

Joint sets identification and determination of resistivity orientation by analyzing the results of square array azimuthal resistivity, in the west of Sabzevar ophiolite

Shirzadi, A R.¹  | Ghanati, R.¹ 

1. Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: rghanati@ut.ac.ir

(Received: 1 Jan 2024, Revised: 19 March 2024, Accepted: 21 May 2024, Published online: 5 Oct 2024)

Summary

The study area is located in the NE of Iran, in the NW of “Sabzevar” city, in the west of Sabzevar ophiolite (Upper Cretaceous). Harzburgite, dunite, lherzolite and wehrlite (mostly serpentized) are the main ultramafic rocks of Sabzevar ophiolite. This area is well-known for the presence of chromite mines. Due to tectonic forces, chromite layers are displaced from their original place by faults in many locations. One of the most important steps in mining exploration of such area is the identification of geological structures. In peridotitic rocks, identification of faults, in the natural topographic surfaces, is usually difficult. Identification of faults can help reveal the correct location of the hidden deposits which in turn, can reduce the costs of mining operations and increase productivity. Azimuthal resistivity sounding (ARS) and square array resistivity methods (SAR) are geoelectrical methods that are widely used to identify the direction of discontinuities in fractured, faulted, and jointed rocks. In this research, one SAR sounding is used in a part of the mining area to identify the local geological structure. Two advantages of the square array, compared to the Schlumberger, is the need for a smaller area and the less dependence of the resistivity to changes in direction. The deployment of the square array requires an area of about 65% of the Schlumberger or Wenner arrays. The bedrock of the location is made of serpentized peridotites. About 80% of the original peridotitic (or ultramafic) rocks are altered to serpentinites. Using a geoelectric resistivity device, data collection was performed on serpentinites with no overburden. This method was carried out to check the existence of a suspected fault in one of the mines. The apparent resistivities measured by the square array method showed significant changes in different geographical directions. Apparent resistivities were calculated by increasing the length of the side of the square array, in 4 steps, which increases the depth of exploration to the greater depths. Due to the lack of large surfaces in the study area, the deployment of the square array was implemented with spatial limitation (maximum 13.8m). Obviously, by increasing the length of the side of the square array, more accurate information can be obtained from the subsurface conditions. The length of the square sides was set to be 3.5, 4.9, 6.9, 9.8 and 13.8m. With increasing the length of the square side, the apparent resistivity shows a decreasing trend from 270 to 180 to 110 to 65 and to 70 Ω .m. Anisotropy ellipses were drawn for each depth. The ellipses of resistivity are formed distinctly except for the lowest depth which is in the form of a star. According to the anisotropy ellipses, 4 groups of joint sets exist which are in the direction of 30°, 67°, 120° and 150°. To compare the results of the square array resistivity with another method, the joint sets were measured at the outcrop, using a geological compass. The results are drawn in the form of a rose diagram. The joint sets inferred from the apparent resistivity diagrams are similar to the rose diagram with regard to the number of joint sets and show fairly a good correlation in terms of the direction of the joint sets. The maximum coefficient of anisotropy is estimated to be 2.0. The interpretation of the square array data shows that the existence of a fault, in the studied local area, does not seem to be likely and the joint sets are the main structural feature in this location. Hence it is appropriate to carry out the square array survey in auxiliary points, along with additional studies, including collecting data at the outcrops or, if possible, using other geophysical methods to reach more certain results.

Keywords: Azimuthal, Ore exploration, Sabzevar ophiolite, Square array.

Cite this article: Shirzadi, A R., & Ghanati, R. (2024). Joint sets identification and determination of resistivity orientation by analyzing the results of square array azimuthal resistivity, in the west of Sabzevar ophiolite. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(3), 595-616. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.369862.1007580>

E-mail: (1) ar.shirzadi@ut.ac.ir



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.369862.1007580>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

شناسایی درزه‌ها و تعیین جهت‌یافتگی آن با استفاده از تحلیل نتایج برداشت مقاومت‌ویژه آزمون‌های مربعی در غرب افیولیت سبزوار

علیرضا شیرزادی^۱ | رضا قناتی^۱ ✉

۱. گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: rghanati@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۳/۱، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۷/۱۴)

چکیده

محدوده مورد مطالعه در شمال غرب شهرستان سبزوار و در غرب «افیولیت سبزوار» واقع شده است. این منطقه، به واسطه وجود معادن کرومیت، مشهور می‌باشد. یکی از مراحل بسیار مهم در اکتشاف معادن، شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی است. در سنگ‌های پریدوتیتی، شناسایی گسل‌ها، در سطوح طبیعی زمین، به دلیل کم‌یافت بودن لایه‌های کلیدی، معمولاً مشکل می‌باشد. سونداژنی مقاومت‌ویژه الکتریکی با استفاده از آرایه مربعی به روش آزمون‌های به‌عنوان یک رهیافت ژئوفیزیکی برای شناسایی شکستگی‌ها و مشخص کردن جهت آنها در سنگ‌های گسل خورده و درزه‌دار به کار می‌رود. بررسی‌های زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که زون‌های شکسته و نیز جهت غالب درزه‌ها و شکستگی‌ها ارتباط مستقیمی با محل کانی‌زایی و جهت‌یافتگی ماده معدنی دارد. از این رو در این تحقیق، برای شناسایی ساختار زمین‌شناسی بخشی از محدوده معدنی با تمرکز بر روی شناسایی امتداد غالب شکستگی‌ها، در یک نقطه، روش سونداژنی مقاومت‌ویژه الکتریکی با استفاده از آرایه مربعی به کار گرفته شده است. سنگ بستر محدوده مورد مطالعه از پریدوتیت‌های سرپانتینی شده تشکیل شده است. داده‌برداری در سرپانتینیت‌های بدون روبرا با استفاده از اندازه‌گیری‌های آرایه مربعی، برای بررسی وجود زون گسلی احتمالی، در یکی از معادن انجام شد. مقاومت‌های ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده به این روش تغییرات قابل ملاحظه‌ای، در جهت‌های مختلف جغرافیایی، نشان داد. تفسیر نتایج به‌دست آمده از آرایه مربعی نشان می‌دهد که وجود گسل در محدوده مطالعه‌شده محتمل نبوده و شبکه درزه‌ها، اصلی‌ترین عوارض ساختمانی حاکم در این محدوده است. شکل نمودارهای مقاومت‌ویژه ظاهری آرایه مربعی، وجود شبکه درزه‌ها را که در چند جهت متفاوت امتداد دارد، تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آرایه مربعی، سونداژنی آزمون‌های افیولیت سبزوار، ساختار.

۱. مقدمه

کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت معدنکاری داشته باشد. در منطقه مورد مطالعه، پیکره‌های کرومیتیتی در بسیاری موارد در امتداد خاصی تمرکز یافته است که به‌نظر می‌رسد در امتداد گسل‌ها بوده و از این رو تحلیل ساختاری محدوده معدنی، به دلیل وجود زون‌های گسلی از اهمیت زیادی برای اکتشاف کرومیت برخوردار است؛ با توجه به توانمندی‌های روش‌های ژئوفیزیکی در مشخص کردن زون‌های شکستگی، می‌توان از آن برای مشخص کردن وجود ارتباط بین شکستگی‌ها و اکتشاف کرومیت استفاده کرد. گذشته از روش‌های زمین‌شناسی، یکی از راه‌های شناخت ساختارهای زمین‌شناسی، کمک

هر یک از ذخایر بسیار متنوع معدنی، در دل زمین، جایگاه ویژه‌ای داشته و آگاهی از ساختارهای زمین‌شناسی دربرگیرنده مواد معدنی، مرحله بسیار مهمی در اکتشاف ذخایر است. انواع لایه‌بندی، دایک (Dike)، تاقدیس‌ها، ناودیس‌ها، گسل‌ها، دگرشیبی‌ها (Unconformity) و درزه‌ها از جمله ساختارهای مهم زمین‌شناسی است که مواد معدنی می‌توانند هر کدام، به‌شکلی در آنها ذخیره شود. ذخایر کرومیت از این قاعده مستثنی نبوده و پس از تشکیل، عموماً تحت تأثیر گسل‌ها و جابه‌جایی‌های ثانویه قرار می‌گیرد. شناخت این جابه‌جایی‌ها می‌تواند موجب شناسایی موقعیت صحیح کانسار شده و تأثیر بسزایی در

استناد: شیرزادی، علیرضا و قناتی، رضا (۱۴۰۳). شناسایی درزه‌ها و تعیین جهت‌یافتگی آن با استفاده از تحلیل نتایج برداشت مقاومت‌ویژه آزمون‌های مربعی در غرب افیولیت سبزوار. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۵۰(۳)، ۵۹۵-۶۱۶. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.369862.1007580>

رایانامه: (۱) ar.shirzadi@ut.ac.ir



از علم ژئوفیزیک می‌باشد. به علاوه، روش‌های ژئوفیزیکی به‌طور گسترده‌ای برای بسیاری از دیگر کاربردهای زیرسطحی از جمله نقشه‌برداری زمین‌شناسی، مطالعات مهندسی و زیست‌محیطی و تحقیقات هیدروژئولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته است (مسعود و همکاران، ۲۰۰۹). سونداژنی مقاومت‌ویژه آزیموتی (ARS) روشی ژئوالکتریکی است که برای شناسایی جهت شکستگی‌ها در سنگ‌های شکسته شده، گسل خورده و درزه‌دار استفاده می‌شود. این روش به‌عنوان یک روش سطحی سریع و مؤثر برای تعیین جهت‌های اصلی ناهمسانگردی الکتریکی که مستقیماً با تغییرات جانبی سنگ‌شناسی و یا ساختاری زیرسطحی مرتبط است، به کار گرفته شده است. در مطالعات به‌روش ARS، تغییر در مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری، به‌عنوان تابعی از آزیموت اندازه‌گیری می‌شود. روش آزیموتی ژئوالکتریکی به دو روش اصلی انجام می‌شود: الف) آرایه آزیموتی خطی سنتی مانند آرایه‌های ونر و شلومبرژه (ARS) و ب) آرایه آزیموتی مربعی (SAR).

هنگامی که سنگ‌ها دارای لایه‌بندی شیب‌دار بوده و یا برگوارگی (Foliation) داشته باشد، آرایه مربعی، به‌عنوان جایگزینی برای آرایه‌های ونر یا شلومبرژه خطی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بحث کامل آرایه مربعی و روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط هابرجم (۱۹۷۹) انجام شده است. روش آرایه مربعی از دهه ۱۹۶۰ میلادی به کار گرفته شده و تاکنون پژوهش‌های بسیاری، در مورد ویژگی‌های آن، منتشر شده است. این آرایه دارای کاربرد و قابلیت‌های متنوعی از جمله در تشخیص ساختارهای زمین، تعیین جهت حرکت سیالات در زیرزمین و تخمین تخلخل ثانویه سنگ‌ها دارد.

در این قسمت، جهت آشنایی بیشتر، به چند نمونه از مطالعات انجام‌شده به‌روش آرایه مربعی، اشاره می‌شود. کارپنتر و هابرجم (۱۹۵۶) مفهوم ناهمگنی جانبی (Lateral inhomogeneity) و تأثیرات آن بر مطالعات قائم (Depth probe) آرایه ونر خطی (Linear) را تشریح کرده و راه‌کارهایی، برای تشخیص این تأثیرات، در

مطالعات عمودی، معرفی می‌کنند.

هابرجم و واتکینز (۱۹۶۷ الف) ضمن معرفی اندیس ناهمگنی جانبی (Lateral inhomogeneity index)، تأثیرات آن را در نتایج حاصل از مطالعات آرایه‌های ونر و شلومبرژه خطی، مطرح می‌کنند. ایشان وجود ناهمگنی را انحراف از شرایط مفروض ایده‌آل (لایه‌های افقی و همگن) دانسته و ضمن تشریح چگونگی تشخیص آن، راه‌کاری محاسباتی، برای کاهش تأثیرات آن بر مطالعات ژئوالکتریکی عمودی، معرفی می‌کنند. در صورتی که شدت ناهمگنی جانبی زیاد باشد، روش پیشنهاد شده، می‌تواند از کارایی لازم برخوردار نباشد.

هابرجم و واتکینز (۱۹۶۷ ب) روش آرایه مربعی ساده (Single square) را از دیدگاه نظری و عملی تشریح کرده و اظهار می‌دارند که حساسیت در تشخیص مقاومت‌ویژه، در مرکز آرایه مربعی، نسبت به آرایه‌های خطی، بیشتر بوده اما حساسیت، نسبت به جهت (Orientation)، در این آرایه کمتر است. نشان داده شد که آرایه مربعی، در بررسی تغییرات مقاومت‌ویژه جانبی، دارای مزیت بیشتری است و وابستگی کمتر آن به جهت، باعث می‌شود تا مقایسه نتایج آن با نمودارهای الگو، راحت‌تر باشد. ایشان مفاهیم مقاومت‌ویژه ظاهری متوسط (Mean) و اندیس ناهمگنی آزیموتی (Azimuthal inhomogeneity index) را برای آرایه مربعی معرفی کرده و مفهوم اخیر را با ناهمگنی جانبی مقایسه می‌کنند. همچنین کاربرد آرایه مربعی را در نقشه‌برداری افقی (Mapping) و مطالعه عمودی (Probing) بیان کرده و مزایای و معایب آن را در مقایسه با آرایه‌های ونر و شلومبرژه خطی برمی‌شمارند. همچنین نشان داده شد که وقتی گسلی عمودی وجود دارد، میانگین مقاومت‌ویژه‌ای که به‌روش آرایه مربعی تعیین شد، نسبت به آرایه ونر، حساسیت کمتری نشان داده و مقاومت‌ویژه متوسط آرایه مربعی، در عمل، از پایداری بیشتری برخوردار است.

هابرجم (۱۹۷۲) ناهمسانگردی (Anisotropy) را در ارتباط با «ناهمگنی آزیموتی» تشریح کرده و تأثیرات ناهمسانگردی مواد زیرسطحی، بر آرایه مربعی را توضیح

مقاومت، با جهت، را نشان داده که منجر به ناهمگنی آزمونتی بالا می‌شود. با استفاده از تحلیل ناهمسانگردی و سونداژ مربعی متقاطع که در این منطقه بسیار ناهمسانگرد انجام شده، بخش عمده‌ای از تأثیرات جهت‌گیری، آشکار شده است.

سونداژ مقاومت‌ویژه جریان مستقیم آرایه مربعی آزمونتی، توسط لین و همکاران (۱۹۹۵)، برای شناسایی شکستگی‌های سنگ بستر متبلور که در زیر رسوبات یخچالی قرار دارد، در نیوهامپشایر (آمریکا)، انجام شده است. مقاومت‌ویژه‌های ظاهری اندازه‌گیری شده، با تغییر جهت آرایه، تغییر کرد. تفسیر گرافیکی داده‌های آرایه مربعی نشان می‌دهد که یک مجموعه شکستی (یا برگواری) در سنگ بستر، در آزمونت ۳۰ درجه وجود دارد. تفسیر داده‌های آرایه مربعی متقاطع، جهت‌گیری ۲۷ درجه و ضریب ناهمسانگردی ۱/۳۱ را نشان داده است. نتایج مطالعه آرایه مربعی آزمونتی، توسط سایر مطالعات ژئوفیزیکی، از جمله بررسی‌های لرزه‌ای آزمونتی و سونداژ آزمونتی مقاومت‌ویژه جریان مستقیم شلومبرژه تأیید شده است. روش سونداژ مقاومت‌ویژه جریان مستقیم آرایه مربعی نسبت به آرایه‌های ونر و شلومبرژه که رایج‌تر هستند، به ناهمسانگردی سنگ‌ها حساس‌تر است. مزیت دیگر روش آرایه مربعی این است که اجرای آن به مساحتی حدود ۶۵ درصد از آرایه شلومبرژه یا ونر نیاز دارد.

آرایه مربعی، توسط گایلورد و کارلسون (۲۰۰۵) در کنتیکت (آمریکا)، در دو محدوده، به فاصله حدود ۱/۳ کیلومتر، برای مشخص کردن شکستگی‌ها در سنگ بستر متبلور، اجرا شده است. در هر دو محدوده، رسوبات یخچالی بر روی گنایس قرار دارد. در محدوده اول، با استفاده از تحلیل گرافیکی داده‌های مقاومت آزمونتی، امتداد شکستگی‌ها بین ۴۵ تا ۶۰ درجه تشخیص داده شد. ناهمسانگردی ظاهری و تخلخل ثانویه با استفاده از داده‌های آرایه مربعی متقاطع برای این محدوده محاسبه شده است. در محدوده دوم، «تحلیل گرافیکی» سیستم پیچیده‌تری از شکستگی‌ها را نشان داده. امتداد شکستگی‌ها، در اعماق مختلف، تعیین شده و برخی از

داده است. وقتی ناهمسانگردی زیاد است، تغییرات شدید مقاومت‌ویژه ظاهری، با تغییر جهت، در هر دو نوع آرایه مربعی و خطی ایجاد می‌شود. بنابراین مقاومت‌ویژه ظاهری علاوه بر این که به موقعیت آرایه و فاصله الکترودی آرایه بستگی دارد، در بسیاری موارد، به جهت (آزمونت) آرایه نیز وابسته است. در این شرایط، استفاده از آرایه مربعی متقاطع (Crossed square) از پایداری و اطمینان بیشتری برخوردار است. از مزایای آرایه مربعی، نسبت به آرایه شلومبرژه، نیاز به مساحت کمتر و به علاوه وابستگی کمتر مقاومت‌ویژه به تغییر جهت می‌باشد. ناهمسانگردی مؤثر (Effective) تلفیقی از ناهمسانگردی و ناهمگنی است. مقادیر ناهمگنی آزمونتی حاصل از سونداژ آرایه مربعی ساده، در دو ناحیه یورکشایر و انگلسی (انگلستان)، بترتیب به تعداد ۷۴ و ۹۹ سونداژ، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و مقدار ناهمسانگردی برای آن محاسبه شده است.

هابرجم (۱۹۷۵) آرایه مربعی متقاطع را به تفصیل، تشریح کرده است. ناهمسانگردی و امتداد ساختارها (Strike) از مواردی است که می‌توان، به وسیله این روش، مورد بررسی قرار داد. در زمین‌هایی که لایه‌بندی، دارای شیب تند بوده و بسیار ناهمسانگرد است، اثرات قابل توجهی را می‌توان به دلیل ناهمسانگردی، در مقدار مقاومت‌ویژه مشاهده کرد که پایداری مقادیر مقاومت‌ویژه آرایه مربعی ساده را برهم می‌زند. در چنین شرایطی، اگر از آرایه مربعی متقاطع استفاده شود، مقاومت‌ویژه، برای اکثر اهداف عملی، پایدار خواهد بود. آرایه مربعی بهبودیافته (Modified) توسط نام‌برده، معرفی و پیشنهاد می‌شود. این روش در واقع تلفیقی از آرایه مربعی ساده و روش خطی است و شامل دو حالت بوده و در واقع روشی برای تسهیل کار عملی می‌باشد؛ در حالت اول اگر مقدار ناهمسانگردی و شیب لایه‌ها از مقدار خاصی کمتر باشد از آرایه مربعی ساده استفاده می‌شود و در غیر این صورت، آرایه مربعی متقاطع، که به زحمت بیشتری نیاز دارد، انجام می‌شود. نتایج حاصل از ۱۵ سونداژ آرایه مربعی متقاطع، در منطقه انگلسی (انگلستان) ارائه شده است. این ناحیه قبلاً توسط هابرجم (۱۹۷۲) مطالعه شده و تغییرات زیاد

مربعی آزیموتی یکی از روش‌های مفید برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی در سنگ‌های سخت است.

روش سونداژ مقاومت آرایه مربعی آزیموتی در ۱۲ نقطه در بخش‌هایی از پی‌سنگ کریستالی شرق نیجریه توسط جورج و همکاران (۲۰۱۴) برای مشخص کردن جهت درزه‌ها و به‌کارگیری نتایج آن در مطالعات آب‌های زیرزمینی، انجام شده است. در این منطقه، میزان آبدهی چاه‌ها، به این دلیل که سنگ‌های محدوده مورد مطالعه غیرقابل نفوذ بوده و حرکت آب‌های زیرزمینی صرفاً وابسته به ناپیوستگی‌های موجود در سنگ می‌باشد، کم است. اندازه ضلع آرایه مربعی ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۷۰ متر تنظیم شده است. نتایج این مطالعه وجود شکستگی را در پی‌سنگ اثبات کرده است. در ۷ نقطه شکستگی‌ها در جهت شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و در ۶ نقطه در جهت شمال‌غربی-جنوب‌شرقی قرار داشتند که نشان می‌دهد منطقه مورد مطالعه پتانسیل خوبی برای بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی دارد.

ویژگی شکستگی‌ها در سنگ آهک، در یورکشایر (انگلستان)، با استفاده از توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و آرایه مربعی آزیموتی، توسط اودسن و جورج (۲۰۱۸) مورد مطالعه قرار گرفته است. آرایه مربعی ناهمسانگردی سنگ بستر را، با وجود روباره ماسه‌ای، شناسایی کرده است. در نمودارهای قطبی آرایه مربعی، شکستگی‌ها در جایی مشاهده می‌شود که کمترین مقاومت ویژه الکتریکی وجود داشته است. تخلخل ثانویه بین ۲۰ تا ۲۷ درصد برآورد شد که به دلیل وجود برگوارگی در سنگ است. نسبت ناهمگنی آزیموتی، که برای تخمین شدت تغییرات مقاومت جانبی محاسبه می‌شود، برابر با مقدار متوسط ۰/۷ بود. این بدان معناست که اثرات تغییرات مقاومت جانبی خیلی شدید نیست. ضریب ناهمسانگردی سنگ آهک برابر با ۱/۴ است که در حد متوسط است. ناهمسانگردی در سنگ آهک به دلیل وجود شکستگی است و ناهمگنی آزیموتی به دلیل تغییرات مقاومت خاک، ناهمگنی سنگ‌شناسی و تفاوت در مقاومت سنگ بستر است. این تحقیق نشان می‌دهد که

تفسیرها برای این محدوده بیان شده اما پیچیدگی سیستم شکستگی در این محدوده، مانع از محاسبه ناهمسانگردی ظاهری و مقادیر تخلخل ثانویه قابل اعتماد، شده است.

آرایه مربعی مقاومت ویژه الکتریکی توسط اصفهانی (۲۰۱۱)، به منظور تعیین ویژگی‌های ناهمسانگردی، در منطقه درزه‌دار و گسل‌دار هارامون (سوریه)، مورد استفاده قرار گرفته است. بالاآمدگی (Uplift) هارامون ساختاری کشیده است که توسط سیستمی از گسل‌ها و شکستگی‌ها قطع می‌شود. آرایه مربعی، در ۱۱ نقطه، در امتداد یک پروفیل، بر روی کنگلومرای که در زیر آن گدازه‌های بازالتی وجود دارد، اجرا شد. آرایه شلومبرژه نیز در همان نقاط اجرا شد تا نتایج دو آرایه با یکدیگر مقایسه شده و برتری آرایه‌ها مورد بررسی قرار گیرد. این مطالعه، حساسیت جهتی بالای آرایه مربعی را در مقایسه با آرایه شلومبرژه نشان داده و مشاهده می‌شود که حساسیت ناهمسانگردی آرایه مربعی بهتر از آرایه‌های ونر و شلومبرژه است. بنابراین توصیه شده که آرایه مربعی برای شناسایی مناطق دارای گسل و شکستگی به کار گرفته شود، به ویژه در زمانی که آرایه سنتی شلومبرژه کارایی لازم را ندارد.

روش مقاومت آرایه مربعی آزیموتی، در ۸ نقطه، در منطقه‌ای دارای شکستگی، در نزدیکی روستای ادیکال (هندوستان)، برای یافتن سطح آب زیرزمینی، توسط راویندران (۲۰۱۲) به کار برده شد. منطقه مورد مطالعه، از بالا به پایین، شامل خاک سرخ ضخیم، شن، کوارتزیت و سنگ سخت (شارنوکیست) است. این منطقه دارای ناهمسانگردی بالا است. آرایه مربعی، به صورت متقارن، در اطراف هر نقطه گسترش داده شد، به طوری که نتایج سونداژنی را می‌توان به عنوان تابعی از عمق تفسیر کرد. نمودارهای قطبی آزیموتی (Polar plots) برای تشخیص تغییرات عمقی مقاومت، استفاده شد. از بررسی مقاومت‌های الکتریکی با عمق، مشخص شد که آب شیرین، در عمق ۲۵ متری از سطح، وجود دارد. برای شناسایی ضخامت آبخوان از تغییرات مقاومتی آرایه مربعی استفاده شد. مولف اظهار می‌دارد که روش آرایه

آرایه مربعی ابزار مفیدی برای تعیین ویژگی‌های شکستگی سنگ‌ها در غیاب رخنمون‌های سطحی است. در یک تحقیق، تغذیه آبخوان کارستی، توسط آب‌های فرورو، با استفاده از روش‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و آرایه مربعی توسط سنس و همکاران (۲۰۲۱) در شمال غرب ترکیه، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق غارهای کارستی (حفره‌های هوا) در داخل سنگ آهک تریاس منجر به ایجاد ناهنجاری‌های مقاومتی بالا شد. از سوی دیگر، مناطق حاوی خاک‌های غنی از رس و شبکه‌های شکستگی حاوی آب، منجر به ایجاد ناهنجاری‌هایی با مقاومت کم شدند. بررسی به روش ERT منجر به آشکار شدن مناطق تغذیه سریع، در کارست شد و نشان داد که شیب شبکه مناطق کارستی به سمت شمال شرق است. این روش همچنین مشخص کرد که شبکه‌های شکاف‌های غیرکارستی و لایه‌های ضخیم غنی از رس که منجر به تغذیه تأخیری آبخوان می‌شود، در بعضی مناطق وجود دارد. در این تحقیق مطالعه توسط آرایه مربعی نشان داد که شکستگی‌های غالب در جهت‌های جنوب غرب-شمال شرق و شمال غرب-جنوب-شرق امتداد دارد و نشان داد که گسل‌ها و شکستگی‌ها تا اعماق پایین آبخوان کارستی گسترش یافته است. نتایج حاصل از مطالعه ERT و آرایه مربعی توزیع مناطق تغذیه سریع و آهسته آبخوان را در سرتاسر ناحیه کارست، امکان‌پذیر کرد. در نهایت، این مطالعه نشان داد که کاربرد ترکیبی آرایه مربعی و بررسی‌های ERT می‌تواند تغذیه آبخوان را توسط آب‌های زیرزمینی، در یک ناحیه پیچیده کارستی، مشخص کند و می‌تواند روشی برای آشکار کردن میزان آسیب‌پذیری مناطق کارستی در برابر آلودگی آب‌های زیرزمینی باشد.

در تحقیقی استفاده از آرایه‌های مربعی و مربعی متقاطع در تخمین تخلخل ثانویه، توسط ماتیس (۲۰۲۳)، در منطقه‌ای که ساختار زمین‌شناسی آن شناخته شده است، مطالعه شده است. تخلخلی که پس از تشکیل سنگ‌ها ایجاد می‌شود تخلخل ثانویه نامیده می‌شود. تخلخل ثانویه سنگ‌ها نقش مهمی در اکتشاف و بهره برداری آب، در سازندهای

کریستالی دارد. معمولاً تخلخل ثانویه از مشاهدات چاه‌پیمایی تخمین زده می‌شود اما اندازه‌گیری‌های مقاومت آزیموتی و آرایه مربعی می‌تواند برای تخمین این پارامتر مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق، داده‌های صحرایی از شمال غرب انگلیس برداشت شده است. در این ناحیه سازندهایی با شیب تند گسترش دارند و بین سازندهای همسانگرد و ناهمسانگرد مرز مشترک (کنتاکت) وجود دارد. در این مطالعه مقاطع مقاومت‌ویژه دوبعدی برای ارائه تفسیر بهتری از مطالعه صحرایی، ترسیم شده است. در طول دو پروفیل، که مرز بین سازندها را دربر می‌گیرد، مقادیر تخلخل ثانویه با تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه و با ناهمسانگردی مقایسه شده است. در این تحقیق، تخلخل ثانویه محاسبه شده در مکان‌یابی گسل‌ها و کنتاکت‌ها بسیار کارآمد بوده است. با کمک سونداژ آرایه مربعی متقاطع، می‌توان امتداد سازندهای زمین‌شناسی را محاسبه کرد.

در تحقیق کنونی، برای شناسایی جهت و نوع ناپیوستگی‌ها از روش آرایه مربعی استفاده شده است. بررسی‌های زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که زون‌های شکسته و نیز جهت غالب درزه‌ها و شکستگی‌ها در بسیاری موارد، ارتباط مستقیمی با محل کانی‌زایی و جهت‌یافتگی ماده معدنی دارد. از این‌رو در این تحقیق، برای شناسایی ساختار زمین‌شناسی بخشی از محدوده معدنی با تمرکز بر روی شناسایی امتداد غالب شکستگی‌ها، در یک نقطه، روش سونداژزنی مقاومت‌ویژه الکتریکی با استفاده از آرایه مربعی و با تفسیر گرافیکی، به کار گرفته شده است.

۲. روش پژوهش

۱-۲. روش سونداژ آزیموتی مقاومت‌ویژه الکتریکی با آرایه مربعی

روش سونداژزنی مقاومت‌ویژه الکتریکی جریان مستقیم، تغییرات مقاومت‌ویژه ظاهری مواد زمین را در راستای عمود بر سطح زمین، اندازه‌گیری می‌کند. این تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی می‌تواند تحت تأثیر ناهمسانگردی

شمال شرق ایران و در شمال شهرستان سبزوار واقع شده است (شکل ۲). منطقه مورد مطالعه، در نزدیکی روستای فرومد و در فاصله حدود ۶۰۵ کیلومتری از تهران قرار دارد. دسترسی به محدوده مورد نظر، از مبدأ تهران، با گذر از شهرهای ایوانکی، سمنان، دامغان، شاهرود و میامی می‌باشد. در شکل ۲، موقعیت جغرافیایی افیولیت سبزوار، برنگ قرمز، در چهارگوش مشکی، در شمال شرق ایران مشخص شده است.

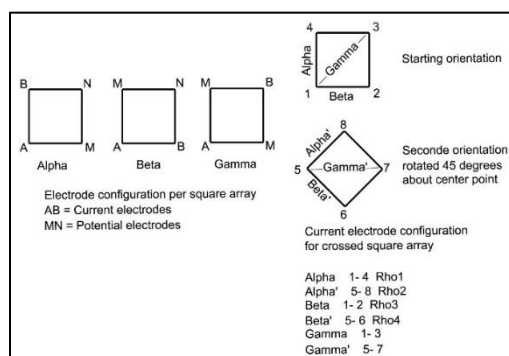
۱-۳. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

رشته کوه‌های جغتای از دیدگاه زمین‌شناسی، بقایای سنگ‌های بستر بجای مانده از «اقیانوس سبزوار» است که در کرتاسه پسین، در اثر نیروهای تکتونیکی، بسته شده است (لنچ و همکاران، ۱۹۷۷). این رشته کوه، در زمین‌شناسی ایران، با نام «افیولیت سبزوار» شناخته می‌شود. این نام‌گذاری به دلیل واقع بودن این افیولیت در شمال شهرستان سبزوار است. در واژه‌گان زمین‌شناسی، به گوشته بالایی و پوسته به‌جامانده از اقیانوس‌های قدیمی که امروزه در قاره‌ها قرار دارند، افیولیت (Ophiolite) نام نهاده‌اند (دیلک، ۲۰۰۳). سنگ‌های آلترامافیک از جمله: هارزبورگیت، دونیت، لرزولیت و ورلیت (بیشتر سرپانتینی شده) از سنگ‌های اصلی افیولیت سبزوار است. سرپانتینی شدن سنگ‌های پریدوتیتی افیولیت‌ها عموماً تحت تأثیر آب‌های داغ، در کف اقیانوس‌ها انجام شده است (فراگرین و همکاران، ۱۹۹۶). شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مواد تشکیل دهنده زمین، شکستگی سنگ‌ها، لایه‌بندی و یا برگوارگی در سنگ‌ها و لایه‌های زمین قرار گیرد. در روش مقاومت‌ویژه الکتریکی جریان مستقیم، می‌توان راستای شکستگی‌های سنگ‌ها را توسط آرایه‌های خطی شلومبرژه و وزن مشخص کرد اما روش آرایه مربعی، نسبت به ناهمسانگردی سنگ‌ها، حساسیت بیشتری دارد و به‌علاوه، نسبت به روش‌های نام‌برده، مساحت کمتری برای انجام عملیات داده‌برداری، نیاز دارد (هابرجم، ۱۹۷۲؛ داربو ا فودا و لویس، ۱۹۸۹). روش سونداژ مقاومت‌ویژه الکتریکی جریان مستقیم آرایه مربعی، شامل قرار دادن چهار الکتروود در سطح زمین، به‌شکل یک مربع است؛ به‌نحوی که هر الکتروود در یک گوشه از مربع قرار می‌گیرد و دو الکتروود وظیفه ارسال جریان الکتریکی و دو الکتروود دیگر وظیفه ثبت پتانسیل الکتریکی را به عهده دارد. محل اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی به نقطه مرکزی مربع نسبت داده می‌شود. آرایه مربعی در اطراف نقطه مرکزی چرخانده شده و اندازه‌گیری‌های آزیموتی مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری انجام می‌گیرد (شکل ۱). بیشتر کردن فاصله الکتروودها حول یک نقطه مرکزی، جریان را به اعماق بیشتری ارسال می‌کند و بدین ترتیب اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی به‌عنوان تابعی از عمق، امکانپذیر می‌شود (هابرجم و واتکینز، ۱۹۶۷ ب).

۳. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

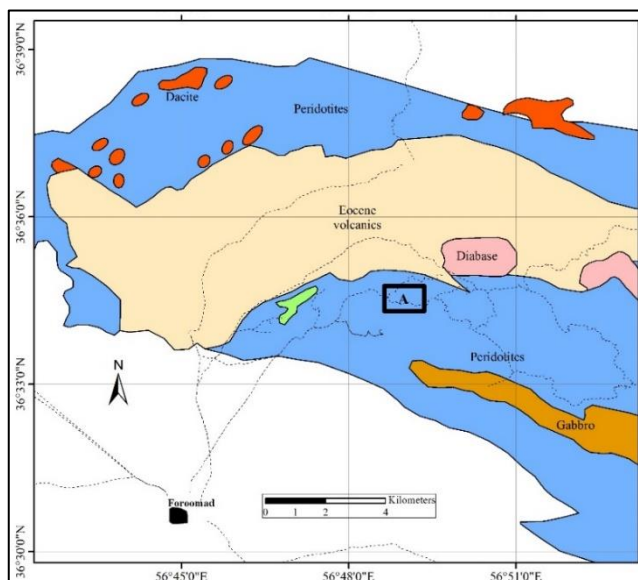
افیولیت سبزوار، در فرهنگ علم جغرافیا، به نام «رشته کوه‌های جغتای» نام‌گذاری شده است. این رشته کوه با امتداد تقریباً شرقی-غربی، به طول حدود ۱۸۵ کیلومتر در



شکل ۱. موقعیت الکتروودها و توالی برداشت داده‌ها در آرایه مربعی متقاطع. برگرفته از لین و همکاران (۱۹۹۵). الکتروودهای A و B برای تزریق جریان الکتریکی و الکتروودهای M و N برای اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی هستند.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه. موقعیت جغرافیایی رشته کوه‌های جغتای، در شمال شرق ایران و در شمال شهرستان سبزوار، در چهارگوش مشکی، نشان داده شده است.



شکل ۳. نمایش منطقه مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی غرب افیولیت سبزوار. منطقه مورد مطالعه، در مرکز چهارگوش مشکی، در سمت راست (A) نقشه، مشاهده می‌شود. محدوده مورد مطالعه در سنگ‌های پریدوتیتی (برنگ آبی) قرار دارد. مقیاس ۴ کیلومتر را نشان می‌دهد. روستای فرومد در پایین تصویر، برنگ مشکی مشخص می‌باشد.

۴. مطالعات صحرائی و تفسیر نتایج

۴-۱. سونداژ مقاومت ویژه آزمون‌تی با آرایه مربعی

اندازه‌گیری مقاومت ویژه آزمون‌تی خطی، با چرخاندن آرایه الکترودی به دور یک نقطه مرکزی و ثبت مقاومت ویژه در امتداد آزمون‌های مشخص، برای تشخیص تغییر مقاومت ویژه ظاهری با تغییر جهت، انجام می‌شود (واتسون و بیکر، ۱۹۹۹). در این روش، مقاومت ویژه ظاهری برای تمام فاصله‌های الکترودی، در امتداد هر آزمون، اندازه‌گیری و ثبت

شده و سپس بر روی یک نمودار قطبی ترسیم می‌شود. در صورتی که شکل مقاومت ویژه ظاهری در نمودار قطبی (دایره‌ای)، به شکل «دایره» باشد این می‌تواند به معنای نبود گسل یا نبود ناهمسانگردی در سنگ باشد و در صورتی که به شکل «بیضی» باشد این می‌تواند وجود ساختاری مانند گسل را در امتداد آزمون‌تی مشخص، نشان دهد. برای آرایه‌های خطی، محور بزرگ‌تر بیضی با امتداد گسل منطبق است در حالی که در مورد آرایه‌های غیرخطی، مانند آرایه مربعی، محور کوچک‌تر بیضی،

موازات امتداد درزه یا گسل (ρ_{aL}) اندازه‌گیری می‌شود به مقاومت ویژه ظاهری در جهت عمود بر امتداد آن (ρ_{aT}) به دست آورد؛ یعنی $\lambda = \rho_{aL} / \rho_{aT}$ که این همان طور که در شکل ۴-الف نشان داده شده است، با رابطه بین مقاومت ویژه واقعی (شکل ۴-ب) که در آن $\lambda = \rho_T > \rho_L$ متناقض است. این همان چیزی است که پارادوکس ناهمسانگردی مقاومت ویژه نامیده می‌شود (کلر و فریشنکت، ۱۹۶۶؛ واتسون و بیکر، ۱۹۹۹؛ لین و همکاران، ۱۹۹۵).

در تحقیق کنونی، بررسی مقاومت ویژه جریان مستقیم با استفاده از روش آرایه مربعی انجام شده است. هنگامی که سنگ‌ها دارای لایه‌بندی شیب‌دار بوده و یا برگوارگی داشته باشد آرایه مربعی، به‌عنوان جایگزینی برای آرایه‌های ونر یا شلومبرژه خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد (هابرجم و واتکینز، ۱۹۶۷ ب). در آرایه مربعی، محل اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی، به نقطه مرکزی مربع نسبت داده می‌شود. اندازه آرایه، در مرحله اول اندازه‌گیری، طول ضلع مربع (A) است. در مرحله دوم، طول ضلع مربع، به مقدار $A\sqrt{2}$ می‌باشد. این گسترش طول ضلع، به همان نسبت (طول ضلع مربع قبلی ضربدر $\sqrt{2}$)، برای اندازه‌گیری‌های سوم و چهارم و... انجام می‌شود؛ سپس می‌توان نتایج به‌دست آمده را به‌عنوان تابعی از عمق تفسیر کرد.

موازی با امتداد گسل است (هابرجم و واتکینز، ۱۹۶۷ الف).

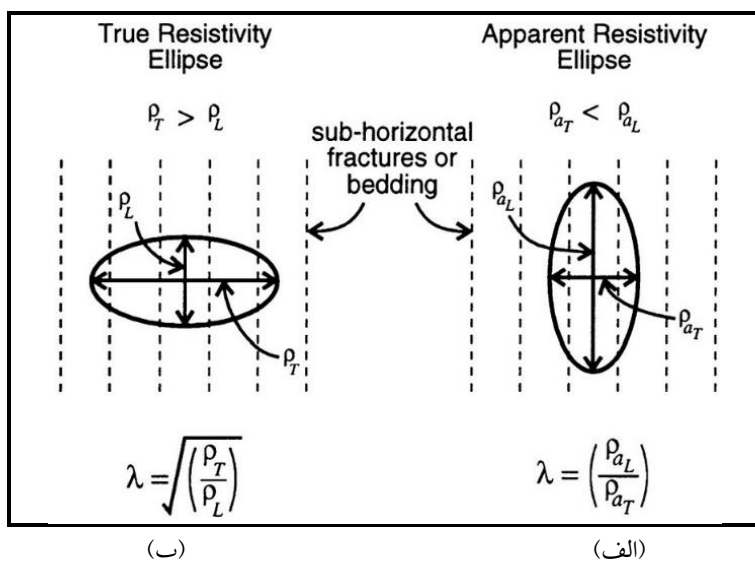
۴-۲. ضریب ناهمسانگردی ظاهری

در مورد یک محیط ناهمسانگرد با ساختمان لایه‌ای و یا دارای شکستگی، دو پارامتر را می‌توان تعریف کرد؛ یکی ضریب ناهمسانگردی (λ) و دیگری میانگین مقاومت ویژه (ρ_m). این دو مورد با روابط زیر بیان می‌شود:

$$\lambda = \sqrt{\rho_T / \rho_L} \quad (1)$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_T \times \rho_L} \quad (2)$$

که در آن ρ_T مقاومت ویژه، عمود بر لایه‌بندی و ρ_L مقاومت ویژه، در امتداد آن است (واتسون و بیکر، ۱۹۹۹؛ کلر و فریشنکت، ۱۹۶۶). برای محیط‌های همگن و همسانگرد، λ برابر با ۱ است در حالی که در محیط‌های همگن و ناهمسانگرد که در آن ρ_T بیشتر از ρ_L است، این مقدار از ۱ تا ۲ متغیر است (کلر و فریشنکت، ۱۹۶۶؛ کریستنسن، ۲۰۰۰). در مطالعه حاضر، فرض بر آن است که ناهمسانگردی ناشی از شبکه درزه‌هاست؛ بنابراین جهت امتداد بیشترین درزه‌ها را می‌توان با جهت مقاومت ویژه به‌دست آمده از نمودار قطبی نشان داد. در آرایه خطی شلومبرژه می‌توان ضریب ظاهری ناهمسانگردی (λ) را از نسبت مقاومت ویژه ظاهری که به



شکل ۴. بیضی‌های مقاومت ویژه ظاهری (الف) و واقعی (ب). این شکل نشان‌دهنده پارادوکس ناهمسانگردی است (واتسون و بیکر، ۱۹۹۹).

زیر، به صورت «تحلیلی» نیز برای به دست آوردن «امتداد شکستگی‌ها» تفسیر کرد (هاجرم، ۱۹۷۵). فرمول‌های استفاده شده در این روش، به قرار زیر است. فرمول ۵، چگونگی محاسبه زاویه امتداد شکستگی (θ) را نشان می‌دهد. در فرمول‌های ۶ تا ۹، مقادیر ρ_{a_2} ، ρ_{a_1} ، ρ_{a_3} ، ρ_{a_4} مقاومت‌های ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده، به روش آرایه مربعی متقاطع، نمایش داده شده در شکل ۱ است.

$$\theta = \frac{1}{2} \text{Arc tan} \left[\frac{(D^{-2} - C^{-2})}{(A^{-2} - B^{-2})} \right] \quad (5)$$

$$A = \frac{\left[\frac{\rho_{a_3} + 3\rho_{a_1}}{2} + \frac{\rho_{a_4} + \rho_{a_2}}{2^{1/2}} \right]}{(2+2^{1/2})} \quad (6)$$

$$B = \frac{\left[\frac{\rho_{a_1} + 3\rho_{a_3}}{2} + \frac{\rho_{a_2} + \rho_{a_4}}{2^{1/2}} \right]}{(2+2^{1/2})} \quad (7)$$

$$C = \frac{\left[\frac{\rho_{a_4} + 3\rho_{a_2}}{2} + \frac{\rho_{a_1} + \rho_{a_3}}{2^{1/2}} \right]}{(2+2^{1/2})} \quad (8)$$

$$D = \frac{\left[\frac{\rho_{a_2} + 3\rho_{a_4}}{2} + \frac{\rho_{a_3} + \rho_{a_1}}{2^{1/2}} \right]}{(2+2^{1/2})} \quad (9)$$

در تحقیق کنونی، طول ضلع آرایه مربعی (A)، در هر مرحله بعدی، به $A\sqrt{2}$ افزایش یافت. افزایش طول ضلع مربع از مقدار اولیه (۳/۵ متر)، در ۴ مرحله، به طول ۴/۹، ۶/۹، ۹/۸ و ۱۳/۸ متر انجام شد. در هر طول ضلع مشخص از آرایه مربعی، برای اندازه‌گیری در آزمون‌های مختلف، راستای اضلاع هر مربع با مربع قبلی و بعدی به فاصله ۱۵ درجه تنظیم شد (جدول ۱ و شکل ۵). در این روش، پس از اندازه‌گیری‌های آزمون α و β ، آزمون γ ، صرفاً برای کنترل صحت مقاومت ویژه دو آزمون قبلی می‌باشد و مقدار مقاومت ویژه ظاهری آزمون گاما می‌بایست در حد بین آزمون α و β قرار گیرد. برای انجام مطالعه آزمون‌های مربعی در این تحقیق، تعداد ۹۰ مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری، در جدول ۲ آورده شده است.

برای هر مربع، سه اندازه‌گیری انجام می‌شود. دو اندازه‌گیری عمود بر هم (α و β) و یک اندازه‌گیری مایل (γ) (شکل ۵). جهت آزمون‌های اندازه‌گیری‌های α و β به موازات خط اتصال الکترودهای جریان است. اندازه‌گیری γ برای بررسی صحت اندازه‌گیری‌های α و β انجام می‌شود. مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود:

$$\rho_a = \frac{k \times \Delta V}{I} \quad (3)$$

در این فرمول ρ_{ap} مقاومت ویژه ظاهری، k ضریب هندسی آرایه، ΔV اختلاف پتانسیل (ولت) و I جریان (آمپر) می‌باشد.

ضریب هندسی آرایه مربعی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k = \frac{A \times 2\pi}{2 - \sqrt{2}} \quad (4)$$

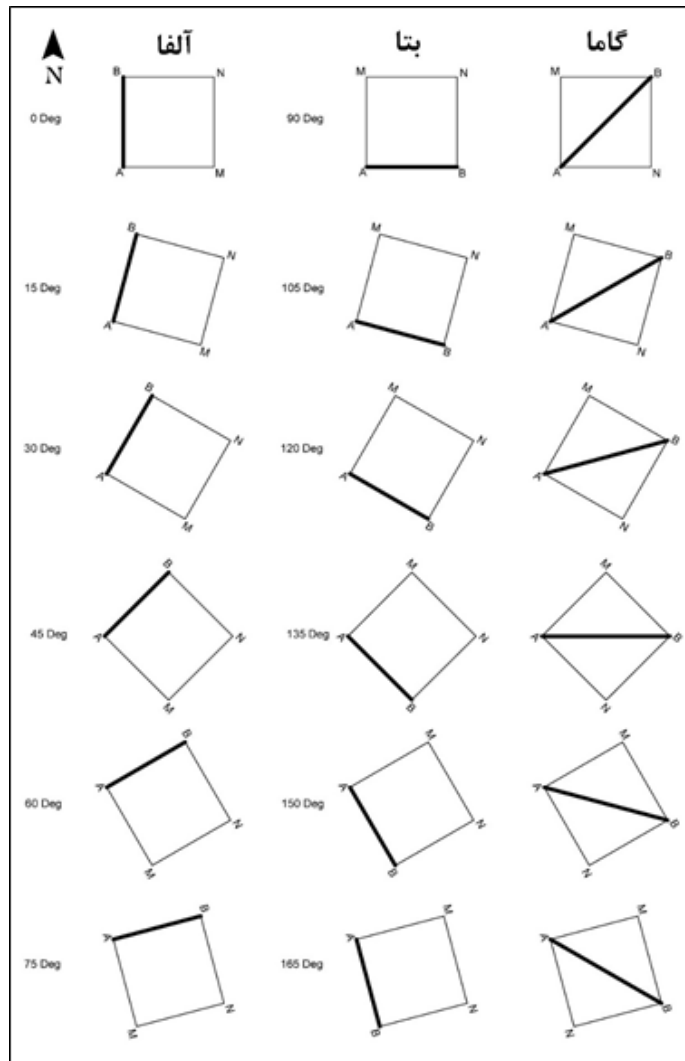
که در این فرمول A طول ضلع آرایه مربعی (متر) است. روی زمین، داده‌های آرایه‌های مربعی در فواصل زاویه‌ای کوچک جمع‌آوری می‌شود. برای مثال، شش آرایه مربعی که با زاویه چرخشی 15° از هم جدا می‌شوند. این شش آرایه، شامل سه جفت داده آرایه مربعی متقاطع مستقل (دو آرایه مربعی که با زاویه 45° از هم جدا شده‌اند) می‌باشد که داده‌های کافی برای «تحلیل» و همچنین برای نمایش «گرافیکی» و ترسیم بر روی نمودار را ارائه می‌دهد (لین و همکاران، ۱۹۹۵).

در روش آرایه مربعی امتداد شکستگی‌ها را می‌توان به صورت گرافیکی یا تحلیلی تعیین کرد. برای تفسیر گرافیکی امتداد شکستگی، مقاومت ویژه ظاهری آرایه مربعی در برابر آزمون آن رسم می‌شود. جهت اصلی امتداد شکستگی عمود بر جهت حداکثر مقاومت ویژه الکتریکی است.

داده‌های آرایه مربعی متقاطع را می‌توان طبق روابط

جدول ۱. ترتیب اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه ظاهری در آرایه مربعی. این جدول در شکل ۵، به‌صورت گرافیکی نشان داده شده است. مقدار مقاومت ظاهری در آزمون گاما، صرفاً جهت کنترل اندازه‌گیری‌های آزمون آلفا و بتا می‌باشد. در آرایه مربعی، برای هر طول ضلع مشخص از مربع، طبق جدول زیر، ۱۸ اندازه‌گیری انجام شود. مجموعاً ۹۰ اندازه‌گیری انجام شده است (۱۸ ضربدر ۵ عمق اندازه‌گیری). واحد اندازه‌گیری به درجه می‌باشد. موقعیت و شبکه پلان اندازه‌گیری در شکل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ نمایش داده شده است. نقشه توزیع نقاط در شکل ۵ نمایش داده شده است.

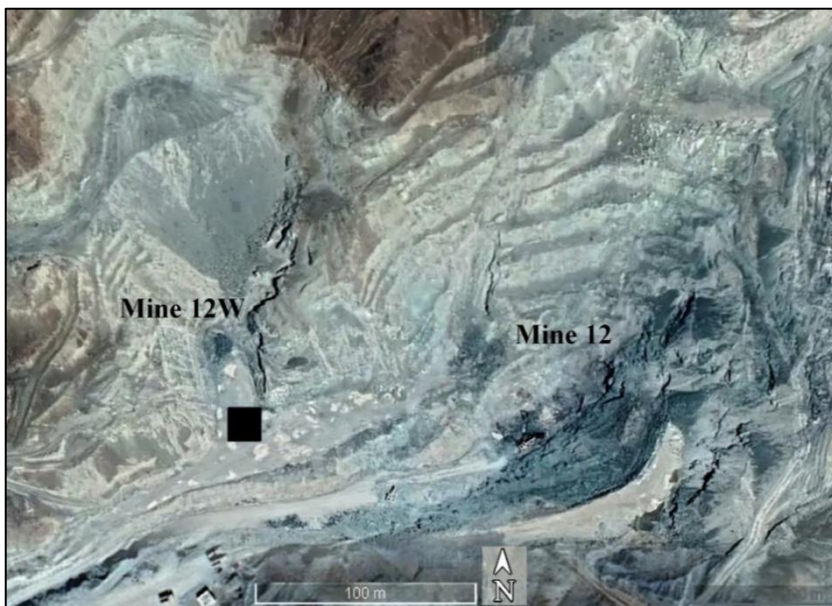
آزمون اول (α)	آزمون دوم (β)	آزمون سوم (γ)	
صفر	۹۰	۴۵	مرحله اول
۱۵	۱۰۵	۶۰	مرحله دوم
۳۰	۱۲۰	۷۵	مرحله سوم
۴۵	۱۳۵	۹۰	مرحله چهارم
۶۰	۱۵۰	۱۰۵	مرحله پنجم
۷۵	۱۶۵	۱۲۰	مرحله ششم



شکل ۵. پلان چگونگی اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه در آرایه آزمون مربعی به‌کار رفته در این تحقیق. در این شکل، هر مربع با زاویه ۱۵ درجه نسبت به مربع قبلی (از بالا به پایین) قرار دارد. ضلعی از مربع که با خط ضخیم مشخص شده راستای اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه را نشان می‌دهد. با اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه ظاهری در ۱۲ راستا (ستون اول و دوم از چپ)، مقاومت‌ویژه ظاهری به دور یک دایره کامل (۳۶۰ درجه) به فواصل ۱۵ درجه اندازه‌گیری خواهد شد. مقدار مقاومت‌ویژه ظاهری در ستون سوم صرفاً جهت کنترل اندازه‌گیری‌های ستون اول و دوم است. اندازه‌گیری‌ها به ترتیب آلفا، بتا و گاما نامیده می‌شود.

۳-۴. برداشت صحرایی مقاومت ویژه آزمونوتی با آرایه مربعی انجام این مطالعه با هدف تشخیص جهت ناپیوستگی ها که ناشی از وجود گسلی احتمالی و درزه ها است، در معدن ۱۲ انجام شد. همچنین پاسخ به این پرسش که آیا درزه ها

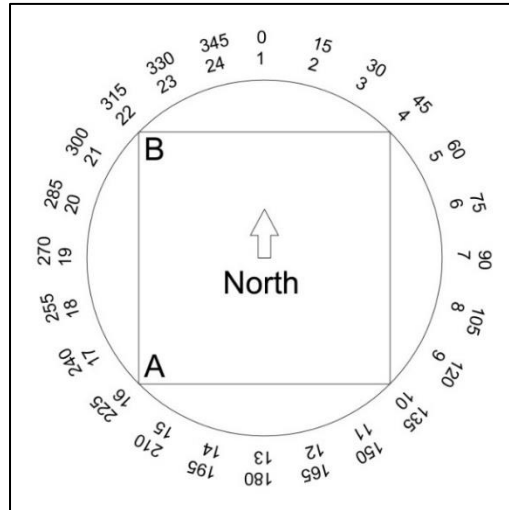
و شکستگی ها می تواند نشانگری برای وجود گسل در منطقه مورد مطالعه که موجب جابه جایی ماده معدنی شده است، باشد. برای استقرار الکترودهای آرایه مربعی، از بزرگ ترین و مناسب ترین سطح موجود در معدن استفاده شد (شکل ۶ و ۷).



شکل ۶. پلان موقعیت آرایه مربعی در معدن ۱۲. موقعیت آرایه مربعی، با مربع مشکی، نمایش داده شده است. مقیاس در پایین تصویر، یکصد متر را نشان می دهد.



شکل ۷. نمایش نقطه اندازه گیری (مرکز مربع) و نمایش آزمونوتی های اندازه گیری مقاومت ویژه ظاهری در آرایه مربعی در معدن ۱۲. در این شکل، عدد ۱ (سمت چپ عکس) و فلش مشکی جهت شمال (صفر درجه) را نشان می دهد. آزمونوتی های اندازه گیری، به صورت کامل، در شکل ۸ نشان داده شده است. جهت AB اولین اندازه گیری، در هر طول ضلع مربع (با مترآژ مشخص) را نشان می دهد. به خودرو، برای مقیاس، توجه شود. در این شکل، نمودار ستاره ای حاصل از برداشت مقاومت ویژه ظاهری، برای طول ضلع ۱۳/۸ متر، نمایش داده شده است.



شکل ۸. نمایش جهت اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه، به‌روش آرایه مربعی، در آزیموت صفر درجه. در این نمودار، عدد ۱ جهت شمال (صفر درجه) را نشان می‌دهد؛ بنابراین آزیموت مقاومت‌ویژه اندازه‌گیری شده در این تصویر، صفر درجه (راستای AB) می‌باشد. اندازه‌گیری در راستای AB به‌نام آلفا نام‌گذاری می‌شود.

به‌دست آورد. عمق نفوذ در مواد همسانگرد و همگن را می‌توان تقریباً برابر با طول ضلع مربع در نظر گرفت (کارلسون و گایلورد، ۲۰۰۵). بررسی مقادیر ضریب ناهمسانگردی نشان می‌دهد که الگوی مشخصی در رابطه با تغییرات آن از سطح تا عمق وجود ندارد هرچند به‌طور کلی این مقدار در لایه‌های پایین بیشتر است. ناهمسانگردی در برخی اندازه‌گیری‌ها مقادیر کمتر از یک را نشان می‌دهد که احتمالاً به دلیل وجود خطا در اندازه‌گیری‌ها می‌باشد.

پس از به‌دست آوردن مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری، این مقادیر بر روی نمودارهای دایره‌ای (قطبی) ترسیم و در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود به‌طور کلی، با زیادتر شدن عمق نفوذ جریان (افزایش طول ضلع مربع) مقاومت‌ویژه ظاهری روندی کاهشی نشان داده و در اولین، دومین، سومین، چهارمین و پنجمین برداشت (الف، ب، پ، ت، ث) بیشینه مقاومت‌ویژه ظاهری به‌ترتیب حدود ۲۷۰، ۱۸۰، ۱۱۰، ۶۵ و ۷۰ اهم‌متر می‌باشد. کاهش مقاومت ظاهری با افزایش عمق را می‌توان، به احتمال، به افزایش میزان رطوبت با عمق نسبت داد. در این محدوده، حفاری گمانه اکتشافی، وجود آب در عمق حدود ۱۳ متری را به اثبات رسانده است.

۴-۴. استفاده از آرایه مربعی برای تشخیص جهت ناپیوستگی‌ها

در این تحقیق، روش مقاومت‌ویژه آرایه مربعی، برای تشخیص جهت ناپیوستگی‌ها که ناشی از وجود درزه‌ها است، در معدن ۱۲ انجام شد. در واقع با تعیین شدت ناهمسانگردی و تقریب جهت غالب درزه می‌توان به اطلاعاتی در رابطه با سازوکار شکستگی‌ها در منطقه به‌دست آورد. در محدوده سنگ بستر محدوده مورد مطالعه شامل پریدوتیت‌های سرپانتینی شده می‌باشد. پارامترهای برداشت، مقادیر مقاومت‌ویژه و میزان ضریب ناهمسانگردی در زوایای مختلف مربوط به آزیموت‌های α و β در جدول ۲ آورده شده است. این اندازه‌گیری‌ها شامل ۵ طول ضلع مشخص (A) از آرایه مربعی است. طول ضلع مربع از $\frac{3}{5}$ متر به $\frac{13}{8}$ متر، با افزایش برای هر سونداژ، بمیزان $\sqrt{2}$ برابر سونداژ قبلی، افزایش می‌یابد (به‌ترتیب $\frac{3}{5}$ ، $\frac{4}{9}$ ، $\frac{6}{9}$ ، $\frac{9}{8}$ و $\frac{13}{8}$ متر). زاویه چرخش مربع در هر مرحله، ۱۵ درجه می‌باشد. به‌دلیل کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه، سطح زمین عمدتاً پُر شیب و مناطق مسطح بسیار محدود بوده که این باعث محدودیت در تنظیم حداکثر طول ضلع آرایه مربعی شد ($\frac{13}{8}$ متر). بدیهی است که با افزایش بیشتر طول ضلع آرایه مربعی، می‌توان اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری از شرایط زیرسطحی

جدول ۲. مقادیر مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده در آرایه آزمون مربعی و ضریب ناهمسانگردی محاسبه شده.

زاویه	ضلع مربع (متر)	مقاومت ویژه ظاهری الف قبل از اعمال ضریب هندسی	مقاومت ویژه ظاهری بتا قبل از اعمال ضریب هندسی	ضریب هندسی	مقاومت ویژه ظاهری الف بعد از اعمال ضریب هندسی	مقاومت ویژه ظاهری بتا بعد از اعمال ضریب هندسی	ضریب ناهمسانگردی
۰	۳/۵	۷/۲۶	۵/۱	۳۷/۵	۲۷۲/۳	۱۹۱/۳	۱/۲
۰	۴/۹	۳/۰۳	۱/۵	۵۲/۵	۱۵۹/۱	۸/۷۸	۱/۴
۰	۶/۹	۱/۴۲	۰/۳۹	۷۴	۱۰۴/۹	۲۸/۸	۱/۹
۰	۹/۸	۰/۵۴	۰/۲۴	۱۰۵/۱	۵۷/۲	۲۵/۴	۱/۵
۰	۱۳/۸	۰/۲۳	۰/۴۴	۱۴۷/۹	۳۴/۲	۶۵/۱	۰/۷
۱۵	۳/۵	۷/۴	۴/۴۲	۳۷/۵	۲۷۷/۵	۱۶۵/۸	۱/۳
۱۵	۴/۹	۳/۵	۱/۳۹	۵۲/۵	۱۸۳	۷۳	۱/۶
۱۵	۶/۹	۱/۵۱	۰/۳۷	۷۴	۱۱	۲۷	۲
۱۵	۹/۸	۰/۵۴	۰/۴۴	۱۰۵/۱	۵۴/۴	۴۶/۲	۱/۱
۱۵	۱۳/۸	۰/۲۱	۰/۱۲	۱۴۷/۹	۳۱/۵	۱۸	۱/۳
۳۰	۳/۵	۶/۶۷	۴/۷	۳۷/۵	۲۵۴	۱۷۶	۱/۲
۳۰	۴/۹	۳/۲۶	۱/۱۹	۵۲/۵	۱۷۱	۶۲	۱/۷
۳۰	۶/۹	۰/۹۷	۰/۵۴	۷۴	۷۱	۴۰	۱/۳
۳۰	۹/۸	۰/۴۲	۰/۲	۱۰۵/۱	۴۴	۲۱	۱/۴
۳۰	۱۳/۸	۰/۱۸	۰/۲۲	۱۴۷/۹	۲۶	۳۲	۰/۹
۴۵	۳/۵	۷/۱۸	۴/۳۹	۳۷/۵	۲۶۹	۱۶۴	۱/۳
۴۵	۴/۹	۲/۷۴	۱/۳۶	۵۲/۵	۱۴۴	۷۱	۱/۴
۴۵	۶/۹	۰/۹	۰/۴۱	۷۴	۶۷	۳۰	۱/۵
۴۵	۹/۸	۰/۳۳	۰/۳	۱۰۵/۱	۳۴	۳۱	۱
۴۵	۱۳/۸	۰/۴۸	۰/۳	۱۴۷/۹	۷۱	۴۴	۱/۳
۶۰	۳/۵	۶/۸	۵/۹	۳۷/۵	۲۵۵	۲۲۱	۱/۱
۶۰	۴/۹	۲/۲۶	۱/۴	۵۲/۵	۱۱۹	۷۳	۱/۳
۶۰	۶/۹	۰/۷۵	۰/۷۴	۷۴	۵۵	۵۴	۱
۶۰	۹/۸	۰/۳۲	۰/۳۴	۱۰۵/۱	۳۳	۳۶	۱
۶۰	۱۳/۸	۰/۱۹	۰/۱۹	۱۴۷/۹	۲۷	۲۸	۱
۷۵	۳/۵	۶/۰۸	۶/۲۱	۳۷/۵	۲۲۸	۲۳۲/۹	۱
۷۵	۴/۹	۱/۸۵	۲/۲۸	۵۲/۵	۹۷/۱	۱۱۹/۷	۰/۹
۷۵	۶/۹	۰/۴۹	۱/۰۶	۷۴	۳۶/۳	۷۸	۰/۷
۷۵	۹/۸	۰/۲۹	۰/۶۱	۱۰۵/۱	۳۰	۶۴/۱	۰/۷
۷۵	۱۳/۸	۰/۲۱	۰/۳۸	۱۴۷/۹	۳۱/۱	۵۶/۲	۰/۷

۴-۵. نمودار گُل سرخی

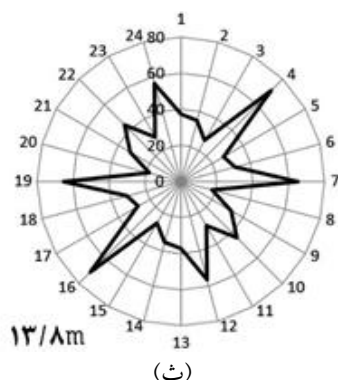
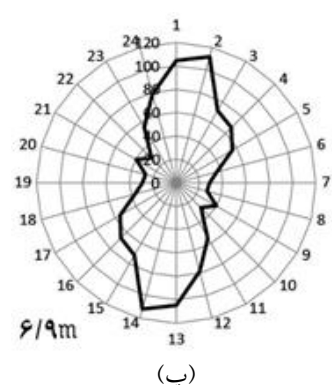
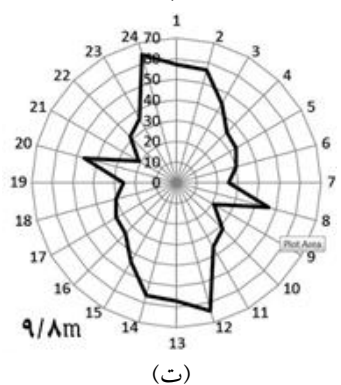
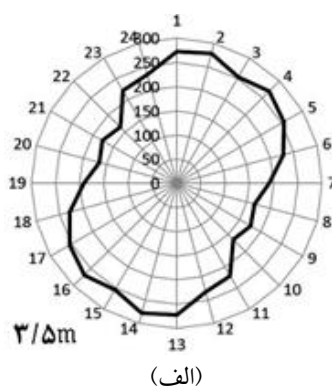
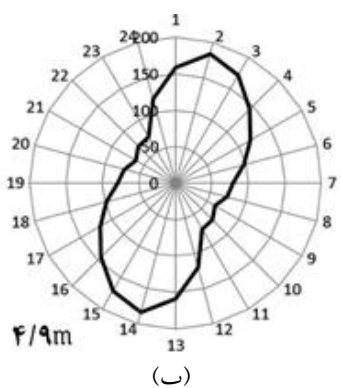
است. سطوح ناپیوستگی با جهت گیری مشابه را می توان عموماً به یک یا چند گروه ناپیوستگی تقسیم بندی کرد. در شیب دامنه ها، تجمع ناپیوستگی ها می تواند

از مهم ترین ویژگی ناپیوستگی ها، جهت گیری آنها نسبت به یکدیگر و نسبت به سطح شیب دامنه ها

متغیرها جهت یا زاویه است که به دور مرکز یک دایره نشان داده می‌شود و دیگری یک کمیت اسکالر است که با فاصله شعاعی از مرکز دایره نشان داده می‌شود؛ بنابراین نمودار گل سرخی، نموداری در مختصات قطبی می‌باشد. چون مقدار شعاعی، نشان‌دهنده تعداد است، نمودار گل سرخی به صورت نوعی هیستوگرام عمل می‌کند به طوری که ستون‌های هیستوگرام به دور یک دایره پیچیده شده است.

منجر به ناپایداری و ریزش شود. بنابراین، نمایش دقیق جهت‌گیری مجموعه ناپوستگی می‌تواند به پیش‌بینی و تحلیل پایداری شیب کمک کند (تیرونه و همکاران، ۲۰۱۳). برای نمایش جهت‌گیری ناپوستگی‌ها می‌توان از نمودارهای گل سرخی استفاده کرد.

در بررسی‌های زمین‌شناسی، نمودار گل سرخی نموداری است که رابطه بین دو متغیر را نشان می‌دهد؛ یکی از



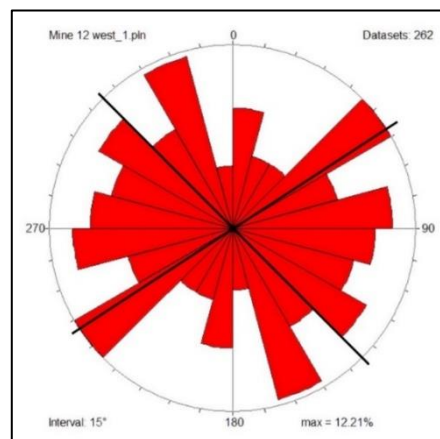
شکل ۹. نمایش مقاومت ویژه ظاهری آرایه آزمایشی مربعی، بر روی نمودارهای دایره‌ای. در این نمودار، عدد ۱ جهت شمال (صفر درجه) و عدد ۱۳ جهت جنوب (۱۸۰ درجه) را نشان می‌دهد. فاصله اعداد از هم ۱۵ درجه می‌باشد. در این شکل، با زیادتر شدن عمق بررسی (افزایش طول ضلع مربع)، مقاومت ویژه ظاهری روند کاهشی نشان می‌دهد. در اولین برداشت (الف) بیشینه مقاومت ویژه ظاهری حدود ۲۷۰ اهم-متر و در آخرین برداشت (ث) این مقدار برابر با ۷۰ می‌باشد. طول ضلع آرایه مربعی، از (الف) تا (ث)، در زیر هر شکل، درج شده است.

در بحث کنونی، متغیر اول امتداد ناپیوستگی‌ها (درزه‌ها، گسل‌ها و...) و متغیر دوم تعداد آنهاست (شکل ۱۰). از نمودار گل‌سرخ ترسیم شده برای منطقه مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که مهم‌ترین مجموعه ناپیوستگی‌ها در سطح زمین، در دو راستا، با امتداد ۴۵ تا ۶۰ درجه و ۱۵۰ تا ۱۶۵ درجه وجود دارد. درزه‌هایی با اهمیت کمتر نیز در شکل، قابل مشاهده می‌باشد. شناسایی جهت غالب شکستگی‌ها از جهت قابل اهمیت است که نیروهای تکنونیک در منطقه فرومد منجر به ایجاد شکستگی‌های فراوان و گسلی شدن بیشتر واحدها شده و بیشتر مواد معدنی در شکستگی و فضای باز سنگ‌ها، جایگیری و تمرکز می‌یابند. بنابراین به نظر می‌رسد که به دلیل پیچیدگی‌های افولیت منطقه سبزوار و عدم تباین فیزیکی مشخص کانسار و محیط میزبان، شناسایی الگوی ناهمسانگردی مرتبط به شکستگی‌های منطقه امکان تعیین موقعیت و جهت یافتگی افولیت‌ها را فراهم می‌آورد. از طرفی مدل‌سازی این نوع شکستگی‌ها باعث انتخاب بهینه نقاط حفاری و در نتیجه کاهش هزینه‌های اکتشافی می‌شود.

۴-۶. شبکه درزه‌ها

تحلیل پایداری شیب‌های سنگی برای طراحی ایمن

دامنه‌های حفاری شده مانند معادن روباز، بریدگی جاده‌ها، پل‌ها و همچنین برای بررسی شرایط تعادل یک شیب طبیعی، ضروری می‌باشد. این تحلیل با در نظر گرفتن تأثیر انواع ناپیوستگی‌ها (درزه‌ها، گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها، صفحات لایه‌بندی و غیره) صورت می‌گیرد. ساختار زمین‌شناسی سنگ، اغلب بر پایداری شیب‌ها در توده‌های سنگی درزه‌دار، تأثیر زیادی دارد. مشخصات زمین‌شناسی توده سنگ عموماً شامل محل و تعداد دسته درزه‌ها، فاصله درزه‌ها، جهت‌گیری درزه‌ها، مواد پرکننده درزه‌ها و میزان آب در درزه‌ها می‌باشد. اولین گام در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی، شناسایی دقیق ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها است که می‌تواند به کمک عکس‌های هوایی، برداشت سطحی و یا بررسی مغزه‌های حاصل از گمانه انجام می‌شود (لاتا و گاراگا، ۲۰۱۰). یکی از روش‌های متداول اندازه‌گیری شیب و امتداد درزه‌ها استفاده از قطب‌نمای زمین‌شناسی می‌باشد. در تحقیق کنونی برداشت درزه‌ها از رخنمون‌های سطحی و توسط قطب‌نمای زمین‌شناسی انجام و به صورت گرافیکی، توسط نمودار گل‌سرخ، نمایش داده شده است (شکل ۱۰). تعداد درزه‌های اندازه‌گیری شده ۲۶۲ و درزه‌ها در دسته‌های ۱۵ درجه‌ای تقسیم‌بندی و ترسیم شده است.



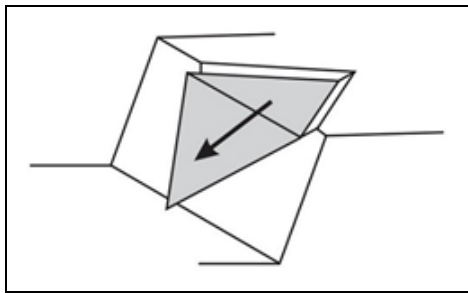
شکل ۱۰. نمودار گل‌سرخ مربوط به برداشت شیب و جهت ناپیوستگی‌ها در محدوده معدن ۱۲. این نمودار نشان‌دهنده جهت درزه‌ها در برابر تعداد آنهاست. در این نمودار درزه‌ها در دو راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب و شمال‌غرب-جنوب‌شرق تراکم بیشتری نشان می‌دهد. تعداد ناپیوستگی‌های اندازه‌گیری شده ۲۶۲ و ناپیوستگی‌ها در دسته‌های ۱۵ درجه‌ای تقسیم‌بندی و ترسیم شده‌اند. دو خط ضخیم مشکی، امتداد دو درزه مهم، که در گودال استخراج، به صورت گوه‌ای ریزش نموده (شکل ۱۲) را نشان می‌دهد (درزه ۴۰-۳۲۸ با امتداد شمال‌شرق-جنوب‌غرب و درزه ۴۰-۲۲۵ با امتداد شمال‌غرب-جنوب‌شرق).

مشاهده می‌شود از به هم پیوستن دو سری از درزه‌های مهم با مشخصات ۴۰-۳۲۸ و ۴۰-۲۲۵ در معدن ۱۲ ایجاد شده است (عدد سمت چپ و راست به ترتیب، جهت شیب و مقدار شیب را نشان می‌دهد). این دو درزه مهم، توسط دو خط ضخیم مشکی، بر روی نمودار گل‌سرخ (شکل ۱۰) نشان داده شده است.

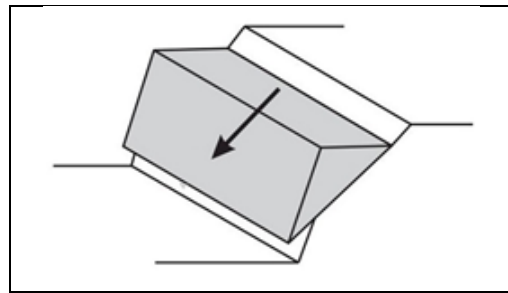
مکان برداشت مشخصات درزه‌هایی که نمودار آن در شکل ۱۰ نمایش داده شده دقیقاً در اطراف موقعیت آرایه مربعی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود مهم‌ترین ناپیوستگی‌ها در دو راستا، با امتداد ۴۵ تا ۶۰ درجه و ۱۵۰ تا ۱۶۵ درجه وجود دارد.

به‌طور کلی، واژه ناپیوستگی (Discontinuity) برای درزه‌ها، گسل‌ها و هر نوع سطح جدایش دیگر که در طبیعت، در سنگ‌ها، وجود داشته باشد، به کار برده می‌شود. شکل ۱۱ دو نوع مهم از ریزش‌های دامنه را نشان می‌دهد (هوک و بری، ۱۹۷۲). نوع اول (الف) ریزش‌های صفحه‌ای و نوع دوم (ب) ریزش‌های گوه‌ای نام دارد. ریزش‌های نوع اول در اثر یک سری ناپیوستگی و نوع دوم از به هم پیوستن دو سری ناپیوستگی ایجاد می‌شود. در محدوده مورد مطالعه هر دو نوع ریزش وجود دارد.

در شکل ۱۲ ریزشی گوه‌ای که در سمت راست شکل

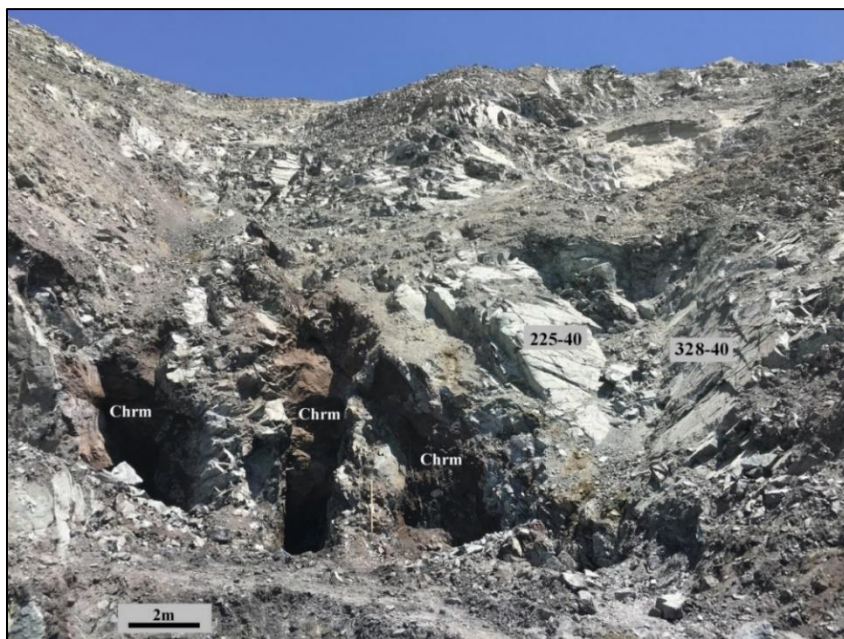


(ب)



(الف)

شکل ۱۱. دو نوع از ریزش‌های مهم در دامنه‌های سنگی. نوع اول (الف) ناپیوستگی صفحه‌ای و نوع دوم (ب) ناپیوستگی گوه‌ای نام دارد. در شکل ۱۲، ریزش از دیواره‌های معدن، به صورت گوه‌ای مشاهده می‌شود که نتیجه عملکرد دو سری دسته درزه نام‌برده در شکل می‌باشد.



شکل ۱۲. نمایی از درزه‌های مهم واقع در معدن ۱۲ شرقی. گوه ریزش کرده، در سمت راست تصویر، از به هم پیوستن دو سری از درزه‌های اصلی (۴۰-۳۲۸ و ۴۰-۲۲۵) ایجاد شده است. نماد Chrm نشان‌دهنده ماده معدنی کرومیت می‌باشد. مقیاس در پایین شکل، برابر با ۲ متر می‌باشد.

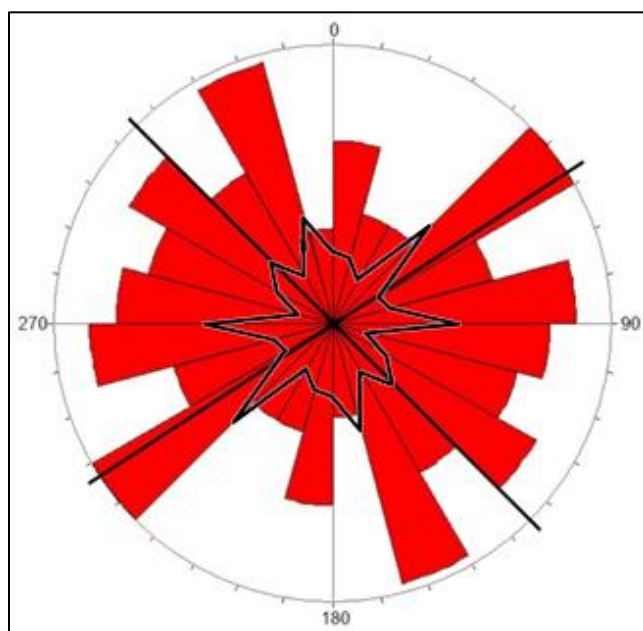
۵. بحث

در مواردی که نمودار گرافیکی نمایش دهنده تنها یک امتداد اصلی با مقاومت ویژه کم باشد، این مشاهده می‌تواند به احتمال قوی، در نتیجه وجود گسل باشد؛ در این صورت نمایان شدن درزه‌ها در کنار گسل، به دلیل کمتر بودن ضخامت درزه‌ها و در نتیجه رسانایی کمتر، امکان پذیر نمی‌باشد. چنین موردی در مطالعه کنونی مشاهده نشد. نتایج حاصل از داده‌های جمع‌آوری شده در محدوده مورد مطالعه، تغییرات قابل توجهی از مقاومت ویژه ظاهری را در جهت‌های مختلف نشان می‌دهد. این داده‌ها در جدول ۲ آورده شده است. مقادیر این جدول، به صورت گرافیکی، در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود بیضی مقاومت ویژه ظاهری بخوبی تشکیل شده و مشاهده می‌شود، به جز در مورد آخر (شکل ۹-ث) که به شکل ستاره است. جهت بیضی، در ۴ اندازه‌گیری اول، تا حدودی متفاوت بوده و به علاوه مقاومت ویژه ظاهری از سطح به عمق کاهش می‌یابد. نمودارهای دایره‌ای نشان می‌دهد که در کمترین عمق (شکل ۹-الف) کمترین مقاومت ویژه ظاهری (مهم‌ترین ناپیوستگی‌ها) در راستایی با امتداد ۱۲۰ درجه وجود دارد که با افزایش عمق، با گردش حدود ۱۵ درجه‌ای در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، به راستای ۱۰۵ درجه می‌رسد و یک «نقطه حداقل» دیگر نیز در راستای ۱۳۵ درجه تشکیل می‌شود (شکل ۹-پ). با افزایش بیشتر عمق بررسی، کمترین مقدار مقاومت، با گردش حدود ۱۵ درجه‌ای در جهت عقربه‌های ساعت، دوباره در راستای ۱۲۰ درجه قرار گرفته و یک نقطه حداقل دیگر نیز در راستای ۹۰ درجه به وجود می‌آید (شکل ۹-ت). در آخرین مرحله، با افزایش بیشتر عمق بررسی (۱۳/۸ متر)، کمترین مقدار مقاومت، دوباره در راستای ۱۰۵ درجه قرار می‌گیرد (شکل ۹-ث) و نقاط حداقل دیگری در راستای ۱۵۰، ۳۰ و ۶۷ درجه تشکیل می‌شود. بنابر مشاهدات بالا می‌توان اظهار کرد که در ۴ عمق اول، کمترین مقاومت (امتداد

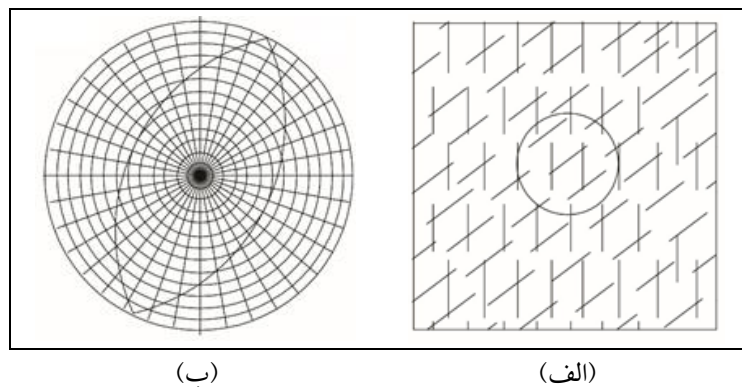
درزه‌ها)، در محدوده‌ای بین ۹۰ تا ۱۲۰ درجه و به‌طور عمده در دو راستا قرار می‌گیرد و در بیشترین عمق (۱۳/۸ متر)، ۴ نقطه حداقل مشاهده می‌شود. بیشترین ضریب ناهمسانگردی طبق فرمول $\lambda = \sqrt{(\rho T / \rho L)}$ مربوط به طول ضلع ۶/۹ متر و برابر با ۲/۰ می‌باشد. با وجود این که مقادیر بیشترین رسانایی به‌طور کلی در ۴ تصویر اول و حتی در هر ۵ تصویر، تا حدود زیادی با یکدیگر همخوانی دارد اما لازم است تغییرات جهت کمترین رسانایی و تشکیل شکل ستاره‌ای (در بیشترین عمق) قابل تفسیر باشد. تیلور و فلمینگ (۱۹۸۸) در تحقیق خود که به‌روش مقاومت ویژه آزیموتی و با استفاده از آرایه ونر انجام شده، اظهار داشته‌اند که در بخشی از منطقه مورد مطالعه ایشان، طول بیشتر درزه‌ها کمتر از فاصله الکترونی بوده و در این شرایط، جریان، مانند آنچه در مورد درزه‌هایی با طول متوسط کمتر از فاصله الکترونی صادق است، نمی‌تواند در امتداد یک سری از درزه‌های مشخص، عبور کند بلکه از مسیر دیگری با مقاومت کمتر، جریان می‌یابد. این مطلب، به صورت گرافیکی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این حالت، از آنجایی که جریان الکتریکی همیشه مسیر کمترین مقاومت ویژه الکتریکی را دنبال می‌کند، جهت بیضی ناهمسانگردی موازی با امتداد هیچ یک از دسته درزه‌ها نبوده بلکه با کوتاه‌ترین طول مسیر جریان الکتریکی منطبق خواهد بود. این مسیر نشان‌دهنده جهت بیشترین رسانایی است که تابعی از میانگین طول و تعداد دسته درزه‌های موجود در هر منطقه است. هر چه دسته درزه‌های یک گروه مشخص، طولانی‌تر و نزدیک‌تر باشند، جریان کمتری، در دسته درزه‌های دیگر، پیموده می‌شود. می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که مشابه به آنچه که در مطالعه تیلور و فلمینگ نیز مطرح شده، تغییرات امتداد رسانایی از اعماق کمتر به بیشتر، در اثر افزایش طول آرایه و در نتیجه در اثر تغییر مسیری است که جریان در هر مرحله، در عمق بیشتر می‌پیماید. این نشان می‌دهد که بیشینه طول متوسط درزه‌ها در منطقه مورد بررسی، کمتر از ۱۳/۸ متر می‌باشد. با توجه

نبود گمانه‌های اکتشافی، مشخص نمی‌باشد. به نظر می‌رسد که موضوع تغییر جهت بیشترین رسانایی با افزایش عمق (افزایش طول ضلع آرایه) با نتایج حاصل از تحقیق تیلور و فلمینگ قابل تفسیر است اما آیا این که بیشترین رسانایی (۴ جهت) که در شکل ۹-ث نمایش داده شده، نشان‌دهنده جهت بیشترین درزه‌هاست و یا این که مسیر بیشترین جریان را نشان می‌دهد، به‌طور قطعی، با داده‌های کنونی، قابل اثبات نیست. بنابراین لازم است در چنین شرایطی، در صورت امکان، از شواهد بیشتر (برای مثال داده‌های گمانه‌های اکتشافی) استفاده شود. مسئله بالا از نظر دیگری قابل بررسی می‌باشد. از نظر لین و همکاران (۱۹۹۵) راستای کمترین مقاومت در جهت عمود بر بیشترین مقاومت قرار دارد. در صورتی که نمودار ستاره‌ای را از این دیدگاه تفسیر کنیم، راستای کمترین مقاومت در امتداد شمال غرب-جنوب شرق (۱۳۵ درجه) خواهد بود. به‌طور کلی می‌توان اظهار کرد که نمودار گل‌سرخ با نمودار مقاومت ویژه ظاهری، انطباق نسبتاً خوبی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹-ث، احتمال می‌رود که در محدوده مطالعه شده، ۴ دسته درزه وجود داشته باشد که با برداشت‌های سطحی همخوانی نسبی دارد.

به نمودارهای شکل ۹ می‌توان اظهار کرد که در عمق نفوذ کم، کمترین مقاومت ویژه الکتریکی در راستای درزه‌هایی با امتداد شمال غرب-جنوب شرق (حدود 105° تا 120°) می‌باشد (شکل ۹-الف تا ۹-ت) و سپس با بیشتر شدن عمق نفوذ جریان (بیشتر شدن طول ضلع آرایه مربعی از طول متوسط درزه‌ها)، شکل بیضی به شکلی شبیه به ستاره تغییر یافته که، به احتمال، در اثر تأثیر دسته درزه‌های دیگر، با امتداد 30° ، 67° و 150° می‌باشد (شکل ۹-ث). با وجود مقایسه‌ای که در بالا، بین دو تحقیق بعمل آمد، تحقیق تیلور و فلمینگ از نظر این که تعداد دسته‌های موجود در تحقیق ایشان (۲ سری) با تعداد دسته درزه‌هایی که در تحقیق کنونی وجود دارد (حدافل ۴ سری) یکسان نیست، با تحقیق کنونی قابل مقایسه نمی‌باشد. برای بررسی بیشتر، نمودار ۹-ث را به‌روی نمودار گل‌سرخ حاصل از برداشت درزه‌های سطحی، منطبق کرده‌ایم (شکل ۱۳). همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، جهت بیشترین رسانایی (به‌روی نمودار ستاره‌ای) لزوماً با تعداد بیشترین درزه‌ها (نمودار گل‌سرخ) منطبق نمی‌باشد. بازشدگی درزه‌ها (Aperture) عامل دیگری است که در رسانایی درزه‌ها نقش بسزایی دارد اما این که بازشدگی درزه‌ها در عمق بیشتر، به چه میزان می‌باشد متأسفانه به دلیل



شکل ۱۳. ترسیم نمودار مقاومت الکتریکی به‌روی نمودار گل‌سرخ. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین رسانایی (فرورفتگی در نمودار ستاره‌ای) با تعداد بیشترین درزه‌ها (نمودار قرمز) لزوماً منطبق نمی‌باشد.



شکل ۱۴. نمایش جهت درزه‌ها (الف) و بیضی آنیزوتروپی (ب) از تیلور و فلمینگ (۱۹۸۸). همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مسیر کمترین مقاومت‌ویژه (بیشترین جریان) در امتداد هیپچیک از دو دسته درزه (الف) نبوده بلکه از مسیری در بین آنها است که در راستای قطر بزرگ‌تر بیضی آنیزوتروپی (ب) می‌باشد. نمودار شکل ۱۳ معادل با نمودار فوق است که به کمک نمودار گل‌سرخ، برای تحقیق کنونی، ترسیم شده است.

۶. نتیجه‌گیری

مربعی، در چند نقطه، به‌همراه مطالعات تکمیلی، از جمله برداشت از رخنمون‌ها و یا در صورت امکان استفاده از داده‌های گمانه‌های اکتشافی و روش‌های ژئوفیزیکی دیگر، انجام شود.

طبق نتایج به‌دست آمده، می‌توان اظهار کرد که از آرایه مربعی می‌توان برای آشکارسازی ساختارهای زمین‌شناسی در پروژه‌های معدنی و عمرانی و بررسی آب‌های زیرزمینی بهره‌جست. استخراج در معادن روباز، عموماً با حفاری گودالی به‌شکل مخروطی واژگون، انجام می‌شود. طراحی این مخروط با استفاده از مشخصات شبکه درزه‌ها و دیگر ویژگی‌های توده سنگ انجام می‌شود. در صورت موجود بودن امکانات و مناسب بودن شرایط توپوگرافی، می‌توان، علاوه‌بر برداشت داده‌ها از رخنمون‌ها، از داده‌های آرایه مربعی، برای شناسایی شبکه درزه‌ها، برای طراحی گودال استخراج (Open pit)، استفاده کرد.

کاربرد روش آرایه مربعی، در مناطق کوهستانی و با توپوگرافی تُند، به علت موجود نبودن سطوح صاف بزرگ، دارای محدودیت است. در منطقه مورد مطالعه، با توجه به نبود سطوح بزرگ مناسب، اجرای آرایه مربعی، با محدودیت اجرا شد (بیشینه ضلع مربع ۱۳/۸ متر می‌باشد). حفاری‌های معدنی و ایجاد پله و پرتگاه، وجود دپوی باطله‌ها در اطراف و در داخل محدوده‌های معادن در حال

تحلیل ساختاری توده‌های سنگی، به‌دلیل وجود زون‌های گسلی و وجود شبکه درزه‌ها از اهمیت زیادی، برای اکتشاف، برخوردار است. گسل‌ها و درزه‌ها از جمله مهم‌ترین عوارض ساختمانی توده‌های سنگی است. در این مطالعه، قابلیت آرایه مربعی آزیموتی، برای بررسی ناپیوستگی‌های توده سنگ، مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت‌ویژه ظاهری، در یک نقطه، بر روی سنگ بستر متبلور بدون روباره، با افزایش طول ضلع آرایه، در ۵ مرحله، از عمق کمتر به بیشتر، محاسبه و بیضی ناهمسانگردی برای هر مرحله، رسم شد. استفاده از آرایه مربعی، تا حدود زیادی، منجر به شناسایی شبکه درزه‌ها و چگونگی جهت‌گیری آن شد؛ تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از این مطالعه، وجود گسل، در محدوده آرایه مربعی را تأیید نمی‌کند. نتیجه مطالعات دیگر، وجود گسل مورد نظر را در فاصله حدود ۲۵۰ متری به اثبات رسانده است. مشاهده بیضی ناهمسانگردی، در اعماق مختلف، به احتمال، وجود ۴ دسته درزه را نشان می‌دهد که در راستای 30° ، 67° ، 120° و 150° کشیدگی داشته که با نمودار گل‌سرخ از نظر تعداد دسته درزه‌ها و تا حدودی از نظر امتداد درزه‌ها انطباق خوبی نشان می‌دهد. از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که بهتر است، برای رسیدن به نتایجی با قطعیت بیشتر، برداشت به‌روش آرایه

محدودیت‌های مکانی ایجاد می‌کند.

مراجع

- Asfahani, J. (2011) Application of a Directional Geoelectrical Resistivity Square Configuration for Anisotropy Estimation in Haramoun Region, Southern Syria. *Earth Sci.*, 22(1), 77-98.
- Carlson, C. A., & Gaylord, T. G. (2005). Fracture characterization in crystalline bedrock using square-array resistivity methods, Southeastern Connecticut. *Northeastern Geology & Environmental Sciences*, 27(4), 317-325.
- Carpenter, E. W., & Habberjam, G. M. (1956). A Tri-Potential Method of Resistivity Prospecting. *Geophysics*, 21(2), 455-469.
- Christensen, N. B. (2000). Difficulties in determining electrical anisotropy in subsurface investigations. *Geophys. Prospect.* 48, 1-19.
- Darboux-Afouda, R., & Louis, P. (1989). Contribution des mesures de l'anisotropie électrique la recherche des aquifères de fracture en milieu cristallin au Bénin. *Geophysical Prospecting*, 37, 91-105.
- Dilek, Y. (2003). Ophiolite concept and its evolution. *Geological Society of America, Special Paper*, 373.
- Fruh-Green, G. Plas, A., & Lecuyer, C. (1996). Petrologic and stable isotope constraints on hydrothermal alteration and serpentinization of the EPR shallow mantle at Hess deep site 895. *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results*, 747, 255.
- Gaylord, T. J., & Carlson, C. A. (2005). Fracture Characterization in Crystalline Bedrock Using Square Array Resistivity Methods, Southeastern Connecticut. *Northeastern Geology & Environmental Sciences*, 27(4), 317-325.
- George, A. M. Okwueze, E. E., & Abong, A. A. (2014). Azimuthal square array resistivity sounding of shallow subsurface fracture distribution in parts of the eastern basement complex of Nigeria. *British Journal of Earth Sciences Research*, 2(1), 1-18.
- Habberjam, G. M. (1972). The Effects of Anisotropy on Square Array Resistivity Measurements. *Geophysical Prospecting*, 20, 249-266.
- Habberjam, G. M. (1979). Apparent Resistivity Observations and the Use of Square Array Techniques. *Published by Gebruder Borntraeger*, 152.
- Habberjam, G. M., & Watkins, G. E. (1967a). The reduction of lateral effects in resistivity probing. *Geophysical Prospecting.*, 16, 221-236.
- Habberjam, G. M., & Watkins, G. E. (1967b). The use of a square configuration in resistivity prospecting. *Geophys. Prospect.* 15, 445-467.
- Habberjam, G. M. (1975). Apparent Resistivity, Anisotropy and Strike Measurements. *Geophysical Prospecting*, 23, 211-247.
- Hoek, E. V., & Bray, J. (1972). Rock Slope Engineering. *Revised 3rd edition. London: Institution of Mining and Metallurgy*, 456.
- Keller, G. V., & Frischknecht, F. C. (1966). Electrical Methods in Geophysical Prospecting. *Pergamon Press*, 527.
- Lane Jr. J. W. Haeni, F. P., & Watson, W. M. (1995). Use of a square-array direct-current resistivity method to detect fractures in crystalline bedrock in New Hampshire. *Ground Water*, 33(3), 476-485.
- Latha, G. M., & Garaga, A. (2010). Stability analysis of a rock slope in Himalayas. *Geomechanics and Engineering*, 2(2), 125-140.
- Lench, G. Mihm, A., & Alavi-Tehrani, N. (1977). Petrography and geology of the ophiolite belt north of Sabzvar/Khorasan (Iran). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Monatshefte*, 131, 156-178.
- Massoud, U. El Qady. G. Metwaly, M., & Santos, F. (2009). Delineation of Shallow Subsurface Structure by Azimuthal Resistivity Sounding and Joint Inversion of VES-TEM Data: Case Study near Lake Qaroun, El Fayoum, Egypt. *Pure and Applied Geophysics*, 166, 701-719.
- Matias, M. J. (2023). Estimate of Secondary Porosity from Surface Crossed Square Array Resistivity Measurements. *Geosciences*, 13, 101.
- Ravindran, A. (2012). Azimuthal Square Array Configuration and Groundwater Prospecting in Quartzite Terrian at Edakkal, Ambasamudram, Tirunelveli. *Research Journal of Earth Sciences*, 4(2), 49-55.
- Sener, A. Peksen, E., & Yolcubal, I. (2021). Application of square array configuration and electrical resistivity tomography for characterization of the recharge area of a karst aquifer: A case study from Menekse karst plateau (Kocaeli, Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 195, 104474.
- Taylor, R. W., & Fleming, A. H. (1988). Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Groundwater*, 26, 464-474.
- Tiruneh, H. W., Stetler, L. D. Oberling, Z. A. Morrison, D. R. Connolly, J. L., & Ryan, T. M. (2013). Discontinuity mapping using

بهربرداری، از مواردی است که برای به‌کارگیری روش‌های مقاومت‌ویژه آزیموتی ژئوالکتریکی،

- Ground-Based LiDAR: Case study from an open pit mine; *ARMA, American Rock Mechanics Association*, 13, 663.
- Udosen, N. I., & George, N. J. (2018). Characterization of electrical anisotropy in North Yorkshire, England using square arrays and electrical resistivity tomography. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 4, 215-233.
- Watson, K. A., and Barker, R. D. (1999). Differentiating anisotropy and lateral effects using azimuthal resistivity offset Wenner soundings. *Geophys*, 64, 739-745.