زیر سطحی، موجب شستگی می‌شود و تونل‌های فرسایشی را به وجود می‌آورد. در ادامهٔ این روند در برخی نقاط که درصد لس فراوانی دارد، تونل‌های فرسایشی به سطح زمین مهاجرت می‌کند و به پیدایش فروچاله‌ها و خندق‌ها منجر می‌شود. مقاومت الکتریکی توزیع‌یافته متناسب با اطلاعات به دست آمدهٔ مربوط به گمانهٔ BH3 و پروفیل AB، در شکل ۱۲ آورده شده‌است.

جدول ۹: نوع خاک در گمانهٔ حفر شده BH3 پروفیل AB

BH3		
ردیف	عمق (m)	مشخصات خاک
1	0 – 1	خاک دستی
2	1 – 1/7	خاک سیلتی رسی ورقه‌ای با چسبندگی متوسط و رطوبت کم
3	1/7 – 3/3	خاک سیلتی رسی با چسبندگی متوسط و رطوبت متوسط به رنگ قهوه‌ای روشن
4	3/3 – 3/7	خاک سیلتی رسی با چسبندگی زیاد و درصد رطوبت زیاد به رنگ قهوه‌ای تیره
5	3/7 – 7/3	خاک سیلتی رسی با درصد رطوبت متوسط و چسبندگی متوسط به رنگ قهوه‌ای روشن
6	7/3 – 9/2	خاک سیلتی رسی با درصد رس بیشتر نسبت به لایهٔ قبلی و درصد رطوبت نسبتاً زیاد و چسبندگی زیاد به رنگ قهوه‌ای تیره به همراه رگه‌های آهکی
7	9/2 – 11/2	خاک سیلتی رسی با چسبندگی زیاد و درصد رطوبت زیاد به رنگ قهوه‌ای روشن دارای چینه‌بندی



شکل ۱۲: نمودار تغییرات مقاومت ویژهٔ الکتریکی در جهت عمق در محل گمانهٔ BH3 پروفیلAB

ـ گمانهٔ BH4 و پروفیل CD

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

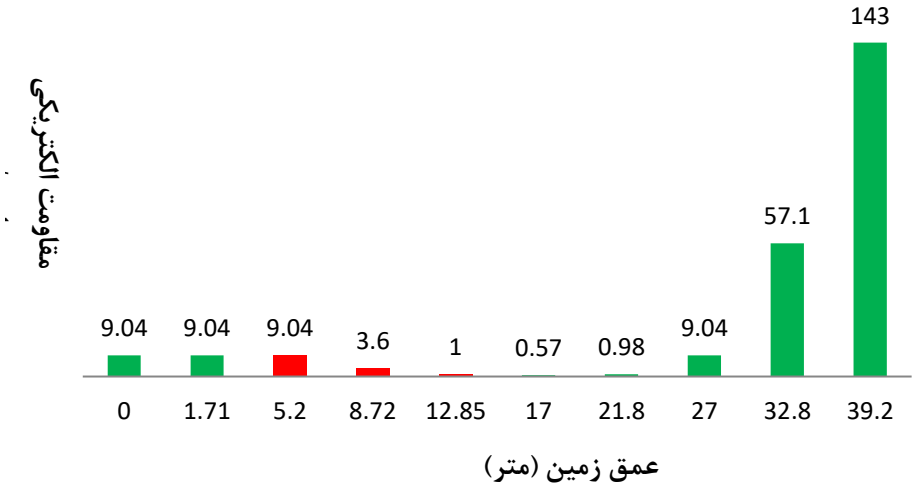
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

مقاومت سطحی در پروفیل CD و در محل گمانهٔ BH4، متأثر از خاک سطحی دستی است. با افزایش عمق کاوش، از مقدار مقاومت الکتریکی ویژه کاسته می‌شود؛ به طوری که تا عمق دو متری، خاک سیلتی رسی با چسبندگی و درصد رطوبت کم نهشته های این بخش را تشکیل می‌دهد و تا حدود شش متری ادامه می‌یابد. تغییر خاک سطوح زیرین در اثر جریان‌های زیر سطحی ـــ که مستعد فرسایش است ـــ احتمالاً باعث شده مقدار مقاومت الکتریکی نیز کاهش یابد. در ادامه کاهش مقدار مقاومت الکتریکی تا عمق حدوداً سیزده متری، به طور قابل ملاحظه‌ای محسوس است که تا عمق هفده متری به کمترین مقدار خود می‌رسد. تأثیرپذیری خاک در برابر جریان‌های زیرسطحی و تراکم کم خاک با مقاومت کم استحکام در برابر جریان‌های زیرسطحی، به کاهش مقدار مقاومت الکتریکی منجر می‌شود. افزایش مقدار مقاومت الکتریکی از سطوح ۲۵ متری به پایین، سطح مقاوم با نفوذپذیری کم نسبت به اعماق کمتر را آشکار می‌کند. همچنین از مقایسهٔ ردیف‌های ۲ و ۴ جدول ۱۰ مشخصات خاک، می‌توان این نتیجه را دریافت که در عمق پنج متر به دلیل درصد رطوبت بیشتر و تراکم کمتر (رس کمتر)، عدد SPT متناظر آن عددی با لندیس کوچک‌تر است و چنان که نمودار نشان می‌دهد، وجود رس در لایهٔ دوم و در ردیف چهارم به همراه رطوبت زیاد، به کاهش مقاومت الکتریکی منجر می‌شود.

جدول ۱۰: نوع خاک در گمانهٔ حفر شده BH4 پروفیل CD

BH4		
ردیف	عمق (m)	مشخصات خاک
1	0 – 1	خاک دستی
2	1 – 2/2	خاک سیلتی رسی به رنگ قهوه‌ای تیره با چسبندگی کم و درصد رطوبت متوسط (آبراهه‌ای)
3	2/2- 3	سیلت رسی به رنگ قهوه‌ای تیرهٔ خاک حاوی هوموس چسبندگی متوسط و درصد رطوبت متوسط
4	3 – 5/95	خاک سیلتی با درصد رطوبت خیلی زیاد به رنگ قهوه‌ای تیره از عمق ۵ – ۳/۸۰ به دلیل کولابی نمونه نداشتیم احتمال برخورد با تونل
5	5/95 – 6/4	خاک سیلتی رسی با درصد رطوبت خیلی زیاد به رنگ قهوه‌ای تیره
6	6/4 – 7/23	خاک سیلتی رسی درصد رطوبت بالا به رنگ قهوه‌ای تیره و چسبندگی زیاد
7	7/23 – 8/23	خاک سیلتی رسی با درصد رطوبت بالا به رنگ قهوه‌ای تیره و چسبندگی زیاد
8	8/23 – 10/3	خاک سیلتی رسی با درصد رس بالا به رنگ قهوه‌ای روشن‌تر نسبت به قبل تا ۱۰/۱۵ و چسبندگی زیاد و درصد رطوبت زیاد
9	10/3 – 11/1	خاک سیلتی رسی به رنگ قهوه‌ای تیره متمایل به قرمز درصد رس بیشتر و چسبندگی زیاد
10	11/1 – 12/28	خاک سیلتی رسی حاوی رگه‌های آهکی و نودول‌های آهکی به قطر ۱۵-۱۰ میلیمتر
11	12/28 – 13/38	خاک سیلتی رسی حاوی رگه‌های آهکی به رنگ سفید شیری رنگ کلی نمونه قهوه‌ای روشن با چسبندگی و درصد رطوبت نسبتاً زیاد
12	13/38 – 15/5	سیلت و رس با چسبندگی و درصد رطوبت زیاد مقادیر کمتر آهک از عمق ۱۴/۲۰-۱۳/۳۸ و ۱۵/۱۰ مقادیری هوموس سیاه و یا بقایای گیاهی به رنگ قهوه‌ای تیره و چسبندگی و درصد رطوبت زیاد

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]



شکل ۱۳: نمودار تغییرات مقاومت ویژهٔ الکتریکی در جهت عمق در محل گمانهٔ BH4 پروفیل CD

۵ـ بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل‌سازی معکوس و تهیهٔ نقشه‌های هم‌مقاومت الکتریکی، اطلاعات مناسبی از وضعیت کلی منطقه ارائه می‌دهد. به طور کلی، مقادیر مقاومت ویژه برای پروفیل‌های مورد مطالعه و روند تغییرات آن ، عمدتاً متأثر از واحدهای لسی منطقه است. اگرچه روند تغییرات در برخی قسمت‌ها افزایش یا کاهش یافته‌است؛ افزایش مقادیر مقاومت ویژه عمدتاً با واحدهای سنگی در ارتباط است همانند آنچه در پروفیل EF به صورت افزایش شدید مقدار مقاومت ویژه دیده می‌شود. همچنین کاهش مقدار مقاومت ویژه الکتریکی در پروفیل‌ها نیز مشاهده می‌شود که این کاهش به نظر می‌آید با افزایش رطوبت و میزان رس در ارتباط باشد. اگرچه با توجه به مشاهدهٔ نمک در اطراف چشمهٔ پایین‌دست روستا، می‌توان این مورد را نیز به عنوان یک گزینهٔ احتمالی دیگر در برخی نواحی به عنوان عامل کاهش مقاومت الکتریکی نام برد. نتایج حاصل از نقشهٔ هم‌مقاومت الکتریکی نیز اطلاعات مفیدی ارائه می‌دهد. تغییر توزیع مقاومت الکتریکی به صورت پهنه در سطوح مختلف نشان داد که با افزایش عمق ساختار زیرین به خصوص در سطوح تحتانی، ثبات به وجود می‌آید و با افزایش مقاومت الکتریکی نیز همراه است که در برابر رخداد فرسایش و انتقال تونل‌ها در سطوح زیرین، مقاومت نشان می‌دهد. البته این مورد نیازمند بررسی‌های بیشتر است؛ زیرا با توجه به مقدار مقاومت الکتریکی و نتایج به دست آمده از مطالعات ژئوتکنیکی، جنس سنگ کف منطقه احتمالاً از آهک‌های هوازده است. این مورد می‌تواند موضوع انحلال را در آینده به ذهن آورد. از دستاوردهای دیگر مطالعهٔ ژئوالکتریک محدودهٔ روستای چشمه‌لی، افزایش مقدار مقاومت الکتریکی در بخش جنوبی روستا است که روند متفاوتی نسبت به سایر بخش‌ها دارد و در نقشه‌های هم‌مقاومت آشکار شده‌است. احتمالاً از دست دادن رطوبت و خالی ماندن خلل و فرج بین دانه‌بندی‌ها و اثرات فرسایش‌های تونلی، به افزایش مقاومت الکتریکی منجر می‌شود.

با توجه به نتایج مطالعات ژئوتکنیکی، در اغلب موارد و بر اساس تحلیل نتایج می‌توان گفت که در خاک‌های با طبقه‌بندی CL (لسی نرم[1])، مقاومت الکتریکی در حدود ۱۳-۹ اهم متر و مقاومت الکتریکی برای خاک‌های با طبقه‌بندی

[1] SOFT

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

CL (لسی سخت[1])، در حدود ۹-۴ اهم‌متر است. افزایش درصد رس و رطوبت نسبی، به افزایش تراکم (عدد SPT بالا) و کاهش مقاومت الکتریکی منجر می‌شود. از طرف دیگر، کاهش درصد رس و رطوبت‌به‌به کاهش تراکم (عدد SPT پایین) و افزایش نسبی مقاومت الکتریکی در این نوع خاک‌ها منجر می‌شود؛ به همین دلیل، آشکارسازی سطوح مربوط به رس و سیلت با توجه به ماهیت و حساسیت آنها در برابر پدیدهٔ فرسایش، از موارد مهم این پژوهش است. به طور مشخص، در این نوع خاک‌ها و فرسایش مختص آنها (خندقی یا تونلی)، مقاومت الکتریکی در تونل‌ها و حفره‌های خالی ایجاد شده، افزایش و در تونل‌ها و حفره‌های پر شده با جریان‌های زیر سطحی و رطوبت زیاد (گل و لای)، کاهش می‌یابد.

جدول ۱۲: مقایسهٔ پارامتر ژئوفیزیکی مقاومت الکتریکی با سایر پارامترهای ژئوتکنیکی در خاک‌های لسی

عدد SPT	میزان رطوبت	میزان رس	مقاومت الکتریکی	رنج مقاومت (اهم متر)	رده‌بندی خاک
پایین	پایین	پایین	بالاتر	۱۳-۹	Soft
متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	۱۱-۱۰	Medium
بالا	بالا	بالا	پائین تر	۹-۴	Hard

به طور کلی، با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعهٔ حاضر، می‌توان گفت فراوانی سیلت در سطوح میانی که محل جریان آب‌های زیرسطحی است با افزایش انرژی جریان، مقاومت خود را از دست می‌دهد و همراه با جریان‌های زیر سطحی حمل می‌شود که نمود آن تونل‌های فرسایشی است. در ادامه، در بخش فوقانی تونل‌های فرسایشی در زون‌هایی که میزان سیلت با حد خمیری کم توزیع شده‌است، ریزش و تخریب بخش فوقانی به سطح زمین مهاجرت می‌کند و به شکل فروچاله نمایان می‌شود. افزایش انرژی جریان در ادوار بعدی، به افزایش ابعاد تونل‌های فرسایشی منجر می‌شود و در اثر تخریب به شکل خندق درمی‌آید که در ابتدا و انتهای تونل‌های فرسایشی روستای چشمه‌لی رخنمون دارد. در نهایت با توسعهٔ فرسایش در محدودهٔ روستا، مورفولوژی این ناحیه تغییر می‌کند. بی‌توجهی به این پدیده در مناطق مسکونی، می‌تواند آسیب‌های قابل ملاحظه‌ای به بار بیاورد که نیازمند تمهیدات مناسب است.

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که روش ژئوالکتریک با توجه به حساسیت مقادیر مقاومت الکتریکی به تغییرات ساختاری در سطوح زیرین، قابلیت مناسبی دارد و در صورت استفاده، به کاهش هزینه‌ها در سایر مطالعات اجرایی منجر می‌شود. همچنین سرعت برداشت، تحلیل و نتیجه‌گیری این روش در مقایسه با سایر روش‌های اجرایی بالا است.

منابع و مآخذ

1. Abu-Hassanein, Z.; Benson, C.; & L. Blotz, 1996. Electrical Resistivity of Compacted Clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5), 397-406.
2. Bahrami, K.; Fatemi Aqda, S. M.; Talkhabloo, M.; & H. Jamalizadeh, 2016. The role of tunnel erosion in the formation of North Kalaleh sinkholes in Golestan province, *9th Iranian Conference on Engineering Geology and Environment* (in Persian).
3. Bell, F. G., 2007. Engineering Geology. Second Edition, ISBN-13:978q-0-7506-8077-6, P.213, Elsevier Ltd., All rights reserved. http://books.elsevier.com.

[1] Hard

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

4. Bernatek-Jakiel, A.; Kacprzak, A.; & M. Stolarczyk, 2016. Impact of soil Characteristics on piping activity in a mountainous area under a temperate climate (Bieszczady Mts., Eastern Carpathians), *Catena*, 141,117-129.
5. Bhattarai, R.; & D. Dutta., 2006. Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield Using GIS at Catchment Scale, Water Resour, 21, 1635-1647. [http://doi.org/*10.1007*/s11269-006-9118-z].
6. Dotterweich, M., 2008. The history of soil erosion and fluvial deposits in small catchments of central Europe: Deciphering the long-term interaction between humans and the environment, *Geomorphology*, 101, 192-208. [https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.023].
7. Erfan, SH.; Rezaie KH.; Lak, R.; & S. M. Ale Ali, 2019. Integration of sedimentology and geoelectrical studies in Quaternary deposits in western and eastern coastal areas of southern part of Lake Urmia, *Iranian Quaternary Journal of Iran*, 5(1), 59-79 (in Persian).
8. Giahi, S., 2010. Investigation of sedimentological characteristics and environmental role of Losses in Gorgan-Dasht region, thesis, University of Tehran (in Persian).
9. Grabowski, R. C.; Droppo, I. G.; & G. Wharton, 2011. Erodibility of cohesive sediment: the importance of sediment properties, *Earth-Science Reviews*, 105(3), 101-120.
10. Habberjem, G. M., & G. E. Watkins., (1967). The use of square configuration in resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting*. 15, 455-467.
11. Kariminejad, N.; Hosseinalzadeh, M.; & H. Pourghasemi, 2020. A Review of Spatial Monitoring of Piping Collapse Using Unmanned Aerial Vehicle in Loess-Derived Soils in the Golestan Province, *Watershed Management Research*, 33(3), 53-69 (in Persian).
12. Karim, M. Z., & S. Tucker-Kulesza., (2017). Conference: Geotechnical Frontiers 2017. http://dx.doi.org/10.1061/9780784480465.006.
13. Keesstra, S. D.; Bouma, J.; Wallinga, J.; Tittonell, P.; Smith, P.; Cerdà, A.; Montanarella, L.; Quinton, J. N.; Pachepsky, Y.; & W. H. van der Putten, 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals, *Soil*, 2, 111-128. [http://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016].
14. Kiani, F.; Jalalian A.; & A. Pashaei, 2005. Using Archaeological Information to Investigate the Sedimentation Time of Windy Sediments in Golestan Province, Proceedings of the First National Conference on Wind Erosion, Yazd University (in Persian).
15. Kibria, G., & M. S. Hossain., (2012). Investigation of geotechnical parameters affecting electrical resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 138(12), 1520-1529.
16. Kolagari, A., 1992. Principles of geophysical discoveries, First Edition, Tabriz University Press (in Persian).
17. Lal, R., 2001. Soil degradation by erosion. Land Degrad. 12, 519-539. [https://doi.org/10.1002/ldr.472].
18. Loke, M. H., 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys. (http://www.abem.se/ftp/Loke/Res2dinv.pdf).
19. Marsh, W. M.; & J. Grossa.; (1996). Environmental Geography: Science, Land Use, and Earth Systems; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA.
20. Oldeman, L. R., 1991. Global extent of soil degradationو In Bi-Annual Report 1991-1992/ISRIC; International Soil Reference and Information Centre (ISRIC): Wageningen, The Netherlands, 1992, 19-36.
21. Pashaei, A., 2003. A study of the ancient soils of Golestan province as evidence for climate change in the Pleistocene, the third regional conference and the first national conference on climate change, the Meteorological Organization and the University of Isfahan (in Persian).
22. Pimentel, D., & N. Kounang., (1998). Ecology of Soil Erosion in Ecosystems. *Ecosystems*. 1, 416-426. [https://link.springer.com/article/10.1007/s100219900035].
23. Reynolds, J. M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental, *Geophysics*, 418-459.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

24. Rezaei, H., 2013. Investigation of the effect of dynamic density and static loads on the shear resistance of loesses in Golestan, PhD thesis in Engineering Geology, Ferdowsi University of Mashhad (in Persian).
25. Routschek, A.; Schmidt, J.; & F. Kreienkamp, 2014. Impact of climate change on soil erosion—A high-resolution projection on catchment scale until 2100 in Saxony/Germany. *Catena*, 121, 99-109. [https://doi.org/10.1016/j.catena. 2014.04.019].
26. Servati, M.; Qudusi, J.; & Z. Teymouri Yansari, 2009. Geomorphology of loesses in Yali Badrak region, northeast of Golestan province, north of Kalaleh city, *Physical Geography Quarterly*, 1, 97-114 (in Persian).
27. Servati, M.; Qudusi J.; & M. Dadkhah, 2008. Factors influencing the formation and spread of Gully erosion in Losses, *Journal of Research and Construction in Natural Resources*, 78, 20-33 (in Persian).
28. Talebi, A., 2011. Study of physical and chemical variables of marn and its effect on various forms of erosion in Hablehroud watershed, 7th Iranian Conference on Engineering Geology and Environment, Shahroud, Shahroud University of Technology (in Persian).
29. Telford, W. M.; Geldart, L. P.; & R. E. Sheriff, 1990. Applied Geophysics (second edition). Cambridge University Press.
30. Tosic, R.; Dragicevic, S.; Kostadinov, S.; & N. Dragovic, 2011. Assessment of Soil Erosion Potential by the Usle Method: Case Study, Republic of Srpska—BiH. Fresenius Environ, *Bull*, 20, 1910-1917.
31. Veerasingam, S.; Venkatachalapathy, R.; & T. Ramkumar, 2012. Heavy metals and ecological risk assessment in marine sediments of Chennai, India, *Carpathian J. Earth Environ. Sci*, 7, 111-124.
32. Wilson, G. V.; Rigby, J. R.; & S. M. Dabney, 2015. Soil pipe collapses in a loess pasture of Goodwin Creek watershed, Mississippi: role of soil properties and past land use, *Earth Surface Proccess and Landform*, 40, 1448-1463.
33. Woodward, J., & I. Foster., (1997). Erosion and suspended sediment transfer in river catchments: Environmental controls, processes and problems. *Geography*. 82, 353-376.
34. Yamani, M., & M. Akbarian., (2013). The effect of sedimentological characteristics on the development of tunnel erosion in the Flysch Makran Formation (Case study: Jask city area). *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 7, 1-17 (in Persian).
35. Yang, D.; Kanae, S.; Oki, T.; Koike, T.; & K. Musiake, 2003. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes, *Hydrol. Process*, 17, 2913-2928. [https://doi.org/10.1002/hyp.1441].
36. Zhao, G.; Mu, X.; Wen, Z.; Wang, F.; & P. Gao, 2013. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China, *Land Degrad*, 24, 499-510. [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.2246].
37. Zhou, Q. Y.; Shimada, J.; & A. Sato, 2001. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography, *Water Resources Research*, 37(2), 273-285.
38. Zhu, T. X.; Luk, S. H.; & Q. G. Cai, 2002. Tunnel erosion and sediment production in the hilly loess region, North China, *Journal of Hydrology*, 257, 78-90.
39. Zhu, T. X., 2003. Tunnel development over a 12-year period in a semi-arid catchment of the Loess Plateau, China, *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 507-525.
40. Zhu, T. X., 2012. Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China, *Geomorphology*, 153, 144-155.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

Assessment of Tunnel Erosion in Cheshmeh Lee Village in Golestan Province

Aydin Moradi: *Expert of the Environmental Hazards and Meteorological Disasters Research, Natural Disasters Research Institute, Tehran*
Somayeh Emadodin[1]: *Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Golestan University, Gorgan*
Alireza Sedaghat Deghi: *Expert of the Environmental Hazards and Meteorological Disasters Research, Natural Disasters Research Institute, Tehran*

Article History (Received: 2022/05/14 **Accepted:** 2022/08/20**)**

Extended abstract

1- Introduction

Sinkholes are processes of land deformation that create conical shapes with different dimensions in karst and loess areas, and if they occur in high frequency in one area, they form a specific topography. Sinkholes in loesses occur for various reasons and the main cause is the phenomenon of collapsibility in loesses. Sinkholes create spatial landscapes after formation and make subsequent changes in the earth's surface. In Iran, a large amount of valuable soil is lost to erosion every year for various reasons. The amount of soil loss by this phenomenon is estimated at about 2 billion tons, which is estimated as 7.6% of the world's total erosion, and a significant amount of soil enters the rivers as sediment every year. One type of erosions is tunnel erosion, which has been less studied compared to surface erosion due to its complex formation and measurement difficulties. Tunnel erosion is one of the water erosions whose occurrence causes significant changes in the earth's landscape and environmental degradation. This type of erosion is often caused by dissolution. Cheshmeh Lee village is located 45 km northeast of Kalaleh and 27 km southwest of Maraveh Tappeh in Golestan province.

2- Methodology

Geoelectric studies in the Cheshmeh Lee village had been considered with the aim of studying sinkholes, hidden created channels and their path, soil horizons and geological units, possible fractures, surface and groundwater as well as bedrock structures. A total of four profiles named as AB, CD, EF, and GH were designed in this village, then the data were collected using dipole-dipole array with an electrode distance of 10 meters for different separation steps. The data obtained from the Geoelectric studies were processed after the field data were collected.

3- Results

AB profile

The range of variation of the resistivity value across the obtained section is not large. Changes in the amount of resistivity indicate small changes in the type of geological strata that are often associated with area loess. However, in some parts, the amount of resistivity has slightly increased or decreased. The increase in resistivity is probably related to the compaction (density) of loess units, and the decrease in resistivity can be due to the presence of moisture, salt (due to its observation in downstream springs) or an increase in clay.

CD profile

There is a similar trend in terms of change in the amount of resistivity in the AB profile. The amount of resistivity affected by loess units has changed in the area. However, in some parts of the cross-section, an

[1] **Corresponding Author: s.emadodin@.gu.ac.ir**

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]

increase or decrease in the specific resistance can be observed. The amount of resistivity has decreased in medium depths, especially in the middle of the section. Given the amount of resistance obtained, probably indicates the beginning of the floor stone in this section.

EF profile

The highest amount of resistivity is distributed at higher depths. Increased resistivity can indicate the beginning of the depth of the floor stone in this area.

GH profile

As in the previous profiles, in this profile, the main changes of special resistance are related to the loess units of the region, and sometimes in some parts, an increase or decrease in the amount of special resistance can be observed. Considering the residential location of the village along with the outcrops of sinkholes and erosion tunnels, 4 points were selected and introduced for drilling holes in order to study the geotechnical features of the area. This part of the study includes field operations such as drilling boreholes, and conducting field experiments, and laboratory experiments. Also, this part of the research was conducted with the objectives of determining the soil type and thickness of soil layers, determining the stratification and geotechnical conditions of the soil and examining the physical and mechanical characteristics of the soil.

4- Discussion & Conclusions

The results of inverse modeling and preparation of all-electrical resistance maps provided appropriate information about the general state of the region. In general, the values of resistivity for the studied profiles showed the trend of changes in the amount of resistivity, which are mainly affected by the loess units of the region. However, the trend of change has increased or decreased in some parts. Increasing the amount of resistivity is mainly connected with stone units. The results of the analyses conducted show that the Geoelectric technique has a good capability due to the sensitivity of the amount of electrical resistance to the structural changes in the lower levels, and if this technique is used, it leads to a reduction in costs in other executive studies. Also, the speed of harvesting, analyzing and drawing conclusions from this technique is high compared to other executive methods.

Key Words: Cheshmeh Lee village, Geotechnic, Geoelectric, Tunnel erosion

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.12.4]