

تلفیق زمین‌آماري مطالعات رسوب‌شناسي و ژئوالکتریک در نهشته‌های کواترنر

پهنه‌های ساحلی غربی و شرقی بخش جنوبی دریاچه ارومیه

شهره عرفان؛ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد علوم تحقیقات تهران و سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

خلیل رضایی*؛ استادیار رسوب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران

راضیه لک؛ دانشیار پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

سید محسن آل‌علی؛ استادیار رسوب‌شناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد علوم تحقیقات تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۶

چکیده

مطالعات بین‌رشته‌ای نقش مهمی در پاسخگویی به سؤالات پروژه‌های مهندسی بازی می‌کنند. مطالعات تلفیقی رسوب‌شناسی و ژئوالکتریک برای بررسی پراکنش انواع رسوبات دو سوی غربی و شرقی بخش جنوبی دریاچه ارومیه، نقش آن‌ها در تبادل آب‌های زیرزمینی و وجود گسل در بستر دریاچه انجام شد. بدین منظور ۱۸ گمانه ۱۰ متری در سه پروفیل در دو سوی دریاچه حفاری و رسوبات ستون چینه‌شناسی آن‌ها تحت آزمایش دانه‌بندی و کانی‌شناسی و تطابق قرار گرفت. تعداد ۳۹۱ سونداژ ژئوالکتریک قائم با آرایه شلومبرژه در دشت‌های حاشیه برداشت شدند. ستون دانه‌بندی گمانه‌ها با سونداژ مجاور متناظر شد و با تصحیحات نرمال‌سازی، به روش دیفیوژن، درون‌یابی و نقشه‌های هم‌مقاومت ترسیم و تفسیر شد. در ۵ مقطع عرضی، برش‌هایی از غرب تا شرق دریاچه تهیه و تغییرات دانه‌بندی و مقاومت الکتریکی در آن‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد در دو ناحیه، به دلیل وجود رسوبات درشت‌دانه و دارای مقاومت الکتریکی بالا، امکان تبادل آب‌های زیرزمینی وجود دارد. این نقاط می‌توانند مسیل‌های قدیمی رودخانه شهرچای و باراندازچای و انشعابات آن‌ها بوده باشند. به دلیل تمایز بالا و اختلاف مقادیر دو پارامتر مقاومت الکتریکی و مغناطیسی در دو سوی دریاچه، یک گسستگی ژئوفیزیکی در دو روش ژئوالکتریک و مغناطیس‌سنجی هوایی در محل دریاچه قابل اثبات است. کلیدواژگان: دریاچه ارومیه، رسوب‌شناسی، زمین‌آمار، ژئوالکتریک، کواترنر.

مقدمه

مطالعات بین‌رشته‌ای و تلفیقی امروزه نقش مهمی در پاسخگویی به سؤالات و ابهامات پروژه‌های مهندسی بازی می‌کنند. این موضوع، به‌ویژه در حالت‌هایی که مطالعات متنوع هم‌افزایی دارند و کاستی‌های یک‌دیگر را برطرف می‌کنند، بسیار کارگشاست. بین مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی، تلفیق مطالعات رسوب‌شناسی با ژئوالکتریک برای شناسایی پدیده‌های زیرسطحی با اهداف و مقیاس‌های مختلف در تحقیقات متعدد گزارش شده است. شناسایی خصوصیات آبرفت‌ها، اکتشافات آب زیرزمینی و مواد معدنی، همراهی با مطالعات ژئوتکنیکی در احداث سازه‌های سنگین فقط برخی از این کاربردها هستند (تلفورد و همکاران ۱۹۹۰: ۲۲). حساسیت این روش‌ها به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و رسوبات آبرفتی دلیل

موفقیت آن‌ها در بررسی خاک‌ها و پدیده‌های مرتبط نظیر فرسایش است (مک آنالن و همکاران ۲۰۱۸؛ کارپنتیر و همکاران ۲۰۱۲). از سوی دیگر، در صورتی که بخواهیم درباره علت و میزان توسعه این پدیده‌ها در زیر سطح زمین، بدون تخریب و آسیب‌های زیست‌محیطی، کاوش کنیم، فقط روش‌های ژئوفیزیکی پاسخگو هستند. ژئوالکترونیک یکی از روش‌های ژئوفیزیکی پرکاربرد و ارزان است که علاوه بر بروز حساسیت و پوشش پارامترهای مختلف خاک در اعماق مختلف نیز توانایی تفکیک لازم را دارد (رویل و همکاران ۲۰۰۴؛ جودال ۲۰۰۶؛ ایگبوئکوه و همکاران ۲۰۰۴).

استفاده از روش مقاومت‌سنجی الکترونیکی را نخستین بار اشلمبرگر، استاد فیزیک مدرسه عالی معدن پاریس، در سال ۱۹۱۲، ابداع کرد (تلفورد و همکاران ۱۹۹۰). پس از آن به تدریج کاربرد این روش توسعه یافت. اما، در یکی از مطالعات مهم، زهدی و همکارانش روش مقاومت ویژه الکترونیکی را جهت بررسی آب‌های زیرزمینی به کار بردند (زهدی و همکاران ۱۹۸۹). طی زمان، استفاده از روش‌های تلفیقی گسترش و کاربردهای مختلف یافت و در سال‌های اخیر استفاده از آن‌ها با اقبال بیشتری روبه‌رو شد؛ از جمله تفکیک لایه‌های آبرفت کواترنری برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی (فرولیچ و کلی ۱۹۸۵؛ اکویوز ۱۹۹۶؛ مارکوس و همکاران ۲۰۱۸؛ فرج‌زاده و همکاران ۱۳۸۹؛ سلطان و همکاران ۲۰۱۳؛ الخناجی و الدباغ ۲۰۱۶؛ ایزبوخای و همکاران ۲۰۱۷؛ حسنی عزالدین و همکاران ۲۰۱۳؛ باته و همکاران ۲۰۱۰)، شناسایی و تفکیک نهشته‌های کواترنری (صدوق و همکاران ۱۳۹۶؛ امیری و همکاران ۲۰۱۶؛ سهرابی و همکاران ۲۰۱۷)، توموگرافی الکترونیکی برای تشخیص ویژگی‌های ژئوالکترونیکی زمین‌لغزش (بلانوا و همکاران ۲۰۱۶)، ارزیابی نفوذ و تداخل آب شور دریا در رسوبات ساحلی و بارزسازی زون‌های آب شور و شیرین در آبخوان (بیلانی و سومرو ۲۰۰۶؛ سلیمانی و همکاران ۱۳۹۳)، تلفیق مطالعات ژئوالکترونیک و مورفوتکتونیک برای تعیین ویژگی‌های گسل‌های فعال (حافظی مقدس و همکاران ۲۰۱۷)، بررسی رفتار ژئوالکترونیکی و تغییرات مقاومت الکترونیکی سنگ بستر رسوبی با توجه به تبادل دما و آب زیرزمینی (استیلین و همکاران ۲۰۱۷)، تلفیق مطالعات رسوب‌شناسی و ژئوفیزیکی برای ارزیابی سنگ‌شناسی و مسیر گذر آب‌های زیرسطحی در محدوده مرداب‌ها (تراپ و نایزل ۲۰۱۹)، تشخیص شکستگی‌های بستر مسیر بزرگراه‌ها (ادنیکا و همکاران ۲۰۱۸)، تلفیق مطالعات ژئوالکترونیک و حفاری گمانه‌های رسوبی برای بررسی راهکارهای مبارزه با خشک‌سالی (سوسیلو و همکاران ۲۰۱۸)، تلفیق مطالعات رسوب‌شناسی و ژئوالکترونیک برای تعیین ویژگی‌های محیط فسفات‌های رسوبی در معادن (اصفهان‌ی ۲۰۱۸).

به طور اخص درباره دریاچه ارومیه امیری و همکارانش (۲۰۱۶) فرایند شور یا شیرین شدن آب‌های زیرزمینی حاشیه دریاچه ارومیه را، از طریق هیدروژئولوژی و هیدروشیمی و تغییرات یونی، ارزیابی کردند و بدین نتیجه رسیدند که ترکیب آب زیرزمینی عمدتاً تحت تأثیر واکنش آب با سنگ و خاک است و تبخیر تأثیر چندانی بر آن ندارد. همچنین میزان آب شور در آب زیرزمینی دشت ارومیه بالا نیست و مقادیر بسیار پایینی را در حد بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۷۹ درصد در فصول مرطوب و بین ۰/۰۰۴ تا ۰/۸۱ درصد در فصول خشک نشان می‌دهد. جز چند چاه در نزدیکی دریاچه، سایر نقاط ارتباط واضحی بین دریاچه و سفره دشت حاشیه نشان ندادند. بهترین یون‌هایی که نشان‌دهنده تبادل بین آب زیرزمینی و سنگ و رسوب منطقه بودند نیز یون‌های Na و Cl معرفی شدند. در تحقیقی دیگر امیری و همکارانش (۲۰۱۶) میزان آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی ارومیه از دریاچه را با شواهد ژئوفیزیکی و ایزوتوپی و هیدروشیمیایی بررسی کردند. آن‌ها

دریافتند که مرز آب شور و شیرین در منطقه منظم نیست و نیز سفره آب زیرزمینی همگن نیست. همچنین وجود رسوبات ریزدانه و دارای نفوذپذیری و تخلخل پایین در نزدیکی دریاچه مانند سدی در برابر حرکت آب زیرزمینی عمل می‌کند و تأثیرپذیری آب سفره زیرزمینی از دریاچه را کاهش می‌دهد و ارتفاعات غربی دشت ارومیه در ترکیب آب دریاچه نقش مهم‌تری دارد. رسوبات دارای نفوذپذیری بالا نیز در محل ورود رودخانه‌ها به دریاچه دیده می‌شود که البته هدایت هیدرولیکی بالا و گرادیان هیدرولیکی پایینی نشان می‌دهند (امیری و همکاران ۲۰۱۷: ۱). در مطالعات ایزوتوپی آب‌های زیرزمینی مجاور بخش غربی دریاچه ارومیه مشخص شد در نزدیکی دریاچه پیچیدگی هیدروشیمیایی بیشتر است و گاهی ارتباط خوب و معناداری بین ایزوتوپ‌ها و هیدروشیمی نمی‌توان برقرار کرد. همچنین ارتباط مشخصی بین آب دریاچه و آب زیرزمینی دشت دیده نمی‌شود و لیتولوژی نقش مهم‌تری در ترکیب آب زیرزمینی منطقه دارد. لایه‌های ضخیم و سخت ریزدانه و نمکی قعر دریاچه نقش نوعی سد را بازی می‌کنند و مانع برقراری ارتباط ژئوشیمیایی می‌شوند. لایروبی این لایه‌ها می‌تواند با برقراری مجدد ارتباط باعث احیای دریاچه شود. سهرابی و همکارانش (۲۰۱۷: ۱) رفتار و تغییرات عناصر نادر خاکی را در سفره آب زیرزمینی مجاور دریاچه بررسی کردند و با نمونه‌برداری از آب‌چاه‌های منطقه در دو فصل خشک و تر نتیجه گرفتند فرایند هوازدگی و تماس آب و سنگ منشأ اصلی این عناصر است و طی هوازدگی این مقدار زیاد دچار تغییر نمی‌شود و تقریباً ثابت باقی می‌ماند. این مقادیر با شوری در فصول خشک و تر ارتباط مشخصی نشان نمی‌دهد و باید با پارامترها و شاخص‌های هیدروشیمیایی دیگر کنترل و پایش شود. استیونز و همکارانش (۲۰۱۲) برای دو سیکل اخیر یخبندان و بین یخبندان تغییرات اقلیمی را با استفاده از ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ در دریاچه ارومیه بررسی کردند. آن‌ها پلت‌های مدفوعی غنی از آراگونیت درون رسوبات ۱۸۰۰۰۰ سال اخیر را مطالعه کردند و برای رسوبات حاوی بیش از ۸۰ درصد آراگونیت، به روش U-Th، سن دقیق را به دست آوردند. نتایج نشان داد دوره بین یخبندان از ۱۳۰۰۰۰ سال پیش شروع شده و قبل از آن یک اقلیم یخبندان سرد و خشک بر منطقه حاکم بوده است. در دوره بین یخبندان اقلیم ناپایدار بوده و این موضوع از پوشش گیاهی متغیر نیز هویداست. بین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ سال پیش حداکثر رطوبت وجود داشته و پس از آن اقلیم خشک تر شده است. اما بین ۱۱۵۰۰۰ تا ۱۰۸۰۰۰ سال پیش نیز یک دوره مرطوب وجود داشته است. شرایط خشک فعلی دریاچه از حدود ۱۴۰۰۰ سال پیش شروع شده است. این مقادیر و تغییرات با اندازه‌گیری‌های غار ساروق اسرائیل مشابهت فراوان دارد و این دو منطقه اقلیم مشابهی داشته‌اند. میزان رسوب‌گذاری محاسبه‌شده توسط محققان بین ۰/۵۶ تا ۰/۷۵ میلی‌متر در سال بوده است.

همان‌طور که می‌دانیم، کواترنری بخشی از تاریخ تکوین زمین است که تا دو میلیون سال پیش را در بر می‌گیرد و به دلیل کاستی‌های اطلاعات علمی نیازمند پژوهش‌های اساسی در ایران است. از یک سو آنالیز چندجانبه رسوبات کواترنری (رسوب‌شناسی و ژئوفیزیک) به شناسایی رخساره‌های رسوبی متعددی منجر می‌شود که تفسیر و سن‌سنجی نسبی آن‌ها برای بازسازی محیط‌های رسوبی دیرینه و فرایندهای حاکم بر حمل و رسوب‌گذاری به کار می‌رود - معمولاً در این‌گونه مطالعات از آنالیز مغزه‌های پیوسته یا مقاطع دارای رخنمون و توزیع و پراکنش عمودی و جانبی رخساره‌ها و مدل‌های رسوبی سه‌بعدی استفاده می‌شود (پدرامی ۱۳۶۶) - و از سوی دیگر تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی، مورفولوژیکی، ژئوشیمیایی، و رسوب‌شناسی می‌تواند در بازسازی خط ساحلی دریاها و دریاچه‌ها و تغییرات آن و گاهی ورود ناگهانی

برخی عناصر ناشی از تغییرات محیطی و تأثیر فعالیت‌های انسانی بسیار کمک‌کننده باشد (کارترو و همکاران ۲۰۱۱؛ نوکته و همکاران ۲۰۰۵).

پس از خشک شدن تدریجی و تداوم شرایط نامطلوب دریاچه ارومیه در سال‌های اخیر، تحقیقات متنوعی برای پاسخگویی به سؤالات متعدد مطرح‌شده در دستور کار سازمان‌های مختلف قرار گرفت. مسائل مختلف مرتبط با زمین‌شناسی نیز در همین زمینه در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به بحث گذاشته شد. دو سؤال مهم از مجموعه سؤالات عبارت بودند از: ۱. آیا آب دریاچه ارومیه از محل رسوبات زیرسطحی طرفین خود با آبخوان‌های اطراف و سیستم چاه‌های منطقه در ارتباط است و محل این تبادل و گذر احتمالی آب‌های زیرسطحی شور و شیرین در کدام مناطق است؟ ۲. آیا در زیر دریاچه گسل یا گسستگی و محلی برای فرار آب دریاچه به اعماق یا ورود آب از خارج دریاچه به داخل آن وجود دارد؟ برای پاسخگویی به این دو سؤال، مطالعات رسوب‌شناسی و ژئوالکتریکی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مالی برنامه‌ریزی و طراحی شد. این تحقیق با هدف بررسی پراکنش انواع رسوبات تا عمق ۱۰ متری طی ۲۰۰۰۰ سال اخیر (بر اساس مطالعات سن‌سنجی کلت و شهرابی (۱۹۸۶)) در حاشیه دو سوی غربی و شرقی بخش جنوبی دریاچه ارومیه، نقش آن‌ها در تبادل آب‌های زیرزمینی بین دریاچه و چاه‌های آب دشت‌های حاشیه، و نیز بررسی وجود یا نبود گسل در بستر دریاچه با انجام مطالعات تلفیقی رسوب‌شناسی و ژئوالکتریک تلاش می‌کند تا حدی پاسخگوی این سؤالات باشد. البته عمق کاوش مطالعات ژئوالکتریک تا ۲۵۰ متری است. مطالعات ژئوفیزیکی اهداف دیگری - نظیر تعیین لایه‌هایی محصورکننده زیرین (با توجه به شرایط قابل تغییر آبخوان ارومیه) و تعیین عمق سنگ بستر و تغییرات ناشی از نفوذ احتمالی آب شور به چاه‌های ساحلی - را نیز دنبال می‌کرده است که محققان دیگری به آن‌ها پرداخته‌اند (امیری و همکاران ۲۰۱۶). بدیهی است وجود لایه‌های درشت‌دانه ماسه‌ای و گراولی در طول خط ساحلی دریاچه می‌تواند سبب تداخل سفره‌های آب زیرزمینی دشت‌های مجاور با آب شور دریاچه شود و با توجه به بهره‌برداری بیش از حد چاه‌های آب واقع در باغات و زمین‌های کشاورزی دشت‌های مجاور مجرای برای پیش‌روی آب شور به سمت دشت‌ها فراهم سازد؛ اگرچه برخی نتایج مطالعات قبلی نشان داده که بدلیل وجود لایه‌های ضخیم نمکی کف دریاچه، امکان نفوذ آب شور به لایه‌های سطحی و عمقی آبخوان‌های ساحلی دریاچه ارومیه وجود ندارد (امیری و همکاران ۲۰۱۶).

مواد و روش مطالعه

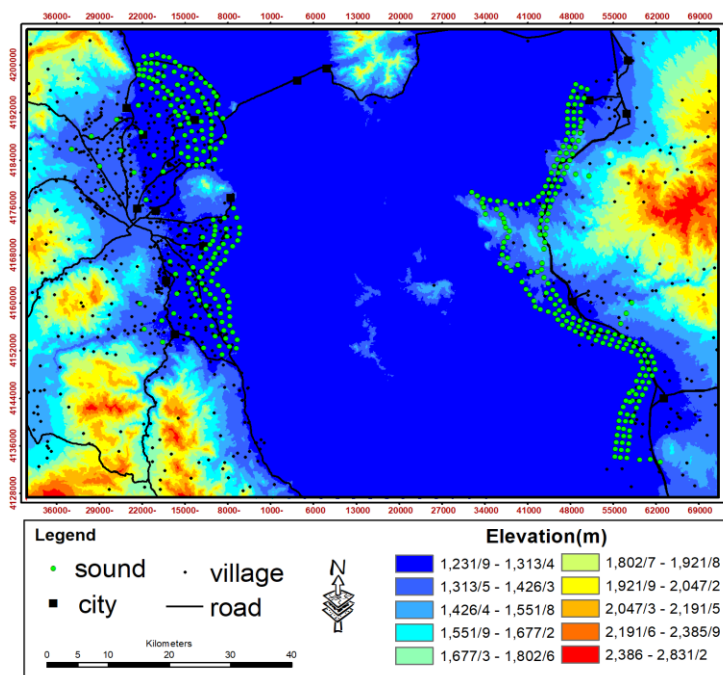
موقعیت منطقه

دریاچه ارومیه بین مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۴۴ درجه و ۱۳ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). این دریاچه یکی از دریاچه‌های فوق‌اشباع از نمک دنیا و بزرگ‌ترین و شورترین دریاچه دائمی ایران است که در یک پهنه فرونشسته کم‌عمق و وسیع قرار گرفته و از دیدگاه زمین‌شناسی حوضه آن حاصل عملکرد سیستم‌های گسلی فشاری تبریز و زرينه‌رود و در واقع دریاچه‌ای زمین‌ساختی است (لک و درویشی ۱۳۹۵؛ لک و همکاران ۱۳۹۲؛ درویشی خاتونی و محمدی ۲۰۱۱) (شکل ۲ و ۳). تحقیقات گذشته نشان داده حدود ۳۵ تا ۴۰ متر نهشته‌های نرم دریاچه‌ای روی پی سنگ سخت‌شده کرتاسه زیرین و

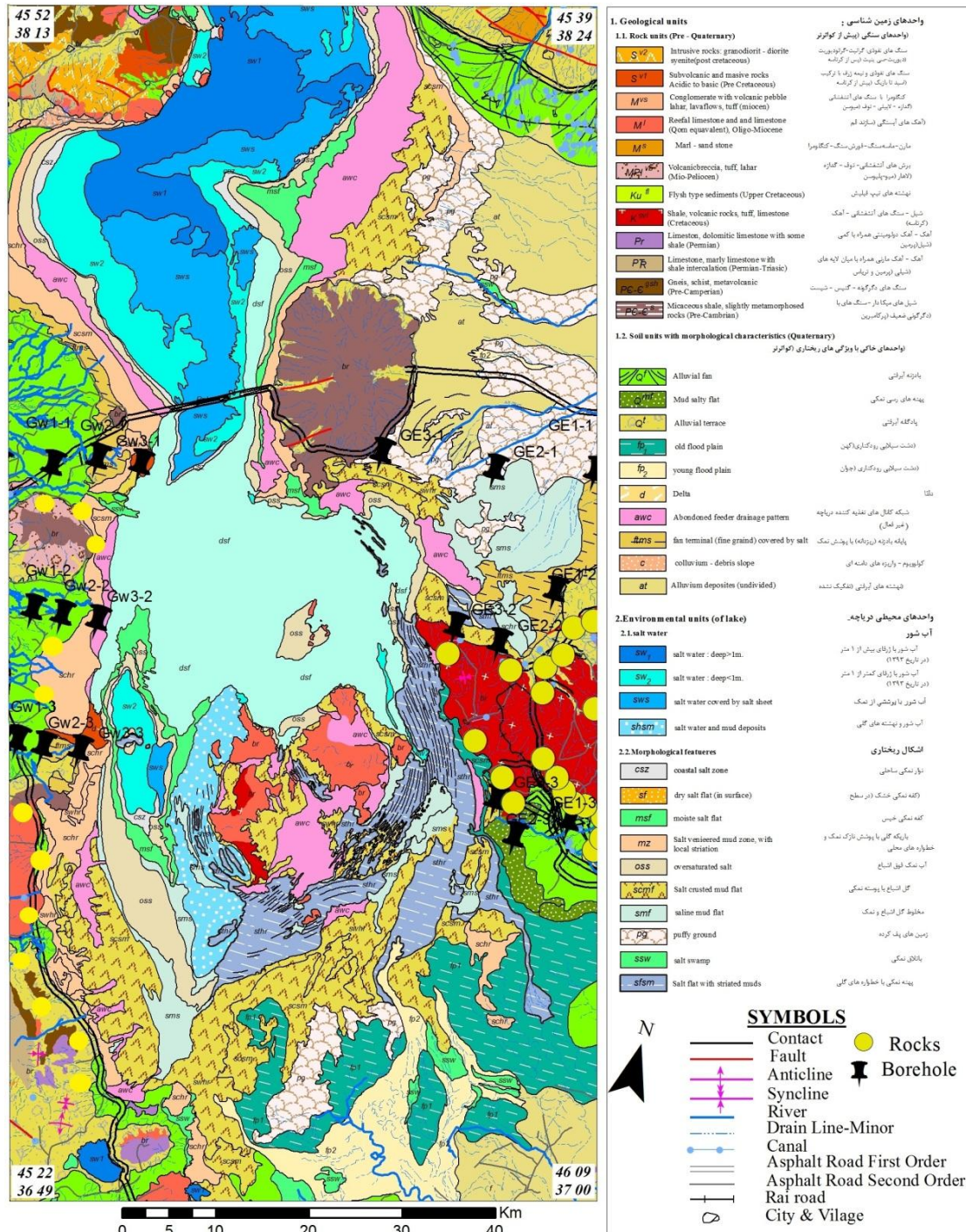
سنگ آهک‌های مارنی میوسن (سازند قم) قرار دارد و سن دریاچه ۳۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ سال برآورد می‌شود (کلت و شهرابی ۱۹۸۶). زیر رسوبات نرم بستر، نهشته‌های هولوسن این منطقه از نوع کویری و کفه‌های گلی وجود دارد. دانه‌های گرده درون رسوبات دریاچه، کانی‌های تخریبی و رسی (کوارتز، کلسیت، پلاژیوکلاز، کائولینیت)، و نیز لایه‌های تبخیری (نمک، ژیس، انیدریت) همگی از شرایط خشک اقلیمی و شوری دریاچه در برخی دوره‌های تاریخی حکایت می‌کنند. آب دریاچه نیز با PH بین ۷/۲ تا ۷/۶ دارای ترکیب غالب کلرید سدیم، منیزیم، و سولفات سدیم و تقریباً قلیایی است (اخوان مقدم و امیرمطلبی ۱۳۹۴)؛ اگرچه امیری و همکارانش (۲۰۱۶) اعلام کردند در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ هیچ‌گاه اسیدیته دریاچه به ۷ نرسیده است. دریاچه ارومیه دریاچه‌ای با آب شیرین بوده که به تدریج شورتر شده تا به حد فوق اشباع از نمک رسیده است (کلت و شهرابی ۱۹۸۶؛ غضبان و مهاجر باوقار ۱۹۹۷). خاک‌های منطقه نیز غالباً از نوع اریدی سول (خاک‌های خشک) و اینسپتی سول (خاک‌های نارس و بلوغ نیافته) همراه با بقایای سنگ مادر است (شکل ۴).



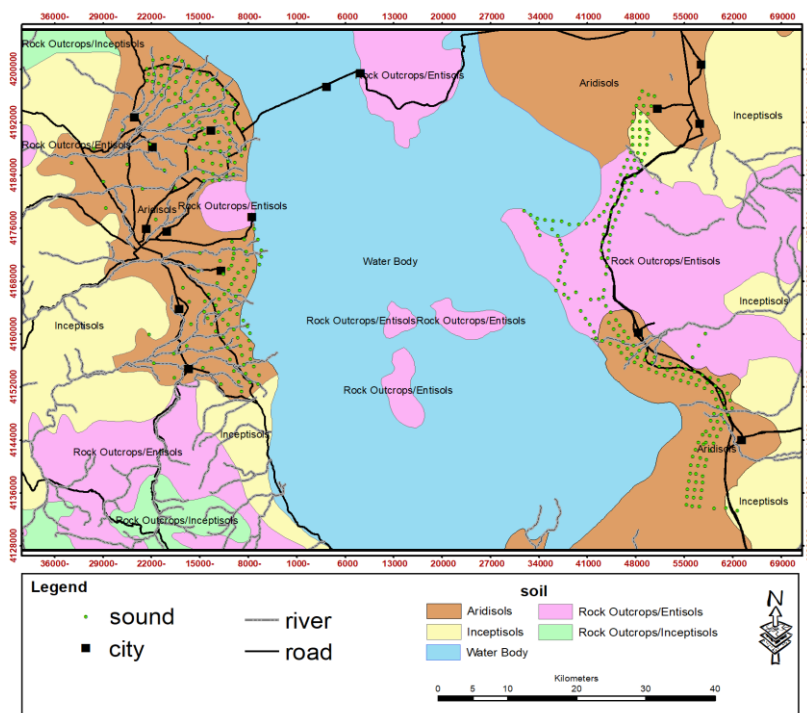
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکندگی نقاط گمانه و برداشت مغزه اطراف دریاچه ارومیه



شکل ۲. نقشه توپوگرافی منطقه و موقعیت نقاط سونداژ ژئوالکترونیک روی آن



شکل ۳. نقشه زمین شناسی محدوده دریاچه، محل برداشت گمانه ها، و نمونه های سنگی (اقتباس از نقشه های سازمان زمین شناسی با اصلاحات نگارنده)



شکل ۴. نقشه انواع خاک در منطقه مورد مطالعه (اقتباس از نقشه ۱:۲۰۰۰۰۰۰ خاک کشور)

نمونه‌برداری و آزمایش

برداشت‌های میدانی این تحقیق شامل دو بخش رسوب‌شناسی و ژئوالکترونیک بود. برای رسوب‌شناسی، حفاری ۱۸ گمانه با دستگاه اوگر دستی تا عمق ۱۰ متر در طول سه خط شمالی و مرکزی و جنوبی (شکل ۱) و نمونه‌برداری از رسوب، برای آنالیزهای دانه‌بندی و ژئوشیمیایی، انجام شد. در صحرا، علاوه بر نمونه‌برداری، همه مشخصات ستون رسوبی مشهود در مغزه، شامل تغییرات ظاهری دانه‌بندی و رنگ رسوبات، با مترآز دقیق یادداشت شد (شکل ۵). اگر میان لایه درشت‌دانه ماسه‌ای وجود داشته باشد باید عمق شروع ریزش مغزه یادداشت شود. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه آزمایش‌هایی از قبیل دانه‌بندی (غالباً با روش هیدرومتری برای رس‌ها و سیلت‌ها) (موسوی حرمی ۱۳۶۷) و آنالیزهای شیمیایی XRF, ICP-OES, XRD با هدف شناسایی کانی‌ها و ترکیب شیمیایی روی نمونه‌ها انجام شد. در انتها برای هر گمانه به طور دقیق ستون چینه‌شناسی، شامل تغییرات دانه‌بندی رسوبات و کانی‌های اصلی و عناصر مهم و فراوان، ترسیم شد (شکل ۶).

در بخش مطالعات ژئوالکترونیک تعداد ۳۹۱ سونداژ الکتریکی قائم با آرایش شلومبرژه تا عمق کاوش ۲۵۰ متری در دو سمت شرقی و غربی بخش جنوبی دریاچه برداشت شد (شکل ۲). نقاط سونداژ مجاور گمانه‌های رسوب‌شناسی انتخاب شد و ابتدا به طور انفرادی با دانه‌بندی رسوبات متناظر شد (شکل ۷) و در ادامه برای مقایسه دو سوی دریاچه از بین سونداژها ۴۵ نقطه انتخاب‌شده هم‌سو با همان پروفیل‌های رسوب‌شناسی مرتب شد و مقاطع مختلف ژئوالکترونیک برای ۵ محور

تهیه و تفسیر شد (شکل ۹). پس از تفسیر انفرادی و مجموعه‌ای سونداژها به کمک نرم‌افزار IPI2WIN، شبه‌مقاطع (شکل ۱۰) و مقاطع ژئوالکتریکی (شکل ۱۱)، مقاطع گرادیان افقی (شکل ۱۲) و عمودی (شکل ۱۳)، مقادیر مقاومت الکتریکی حاصل از تفسیر ژئوالکتریکی در نقاط مختلف تهیه شد. همچنین، پس از آنالیزهای زمین‌آماری به کمک دو نرم‌افزار GS+ و ARCGIS و محاسبه پارامترهای آماری و نرمال‌سازی داده‌ها (شکل ۸) و انتخاب بهترین روش درون‌یابی، در نرم‌افزار ARCMAP، نقشه‌های هم‌مقاومت به روش درون‌یابی نفوذ^۱ با استفاده از مقادیر وزن‌دار در اعماق مختلف از سطح تا ۲۵۰ متری تهیه و تفسیر شد (شکل ۱۴). در انتها این نقشه با نقشه گزارش مطالعات ژئوفیزیک هوایی (مغناطیس‌سنجی) (شکل ۱۵)، تهیه‌شده توسط اخوان مقدم و امیرمطلبی (۱۳۹۴)، مقایسه شد و نتیجه نهایی به دست آمد.



شکل ۵. (A) ادوات مغزه‌گیری، (B) برش و تفسیر و نمونه‌برداری، (C) و (D) نحوه مغزه‌گیری

یافته‌های پژوهش

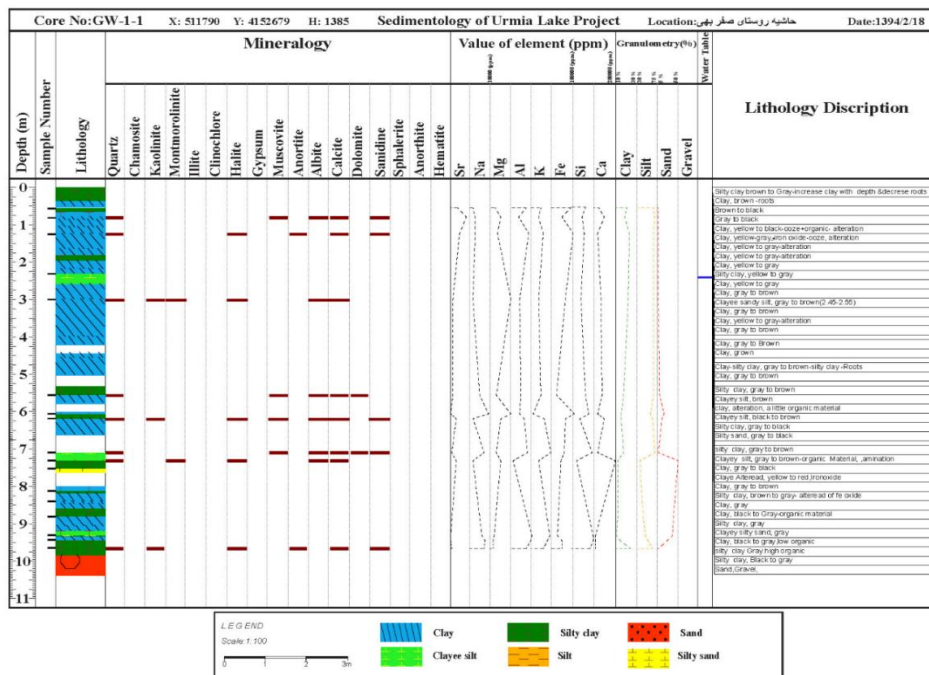
با بررسی مغزه گمانه‌های برداشت‌شده تا عمق ۱۰ متری مشخص شد از نظر دانه‌بندی تقریباً در هیچ گمانه‌ای ذرات بسیار درشت گراولی وجود ندارد و دانه‌ها و کانی‌های رسی بیشترین فراوانی را دارند. اما سونداژهای ژئوالکتریکی اعماق بسیار بیشتری را کاوش کردند. همچنین در برخی اعماق به دلیل افزایش انرژی محیط رسوبی ناگهان ماسه‌ها زیاد شدند که احتمالاً ناشی از افزایش بارش‌ها و جریان یافتن رودخانه‌ها و جویبارها و تغییر مسیرهای متعدد آن‌هاست. همچنین افزایش کانی‌های تبخیری در برخی اعماق دیده می‌شود که با خشکی محیط و کاهش بارش‌ها تطابق دارد. در گمانه‌های متناظر با سونداژهای ژئوالکتریکی می‌توان تأثیر برخورد با آب زیرزمینی و سطح ایستایی را در تغییر مقاومت الکتریکی

به‌خوبی مشاهده کرد. همچنین وجود رس‌ها باعث کاهش نسبی و حضور ماسه‌ها باعث افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. وجود آب شور و تبخیری‌ها مقاومت الکتریکی را بسیار کاهش می‌دهد. از دیدگاه آماری داده‌ها دامنه تغییر بسیار بزرگی دارند و از کمتر از ۱ تا بیش از ۲۰۰۰ اهم متر را نشان می‌دهند. اما فراوانی نقاط و اعماق با مقاومت الکتریکی پایین (حاوی رس‌ها و آب شور) در مقایسه با مقادیر بالای مقاومت (حاوی ماسه‌های خشک یا سنگ کف) بسیار بیشتر و بالاتر است. همچنین، مقادیر مقاومت در دو سوی دریاچه متفاوت است و می‌توان یک گسستگی مشهود بین سونداژهای دو حاشیه را استنباط کرد.

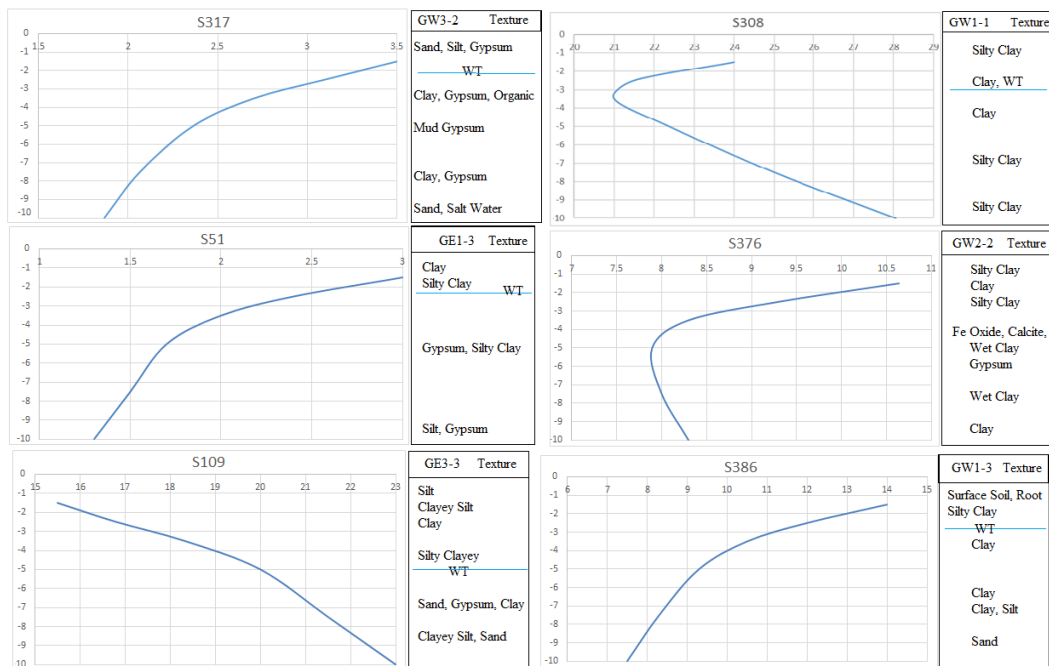
بحث و نتیجه

زمین‌آمار

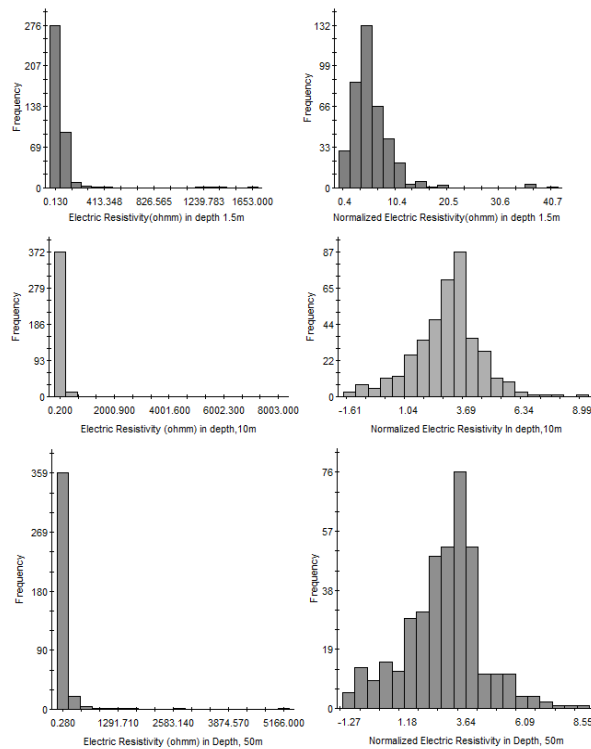
مطالعات و بررسی پارامترهای آماری در علوم زمین و در حالتی که سری‌های عددی از یک یا چند متغیر در فضایی سه‌بعدی پراکنده‌اند به طور روزافزون در حال توسعه و افزایش کاربری است؛ از جمله شبیه‌سازی پی در پی گاوسی و تکنیک فرنالد (یارینگتون ۱۹۹۶)، تعیین متغیرهای کمی و کیفی خاک با استفاده از GIS و تعیین توزیع فضایی خواص خاک (روگوسکی ۱۹۹۶)، مدل‌سازی زمین‌آماری در مطالعات اکتشاف و تخمین مقاومت تک‌محوری فشارشی سنگ‌ها در طول تونل (دوست‌محمدی و همکاران ۲۰۱۴)، مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت الکتریکی و پلاریزاسیون القایی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و حفاری (مصطفایی و رمزی ۲۰۱۸)، روش‌های زمین‌آماری در برگردان داده‌های ژئوفیزیکی، روش زنجیره مارکو مونت کارلو (ساووک هون و دوکاون ۲۰۰۱)، بررسی و مقایسه زمین‌آماری داده‌های صحرائی و آزمایشگاهی ژئوالکتریکی (سوسا و کاروالیو ۲۰۱۴)، استفاده از روش‌های زمین‌آماری برای سه‌بعدی‌سازی نتایج تحقیقات مقاومت ویژه و بارزسازی زون‌های آب شور و شیرین در آبخوان با الگوریتم شبیه‌سازی پی در پی گاوسی و تهیه نقشه‌ها و مدل سه‌بعدی (سلیمانی و همکاران ۱۳۹۳). در این تحقیق، پس از نرمال‌سازی اعداد و تهیه نمودارهای فراوانی داده‌ها در اعماق منتخب، برای درون‌یابی و تهیه نقشه‌های هم‌مقاومت، بعد از بررسی همه روش‌های درون‌یابی، به دلیل صحت بیشتر و تطابق حداکثر با واقعیت زمین‌شناسی منطقه، از روش درون‌یابی نفوذ استفاده شد. روش درون‌یابی نفوذ در واقع مبتنی بر راه‌حل اساسی معادله توزیع گرما در یک محیط است که توضیح می‌دهد چگونه گرما یا ذرات طی زمان در یک محیط همگن پخش می‌شود. مقادیر پیش‌بینی‌های انجام‌شده با استفاده از این روش به‌آرامی در اطراف موانع جریان می‌یابند. در صورت نبود موانع، پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط روش درون‌یابی توزیع تقریباً همانند پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط روش درون‌یابی تابع کرنل با کرنل گاوس است. درون‌یابی نفوذ پیش‌بینی‌هایی را در شبکه (سلول‌های) انتخاب‌شده اتوماتیک تولید می‌کند؛ درحالی‌که همه مدل‌های دیگر در آنالیزهای زمین‌آمار از روش مثلث‌بندی با اندازه‌های متغیر استفاده می‌کنند. مانع جریان می‌تواند برای درون‌یابی داده‌هایی که در جهت ترجیحی تغییر می‌کنند استفاده شود. در این روش شکل کرنل در نزدیکی مانع و با توجه به معادله دیفرانسیل تغییر می‌کند؛ درحالی‌که درباره درونی‌یابی کرنل معمولی فاصله بین نقاط با توجه به کوتاه‌ترین فاصله بین آن‌ها تعریف می‌شود.



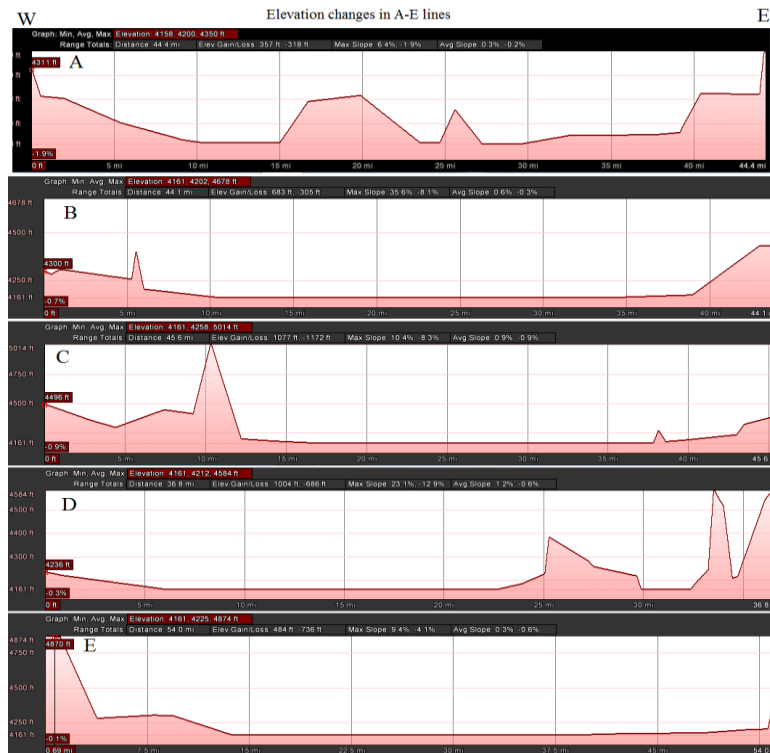
شکل ۶. نمونه‌ای از ستون چینه‌شناسی، درصد اندازه ذرات، و میزان عناصر اصلی در طول گمانه GW-1-1



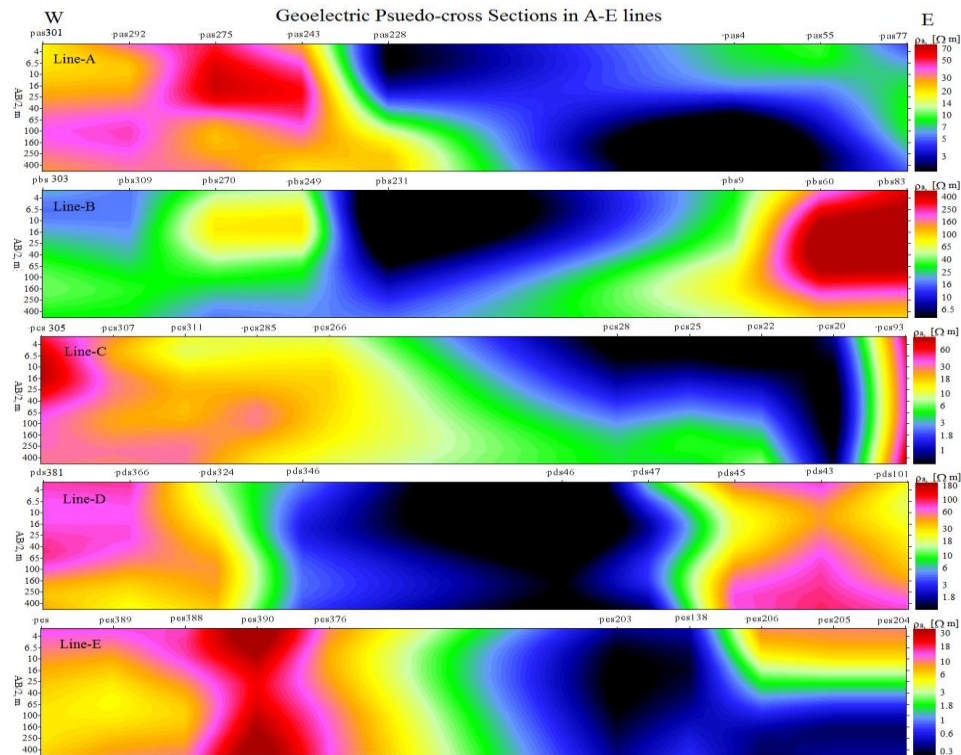
شکل ۷. تناظر برخی مغزه گمانه‌های رسوبی با سونداژهای ژئوالکتریکی مجاور (محور قائم عمق به متر و محور افقی مقاومت الکتریکی به اهم متر است.)



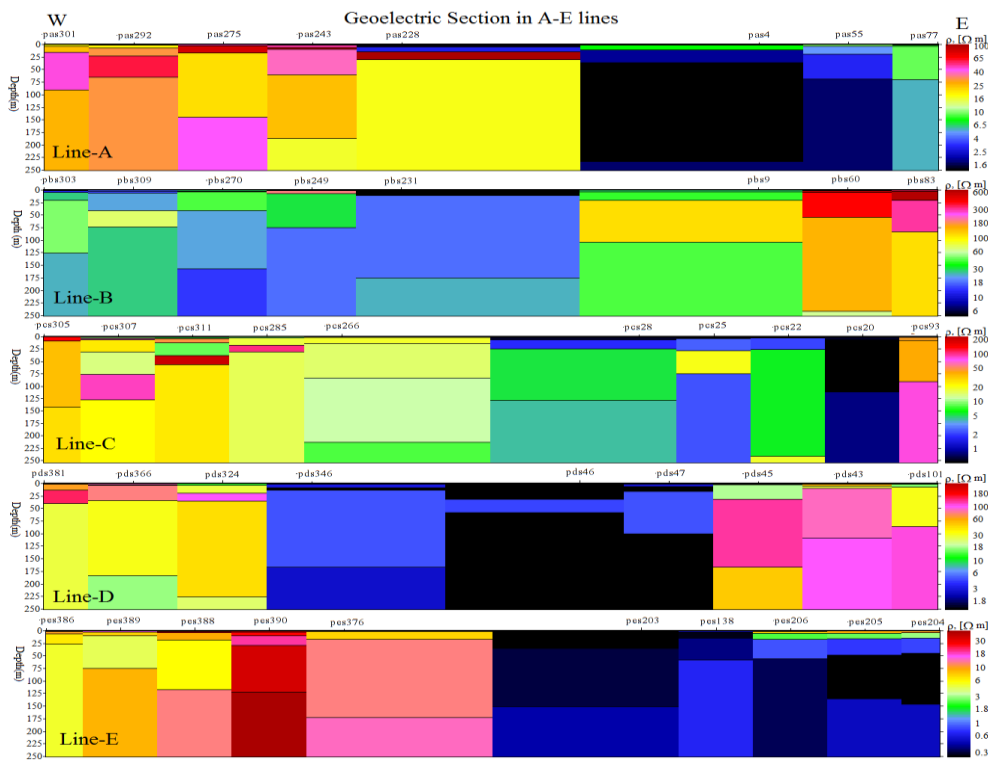
شکل ۸. نمودارهای هیستوگرام فراوانی مقادیر واقعی و نرمال‌شده مقاومت الکتریکی برای اعماق ۱/۵، ۱۰، و ۵۰ متری



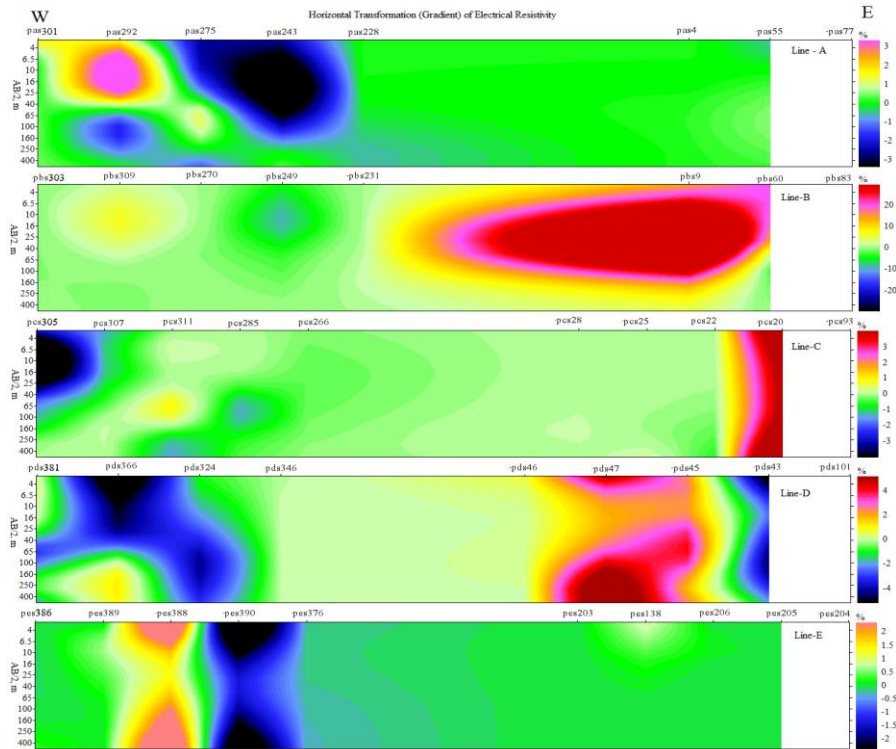
شکل ۹. تغییرات تراز ارتفاعی در راستای ۵ پروفیل شرقی - غربی مطالعات ژئوالکتریک (استخراج‌شده از گوگل ارث)



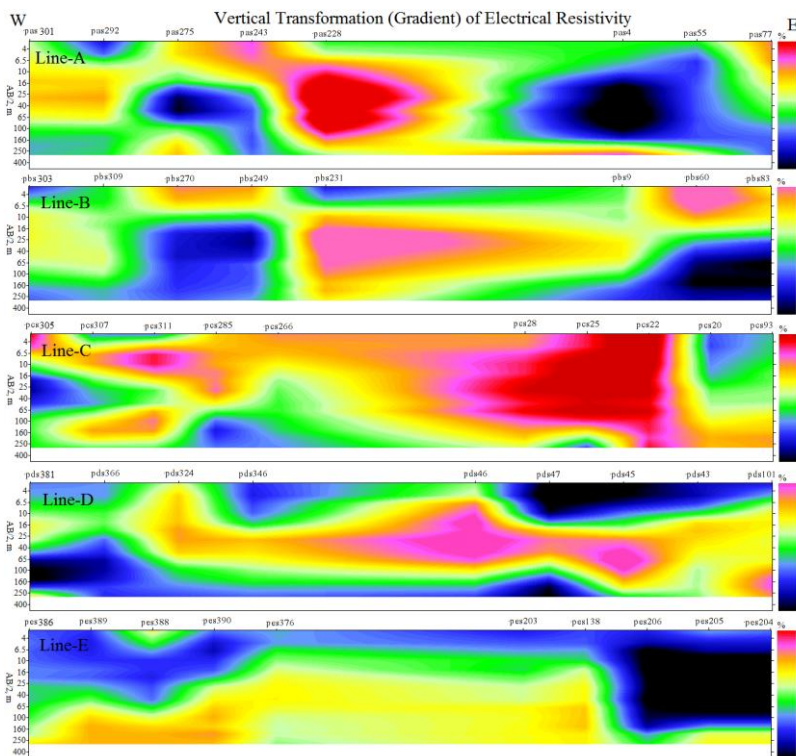
شکل ۱۰. شبه مقاطع ژئوالکتریکی در راستای ۵ پروفیل ژئوالکتریکی



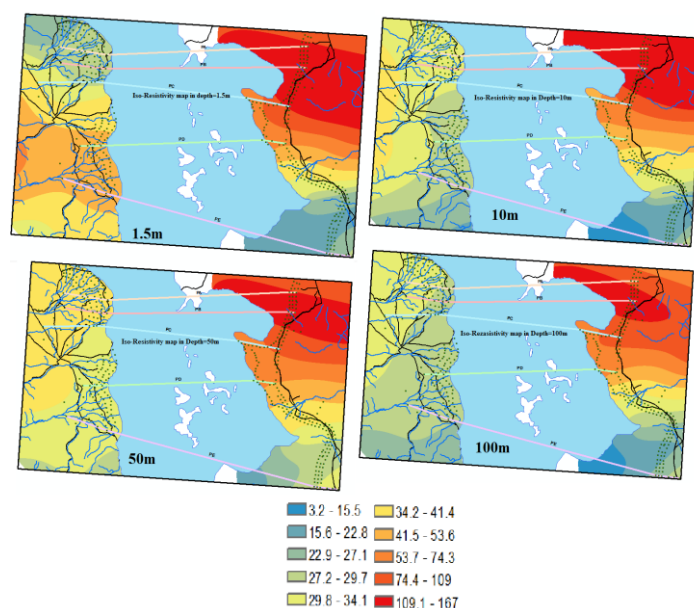
شکل ۱۱. مقاطع ژئوالکتریکی در راستای ۵ پروفیل ژئوالکتریکی



شکل ۱۲. مقاطع گرادیان افقی تغییرات مقاومت الکتریکی در راستای ۵ پروفیل



شکل ۱۳. مقاطع گرادیان عمودی تغییرات مقاومت الکتریکی در راستای ۵ پروفیل



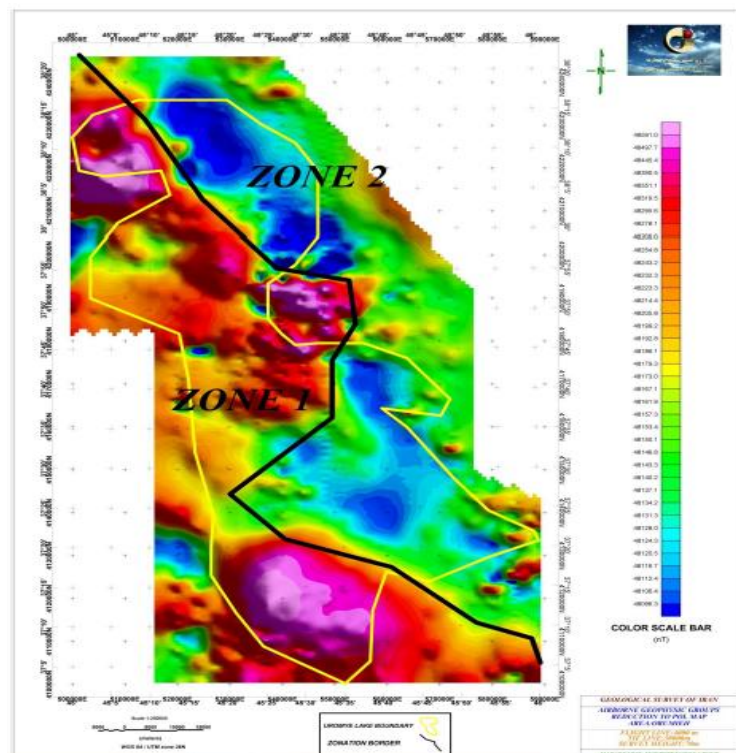
شکل ۱۴. نقشه هم مقاومت الکتریکی با لحاظ کردن مانع دریاچه برای اعماق ۱/۵، ۱۰، ۵۰، و ۱۰۰ متر

در مقاطع ژئوالکتریکی با راستای شمالی - جنوبی در حاشیه غربی بخش جنوبی دریاچه، ارائه شده امیری و همکارانش (۲۰۱۶)، چندین گسل در سنگ کف مشهود است. از دیدگاه مقاومت الکتریکی نیز سه نوع سنگ کف گزارش شده است. در محدوده سونداژهای شماره ۱۸، ۳۴، ۳۹، ۴۰، و ۴۲ مقاومت الکتریکی نسبتاً بالاست (۴۰ تا ۶۵ اهم متر) و از وجود رسوبات درشت دانه ماسه و گراول ریز با منشأ آذرین و دگرگونی حکایت می کند. رسوبات اشباع از آب شیرین و رسوبات آبرفتی تحت اشباع سطحی مقادیر مقاومت الکتریکی بالاتری را نشان داده اند (سونداژهای ۶ و ۷ و ۱۶ و ۱۷). به تدریج و به سمت جنوب با کاهش اندازه رسوبات و افزایش میزان رسوبات تبخیری از مقدار مقاومت الکتریکی کاسته شده است. به دلیل وجود پهنه های نمکی ریزدانه در نزدیکی خط ساحلی مقاومت الکتریکی در سطح و نزدیک سطح زمین بسیار پایین است. عموماً در سواحل ماسه های اشباع از آب شور با گل های غنی از نمک رفتار ژئوالکتریکی مشابهی دارند و مقادیر پایینی را نشان می دهند (زاروکا و همکاران ۲۰۱۱).

مقاطع عرضی عمود بر خط ساحلی دریاچه نشان می دهند اولاً حوضه رسوبی حالت یکنواختی دارد و ثانیاً با دور شدن از دریاچه به تدریج بر مقاومت الکتریکی رسوبات سطحی افزوده می شود. در مناطق دور از دریاچه، سطح آب زیرزمینی پایین تر است که دلیل احتمالی آن وجود نیروی موینگی در رسوبات ریزدانه نزدیک دریاچه است. میزان هدایت الکتریکی آب چاه های منطقه نیز بین ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ میکروزیمنس بر ثانیه متغیر بوده است.

جدول ۱. تغییر مقاومت الکتریکی برای واحدهای لیتولوژیکی مختلف در منطقه ارومیه (امیری و همکاران ۲۰۱۶)

لیتولوژی		مقاومت الکتریکی کلی اهم متر (برای نقاط سونداژ)	مقاومت الکتریکی اهم متر (برای مقاطع عرضی)
رسوبات رسی دارای سیلت و آبدار		کمتر از ۵	کمتر از ۵ تا ۱۰
رس با مقداری ماسه		۵ تا ۲۰	۱۰ تا ۲۰
ماسه متوسط‌دانه		۲۰ تا ۳۰	۲۰ تا ۳۰
ماسه درشت‌دانه		۳۰ تا ۶۰	۳۰ تا ۱۰۰
ماسه درشت‌دانه با مقداری گراول		بیشتر از ۶۰	بیشتر از ۱۰۰
سنگ کف	هادی الکتریکی	کمتر از ۵	کمتر از ۱۰
	مارن و ماسه‌سنگ	۱۰ تا ۲۰	۱۰ تا ۳۰
	مقاوم الکتریکی (ولکانیک‌ها)	بیشتر از ۳۰	بیشتر از ۳۰



شکل ۱۵. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی در محدوده دریاچه ارومیه (اخوان مقدم و امیرمطلبی ۱۳۹۴)

در این مقاطع و نقشه‌ها می‌توان چندین افق را تشخیص داد: ۱. افق دارای مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰ اهم متر (آب شور و رسوبات ریزدانه)؛ ۲. افقی با مقاومت الکتریکی ۱۰ تا ۲۰ اهم متر (رس‌های با یا بدون آب شیرین)؛ ۳. افق دارای مقاومت الکتریکی بین ۲۰ تا ۶۰ اهم متر (رسوبات ماسه‌ای و درشت‌دانه خشک یا دارای آب شیرین)؛ ۴. افق دارای مقاومت الکتریکی بیش از ۱۰۰ اهم متر (سنگ کف با لیتولوژی شامل ماسه‌سنگ، آهک، انواع سنگ‌های آذرین اغلب از

نوع آتشفشانی). به طور کلی، به وضوح می‌توان هم در مقاطع عرضی هم در نقشه‌های هم‌مقاومت گسستگی مقاومتی را بین دو حاشیه دریاچه مشاهده کرد. بدین معنی که مقادیر مقاومت الکتریکی در دو سوی دریاچه و در اعماقی بیش از ۱۰ متر (عمق حداکثر گمانه‌ها) متفاوت و بدون پیوستگی است و قابل درون‌یابی نیست.

بر اساس نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (شکل ۱۵) بالاترین شدت میدان برای محدوده مورد بررسی ۵۰۱۷۰ نانوتسلا، پایین‌ترین شدت میدان ۴۷۱۱۸ نانوتسلا، و میانگین شدت میدان ۴۸۲۱۳ نانوتسلا است و منطقه به دو قسمت به لحاظ مغناطیسی قابل تفکیک است؛ مناطقی که شدت میدان نسبتاً بالا تا بالا از خود نشان می‌دهد و غالباً قسمت‌های شمال غرب، مرکز جنوب، و جنوب غرب محدوده مورد بررسی را شامل می‌شود (زون ۱). پرواضح است که قسمت‌هایی از محدوده مورد بررسی توسط رسوبات مربوط به دریاچه پوشیده شده است. ولی با نگاهی به لیتولوژی اطراف دریاچه ارومیه مشخص می‌شود لیتولوژی غالب در این منطقه شامل گرانیت، دیوریت، میکرودیوریت به همراه واحدهای آهکی و دولومیت و شیل است.

این واحدهای سنگی به احتمال فراوان در زیر دریاچه نیز گسترش دارد و پی‌سنگ کف دریاچه را تشکیل می‌دهد. وجود شدت میدان بالا در این محدوده به احتمال فراوان ناشی از همین واحدهای لیتولوژیکی است که به علت وجود مگنتیت در ساختار خود شدت میدان بالای ناشی از آن‌ها منطقی است. مناطقی از محدوده، که شدت میدان نسبتاً پایین از خود نشان می‌دهد، قسمت‌هایی از شمال شرق و شرق و جنوب شرق محدوده را شامل می‌شود (زون ۲). در بررسی لیتولوژی این قسمت‌ها و حتی قسمت‌های پوشیده‌شده در دریاچه مشخص می‌شود لیتولوژی موجود شامل رسوبات آبرفتی، آهک، و دیگر واحدهای رسوبی است که طبیعی است شدت میدان بالا از خود نشان نمی‌دهد. در بررسی خطواره‌های مغناطیسی منطقه مشاهده می‌کنیم این قسمت توسط گسل‌هایی با راستای شمال غرب - جنوب شرق از قسمت‌هایی با شدت میدان بالا جدا شده است. بنابراین، یکی از عوامل اصلی تفکیک این دو قسمت از یک‌دیگر به لحاظ شدت میدان بالا و پایین فعالیت‌های تکتونیکی عظیم در محدوده مورد بررسی است (اخوان مقدم و امیرمطلبی ۱۳۹۴).

ساخت دوره‌های گذشته اقلیمی راه را برای کشف روند و علل و عوامل تغییرات اقلیمی باز می‌کند و پیش‌بینی اقلیم آینده را برای برنامه‌ریزی سهولت می‌بخشد. یکی از روش‌های مطالعه تغییرات اقلیمی بررسی رسوبات دریاچه‌ای برای کشف شرایط محیطی دوره‌های پیشین است (کواک و همکاران ۲۰۱۸). چون رسوبات دریاچه‌ای، علاوه بر متابولیسم خود دریاچه، از حمل مواد رسوبی بالادست حوضه توسط رودخانه‌ها تشکیل می‌شود، می‌تواند شرایط محیطی اطراف دریاچه را نیز نشان دهد (سائی ۲۰۰۴). در حوضه‌های بسته، تغییرات اندکی در میزان بارش یا تبخیر موجب تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان شوری و تراز آب می‌شود که معمولاً در نگاشت رسوبات حوضه ثبت می‌شود (باتربی ۱۹۹۹). سطح آب دریاچه ارومیه نوسانات شدیدی در دهه‌های اخیر داشته است که بر فیزیوگرافی، ژئومورفولوژی، و هیدروگرافی این دریاچه تأثیرات بسیار زیادی گذاشته است. در نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه، هرچند عوامل اقلیمی بسیار مؤثر است، نقش عوامل انسانی و تأثیر منفی احداث سد‌های متعدد و بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های سطحی و زیرزمینی بر این دریاچه قابل توجه است. رسوبات درشت‌دانه زیرسطحی محلی برای گذر و تبادل آب بین دریاچه و آبرفت‌های اطراف فراهم می‌کند. با افزایش مکش آب از طریق پمپاژ چاه‌ها آب شور دریاچه به سمت دشت‌های کشاورزی حاشیه کشیده خواهند شد.

از دیدگاه ژئوشیمیایی، تیپ شورابه دریاچه ارومیه تا سال ۲۰۰۵ از نوع Na-Mg-Cl و قابل مقایسه با دریای بزرگ نمک در امریکاست. این روند با خشک شدن دریاچه ارومیه و تشدید میزان تبخیر در دریاچه، به میزان ده‌ها برابر، و همچنین کاهش میزان ورودی آب‌های سطحی در سال‌های اخیر، به میزان بالا، تغییر ترکیب شیمیایی داده و از تیپ Na-Mg-Cl به Mg-Na-Cl تغییر یافته و در انتها به ترکیب جدیدی از نوع شورابه‌ها رسیده است. این تغییر ترکیب می‌تواند باعث تغییر در کانی‌های رسی شود (لک و همکاران ۱۳۹۲؛ لک و درویشی خاتونی ۱۳۹۵). البته کانی‌های رسی به وسیله هوازگی شیمیایی سنگ‌ها، که به تغییرات آب‌وهوایی وابسته‌اند، تشکیل می‌شوند. این کانی‌ها همچنین ممکن است بر اثر فعالیت‌های تکتونیک و ساختارهای قاره‌ای مرتبط با تکامل حاشیه‌ای تشکیل شوند (پاردو و همکاران ۱۹۹۹). توجه به خصوصیات کانی‌های موجود در رسوبات و تغییر شکل آن‌ها از شکلی به شکل دیگر برای فهم ماهیت خصوصیات رسوب ضروری است. تغییر اقلیم موجب تغییر در کانی‌های رسی می‌شود و این کانی‌ها سیگنال‌های ژنتیکی وقایع تشکیل خاک‌ها هستند. ترکیب کانی‌شناسی رس‌ها و تغییرات آن در طول زمان رسوب‌گذاری بازتاب شدت هوازگی در توده‌های خشکی موجود در مناطق مجاور آن است (بوکهایم و گنادیف ۲۰۰۰). برخی محققان اظهار می‌کنند تفسیر آب‌وهوای قدیمی از روی کانی‌های رسی به علت انتقالات مکانیکی مناسب نیست (هوریوچی و همکاران ۲۰۰۰؛ سولوتکینا و همکاران ۲۰۰۰؛ تاپری ۲۰۰۰). درحالی‌که برخی دیگر از محققین بر این باورند که از تغییر شکل کانی‌های رسی و تنوع کانی‌های رسی می‌توان به تغییرات آب‌وهوایی و شدت هوازگی پی برد (ارمن و همکاران ۲۰۰۵؛ منافی ۲۰۱۰). بنابراین وجود کانی‌های رسی در شرایطی غیر از شرایط مناسب جهت تشکیل آن‌ها تغییر شرایط تشکیل آن‌ها را نشان می‌دهد.

در جمع‌بندی می‌توان این نکته را یادآور شد که داده‌ها دامنه تغییر بسیار بزرگی دارند و از کمتر از ۱ تا بیش از ۲۰۰۰ اهم متر را نشان می‌دهند. اما فراوانی نقاط و اعماقی با مقاومت الکتریکی پایین (حاوی رس‌ها و آب شور) در مقایسه با مقادیر بالای مقاومت (حاوی ماسه‌های خشک یا سنگ کف) بسیار بیشتر و بالاتر است. همچنین مقادیر مقاومت در دو سوی دریاچه متفاوت است و می‌توان یک گسستگی مشهود بین سونداژهای دو حاشیه را استنباط کرد. این گسستگی ژئوفیزیکی در دو روش ژئوالکتریک و مغناطیس‌سنجی هوایی قابل اثبات است. همچنین در دو ناحیه به دلیل وجود رسوبات درشت‌دانه و دارای مقاومت الکتریکی بالا امکان گذر آب‌های زیرزمینی و تبادل با محیط رسوبی مجاور وجود دارد.

سیاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از همه عوامل و پرسنل سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور برای همراهی در همه بخش‌ها اعلام می‌کنند.

منابع

Adenika Charles I., Emmanuel A., Ariyibi, Musa O., Awoyemi Adebisi S., Adebayo Oluwaseyi A., Dasho Emmanuel O., (2018). "Application of geophysical approach to highway pavement failure: a case study from basement complex terrain southwestern Nigeria", *Geo-Engineering* (2018) 9:8,

- <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0076-0>.
- Aizebeokhai, A. P. & Olayinka, A. I. (2011). "Effectiveness of 3D geoelectrical resistivity imaging using parallel 2D profiles", *current science*, 101(8), 1036-1052.
- Akhavan Moghadam, M., Amirmotallebi, N., 2015 "Quality and quantity interpretation of aerial geophysics data of Urmia lake", *Geological Survey of Iran*.
- Al-Khafaji, W. M. S. & Al-Dabbagh, H. A. Z. (2016). "Visualizing geoelectric – Hydrogeological parameters of Fadak farm at Najaf Ashraf by using 2D spatial interpolation methods". *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.07.001>.
- Amiri, V., Nakhaei, M., Lak, R., Kholghi, M. (2016). "Investigating the salinization and freshening processes of coastal groundwater resources in Urmia aquifer, NW Iran", *Environ. Monit. Assess.* (2016) 188:233. DOI 10.1007/s10661-016-5231-5.
- Amiri, V., Nakhaei, M., Lak, R., Kholghi, M. (2016)." Geophysical, isotopic, and hydro-geochemical tools to identify potential impacts on coastal groundwater resources from Urmia hypersaline Lake, NW Iran", *Environ Sci Pollut Res* (2016) 23:16738–16760. DOI 10.1007/s11356-016-6859-y.
- Amiri, V., Nakhaei, M., Lak, R. (2017)." Using radon-222 and radium-226 isotopes to deduce the functioning of a coastal aquifer adjacent to a hypersaline lake in NW Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 147 (2017), pp. 128–147.
- Asfahani Jamal (2018). "Geoelectrical Combined Sounding-Profiling Configuration for Characterizing the Sedimentary Phosphatic Environment in Al-Sharquieh Deposits Mine in Syria", *Geofísica International* (2018) 57-3: pp. 189-203.
- Bablani Saeed Ahmed & Saeed Ahmed Soomro (2006). "Evaluation of seawater intrusions in left bank sediments of coastal district Thatta, Sindh, Pakistan". *Proceedings 1st SWIM-SWICA Joint Saltwater Intrusion Conference*, Cagliari-Chia Laguna, Italy - September 24-29, 2006, Session 6 - Intrusion in Sedimentary Aquifers.
- Battarbee, R. W. (1999). "Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record". *Quaternary Science Reviews*, 19, pp. 107-124.
- Batte, A. G., Barifajjo, E., Kiberu, J. M., Kawule, W., Muwanga, A., Owor, M. (2010). "Correlation of geoelectric data with aquifer parameters to delineate the groundwater potential of hard rock Terrain in Central Uganda". *Pure Appl. Geophys.* 167, pp. 1549–1559.
- Bellanova J., Giuseppe C., Giocoli A., Luongo R., Perrone A., Lapenna V., Piscitelli S., (2016). "Electrical Resistivity Tomography surveys for the Geoelectric characterization of the Montaguto landslide (southern Italy)", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, doi:10.5194/nhess-2016-28, 2016.
- Bockheim, J. G. & Gennadiyev, A. N. (2000). "The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base", *Geoderma*, Volume 95, Issues 1–2, March 2000, pp. 53-72.
- Carpentier, S., Konz, M., Fischer, R., Anagnostopoulos, G., Meusburger, K., Schoeck, K. (2012). "Geophysical imaging of shallow subsurface topography and its implication for shallow landslide susceptibility in the Urseren Valley, Switzerland", *Journal of Applied Geophysics* 83 (2012), pp. 46–56.
- Carretero, M. I., Ruiz, F., Pozo, M., Rodríguez Vidal, J., Muñoz Pichardo, J. M., Cáceres, L. M., (2011). "Trace Elements in Holocene sediments of the southern Doñana National Park (SW Spain): Historical pollution and applications". *Environmental Earth Sciences*, 64, pp. 1215–1223.
- Darvishi khatooni, J. (2011)." Report of limnology and paleolimnology of Urmia lake, phase IV: hydrochemistry of Urmia lake", *geological survey of Iran*. Without report number, 80 p (in Persian).
- Darvishi khatooni, J. & Mohammadi, A. (2011). "Report of limnology and paleolimnology of Urmia lake, phase III: paleoclimatology, paleoecology and paleogeography", *geological survey of Iran*. Without report number, 120 p (in Persian).
- Doostmohammadi, M., Jafari, A., Asghari, O. (2014). "Application of Geostatistical Modelling to Study the Exploration Adequacy of Uniaxial Compressive Strength of Intact Rock along the Behesht-Abad Tunnel Route", *Int. J. Min. & Geo-Eng.* Vol. 48, No. 2, pp. 127-136.
- Ghadban, F. & Mohajerbavaghar, N. (1997). "Geochemistry and source of saline waters of Urmia lake", *first Iranian conference on marine geology*, Chabahar, university of Sistan and Baluchestan (in Persian).
- Werner E., Setti M., Marinoni L., (2005). "Clay minerals in Cenozoic sediments off Cape Roberts (McMurdo Sound, Antarctica)", reveal *palaeoclimatic history*, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volume 229, Issue 3, 20 December 2005, pp. 187-211.

- Farajzadeh, R., Rezaei, R., Saberi nasr, A., Ghasempour, L. (1389). "Investigation of Geoelectric applications in subsurface sediments isolation and determination of high potential points for groundwater exploration", 5th national conference of geology and environment, Islamshahr, Azad University.
- Frohlich, R.K. & Kelly, W.E., (1985). "The relation between hydraulic transmissivity and transverse resistance in a complicated aquifer of glacial outwash deposits". *J. Hydrol.* 13: pp. 529-556.
- Hafezi Moghaddas N., Leo Ch., Rahimi B., Azadi A., (2017). "Morpho-tectonics and geoelectric method applied to active faults characterization in South of Mashhad Plain, Northeast of Iran", *Geopersia* 8 (1), 2018, pp. 13-26 DOI: 10.22059/GEOPE.2017.230489.648312.
- Horiuchi, K., Minoura, K., Hoshino, K., Oda, T., Nakamura, T., Kawai, T. (2000). "Palaeoenvironmental history of Lake Baikal during the last 23000 years". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 157, pp. 95-108.
- Hosny, M., Ezzel Deen, Mostafa S. M. Barseem, Ahmed, N. El Sayed (2013)." Ground water exploration in Wadi El – Shaghab using Geophysical techniques, East Idfu, Eastern Desert, Egypt: *Egyptian Journal of Geology*, Vol. 57, pp. 31-47.
- Igboekwe, M. U., Eke, A. B., Adama, J. C., Ihekweaba, M. (2012). "The Use of Vertical Electrical Sounding (VES) in the Evaluation of Erosion in Abia State University, Uturu and Environs". *The Pacific Journal of Science and Technology*, Vol.13. No. 2., pp. 509-520.
- Ipl2Win v. 2.1 Users Guide (2001). "A computer software user guide catalog presented by Moscow State University", *Geological Faculty, Department of Geophysics and Geoscan-m Ltd.*, p. 25.
- Kelts, K. & Shahrabi, M. (1986). "Holocene sedimentology of hypersaline Lake Urmia, Northwestern Iran" *Palaeogeography, Palaeo-climatography, Palaeoecology journal*, Vol. 54: pp. 105-130.
- Songjong K., Jong-Chan Y., Deok H.M., Kitae B., (2018). "Role of clay minerals on reduction of Cr(VI)", *Geoderma*, Volume 312, 15 February 2018, pp. 1-5.
- Lak, R. & Darvishi khatuoni, J. (1395). "Depositional environments and brine composition of Urmia lake: implications on appropriate solution to restoration", *journal of natural resource and environment of Iran.*, Vol. 96, No. 3, pp. 515-531.
- Lak, R., Darvishi khatuoni J., Mohammadi, A., Rezaeian Langeroudi, S. (1392). "Investigation of Holocene climate change in Iran by study of hyper-saturated lakes sediments (case study: Maharlou, Urmia and Howze sultan lakes)", *Earth Science J.*, Summer 1392, Y.22, No. 88.4, pp. 77-88.
- Manafi, S. (2010)." Mineralogical evidences of climate change in some semiarid soils of Southern Urmia, Iran.", *Pochvoznanie, Agrokhimiya i Ekologiya*, 2010, Vol. 44, No. 4, pp. 17-24 ref.12.
- Markus, U. I., Udensi, E. E., Mufutau, O. J., Mannir, M. (2018). "Geoelectric investigation of groundwater potential of part of Rafin-Yashi, Minna, north central, Nigeria". *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2018; 6(1): pp. 58-66.
- McAnallen, L., Doherty, R., Donohue, S., Kirmizakis, P., Mendonça, C. (2018). "Combined use of geophysical and geochemical methods to assess areas of active, degrading and restored blanket bog". *Science of the Total Environment* 621 (2018). pp. 762–771.
- Mousavi harami, R. (1367). "*Sedimentology*", Astan-e-Ghodse razavi pub.
- Mostafaei, K. & Ramazi, H. R. (2018). "3D model construction of induced polarization and resistivity data with quantifying uncertainties using geostatistical methods and drilling (Case study: Madan Bozorg, Iran)", *Journal of Mining & Environment*, Vol. 9, No. 4, pp. 857-872. DOI: 10.22044/ jme. 2018. 6852. 1516.
- Nocete, F., Álex, E., Nieto, J. M., Sáez, R., Bayorna, M. R. (2005). "An archaeological approach to regional environmental pollution in the south-western Iberian Peninsula related to Third millennium BC mining and metallurgy". *Journal of Archaeological Science*, 32, pp. 1566–1576.
- Okwueze, EE. (1996). "Preliminary findings of the groundwater resource potentials from a regional geoelectric survey of the Obudu basement area. Nig". *Global J. Pure Appl. Sci.*, 2(2): pp. 201-211.
- Pardo, A., Adatte, T., Keller, G., Oberhansli, H. (1999). "Palaeo-environmental changes across the Cretaceous- Tertiary boundary at Koshak, Kazakhstan, based on planktic foraminifera and clay mineralogy". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 154, pp. 247-273.
- Pedrami, M. (1366)." Quaternary stratification and their study methods", *Geological Survey of Iran*.
- Revil, A., Naudet, V., Meunier, J. D. (2004). "The Hydroelectric Problem of Porous Rocks: Inversion of the Position of the Water Table from Self-Potential Data", *Geophysics Journal International*, Vol. 159, pp. 435-444.
- Rogowski, A. S. (1996). "Quantifying soil variability in GIS applications: II Spatial distribution of soil

- properties". *International Journal of Geographical Information Systems* 10: pp. 455–75.
- Sadough, S. H., Hoseinzadeh, M. M., Rezaei, Kh., Chezgheh, S. (1396). "Investigation of accumulation pattern of quaternary sediments and pathway of old rivers in Tehran and Karaj plains using Geoelectric studies", *Journal of Quaternary of Iran*, Vol. 3, No.1, pp. 1-14.
- Seok-Hoon, Oh. & Byung-Doo Kwon (2001). "Geostatistical approach to bayesian inversion of geophysical data: Markov chain Monte Carlo method", *Earth Planets Space*, 53, 777–791.
- Sohrabi, N., Kalantari, N., Amiri, V., Nakhaei, M. (2017). "Assessing the chemical behavior and spatial distribution of yttrium and rare earth elements (YREEs) in a coastal aquifer adjacent to the Urmia Hypersaline Lake, NW Iran", *Environ Sci Pollut Res*. DOI 10.1007/s11356-017-9644-7.
- Soleimani, H., Asghari, O., Hafizi, M. K. (1393). "Separation of saltwater and freshwater using sequential Gaussian simulation in resistivity measurements", *Journal of Physics of earth and space*, Vol. 40, No. 4, pp. 99-110.
- Solotchina, E. P., Prokopenko, A. A., Vasilevsky, A. N., Gavshin, V. M. (2002). "Simulation of XRD patterns as an optimal technique for studying glacial and interglacial clay mineral associations in bottom sediments of Lake Baikal", *clay minerals*, Vol. 37, Issue 1, 2002, pp. 105-119.
- Sousa, R. & Carvalho, J. (2014). "Geostatistics applied to electrical resistivity data FEUP Geophysical Experimental Field – A case study". <https://www.researchgate.net/publication/301220102>.
- Sjödahl, P. (2006). "Resistivity investigation and monitoring for detection of internal erosion and anomalous seepage in embankment dams Engineering Geology", Doctoral Thesis, Lund University.
- Steelman Colby M., Celia S. Kennedy, Donovan C. Capes, Beth L. Parker (2017). "Electrical resistivity dynamics beneath a fractured sedimentary bedrock riverbed in response to temperature and groundwater–surface water exchange", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, pp. 3105–3123, 2017, <https://doi.org/10.5194/hess-21-3105-2017>.
- Stevens, L. R., Djamali, M., Andrieu-Ponel, V., de Beaulieu, J. L. (2012). "Hydro-climatic variations over the last two glacial/interglacial cycles at Lake Urmia, Iran", *J Paleolimnol* (2012) 47: pp. 645–660. DOI 10.1007/s10933-012-9588-3.
- Sultan, S. A., Hassan, S. Sabet, Shevni V., Mahfooz A. Hafez, Diaa Hamed, Gaweish, W. R. (2013). "Vertical electrical sounding analysis for groundwater exploration at Nakhl area, Central Sinai, Egypt", *georazrez journal*, issue 1, 1, pp. 1-14.
- Sunaryo S.A. & Fitriah F. (2018). "Groundwater investigation using resistivity method and drilling for drought mitigation in Tulungagung, Indonesia", *International Journal of GEOMATE*, July, 2018 Vol. 15, Issue 47, pp. 124-131. Geotec., Const. Mat. & Env., DOI: <https://doi.org/10.21660/2018.47.98784>.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1990). "Applied Geophysics (second edition)". Cambridge University Press.
- Thiry, M. (2000). "Palaeo-climatic interpretation of clay minerals in marine deposits: an outlook from the continental origin", *Earth-Science Reviews*, Vol. 49, Issues 1–4, March 2000, pp. 201-221.
- Julian T., & Kneisel Ch., (2019). "Geophysical and Sedimentological Investigations of Peatlands for the Assessment of Lithology and Subsurface Water Pathways". *Geosciences* 2019, 9, 118; doi:10.3390/geosciences9030118.
- Yarrington, L. (1996). "Sequential Gaussian simulation". Fernald Geostatistical Techniques, Sandia National Laboratories. <http://www.nwer.sandia.gov/ferald/techniq.html>.
- Zarroca, M., Bach, J., Linares, R., Pellicer, XM. (2011). "Electrical methods (VES and ERT) for identifying, mapping and monitoring different saline domains in a coastal plain region (Alt Empordà, Northern Spain)". *J Hydrol* 409: pp. 407–422.
- Zohdy, A. A. R. (1989). "A New Method for the Automatic Interpretation of Schlumberger and Wenner Sounding Curves". *Geophysics*, 54, pp. 245-253.