

سال ششم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۷
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۰۶ تاریخ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۵/۱۶
صص: ۷۹-۴۹

معیاری ساده برای پهنه‌بندی حساسیت زمین به رخداد فروچاله در مطالعات پایه شبکه‌های خطوط ریلی و انتقال نیرو در ابرکوه یزد

محمد اخوان قالیباف^۱، استادیار علوم خاک، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، ایران
مجتبی رضوی، کارشناس ارشد علوم خاک، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، ایران

چکیده

این مطالعه در دشت آبرفتی مخروط افکنه‌ای ابرکوه انجام شد. اهمیت موضوع مطالعه در رخداد فرونشست، که در ابعاد تا یک دهم هکتار و با عمق تا حدود ده متر است، چنان می‌باشد که در غالب موارد این پدیده نهان و در زیر سطح خاک پدید آمده است. هدف از این مطالعه پیدا نمودن معیار ساده از چند شاخص معدود با نمونه‌برداری از سطح زمین جهت تشخیص استعداد زمین به فروچاله به منظور مدیریت در کاربری اراضی است. در این تحقیق از شیوه‌های تلفیقی مشاهدات سطحی اراضی تا روش‌های کمی برداشت‌های ژئوالکتریک و آزمایشات معمول شیمی و فیزیک خاک استفاده گردید. مسیری به طول ۴۰۰ متر در طول فروچاله‌های ابرکوه با دستگاه ژئوالکتریک بررسی و حفرات کوچک و بزرگ زیر سطحی شناسایی و تصویری از نقاط حساس به نشست تهیه گردید. سپس در راستای مسیر ژئوالکتریک و با اختلاف میکروولت موجود در منطقه نمونه‌هایی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتیمتری تهیه شد. از میانگین سه شاخص هدایت الکتریکی، فراوانی یون‌های موثر در واگرایی، از نسبت‌های یک به پنج خاک و آب، و حد روانی، معیار تشخیص خطر فرونشست بدست آمد و نقشه پهنه‌بندی حساسیت ترسیم شد. با ارزیابی وضعیت خطوط ریلی در حال احداث یزد - اقلید و شبکه دکل‌های انتقال نیرو مشخص گردید که تقریباً تمامی خط ریلی در محدوده ابرکوه و بخشی از مسیر دکل‌های برق از محدوده با حساسیت بیشینه یا بسیار شدید عبور داده شده است.

کلمات کلیدی: معیار تشخیص، کمینه شاخص‌ها، پهنه‌بندی رخداد فروچاله، راه آهن، دکل برق

مقدمه

در طبیعت خاک‌های ریزدانه خاصی وجود دارند که در صورت قرار گرفتن در معرض آب به سهولت شسته شده و فرسایش می‌یابند. این خاک‌ها که عموماً رسی هستند، همراه با میزان سدیم تبادل‌ی بالا، شدیداً خصوصیت واگرایی دارند (سلوکی، ۱۳۷۷). واگرایی خاک پدیده‌ای فیزیکی-شیمیایی می‌باشد که این پدیده با فرسایش در خاک‌های سیلتی رس دار و یا بدون رس و همچنین خاک‌های ماسه‌ای ریزدانه که اساساً دارای چسبندگی بسیار کم یا فاقد چسبندگی هستند، تفاوت دارد. در خاک‌های واگرای غیر رسی ماهیت پدیده فرسایش، مکانیکی بوده در حالی که بروز فرسایش و آب شستگی در رس‌های واگرا، تابعی از مشخصات شیمیایی آب و نوع کانی‌های رسی می‌باشد. واگرایی خاک^۱ و ناپایداری سطح زمین به صورت نشست زمین^۲ و به شکل فروچاله‌ها در ابرکوه یزد موضوعی است که در ایران و جهان، هرچند عوامل تشدید کنندگی متفاوتی از جمله تکنوتیک، انحلال املاح پرمحلول و کارست را برای آن ذکر نموده‌اند ولی تماماً به یک عامل اصلی منتهی می‌گردد و آن برداشت‌های بی‌رویه از سفره‌های آب زیر زمینی است (جباری، ۱۳۸۳ و زارع مهرجردی، ۱۳۹۰). در این رخداد به عواملی مانند انحلال املاح، کارست‌های سنگ‌پی، تکتونیک و نقش رس در مقاومت خاک در گزارش‌های متفاوت توجه شده است. هرچند در علت واقعه فرونشست نقش افت سطح سفره غیر قابل انکار است ولی در نحوه وقوع این پدیده می‌تواند عوامل متفاوتی دخیل باشد که در این خصوص شاید بتوان نظریه ژئودوالیتی یا زوجیت بکار رفته در خصوص ژئومرفولوژی ایران توسط پورخسروانی (۱۳۹۳) اشاره نمود. این وضعیت می‌تواند به دلیل خصوصیت خاصی از زمین، این رخ داد نشست را دیرتر، زودتر و یا با شکل متفاوتی از نقطه دیگری نمایان گردد. اخوان قالیباف و چیژیکووا (۱۹۹۸)^۳ به بررسی کانی شناسی در اراضی سیلابی دشت یزد پرداختند و نقش آب را

¹ Soil Divergency

² Land subsidence

³ Akhavan-Ghalibaf and Chijikova, 1998

در انتقال کانی‌های رسی موثر تشخیص دادند. اخوان قالیباف و المدرسی^۱ (۲۰۰۹) با توجه به شکاف‌های غول‌آسا در بخش‌هایی از آبرفت‌های قدیمی یزد، نقش رسهای گروه اسمکتیت را موثر دانستند. اخوان و محمدی (۱۳۹۰)، در مطالعه کانی‌شناسی رس در دشت یزد اردکان تیپ غالب کانی‌های رسی را گروه ایلات با بیش از ۸۰ درصد بدست آوردند. محمدی جوزدانی و اخوان قالیباف (۲۰۱۱)^۲ با بررسی رسوبات، با آنالیزهای ترمال و طیف سنجی فلئورسنس اشعه ایکس سعی نمودند چینه‌شناسی دشت رسوبی یزد اردکان را از نظر منشا با سازندهای زمین‌شناسی کنونی مقایسه نمایند. آنها در تحقیق خود از نمونه‌های رسوبات رسی جدید و قدیمی دشت سیلابی یزد - اردکان و نیز بعضی از سازندهایی که در ناحیه یزد می‌تواند در تولید رسوبات رسی موثر باشند آزمایش پراش اشعه ایکس به عمل آوردند. آنها همچنین در دشت یزد - اردکان، بعد از ایلات، به ترتیب نزولی، کلریت، کائولینیت و اسمکتیت را تشخیص دادند. مهنهاد و همکاران (۱۳۹۰) نقش گسل‌ها را در دشت یزد اردکان در تغذیه سفره‌های این دشت مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه پهنه‌بندی گسیختگی و نشست زمین در دشت سیلابی یزد- اردکان بر اساس شاخص‌های فیزیکی و کریستالوشیمی با توجه به جنبه‌های کانی‌شناسی رس توسط اخوان و همکاران (۱۳۹۲) نقش تغییر و تحول در کانی‌های رسی را به عنوان یک عامل اصلی در تشدید واگرایی و نشست زمین به دست آوردند. همچنین در این تحقیق کانی‌های رسی در دشت آبرفتی قدیمی را ایلات به همراه اسمکتیت به دست آوردند و گزارش نمودند که بخشی از کانی‌های رسی با تجزیه و انحلال به مواد غیربلورین تبدیل شده است. در گزارش اخیر در خصوص نشست زمین در دشت یزد اردکان مانند ناحیه رستاق و یا بخش‌هایی از خویدک یزد شکاف‌ها و رانش‌هایی با طول ۱۰۰ متر، عرض چند متر (۲-۵ متر) و عمق تا ۳۰ متر ذکر گردیده است. همچنین در بخش نتایج و بحث این گزارش آن‌ها این

¹ Akhavan-Ghalibaf and Almodarresi

² Mohammadi-Jozdani and Akhavan-Ghalibaf (2011)

پدیده را از مشکلات جنبی برداشت بی‌رویه آب که ناسازگار با اقلیم و بیلان آب ناحیه بوده است ذکر نمودند. آنها این وضعیت را در نتیجه تغییر در روش برداشت آب از حدود دهه ۵۰ زمانی که قنات‌ها جای خود را به چاه‌های عمیق دادند و بر تعداد چاه‌های جدید نیز در دشت‌ها روز به روز افزوده گردید، ذکر نمودند. یکی از دلایل تشدید نشست زمین در دشت‌های ایران را به خشکسالی‌هایی مربوط دانسته‌اند، که از دهه ۷۰ افزایش یافته در حالی که مصرف آب نه تنها متناسب با کمبود بارش‌ها کمتر نشده است بلکه حتی به نحوی تصاعدی با رشد و توسعه اراضی کشاورزی و صنعتی افزایش یافته است. رهبر عالم شیرازی و اخوان قالیباف (۲۰۱۴)^۱ با مقایسه سازندهای دولومیتی سلطانیه مربوط به دیرینه زیستی در جنوب یزد با سازندهای آهکی ناپبند مربوط به میانه زیستی، روند هوازدگی ضعیف‌تری را برای سازندهای دولومیتی گزارش نمودند. آنها آب و هوای خشک و بیابانی را دلیلی برای محدودیت هوازدگی و انحلال دولومیت‌های یزد در مقایسه با دولومیت‌های مناطق سرد و مرطوب اروپایی ذکر نمودند. اخوان قالیباف (۱۳۷۹ و ۱۳۸۸) نقش کانی‌های رسی را در ایجاد واگرایی خاک در دشت یزد اردکان موثر دانست. عالمی (۱۳۸۱) عنوان نمود، در دو دهه اخیر نشست و گسیختگی زمین در استان یزد و دشت یزد- اردکان عامل ایجاد گسیختگی در سطح جاده‌ها، شکسته شدن لوله‌های آب‌رسانی، کج شدن دکل‌های برق و ایجاد نشست‌های نامتقارن در ساختمان‌ها و در نتیجه ایجاد شکستگی در سازه‌ها شده است. بنا به نظر آمیغ پی و همکاران (۱۳۸۹)، فرو نشست‌ها در اثر برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی بوجود می‌آیند. در مناطقی که بارندگی نمی‌تواند سرعت برداشت را جبران نماید، برداشت بیش از حد از سفره‌های عمیق رستاق و اردکان موجب کاهش فشار پیرومتریک حدود سه متر در سال شده است. این کاهش فشار موجب برهم خوردن تعادل و افزایش فشار حاصل از بار رسوبات بالایی سفره شده است، به طوری که تخلخل رسوبات با جورشدگی مجدد و متراکم شدن رسوبات کاهش یافته و در با

^۱ Rahbar Alam Shirazi and Akhavan Ghalibaf (2014)

افزایش تراکم، فرونشست حاصل شده است (زارع مهرجویی، ۱۳۹۰). رس‌ها در حضور یون سدیم تبادل‌پذیری و آگرایی بیشتری را نشان می‌دهند چنانکه این وضعیت در مطالعه انجام شده توسط اخوان قالیباف و محمدی (۱۳۹۰) در ایجاد و آگرایی خاک دشت یزد- اردکان مؤثر تشخیص داده شد. رسوبات آهک‌دار یا کارست‌ها در اصطلاح فنی به پدیده خوردگی و انحلال توده سنگ‌های کربناته، آهک و دولومیت گفته می‌شود. اما این پدیده در سایر سنگ‌های انحلال‌پذیر مانند سنگ‌های سولفاتی و کلریدی نیز رخ می‌دهد. ضمن اینکه پدیده فوق در سنگ‌های آواری هم دیده می‌شود. برای مثال، ماسه سنگ‌ها و کنگلومراهای دارای سیمان کربناته و یا سولفاته تحت تأثیر انحلال، کارستی خواهند شد (قبادی، ۱۳۸۶). شکل‌گیری یک سیمای کارستی در گرو وجود دو عامل است: نخست اینکه توده سنگ قابلیت انحلال داشته باشد و دوم اینکه زمینه تشکیل یک سیستم جریان آب زیر زمینی فراهم باشد. با تعریف گفته شده حدود ۲۷ درصد پوسته زمین از رسوبات آهک‌دار تشکیل گردیده است. هرچه پوشش سطحی ضخیمتر باشد، فروچاله کارستی با ابعاد بزرگتری تشکیل می‌شود و سرعت آب باید به حدی باشد که بتواند ذرات خاک را جابجا کند. کرم و همکاران (۱۳۹۲) تعداد فروچاله‌ها را در دشت ابرکوه و در اطراف روستای فیض آباد ۲۸ عدد و در اطراف روستای هروک ۳ مورد ذکر نمودند. آنها با استفاده از روش سامانه اطلاعات جغرافیایی شامل ۸ لایه اطلاعاتی مانند لایه‌های توپوگرافی، سطح آب زیر زمینی، زمین‌شناسی، پوشش‌های خاک و گیاه و فعالیت‌های انسانی، به طور کلی ۳۲ درصد از منطقه مورد مطالعه خود، در ناحیه مرکزی شهرستان ابرکوه، را در معرض خطر بالای وقوع فروچاله به دست آوردند. در گزارشی که از نقش رس‌ها در فرونشست اراضی در ابرکوه یزد توسط اخوان قالیباف و همکاران (۱۹۹۴) انجام گردید فراوانی رس‌های از گروه اسمکتیت در ایجاد فروچاله‌ها تشخیص داده شد. آنها تلاش نمودند تا در این مطالعه در بخش‌های مهرآباد و بهمن از شهر ابرکوه، به ویژه در حاشیه روستاهای فیض آباد و هروک، هرچند منشا ایجاد چاله‌ها به دلیل انحلال آهک و به پدیده کارست نسبت داده شده است، سعی نمودند تا با مطالعه کانی‌شناسی رس در

این ناحیه، نقش رس در تشدید این پدیده بررسی گردد. در مطالعه انجام شده توسط امین و همکاران^۱ (۲۰۱۷) در دشت یزد - اردکان در محدوده مجاور شهر یزد جا به جایی‌های افقی شکاف‌ها و عمودی سطح زمین پس از هر مرحله از مرطوب و خشک شدن سطح زمین، اندازه گیری شد و نقش رسوبات و خاک‌های سطحی در این پدیده موثر به دست آمد. اهمیت مطالعه موضوع نشست زمین به دلیل اختلال در کاربری‌های عمرانی مانند زیر سازی جاده ها و بناها و ناپایداری خطوط ریلی، انتقال نیرو، گاز و آب برکسی پوشیده نیست. حتی وضعیت شدید آن مانند آنچه در ابرکوه رخ داده است، کاربری‌های کشاورزی را نیز دچار مشکل نموده است. از این رو در تهیه نقشه‌های پهنه بندی شدت، لازم است تمامی عواملی که در این عارضه نقش دارد را مورد توجه قرار داد. واگرایی پدیده‌ای است که طی آن خاک‌های رسی در مجاورت آب چسبندگی خود را از دست داده و حتی اگر سرعت جریان آب کم باشد به آسانی شسته شده و فرسایش می‌یابند. مهمترین عامل موثر بر پدیده واگرایی، غلظت یون سدیم در آب منفذی خاک و تک ظرفیتی بودن کاتیون مذکور می‌باشد که باعث افزایش ضخامت لایه آب دوگانه‌ای که ذرات رس را احاطه می‌کند گشته، و در نتیجه نیروی جاذبه بین ذرات کاهش می‌یابد (اخوان قالیباف، ۱۳۸۸ و میدلتون^۲، ۱۹۳۰). از آنجا که کانی‌های رس با توجه به سطح ویژه بالا و دارا بودن سطوح تبادل با یون‌هایی مانند سدیم، می‌تواند یکی از عوامل موثر در واگرایی خاک و رانش زمین باشد، کانی‌های بین لایه‌ای مانند ایلایت - اسمکتیت نسبت به انواع اسمکتیت منیزیم دار و تری اکتاهدرال بیشتر در محیط‌هایی که تبخیری نیستند بوجود می‌آیند (بیافورت^۳، ۱۹۱۰). از آنجا که با پایین رفتن سطح سفره آب زیر زمینی در یک آبخوان و با توجه به قابلیت فشرده شدن رسوبات پیرامون سفره آب پس از خشک شدن، نشست زمین اتفاق می‌افتد، از این رو در شدت این فشرده‌گی و فرونشست عوامل اصلی می‌تواند اندازه ذرات رسوبات، کانی

¹ Amin et al, 2017

² Middleton

³ Biaufort, 1910

شناسی رس، ژئوشیمی، آب روزنه‌ای و زیر زمینی باشد که تعیین‌کننده میزان نشست است (پولند و دیویس، ۱۹۶۹)^۱. میزان نشست می‌تواند از یک تا ده متر به ازای هر ۱۰ متر افت سطح آب سفره اتفاق بیافتد و آن نیز به عواملی مانند ضخامت رسوبات، و تراکم پذیری آن بستگی دارد. همچنین حرکت جانبی زمین هم در مواردی که از منابع نفت و گاز بهره‌برداری شده است گزارش شده است (باور، ۱۹۷۷)^۲. در تحقیق تیری و جک کوئین^۳ (۱۹۹۳) و هک (۱۹۹۱)^۴ در زمینه پراکندگی رس‌های با سن کرتاسه در رسوبات دریایی عمیق نشان دادند که آن تحت تاثیر کوه زایی‌ها، نوسانات سطح آب دریا و شکل اقیانوس‌ها در گذشته بوده است. آنها از چهار کانی رسی اصلی در مطالعه خود، منشا دو تای آن را مربوط به رسوبات اقیانوسی و دوتای دیگر را مربوط به تبدیل رس‌ها به یکدیگر به صورت جدید مربوط دانستند. آنها ایلات و کلریت به همراه ایلات - اسمکتیت‌های بین لایه‌ای و اسمکتیت را بر روی بستر دریایی بازالتی و آذرآواری‌ها مربوط دانستند. اما کائولینیت با مقادیر متغیری از ایلات، کلریت، اسمکتیت و کانی‌های بین لایه‌ای را نتیجه مواد آواری و تخریبی قاره‌ای از پلات فرم‌های^۵ ساحلی دانستند. همچنین آنها اسمکتیت را یک کانی غالب در رسوبات عمیق دریایی کرتاسه تشخیص دادند. این کانی ثانویه توانسته است در نتیجه تغییر و تحول بر روی کانی‌هایی که در طی مراحل آواری به اقیانوس منتقل شده است، بوجود آمده باشد. آنها این روند را مرتبط با سطح آب دریا دانستند و ابراز نمودند که کانی‌های رسی دارای قابلیت لخته^۶ شدن متفاوتی هستند، به طوری که این تمایل به ترتیب از کائولینیت به ایلات و به اسمکتیت کم می‌شود و گاهی این کانیها به صورت بین

¹ Poland & Davis, 1969

² Bouwer (1977)

³ Thiry and Jacquin (1993)

⁴ Haq (1991)

⁵ Platforms

⁶ Flocculation

لایه‌ای در امتداد محور C قرار می‌گیرند. رانکا و همکاران (۲۰۰۴)^۱ در کتاب منتشر شده از انستیتو دولتی ژئوتکنیک سوئد در بخش ۱,۳ از کتاب با عنوان خصوصیات ژئوتکنیکی رس‌های فعال^۲ به تفکیک رس‌ها از جنبه درجه فعالیت در رانش‌های زمین پرداختند. آنها رس‌های سریع که همان رس‌های روان^۳ تعریف شده است را در دسته‌های اصلی فعال و غیرفعال و همچنین در اجزای فعال، معمولی و غیر فعال قرار دادند. همچنین از شاخص‌های تعیین فعالیت رس را علاوه بر نوع رس، نوع کاتیون جذب شده در سطح آن ذکر نمودند. بطوری که اسمکتیت را در مجاورت کلسیم درجه یک فعالیت و در مجاورت سدیم درجه ۷ با بیشینه درجه فعالیت نسبت دادند، در حالی که مسکویت از کانی‌های گروه میکا دارای درجه ۰/۲۳ است. از شاخص‌های تعیین شدت فعالیت رس که در کتاب رانکا و همکاران ارائه شده است، نسبت شاخص خمیری برحسب درصد از شاخص‌های حدود اتربرگ به درصد رس است، چنان که با استفاده از این شاخص رس‌های با نسبت بیشتر از ۱/۴ در گروه رس‌های فعال یا سریع قرار می‌گیرد. فین وج و همکاران (۲۰۰۶)^۴ در مطالعه خود در دشت رسی بانکوک ارتباط بین برداشت آب زیرزمینی که از دهه ۸۰ به بالغ بر ۲ میلیون متر مکعب در روز رسیده است را سبب نشست سالانه ۱۲۰ میلی متری دشت تشخیص دادند. پاچیکو و همکاران (۲۰۰۶)^۵ در مکزیک در دره کورتارو نشست زمین را بر روی رسوبات ریز دانه رسی مدل سازی نمودند به طوری که در این مدل، نشست این دره با هندسه آبخوان مرتبط بوده و تنش‌های برشی و کششی حاصله خصوصیات ظاهری گسل را به همراه داشته است. بر طبق گزارش بورچاردت (۱۹۸۹)^۶ که بیدلیت می‌تواند نتیجه هوازگی میکاهای دی‌اکتاهدرال حاصل شده باشند، زیرا اینها قبلاً جانیشینی لازم

¹ Rankka et al (2004)

² Quick clays

³ Liquefied clays

⁴ Phien-wej (2006)

⁵ Pacheko et al (2006)

⁶ Borchardt (1989)

را در لایه تتراهدرا ل خود برای ساختمان بیدلیت پیدا نموده‌اند. ترموگرام‌هایی که توسط راس و هندریکس (۱۹۵۷)^۱ و همچنین ترموگرام‌هایی که در گزارش مک کنزی (۱۹۴۵)^۲ از رس بیدلیت ارائه شده بود احتمال تشکیل رس‌های گروه اسمکتیت در خاک‌های مناطق خشک را مطرح نمودند. در گزارشی که در خصوص نشست زمین در دره سان جواکین^۳ توسط لودورف و همکاران (۲۰۱۴) منتشر شد است. تشخیص حفره‌های زیرزمینی، چه از منشاء طبیعی مانند حفره کارستی و یا از منشاء انسانی مانند گالری‌های معدن، در برنامه‌ریزی و استفاده از زمین از اهمیت حیاتی برخوردار است. در پروژه‌های ساخت و ساز، و به‌ویژه در مهندسی عمران، لازم است عمق هر گونه حفره زیر سطح سایت ساخت و ساز رفته تعیین و می‌تواند به عنوان اثرات نامطلوب تلقی شود و باعث فرونشست و یا فروپاشی کامل گردد (دی برون و بل، ۲۰۰۱؛^۴ والتهام^۵ و همکاران، ۲۰۰۵). توماس^۶ و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعات خود ثابت نمود که بین فرونشست و سطح پی‌زومتری در زمان ارتباط وجود دارد. افزون بر این بین فرونشست و مکان چاه پمپاژ، فاصله تا رودخانه، زمین‌شناسی و خاک هم بستگی وجود دارد. کو و همکاران (۲۰۱۴) در شهر خیابان چین در یک دوره ۷ ساله با استفاده از تصاویر راداری توانستند و وضعیت نشست زمین را ثبت نمایند. آنها در مطالعه خود از تکنیک InSAR استفاده کردند.

برای بررسی وضعیت درونی زمین و لایه‌های آن از روش اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی یا ژئوالکتریک استعاده می‌گردد. در این روش یک منبع مصنوعی از جریان الکتریسته را جهت عبور آن در داخل زمین به وسیله الکترودهای نقطه‌ای به کار می‌برند. روش ژئوالکتریک یا مقاومت سنجی از قدیمی‌ترین روش‌های الکتریکی است

¹ Ross and Hendricks (1945)

² Mackenzie (1945)

³ San Joaquin Valley

⁴ De Bruyn, I.A., and Bell, F.G

⁵ Waltham

⁶ Tomas

که در آن هدف ثبت اختلاف پتانسیل ایجاد شده ناشی از ارسال جریان مستقیم به داخل زمین است (هابرجم و واتکینز، ۱۹۶۷)^۱. برای ثبت این اختلاف پتانسیل از آرایش‌های مختلف الکترودی استفاده می‌شود. انواع آرایش‌ها یا آرایه‌های الکترودی وجود دارد، به طور مثال ونر، شلومبرژه، دو قطبی - دوقطبی که می‌تواند بسته به نوع کاربرد و قدرت تفکیک آنها مفید باشد. نوعاً جریان الکتریکی از یک جفت الکتروود به زمین وارد می‌شود. جفت الکتروود دیگر میزان ولتاژ را اندازه گیری می‌کند. موقعیت جغرافیایی هر الکتروود در طی برداشت‌ها توسط موقعیت یاب جهانی^۲ دستی ثبت می‌گردد (هابرجم، ۱۹۷۳)^۳. تفسیر داده‌های برداشتی مربوط به موقعیت الکتروودها نسبت به یکدیگر است (سایت اینترنتی ژئوآب^۴ (۲۰۱۷). روش اکتشافات ژئوالکتریک در حدود سال‌های دهه ۱۹۰۰ ارائه شد. روش مقاومت سنجی را نخستین بار اشلومبرگر^۵، استاد فیزیک مدرسه عالی معدن پاریس در سال ۱۹۱۲ ابداع کرد. وی سونداژ الکتریکی قائم را جهت تغییرات عمودی و عمقی مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌ها به کار برده است. بسیاری از اشکال آرایش الکتروودی مانند ونر^۶، اشلومبرگر، دو قطبی - دو قطبی و قطبی - دوقطبی جهت پروفیل و سونداژ الکتریکی توسعه یافته است. آرایه مربعی برای نواحی ناهمسان‌گرد و دارای شکستگی استفاده می‌گردد. زوهدی و همکاران. (۱۹۹۰)^۷ روش‌های ژئوفیزیک سطحی، شامل مقاومت ویژه الکتریکی، را جهت بررسی آب‌های زیرزمینی به کار بردند. توموگرافی یا پرتونگاری مقطعی مقاومت الکتریکی، شامل تعیین توزیع مقاومت الکتریکی زیرسطحی است. این روش با در نظر گرفتن تعداد بسیار زیادی از قرائت‌ها یا از سطح و یا از سوراخ انجام می‌شود (تلفورد^۸ و همکاران،

^۱ Habberjem & Watkins, 1967

^۲ GPS

^۳ Habberjem, 1972

^۴ <http://geoab.com/MiningDrakshaf> , 2017

^۵ Schlumberger

^۶ Wenner

^۷ Zohdy et al, 1990

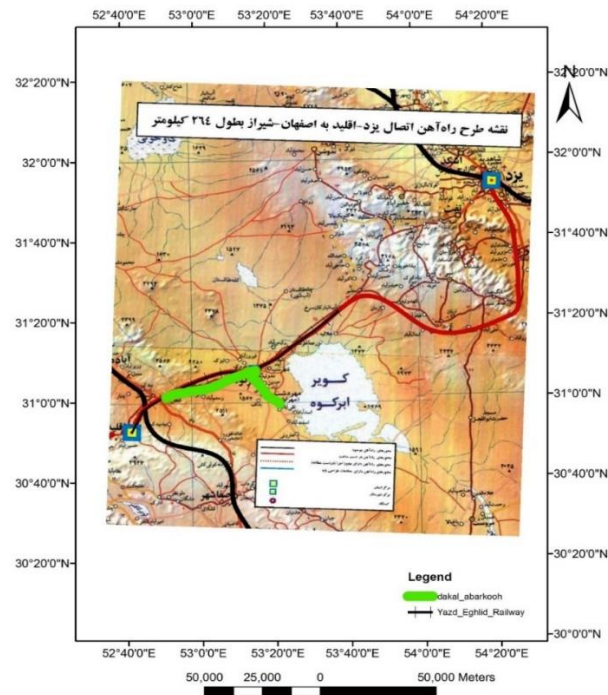
^۸ Telford

۱۹۹۰؛ استور^۱ و همکاران، ۲۰۰۰). بسیاری از محققین اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریک را جهت مشخص کردن ویژگی‌های لایه آبدار و به مقدار کمتری جهت جدا کردن لایه‌های محافظ آبخوان به کار برده‌اند. در دهه آخر سده بیستم با توسعه الگوریتم‌های رایانه‌ای و سامانه کابل چند الکتروودی روش‌های مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی توسعه چشمگیری یافت. به طوری که برای تفسیر داده‌های ژئوالکتریک از روش مدل‌سازی معکوس برای شناسایی یک کانال ماسه‌ای مصنوعی استفاده گردید. روش سونداژ الکتریکی جهت تعیین عمق، ضخامت و مرز لایه‌های آبدار، مشخص کردن زون‌های با پتانسیل بالا در یک لایه آبدار تعیین مرز بین زون‌های آب شیرین و شور و مشخص کردن آلودگی آب‌های زیرزمینی بکار برده شده است.

هدف از مطالعه حاضر دست‌یابی به کمینه تعداد شاخص‌ها در بدست آوردن معیاری برای تشخیص حساسیت اراضی به فرونشست است که کاربرد آن را در تشخیص مناطق خطر آسان نماید. از اهداف دیگر این تحقیق ارزیابی موقعیت مکانی پروژه راه آهن یزد-اقلید است که مطابق با گزارش سایت اینترنتی راه آهن^۲ (۲۰۱۸) به طول ۲۷۴ کیلومتر، بصورت یک خطه، با سرعت طرح ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت برای مسافری و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت برای باری طراحی گردیده است. این طرح در مسیر خود از شهرهای یزد، مهریز، ابرکوه و اقلید، عبور می‌نماید. همچنین از اهداف این تحقیق ارزیابی مسیر خطوط انتقال برق فشار قوی که موقعیت آن بر اساس سامانه اطلاعات جغرافیایی اداره برق یزد بدست آمده است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵). در شکل یک موقعیت این خطوط نشان داده شده است.

¹ store

² Cdtic, 2018

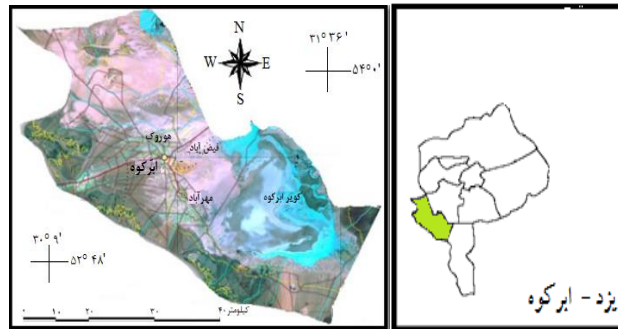


شکل ۱- نقشه مسیر معین شده جهت احداث راه آهن یزد اقلید (اقتباس از سایت اینترنتی راه آهن و بانک سامانه اطلاعات جغرافیایی اداره برق یزد).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان ابرکوه در جنوب غرب استان یزد قرار گرفته و دارای مختصات $۰۹'$ تا ۳۰° عرض شمالی و $۴۸'$ تا ۵۲° طول شرقی می‌باشد. این شهرستان دارای مساحتی بالغ بر ۲۰۰۰ کیلومتر مربع و حداکثر ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد ۳۳۰۰ متر در جنوب و حوالی خانه خوره و حداقل آن ۱۴۵۰ متر و در حول کویر نمک ابرکوه است (شکل ۲).



شکل ۲- موقعیت شهرستان ابرکوه در استان یزد

در شمال این شهرستان، دشت آبرفتی ابرکوه قرار دارد که اراضی اطراف دو روستای واقع در این دشت (فیض آباد و هوروک) با پدیده‌ی فروچاله مواجه شده‌اند. اراضی اطراف روستای فیض آباد دارای ۲۸ فروچاله و اراضی اطراف روستای هوروک دارای ۳ فروچاله می‌باشند. (شکل ۳).

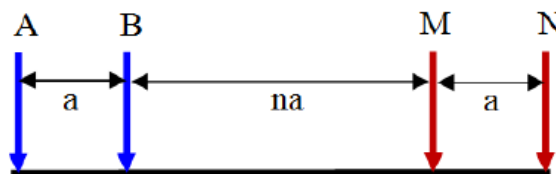


شکل ۳- فروچاله ایجاد شده در شهرستان ابرکوه

روش کار

در گام اول مسیری به طول ۴۰۰ متر با موقعیت جغرافیایی $31^{\circ} 12' 39/43''$ شمالی و $53^{\circ} 18' 50/23''$ شرقی تا $31^{\circ} 12' 38/35''$ شمالی و $53^{\circ} 18' 38/52''$ شرقی، را در طول فروچاله‌های ابرکوه با دستگاه ژئوالکتریک WDDS-2 با قدرت ۳۵۰۰ وات و

کابل هوشمند، برای برداشت نیمه اتوماتیک مقاومت ویژه الکتریکی، بررسی و مقاومت لایه‌های زیر سطحی اندازه‌گیری گردید. آرایش الکترودها در این بررسی به صورت آرایش دوقطبی-دوقطبی بود که در این نوع آرایش فواصل بین الکترودهای جریان و پتانسیل یکسان می‌باشد (شکل ۴). فاصله الکترودها از هم در این بررسی، ۲۰ متر بود. سپس تصویری از حفرات کوچک و بزرگ زیرسطحی و نقاط حساس به نشست تهیه و مقاومت ویژه کانی‌های رسی معین گردید (شکل ۴).



شکل ۴- آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی (A و B الکترودهای جریان و M و N الکترودهای اختلاف پتانسیل)

در این روش با الکترودهای A و B که ۲۰ سانتیمتر در زمین فرو رفته بودند، جریان به زمین تزریق و اختلاف پتانسیل بین دو الکترود M و N اندازه‌گیری شد. این دو الکترود نیز ۲۰ سانتیمتر در زمین فرو رفته بودند. اتصال تمامی الکترودها با آب پای میله‌های الکترود و مرطوب نمودن خاک اطراف آن با زمین برقرار گردید. به این ترتیب مقاومت ویژه لایه‌های مختلف زمین اندازه‌گیری گردید. و برای تهیه تصویری از داده‌های کمی ژئوالکتریک از نرم افزار Res2Dniv استفاده شد (شکل ۵) (تصویر برداری دو و سه بعدی، ۲۰۱۰)^۱. از موقعیت‌های مشاهداتی به تعداد ۱۷ عدد جهت پهنه‌بندی و تعدادی موقعیت شاهد و چاله‌ها برای کنترل در امتداد و اطراف موقعیت آزمایش ژئوالکتریک، از عمق صفر تا ۳۰ سانتیمتر نمونه‌گیری شد و خصوصیات شیمیایی و فیزیکی - شیمیایی از خاک و عصاره‌های خاک و آب به نسبت یک به پنج

^۱ Geoelectrical Imaging 2D & 3D, 2010

و گل اشباع و همچنین از نمونه آب چاه آبیاری به روش‌های معمول و مطابق با دستورالعمل پیچ و همکاران (۱۹۸۲) آزمایش گردید. به منظور بدست آوردن حداقل تعداد شاخص‌های واگیرایی از عوامل خاک در مدل ارزیابی بیابان‌زایی تنها سه شاخص در نظر گرفته شد. اولین شاخص نسبت جمع سدیم و منیزیم به سدیم در عصاره آب و خاک از نسبت یک به پنج بود. دومین شاخص، حد روانی از پارامترهای مکانیک خاک به عنوان عامل رس فعال در واگیرایی خاک در نظر گرفته شد. سومین شاخص خاک از ویژگی فیزیکی شیمیایی، هدایت الکتریکی، یا شاخص غلظت املاح پرمحلول در عصاره خاک و آب، در نظر گرفته شد. زیرا غلظت املاح در انعقاد یا پراکنده سازی کلئیدهای خاک موثر است. این شاخص‌ها در موقعیت‌های پروفیل شاهد و سایر نقاط با پراکندگی تصادفی به تعداد کل ۱۷ موقعیت برای مدل پهنه‌بندی خطر فروچاله‌ها انتخاب شد که به همراه مسیر ریل راه آهن و شبکه دکل برق بر روی تصویر گوگل در شکل ۵ نشان داده شده است. از نقاط معین شده با توجه به شاخص‌های بدست آمده میانگین هندسی هر نقطه با توجه به کلاس‌های چهارگانه شدت بیابان‌زایی کدگذاری و میانگین هندسی بدست آمد. برای میانگین هندسی بدست آمده حد کفایت نمونه‌گیری با توجه به رابطه یک بدست آمد (بلوچنگو و همکاران، ۲۰۱۵):^۲

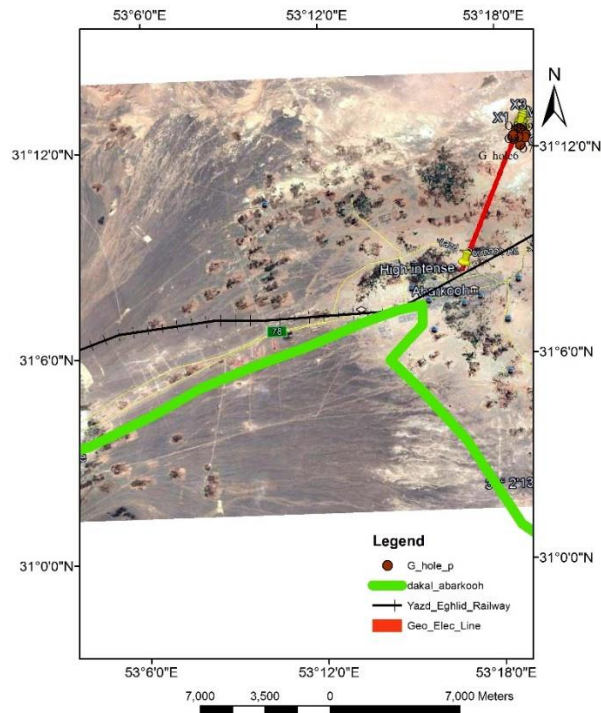
$$n = t^2 (s^2 / \Delta^2) \quad (1)$$

که در رابطه فوق n ، برابر با تعداد نمونه‌های لازم t ، از جدول برای دقت ۹۵ درصد s ، انحراف معیار و Δ ، درصد انحراف قابل قبول از میانگین شاخص‌ها به مقدار ۲۰ درصد از میانگین کل میانگین‌های هندسی در نظر گرفته شد. پس از تهیه مدل پهنه بندی خطر فرونشست با یازده موقعیت از تعدادی از موقعیت‌های باقیمانده برای آزمون دقت پهنه بندی استفاده شد. به منظور بررسی صحت مدل پهنه بندی از نرم افزار GS+، با روش تیم و همکاران^۳ (۲۰۰۴) استفاده شد.

¹ Page et al, 1982

² Belochenko, 2015

³ Timm et al, 2004



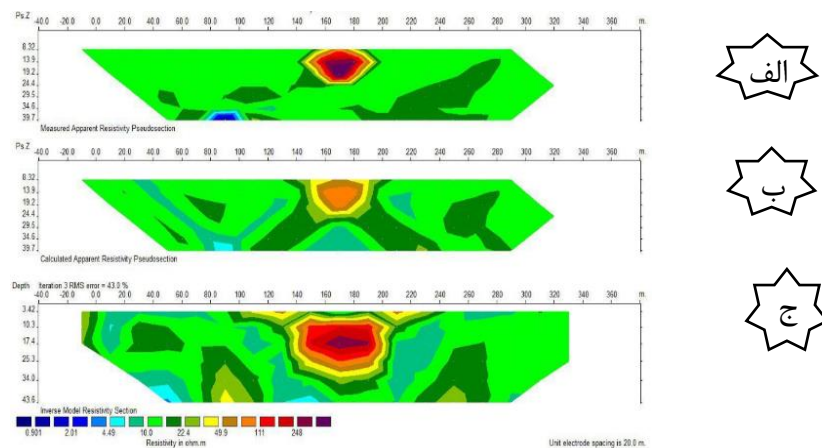
شکل ۵- تصویر گوگل ارث منطقه مورد مطالعه و مسیر آزمایش ژئوالکتریک جهت تعیین مقاومت ویژه لایه‌های زیرسطح

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی‌های ژئوالکتریک

مقاومت ویژه الکتریکی کانی‌های رسی در منطقه مورد مطالعه، از ۲۲/۰ تا ۵۰/۰ ohm.m متغیر است که با رنگ‌های سبز تا زرد بر روی شکل ۶ ج، مشخص می‌باشد. از مسیر ۴۰۰ متری بررسی‌های ژئوالکتریکی حدود ۱۲۰ متر یعنی در محدوده ۸۰ تا ۲۰۰ متر در عمق ۴۰ متری از سطح زمین حفره یا حفرات خالی بزرگی وجود دارد و این حفره‌های خالی بهم ربط دارند. تا اینکه این حفرات خالی مرتبط باهم به حفره بزرگ زیر فروچاله بزرگ متصل می‌گردند. در زیر ساختار دایره‌ای شکل که فرونشست

کرده بود نیز از شکل چنان بر می‌آید که در عمق ۱۰ متری از سطح زمین حفره‌ای خالی وجود دارد و احتمال نشست در مسیر ۲۹۰ تا ۴۰۰ متری بسیار فراوان است. قبل از خاکریز حفره کوچکی در عمق ۳۰ متری از سطح زمین مشاهده می‌شود. زیر خاکریز نیز حفره کوچکی وجود دارد که به هیچ یک از حفرات دیگر ارتباطی ندارد. در راستای فرو چاله‌های بعد از خاکریز نیز حفرات بزرگی وجود دارد که به نظر می‌رسد این حفرات بوسیله راهرویی به هم متصل باشند. نتایج کمی ژئوالکتریک را با استفاده از نرم افزار RES2DNIV نشان داد که از ۱۴۰ متر تا ۲۰۰ متر حفره بسیار بزرگی در عمق ۱۰ متری از زیر زمین وجود دارد. که دارای مقاومتی بیش از ۲۵۰ اهم بر متر است که نشان دهنده فضای خالی و وجود هوا است. این نرم افزار همچنین نشان داد که مقاومت لایه‌های زمین از کمتر از ۱ اهم بر متر تا بیش از ۲۵۰ اهم بر متر متغیر است (شکل ۶). تصویری که از نرم افزار RES2DNIV بدست آمده از عمق سه بخش است: مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده (شکل ۶-الف)، شبه مقطع محاسبه شده (شکل ۶-ب) و مقطع مقاومتی حاصل از روش وارون سازی می باشد (شکل ۶-ج).



شکل ۶ - نتایج کمی بدست آمده از نرم‌افزار RES2DNIV از بررسی‌های ژئوالکتریک

۲-۳- آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

خاک‌های ناحیه مورد مطالعه دارای بافتی رسی تا لومی شنی است که مربوط به زمان‌های رسوب گذاری آبرفتها و شدت جریان‌های آبرفتی در زمان رسوب‌گذاری تغییر نموده است که با تفاوت در درصدی اشیاعی^۱ خاک‌ها در جدول ۱ مشخص است. به طوری که خاک‌های با درصد رس بیشتر میزان رطوبت اشیاعی بیشتری را نشان داده‌اند. اندازه‌گیری واکنش خاک از عصاره گل اشیاع نشان داد که pH از ۶/۶۱ در نمونه ۳ تا ۷/۴۶ در نمونه ۴ متغیر بود که در بازه اسیدی ضعیف تا فلیائیت ضعیف قرار دارد. از شاخص فیزیکی-شیمیایی هدایت الکتریکی خاک منطقه مورد مطالعه نشان داد که خاک‌های این منطقه به جز در نمونه ۲ در همه نمونه‌ها شور بود. این تفاوت EC در نمونه ۲ با سایر نمونه‌ها به دلیل میکرورلیف موجود و شرایط آبشویی طبیعی بهتر در این موقعیت است (جدول ۱).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در عصاره‌های ۱:۵ و گل اشیاع

عصاره خاک						
گل اشیاع		(نسبت خاک به آب، ۱:۵)				
Ec(dS/m)	pH	Ec(dS/m)	pH	SP	عمق (cm)	نمونه
۱۹/۳۶	۷/۴۶	۳/۵۵	۷/۱۰	۲۱/۰	۰-۳۰	۱
۳/۵۳	۷/۱۲	۰/۹۲	۷/۲۸	۲۷/۰	۰-۳۰	۲
۵۴/۵۰	۶/۶۱	۴/۹۳	۷/۵۸	۱۷/۵	۰-۳۰	۳
۶۳/۶۰	۷/۱۴	۵/۸۲	۸/۲۱	۲۵/۰	۰-۳۰	۴

باتوجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات فیزیکی و شیمیایی معین گردید که کاتیون Na^+ به عنوان عامل قلیائیت خاک از فراوانی بیشتری برخوردار است. مقادیر بسیار زیاد Na^+ تبدلی در خاک منجر شده است تا در تناوب‌های خیس و خشک انبساط و

¹ sp

انقباض خاک تشدید یابد و نفوذ پذیری را در حالت خیس کاهش دهد. یون Na^+ قابل تعویض موجب دیسپرس شدن خاک شده است و بنابراین یکی از عوامل اصلی ایجاد واگرایی در خاک‌های رسی این ناحیه بوده است در اکثر نمونه‌ها میزان Mg^{2+} از Ca^{2+} بیشتر است بنابراین کاتیون Mg^{2+} اگرچه یک کاتیون دو ظرفیتی است ولی باعث دیسپرس شدن خاک شده است. (جدول‌های ۲ و ۳).

جدول ۲- یون‌های موجود در عصاره‌های خاک و آب ۱:۵ (meq/l):

نمونه	عمق (cm)	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
۱	۰-۳۰	۲۰	۱۵۴/۸	۳۶	۱۷	۸/۰	۲۰۰	۲۸/۴
۲	۰-۳۰	۱۰	۱۶۶/۶	۱۲	۱۱	۴/۰	۱۶۰	۲/۷
۳	۰-۳۰	۴۷	۲۰۲/۷	۳۰	۱۴	۸/۰	۱۸۰	۷/۷
۴	۰-۳۰	۹	۲۵۰/۶	۱۶	۶	۵/۲	۲۰۰	۸/۴

جدول ۳- یون‌های موجود در عصاره گل اشباع (meq/l):

نمونه	عمق (cm)	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2+}	Cl^-	HCO_3^-
۱	۰-۳۰	۶۶	۴۵۸/۳	۹۲	۱۶	۰/۵۵۷	۴۴۰	۶/۶
۲	۰-۳۰	۳۷	۱۵۵/۸	۴۷	۱۱	۱/۰۰۰	۱۴۰	۰
۳	۰-۳۰	۵۴۷	۱۰۴۹/۴	۱۳۶	۲۴۷	۰/۹۸۶	۱۳۶۰	۴/۴
۴	۰-۳۰	۲۳۷	۱۲۸۹/۰	۲۵	۶۰	۱/۴۹	۱۳۰۰	۵/۴

میزان SAR در همه نمونه‌ها بالاست، SAR بالا موجب کاهش نفوذ آب در خاک، ایجاد کلوخه‌های محکم و سفت و سخت شدن زمین می‌گردد. میزان واگرایی خاک در عصاره‌های ۱:۵ و گل اشباع، در نمونه ۴، بسیار زیاد و در نمونه ۳ به دلیل بافت سبکتر بسیار کم می‌باشد (جدول ۴).

جدول ۴- نسبت‌های مختلف Ca^{2+} ، Mg^{2+} و Na^+ در عصاره های ۱:۵ و گل اشباع و

SAR					
$Na^+ + Mg^{2+} / Ca^{2+}$	$Na^+ / Ca^{2+} + Mg^{2+}$	Na^+ / Ca^{2+}	SAR	عمق (cm)	نمونه‌ها
عصاره خاک و آب با نسبت ۱:۵			عصاره گل اشباع		
۱۱/۷۵	۲/۹۲	۹/۱	۶۲/۴۴	۰-۳۰	۱
۲۵/۳۲	۱۱/۵۹	۲۴/۲۴	۲۸/۷۷	۰-۳۰	۲
۱۶/۶۲	۴/۶	۱۴/۴۸	۷۴/۸۸	۰-۳۰	۳
۴۴/۴۳	۱۱/۳۹	۴۱/۷۷	۱۹۸/۰۱	۰-۳۰	۴

در نمونه آب آبیاری نیز از بین کاتیون‌ها Na^+ و از بین آنیون‌ها SO_4^{2-} بیشترین میزان را دارا بود.

جدول ۵- محتوای یونی و بعضی خصوصیات فیزیکی شیمیایی و شیمیایی آب چاه منطقه

مورد مطالعه

آنیون‌ها			کاتیون‌ها						
meq/l									
HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	EC(μ mhos/cm)	pH	
۸	۹	۶۱۳	۴/۶	۱/۶	۴۹۲	۳۴	۳۰۰۰۰	۷/۲	نمونه آب آبیاری

۳-۳- پهنه‌بندی مناطق خطر فرونشست در دشت آبرفتی ابرکوه با استفاده از نرم

افزار ArcGIS

در جدول‌های ۶ و ۷، حدود کلاس‌های معین شده در این تحقیق بر اساس آزمایشات و مشاهدات بر روی زمین برای شاخص‌های مورد بررسی شامل هدایت الکتریکی^۱، حد روانی^۲ و نسبت مجموع یون‌های محلول سدیم و منیزیم به کلسیم^۳

^۱ EC

^۲ LL

^۳ $Na^+ + Mg^{2+} / Ca^{2+}$ (1:5, soil & water)

در عصاره یک به پنج خاک و آب و میانگین هندسی آنها برای ۱۷ موقعیت اولیه نشان داده شده است.

جدول ۶- کلاس‌بندی پارامترهای مورد ارزیابی در کلاس‌های کم، متوسط، شدید و خیلی شدید

شاخص‌های مورد ارزیابی	کلاس‌های شدت خطر فرونشست در بازه‌های شاخص‌های مورد ارزیابی			
	۱	۲	۳	۴
EC*, dS/m (1:5, soil & water)	<۱/۵	۱/۵ - ۳/۰	۳/۴ - ۰/۰	>۴/۰
LL **(%)	<۱۳/۰	۱۳/۱۷ - ۰/۰	۱۷/۰ - ۲۰/۰	>۲۰/۰
Na ⁺ +Mg ²⁺ /Ca ²⁺ (1:5, soil & water)	<۲۰/۰	۲۰/۰ - ۳۰/۰	۳۰/۴۰ - ۰/۰	>۴۰/۰
	*Electrical Conductivity		**Liquid Limit	

پس از بدست آوردن میانگین‌های هندسی از ۱۷ موقعیت فوق، مجدداً در ناحیه مورد مطالعه بازدید به عمل آمد و با توجه به شرایط موجود کلاس‌های چهارگانه حساسیت به فرونشست مطابق با جدول ۸ تعریف گردید. به طوری که نقاط نمونه‌برداری شده و نقاط مشاهداتی و فروچاله‌ها بر اساس درجه حساسیت در ۴ کلاس قرار داده شد که در آن کلاس ۱ به معنی حساسیت کم، کلاس ۲ حساسیت متوسط، کلاس ۳ حساسیت شدید و کلاس ۴ حساسیت خیلی شدید است.

جدول ۷- میانگین هندسی کلاس‌های پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی

نقاط	EC* (dS/m)	LL** (%)	Na ⁺ +Mg ²⁺ /Ca ²⁺	میانگین هندسی
۱	۳	۱	۱	۱/۴۴
۲	۱	۲	۲	۱/۵۹
۳	۴	۱	۱	۱/۵۹
۴	۴	۳	۴	۳/۶۳
۵	۳	۲	۲	۲/۲۹
۶	۳	۴	۳	۳/۳۰
۷	۱	۴	۳	۲/۲۹
۸	۱	۴	۴	۲/۵۲
۹	۲	۴	۴	۳/۱۷
۱۰	۳	۴	۳	۳/۳
۱۱	۴	۳	۳	۳/۳
۱۲	۲	۴	۴	۳/۱۷
۱۳	۴	۳	۳	۳/۳
۱۴	۳	۳	۴	۳/۳
۱۵	۴	۲	۴	۳/۱۷
۱۶	۳	۳	۴	۳/۳
۱۷	۳	۴	۳	۳/۳

* Electrical Conductivity

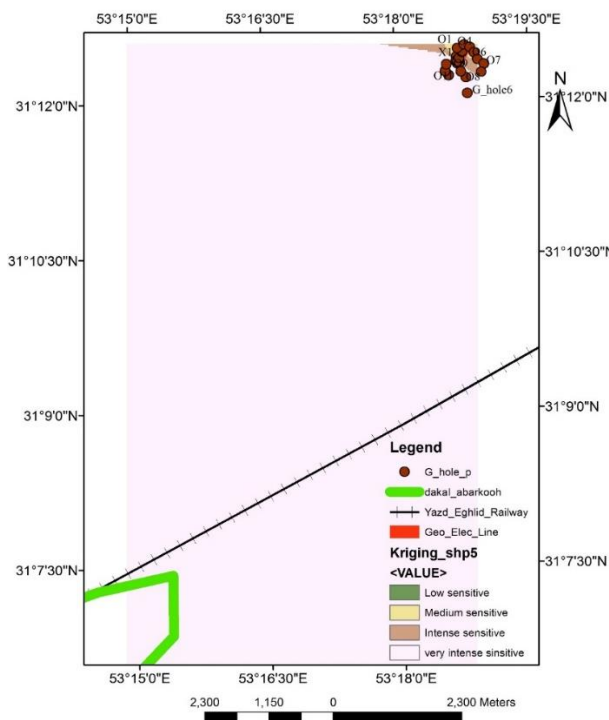
** Liquid Limit

جدول ۸- ارزیابی اراضی بر اساس میزان حساسیت نسبت به فرونشست

میزان حساسیت	میانگین هندسی
کم	۱-۱/۵
متوسط	۱/۲-۵
شدید	۳-۲
بسیار شدید	>۳

به منظور بررسی کفایت نمونه‌گیری از ۱۷ موقت فوق مطابق با رابطه یک در روش کار t، از جدول برای دقت ۹۵ درصد با درجه آزادی ۱۶ برابر است با ۲/۱۲۰ و

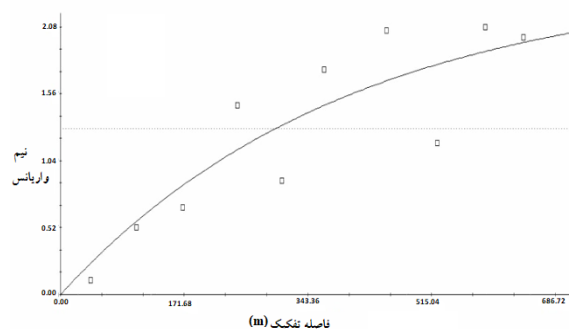
S، انحراف معیار، برابر با ۰/۷۰ و Δ ، درصد انحراف قابل قبول از میانگین شاخص‌ها به مقدار ۱۵ درصد از میانگین کل میانگین‌های هندسی که معادل با ۲/۸۴ است بر ابر با ۰/۴۲۶ به دست آمد. از این رو مقدار n، برابر با تعداد نمونه‌های لازم است برابر با ۱۲ محاسبه گردید که کمتر از ۱۷ نمونه مرحله اول مورد اندازه‌گیری است از این رو تعداد نمونه‌ها با دقت مورد نظر کفایت می‌نماید. پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت آبرفتی ابرکوه، در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل مسیر آزمایش ژئوالکتریک، نمونه‌های گرفته شده بر روی خط ژئوالکتریک، نقاط مشاهداتی، مسیر راه آهن یزد- شیراز و خط دکل های برق مشخص شده است.



شکل ۷ - پهنه بندی خطر مناطق فرونشست دشت آبرفتی ابرکوه و مسیر کاوش‌های ژئوالکتریکی

همان طور که در شکل هفت پیدا است بخش اصلی خطوط ریلی و بخشی از خطوط دکل برق در محدوده با حساسیت بسیار شدید قرار گرفته است که لازم است جهت اصلاح مسیر اقدام گردد.

نمودار واریوگرام که توسط نرم افزار GS+ ترسیم گردید در شکل ۸ نشان داده شده است. این نمودار بیانگر سطح معنی داری قابل قبول در پهنه بندی کریجینگ در زمین آمار، از جنبه پراکندگی داده‌ها در موقعیت‌های مشاهده‌ای است که با مدل نمایی^۱ به دست آمده است. نمودار نیم واریوگرام^۲ با پارامترهای ریاضی در مدل شامل $0.0010 = \text{Co}^3$ ، $\text{Co} + \text{C}^4 = 2.4500$ و دامنه $A^5 = 399.00$ ، همچنین پارامترهای آماری مدل شامل ضریب رگرسیون $r^2 = 0.781$ و باقیمانده مجموع مربعات $\text{RSS} = 0.335$ است.



شکل ۸- نمودار واریوگرام داده‌ها و در موقعیت‌های مکانی مشاهده‌ای

نتیجه‌گیری

در شکل ۹ خطوط پیشنهادی جهت اصلاح مسیر انتقال ریل راه آهن و دکل‌های برق به رنگ آبی به منظور اجتناب از خطر فروچاله‌های ابرکوه نشان داده است. پیشنهاد

¹ Exponential

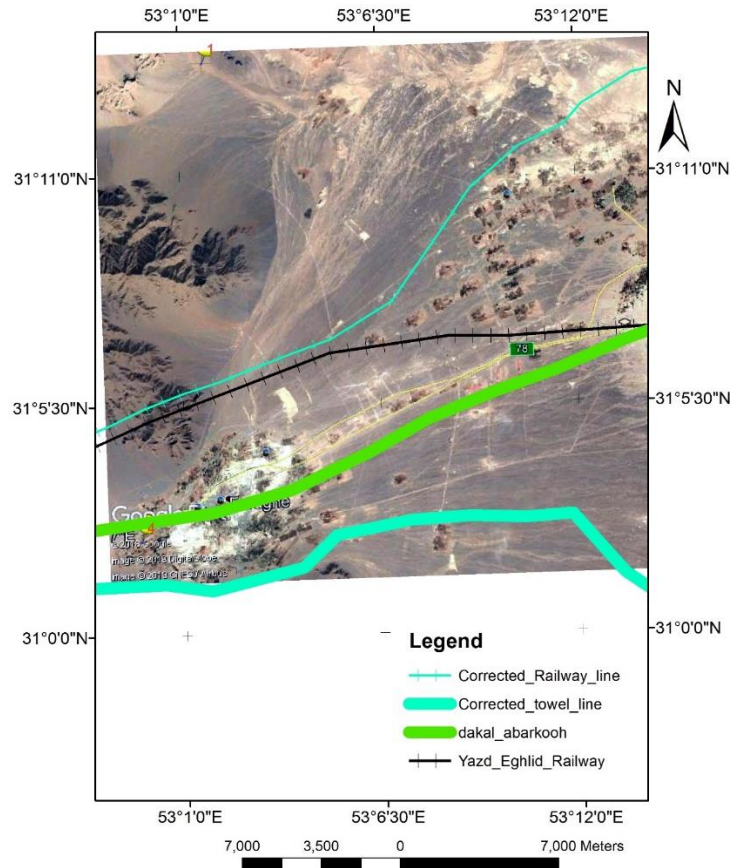
² Semivariogram

³ the Nugget variance

⁴ the Structural Variance Sill

⁵ Range

می‌گردد تا خط دردست اجرای ریلی به دلیل اینکه از محدوده با حساسیت بسیار شدید عبور داده شده است، به خط جدید اصلاح شده تغییر مسیر یابد. همچنین بخشی از محدوده دکل‌های برق به دلیل قرار گرفتن در محدوده با حساسیت بسیار شدید لازم است به خارج از محدوده خطر منتقل گردد و یا در برنامه توسعه خطوط از نواحی با حساسیت زیاد اجتناب شود. معیار پهنه‌بندی مناطق حساس به فروچاله‌های ابرکوه بر پایه اطلاعات خاک سطحی به روش حداقل شاخص‌ها با روش پهنه‌بندی خطر کرم و همکاران (۱۳۹۱) ارائه شده با لایه‌های متفاوت اطلاعاتی از جمله شیب، سطح آب زیر زمینی، زمین‌شناسی و مدیریت کاربری اراضی مطابقت نموده است. این می‌تواند مربوط به ویژگی خاص خاک‌ها در ابرکوه باشد که در موقتیت تجمع رس در مخروط افکنه آبرفتی فراغه ابرکوه پدید آمده است. خاص بودن وضعیت خاک در ابرکوه نسبت به دشت یزد به گونه‌ای است که در یزد و در مناطق حساس مطابق با گزارش حسینی و همکاران (۱۳۹۵) واگرایی خاک‌ها به شکل شق پدید آمده است ولی این واگرایی در ابرکوه به شکل چاله‌ها و گودال‌های زیرزمینی است. از آنجا که خاک خود تابعی از عوامل گوناگونی از جمله عوامل زمین‌شناسی، آب و هوایی، موجودات زنده، توپوگرافی، زمان تشکیل و اثرات انسانی است از این رو می‌توان از معیار خاک بدون در نظر گرفتن پارامترهای مستقل خاک به نقشه‌ای برای پهنه‌بندی خطر حساسیت به نشست زمین دست یافت. نقشه پهنه‌بندی بدست آمده در این طرح با کار کرم و همکاران (۱۳۹۱) که با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی به تهیه نقشه خطر نواحی مستعد به فروچاله در ابرکوه دست یافتند هماهنگی دارد.



شکل ۹- مسیر پیشنهادی اصلاح شده با رنگ آبی جهت خط راه آهن و دکل انتقال نیرو در محدوده ابرکوه یزد

منابع

آمیغ پی، معصومه، عربی، سیاوش، طالبی، علی، جمور، یحیی، (۱۳۸۹)، کاربرد تکنیک تداخل سنجی راداری در مطالعات مناطق فرونشست، سازمان نقشه برداری کشور. اخوان قالیباف، محمد، (۱۳۷۹)، بررسی وجود سپولیت در نهشته‌های زمین‌شناسی و خاک‌های دشت یزد-اردکان به روش‌های آنالیز حرارتی (DTA) و پراش اشعه ایکس (XRD)، هشتمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، مشهد

اخوان قالیباف، محمد، (۱۳۸۸)، تشکیل رس‌های گروه اسمکتایت در محیط خاک آبرفت‌های قدیمی یزد، هفدهمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، همدان
 اخوان قالیباف، محمد (۱۹۹۴)، پیدایش و تحول کانی‌های رس در رسوبات آبرفت جدید و قدیمی چهارم زمین‌شناسی دشت یزد-اردکان به عنوان کلیدی برای چینه‌شناسی و دگرگونی خاک یزد. نوزدهمین کنفرانس انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران. دانشگاه رگان.

اخوان قالیباف، محمد و سمیه محمدی، (۱۳۹۰)، کانی‌شناسی کمی رس در دشت رسی یزد- اردکان با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰، گزارش طرح پژوهشی دانشگاه یزد. ۲۳ص.
 اخوان قالیباف، محمد، هستی بیدکی و حمید مهرنهاد، (۱۹۹۴)، نقش ویژگی‌های کانی‌شناسی رس در شدت فرونشست زمین‌های دشت رسی ابرکوه یزد. مجله کاوش‌های جغرافیایی دانشگاه یزد ۳ (۱): ۲۰۷-۲۲۸.

اخوان قالیباف، محمد، حمید مهرنهاد، نصرت‌ا... امانیان، حمید رضا عظیم زاده و محمد حسین مختاری، (۱۳۹۲)، پهنه‌بندی گسیختگی و نشست زمین در دشت سیلابی یزد- اردکان بر اساس شاخص‌های فیزیکی و کریستالو شیمی با توجه به جنبه‌های کانی‌شناسی رس در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (فاز اول: مقیاس اکتشافی اولیه با خروجی نقشه ۱:۴۰۰۰۰۰)، طرح پژوهشی سازمان جهاد کشاورزی استان یزد، معاونت بهبود تولیدات گیاهی، محل اجرا در دانشگاه یزد. ۲۹ص.

پورخسروانی، محسن، (۱۳۹۳)، نظریه ژئودوالیتی (ایده‌ای در حوزه دانش ژئومورفولوژی)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال بیست و پنجم، شماره اول، صفحات: ۲۵-۳۶. جباری، ایرج، رضاییان، علی (۱۳۸۳)، علل و پیامدهای زمین‌ریخت‌شناختی شق‌های زمین در اشکذر یزد

فصلنامه جغرافیایی سرزمین، سال اول، شماره دوم، صفحات: ۴۸-۶۵.
 حسینی، محمد، محمد اخوان قالیباف، پیمان امین، حمید مهرنهاد و نصرت‌ا... امانیان، (۱۳۹۵)، تغییرات زمانی - مکانی، رانش و شق زمین در ارتباط با برداشت آب و

- شرایط ژئوشیمیایی و هیدروشیمیایی (شمال شرق دشت یزد با مقیاس ۱:۱۰۰۰)، طرح تحقیقاتی در دانشگاه یزد. کارفرما: وزارت نیرو، شرکت برق منطقه‌ای یزد، دبیر خانه تحقیقات برق. ۵۰ص.
- زارع مهرجردی، احمد علی، (۱۳۹۰)، بررسی پدیده نشست زمین و شکستگی‌های موجود در منطقه رستاق جنوب یزد، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال بیست و دوم، شماره سوم، صفحات: ۱۵۵-۱۶۶.
- سلوکی، حمیدرضا، (۱۳۷۷)، مطالعه خاک‌های واگرا در ارتباط با شرایط زمین شناسی در استان خوزستان، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس
- عالمی، افشین، (۱۳۸۱)، بررسی علل نشست زمین در دشت یزد-اردکان سومین همایش ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، پژوهشگاه نیرو، تهران
- قبادی، محمد حسین (۱۳۸۶)، زمین شناسی مهندسی کارست. دانشگاه بوعلی سینا. نسخه دوم. ۳۰۴ص.
- کرم امیر، پرویزضیائیان و نعیمه السادات محصل همدانی، (۱۳۹۱)، بررسی عوامل مؤثر در وقوع فروچاله‌های دشت ابرکوه و تهیه نقشه خطر نواحی مستعد بروز آن، کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی.
- مهر نهاد، حمید، فاطمی عقدا، سید محمود، جعفری، هادی، میرزینعلی، سید امیر، (۱۳۹۰)، بررسی نقش گسل‌های مهم و عمده محدوده دشت یزد اردکان و تاثیر آن در کمیت آبهای زیر زمینی دشت یزد - اردکان، طرح پژوهشی شرکت آب منطقه‌ای، دانشگاه یزد، ۱۴۰ص.

Akhavan-Ghalibaf M and Chijikova N.P, (1998). Clay mineralogy, physical and chemical properties of some soils on the eolians in Central Iran, International Symposium of Arid lands soils, Ezmir, Turkey, PP:45-51.

Akhavan-Ghalibaf, M., and S., Alhoseini Almodarresi, (2009), The Vertisols (as paleosols) with their related giant land cracks as a disaster in Central Iran deserts. International Conference on Desertification in Memory of professor John B. Thornes (ICOD 2009). Murcia University, Spain.

- Amin, P., Akhavan-Ghalibaf, M., Hosseini, M., Dokukin, P., Savin, I., (2017). Geodesic investigation on land surface cracks dynamics in the zone of land subsidence with loamy soils in Central Iran. *Geo Science Scientific Journal*. RUDN University. Russia. 1:13-22.
- Belochenko, I. S., Smagin, A. V., Popok, L. B. & Popok, L. E. (2015). *Data Analysis and Mathematical Modeling in Ecology and Nature Management* Kuban Agrarian University publisher. Krasnodar. Northern Caucasus. Russia. 213p.
- Biaufort, D., (1910), Clay minerals indicators of basin evolution (Sanstone reservoirs). International Master in Advanced Clay Science, 104p.
- Borchardt, G., (1989), In chapter 14, smectites, Co-Editors: Dixon, J.B. and S.B. Weed. *Minerals in soil Environments*. Second Edition. SSSA. USA.1244p.
- Bouwer, Herman, (1977), Land subsidence and cracking due to ground water depletion, U.S. Water Conservation Laboratory, The Agricultural Research Service, U.S. Agriculture Department. *GROUND WATER*, Vol.15, No.5, PP: 358-365.
- De Bruyn, I.A., and Bell, F.G., (2001), The occurrence of sinkholes and subsidence depressions in the far West Rand and Gauteng Province, South Africa, and their engineering implications: *Environmental and Engineering Geoscience*, v. 7, p. 281–295. doi:10.2113/gsegeosci.7.3.281.
- Geoelectrical Imaging 2D & 3D. (2010). RES2DINV ver. 3.59 for Windows XP/Vista/7 Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geotomo software publisher. Malaysia. 151p.
- Habberjem, G. M. (1972). The effects of unisotivity on square array resistivity measurements. *Geophysical Prospecting*. 20: 249-266.
- Habberjem, G. M. & Watkins, G. E., (1967). The use of square configuration in resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting*. 15: 455-467.
- Haq, B., U., (1991), Sequence stratigraphy, sea level change, and significance for the deep sea, *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment*. 12: 3-39.
- Luhdorff S., J.W. Borchers and M. Carpenter, (2014), Consulting Engineers Land Subsidence from Groundwater Use in the San Joaquin Valley, Commissioned by the California Water Foundation. 20p.
- Mackenzie, R., C., (1957), *The differential thermal investigation of clays*. Mineralogical Society, London.
- Mohammadi-Joozdani, S., and M., Akhavan-Ghalibaf, (2011), Vertisols as a phenomenon related to Stratigraphy of quaternary in the Central Iran, Yazd paleoalluvials. XIV Dokuchaev society conference, aneventary 165-years from birth day of V.V. Dokuchaev. Saint Petersburg. Russia.

- Page, A. L., R.H. Miller, and D.R. Keeney. 1982. Methods of soil analysis. Part 2-Chemical and Microbiological Properties. ASA.SSSA.USA.1159p.
- Phien-wej N., P.H. Giao, P., Nutalaya, (2006), Land subsidence in Bangkok, Thailand, *Engineering Geology* 82 187– 201.
- Qu, Feifei, Qin Zhang, Zhong Lu, Chaoying, Zhao, Chengsheng Yang, Jing Zhang, (2014), Land subsidence and ground fissures in Xi'an, China 2005–2012 revealed. *Remote Sensing of Environment by multi-band InSAR time-series analysis*, 155 -366–376
- Rădulescu, V., Rădulescu, F., Diacopolos, C., & Popescu, M. (2003). *Geoelectrical study for delineating underground cavities in karst areas*. p 19-21.
- Rahbaralam Shirazi, F. and M. Akhavan Ghalibaf, (2014), The geological formations as a major factor of soil evolution in semiarid vertical zones of Iran. *Materials of Russian soil study*. 8 (35). Saint Petersburg University, PP: 117-120.
- Rankka, Karin, Yvonne, Andersson-Skold, Carina, Hulten, Rolf, Larsson, Virginie, Eroux and Torleif Dahlin, (2004), Quick clay in Sweden, 1.3. Geotechnical properties of quick clays, Swedish Geotechnical Institute, Report No 65, 148 p.
- Store, H., Storz, W., and Jacobs, F., (2000), Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of earth's upper crust: *Geophysical Prospecting*, v. 48, p. 455–471. doi:10.1046/j.1365-2478.2000.00196.x
- Telford, W.M., Geldart, L.P., and Sheriff, R.E., 1990, *Applied Geophysics*, second edition: Cambridge, Cambridge University Press, 770 p.
- Tomas, R, G. Herrera, J.M. Lopez-Sanchez, F. Vicente, A. Cuenca And J.J. Mallorquí. (2010). Study of the land subsidence in Orihuela City (SE Spain) using PSI data: Distribution, evolution and correlation with conditioning and triggering factors. *Engineering Geology* 115: 105–121
- Thiry, M., and T., Jacquin, (1993), Clay Minerals distribution related to rift activity, sea level changes and pale oceanography in the cretaceous of the Atlantic ocean. *Clay minerals*. 28:68-84.
- Waltham, T., Bell, F., & Culshaw, M. (2005), *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction: Chichester, England, Springer*, 382 p.
- Zohdy, A. A. R., Eaton, G.P., & Mabey, D. R. (1990). Application of surface geophysics to ground-water investigations. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, fourth ed., U.S.G.S.*, p. 123.

منابع اینترنتی

cdtic(2018)<https://www.cdtic.ir/Portal/home/?generaltext/237097/276759/276864>/راہ-آهن-یزد-اقلید/

geoab. 2017. <http://geoab.com/MiningDrakshaf> , 2017, Poland, J., F., Davis, G., H., (1969), Land subsidence due to withdrawal of fluids. U. S. Geological Survey, Sacramento, California, and Washington, D. C. Geological Society of America. Observed (08 July 2015) at <http://reg.gsapubs.org/content/2/187.abstract>
Wikipedia, (2015), <https://fa.wikipedia.org/wiki/Abarkuh>(Observed, 10.07.2015).