



بهره‌گیری از توموگرافی مقاومت الکتریکی در باستان‌شناسی:

مطالعه‌ای با رویکرد مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار COMSOL

آنیثا اخگر^۱، مهیار رادک^۲

۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد باستان‌شناسی دوران تاریخی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر. نویسنده مسئول: anitaakhgar76@gmail.com

۲ دانشجوی دکتری اپتیک و لیزر، دانشکده فیزیک، دانشگاه مازندران، بابلسر.

چکیده	اطلاعات مقاله:
باستان‌شناسی به‌عنوان دانشی میان‌رشته‌ای، همواره به‌دنبال روش‌هایی نوین برای کاوش غیرمخرب و دقیق در لایه‌های زیرزمینی بوده است. یکی از روش‌های نوظهور و بسیار کارآمد در این حوزه، توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) است که با بهره‌گیری از تغییرات مقاومت الکتریکی در زیرسطح، امکان شناسایی ساختارهای مدفون، قبرها، زیرساخت‌ها و دیگر شواهد فرهنگی را فراهم می‌سازد. این مقاله با تمرکز بر کاربرد باستان‌شناختی ERT، به تحلیل عددی این روش در محیط شبیه‌سازی پیشرفته نرم‌افزار COMSOL می‌پردازد. در چارچوب این پژوهش، یک مدل سه‌بعدی استوانه‌ای با قطر ۴۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر طراحی شد که در آن ۲۵ الکترود به‌صورت خطی در سطح قرار گرفتند. شبیه‌سازی عددی انجام‌شده، امکان بررسی دقیق توزیع پتانسیل الکتریکی و مقاومت ویژه زیرسطح را فراهم کرده و با مقایسه نتایج با حل تحلیلی در محیط همگن، صحت عملکرد مدل ارزیابی شد. افزون بر این، تأثیر پارامترهایی همچون آرایش الکترودها، فاصله آن‌ها و ویژگی‌های فیزیکی مواد زیرسطحی بر نتایج تصویربرداری مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب روش ERT با شبیه‌سازی عددی، رویکردی مؤثر، غیرویرانگر و دقیق برای شناسایی ساختارهای باستانی فراهم می‌سازد و می‌تواند جایگزینی علمی و پایدار برای روش‌های سنتی حفاری باشد.	تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳ واژگان کلیدی: توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) تصویربرداری زیرسطحی COMSOL اکتشافات باستانی

* استناد: اخگر، آنیثا، رادک، مهیار (۱۴۰۴). بهره‌گیری از توموگرافی مقاومت الکتریکی در باستان‌شناسی: مطالعه‌ای با رویکرد مدل‌سازی عددی در

نرم‌افزار. پیام باستان‌شناسی، ۱۷(۳۲)، ۱۵۱-۱۶۴.

<https://doi.org/10.71794/peb.2025.1129223>

مقدمه

توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) یکی از روش‌های ژئوفیزیکی بررسی زیرسطحی است که بر پایه اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی در لایه‌های زیرزمینی عمل می‌کند. در این روش، آرایه‌ای از الکترودها بر سطح زمین قرار گرفته و جریان الکتریکی کنترل‌شده‌ای به درون زمین تزریق و سپس اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری می‌گردد (Alexakis et al., 2012). این اندازه‌گیری‌ها امکان ترسیم تغییرات جانبی و عمقی مقاومت ظاهری در لایه‌های زیرسطحی را فراهم می‌سازند. کارایی این روش در باستان‌شناسی به این دلیل است که مقاومت الکتریکی با ویژگی‌های فیزیکی مواد همچون لیتولوژی، شکستگی‌ها، میزان اشباع و محتوای مایعات رابطه مستقیم دارد. با تحلیل توزیع مقادیر مقاومت، اطلاعاتی درباره ساختارهای مدفون و ترکیب آن‌ها به دست می‌آید (Vásconez-Maza et al., 2020).

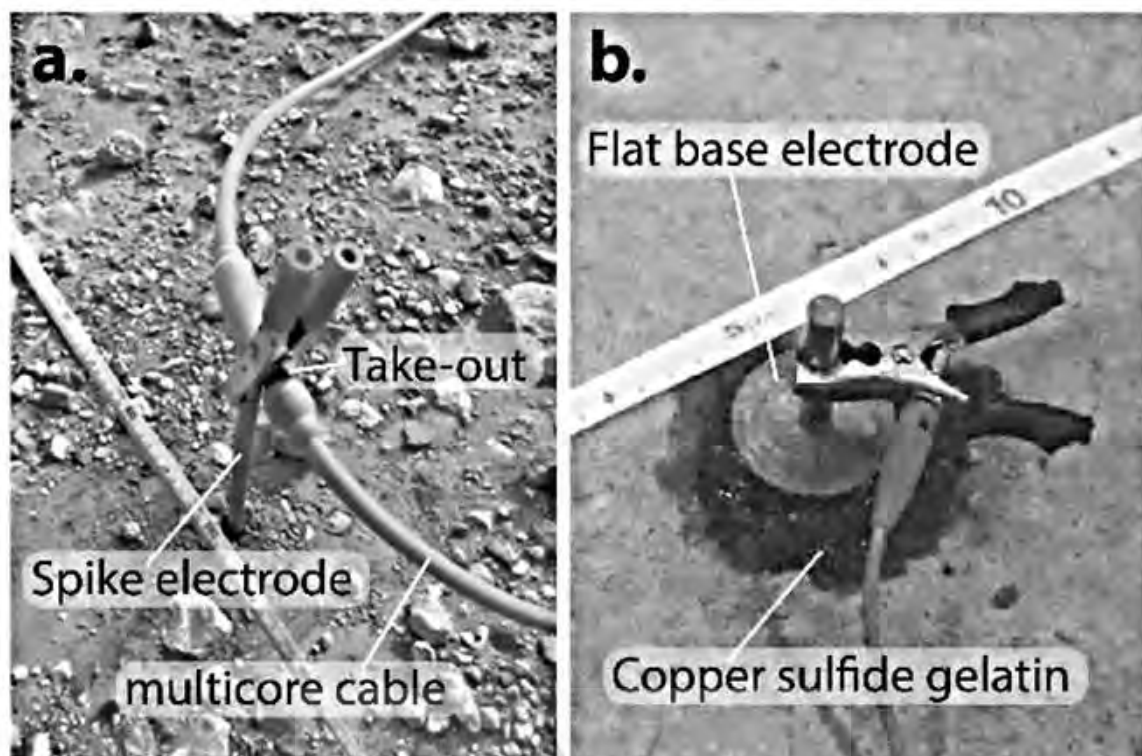
در دهه گذشته، پیشرفت‌های چشمگیری در تجهیزات میدانی و پردازش داده‌ها، امکان توسعه تصویربرداری سه‌بعدی ERT را فراهم کرده‌اند و موجب افزایش ارزش این تکنیک در مطالعات باستان‌شناختی شده‌اند (Bianco et al., 2019). ویژگی‌های الکتریکی اندازه‌گیری‌شده توسط ERT تحت تأثیر عواملی همچون نوع ماده زمین، میزان اشباع خاک، و وجود اجسام یا ساختارهای مدفون قرار دارد. به‌ویژه، وجود مواد رسانا باعث تسهیل جریان الکتریکی شده و اطلاعات دقیق‌تری درباره ویژگی‌های زیرزمینی فراهم می‌کند. اگرچه ERT معمولاً همراه با سایر روش‌های ژئوفیزیکی برای ارائه داده‌های مکمل به کار می‌رود، اما توانایی آن در شناسایی ساختارهای عمیق، آن را به ابزاری مستقل و ارزشمند در کاوش‌های باستان‌شناسی تبدیل کرده است (Bianco et al., 2019). اجرای روش ERT با آرایش خطی یا دوبعدی الکترودها با فواصل منظم انجام می‌گیرد

(Piroddi et al., 2020). در برداشت‌های دوبعدی، هر اندازه‌گیری به فاصله خاصی میان الکترودهای جریان و پتانسیل مربوط می‌باشد و نمایه‌هایی عمودی از زیرسطح مورد نظر ایجاد می‌کند (Milo et al., 2022).

در تصویربرداری‌های سه‌بعدی، الکترودها به شکل حلقه‌ای یا الگوهای هندسی دیگر چیده می‌شوند تا مدل‌هایی جامع‌تر از زیرزمین فراهم شود (Piroddi et al., 2020). این رویکرد سه‌بعدی، به‌ویژه از طریق توسعه توموگرافی احتمالاتی که نیازمند فرضیات پیشین درباره ساختارهای زیرزمینی نمی‌باشد، به سطح بالاتری از دقت و تمرکز رسیده است (Fiore et al., 2002; Mauriello et al., 1999).

انتخاب نوع آرایش الکترودها نقشی کلیدی در کیفیت نتایج دارد. به عنوان نمونه، آرایش دوقطبی-دوقطبی نسبت به تغییرات افقی مقاومت حساس است و برای شناسایی ساختارهای عمودی همچون دیوارها و حفره‌ها مناسب تلقی می‌شود. تفکیک‌پذیری با تغییر فاصله الکترودها تنظیم می‌شود؛ فواصل کوچک‌تر (مثلاً ۵/۰ متر) امکان شناسایی ساختارهای باریک‌تری مانند دیوارها را فراهم می‌سازند، اما عمق نفوذ را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهند (Urbini et al., 2007).

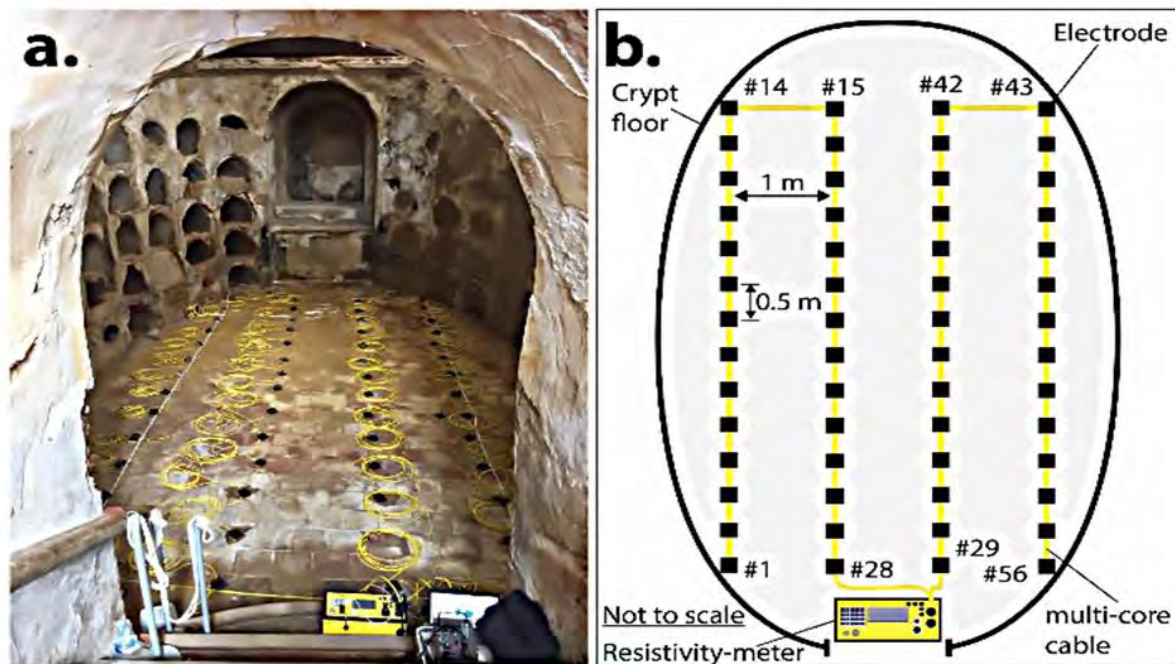
در محیط‌های دشوار مانند بسترهای کم‌عمق دریایی، عواملی چون ضخامت لایه آبی و رسانایی الکتریکی آب باید برای بهینه‌سازی نسبت سیگنال به نویز در نظر گرفته شوند (Loddo et al., 2016). برای غلبه بر موانع فیزیکی در محل‌های انتخابی مورد کاوش، پیکربندی‌های جایگزین مانند آرایه‌هایی به شکل حرف L طراحی شده‌اند (Chávez et al., 2011). کارایی این روش در زمینه‌های باستان‌شناسی بارها از طریق حفاری‌ها تأیید شده و توانایی آن در شناسایی دقیق ساختارهای مدفون به اثبات رسیده است (Urbini et al., 2007; Cardarelli et al., 2008).



شکل ۱: انواع الکترودهای مورد استفاده در مطالعات توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT): (الف) الکترود میله‌ای مرسوم (spike electrode)، (ب) الکترود با پایه تخت (flat-based electrode) (Vásconez-Maza et al., 2020)



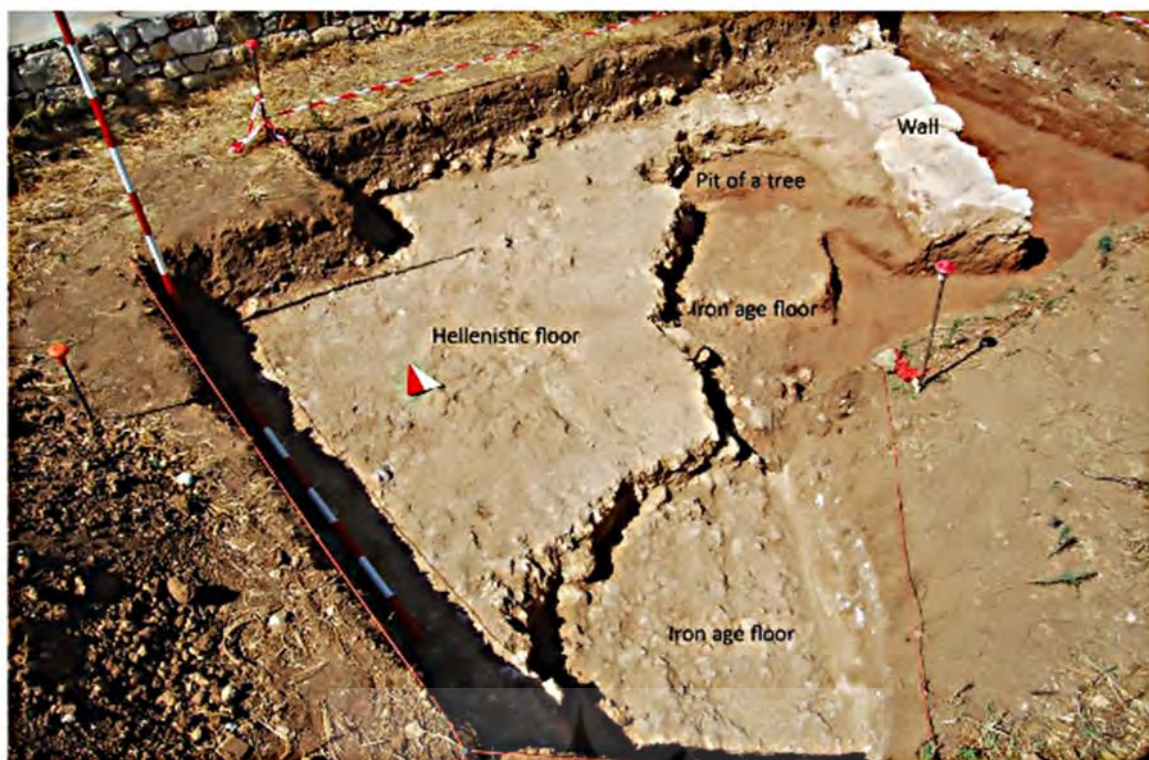
شکل ۲: نمای کلی و موقعیت محل بررسی‌شده: سرداب سنت جوزف در داخل موزه دیوار پونیک (کارتاخنا، اسپانیا) (Vásconez-Maza et al., 2020)



شکل ۳: (الف) پیکربندی سه‌بعدی ERT بر روی کف سرداب سنت جوزف، (ب) نمودار نحوه قرارگیری الکترودهای غیرفعال و کابل‌ها (Vásconez-Maza et al., 2020)



شکل ۴: نواحی مورد بررسی (تصویربرداری از طریق گوگل ارث) (Bianco et al., 2019)



شکل ۵: منطقه ۱: ساختارهای کشف‌شده در جریان حفاری در بخش B (Bianco et al., 2019)

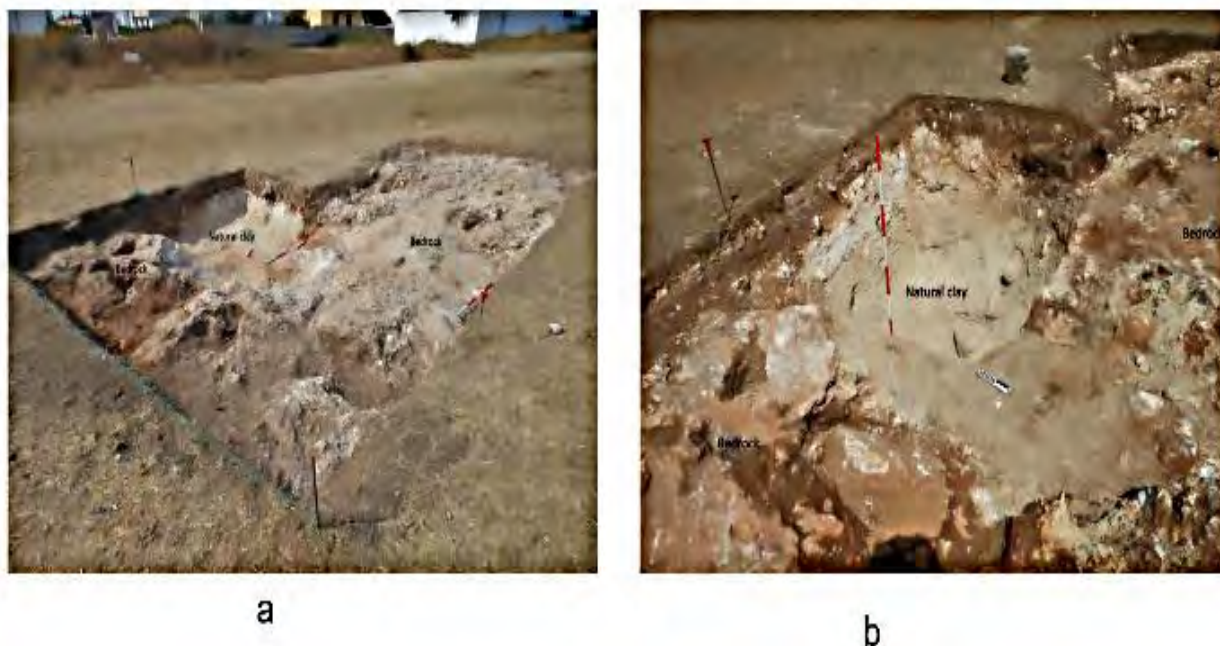


a



b

شکل ۶: منطقه ۱: (الف) و (ب) ساختارهای کشف‌شده در جریان حفاری در بخش E (Bianco et al., 2019)



شکل ۷: منطقه ۲ (ناحیه پالومبارا): (الف) بخش F در حین حفاری؛ (ب) بخش F در پایان حفاری (Bianco et al., 2019).

بحث و شبیه‌سازی

کاربردهای باستان‌شناختی اثرگذار توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT):

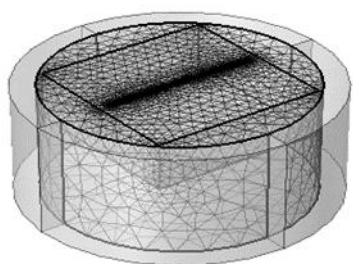
۱- ساختارهای ساختمانی و بنیادها

- امکان شناسایی دیوارهای سنگی، بنیادهای ساختمان‌ها و کاشی‌های انباشته شده از طریق علائم مقاومت بالای مشخص آن‌ها (Cozzolino et al., 2020).
- نقشه‌برداری از محیط‌های ساخته‌شده باستانی شامل دیوارها، ساختمان‌ها و جاده‌ها، حتی در سایت‌های باستان‌شناسی غرق‌شده (Simyrdanis et al., 2016). این روش در مکان‌های باستانی مانند تل‌های نواحی خاورمیانه بسیار موفقیت‌آمیز بوده است، جایی که امکان نقشه‌برداری از ویژگی‌ها در لایه‌های بسیار عمیق و استراتیژی وجود دارد (Novo et al., 2012; Casana et al., 2008). این روش به ویژه در شناسایی و تحلیل ساختارهای باستانی که در لایه‌های عمیق و چندلایه‌ای قرار دارند، موثر است. با استفاده از مقاومت‌سنجی، می‌توان

۲- محل‌های دفن و قبرها

- شناسایی قبرهای پیچیده و دفن‌های ساده از طریق تغییرات مقاومت (Berezowski et al., 2021). این روش به طور موفقیت‌آمیز گور دامیو دی گویس (Damião de Goes) در پرتغال را شناسایی کرد، جایی که مقادیر بالای مقاومت نشان‌دهنده دیوارهای قبر بودند، در حالی که مناطقی با مقاومت کم به فضاهای غنی از تجزیه اشاره داشتند (Berezowski et al., 2021; Matias et al., 2006).
- همچنین قادر به شناسایی دفن‌های تابوتی از طریق مقادیر مقاومت غیرعادی پایین است که اغلب به جمع‌آوری و نگهداری آب مربوط می‌شود (Berezowski et al., 2021); در این بخش، مقاومت‌سنجی می‌تواند به شناسایی دقیق ویژگی‌های زیرزمینی در محل‌های دفن کمک

می‌شود و لایه‌ها، ساختارها و ویژگی‌های باستان‌شناختی مورد نظر در مدل گنجانده می‌گردند. با اختصاص دادن مقادیر مناسب مقاومت الکتریکی به هر ناحیه، پیچیدگی و ناهمگونی زیرسطح به‌طور دقیق بازنمایی می‌شود. معادله لاپلاس رابطه بین پتانسیل الکتریکی و توزیع مقاومت در سطح زیرین را بیان می‌کند.



شکل ۸: ساختار شبکه‌بندی هندسه محیط شبیه‌سازی

در حالت زمین همگن، معادله لاپلاس به معادله پواسون ساده می‌شود. معادله پواسون برای هندسه‌ها و شرایط مرزی ساده، به‌صورت تحلیلی قابل حل است. با این حال، در شرایط واقعی، توزیع مقاومت ویژه در زیرسطح معمولاً پیچیده و ناهمگن است، و این امر حل تحلیلی را غیرعملی می‌سازد. برای مقابله با این پیچیدگی، روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود یا روش تفاضل محدود به‌کار گرفته می‌شوند. این روش‌ها زیرسطح را به یک شبکه یا مش تقسیم کرده و معادله حاکم را به‌صورت عددی برای به‌دست‌آوردن توزیع پتانسیل الکتریکی حل می‌کنند. در شبیه‌سازی انجام‌شده، از یک رویکرد عددی برای حل مسئله پیش‌رو در توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی (ERT) سه‌بعدی استفاده شد. در این شبیه‌سازی، زمینی همگن با مقاومت ویژه‌ای معادل ۱۰۰ اهم‌متر در نظر گرفته شد. مجموعه‌ای از ۲۵ الکتروده برای انجام اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی به‌کار رفت. در فرایند شبیه‌سازی، جریان الکتریکی به الکترودها تزریق شده و اختلاف پتانسیل بین دو الکتروده مشخص با نام‌های C1 و C2 اندازه‌گیری شد. مقاومت از طریق نسبت اختلاف پتانسیل به جریان تزریقی

کند، مانند دیوارهای مقبره‌ها و تغییرات ناشی از فرایند تجزیه اجساد، که باعث تغییرات ویژه‌ای در مقاومت خاک و ساختارهای دفن‌شده می‌شود.

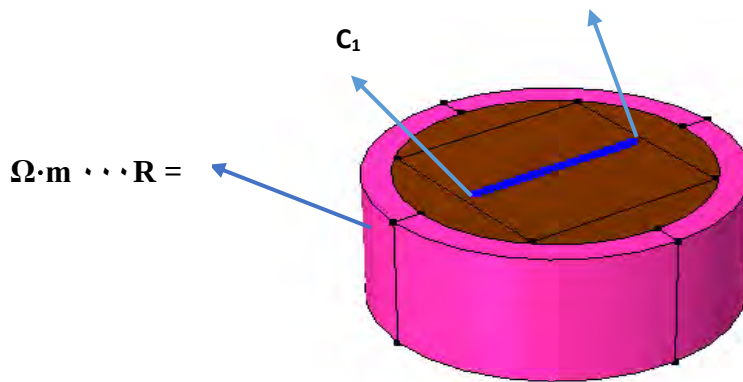
۳- یادمان‌های تاریخی و کلیساها

- تحقیق و بررسی یادمان‌های موجود با استفاده از روش‌های غیرمخرب، مانند بررسی‌ها و تحقیق در آکروپولیس آتن (Tsourlos et al., 2012; Novo et al., 2011). اکتشافات زیر زمین در زیر کف کلیساها به منظور شناسایی فضاهای توخالی، چاه‌های باستانی و سایر ساختارهای پنهان (Tsokas et al., 2008). در این بخش، استفاده از مقاومت‌سنجی برای بررسی ساختارهای تاریخی و دینی اهمیت دارد، زیرا این روش به شناسایی فضاهای پنهانی در زیر ساختمان‌ها و ارزیابی آسیب‌ها یا تغییرات ساختاری کمک می‌کند.

۴- ویژگی‌های زیرساختی

- نقشه‌برداری از زیرساخت‌های باستانی مانند آکودوکت‌ها حتی در عمق‌های قابل توجه (حدود ۱۰ متر) و در شرایط چالش‌برانگیز با لایه‌های سطحی هدایت شونده (Cozzolino et al., 2020; Trogu et al., 2014). این روش برای شناسایی و نقشه‌برداری از زیرساخت‌های زیرزمینی نظیر آکودوکت‌ها، که ممکن است در عمق‌های زیاد و زیر لایه‌های ضخیم زمین دفن شده باشند، بسیار مفید است و به باستان‌شناسان این امکان را می‌دهد که در شرایط سخت، مانند لایه‌های سطحی که مقاومت بالایی دارند، زیرساخت‌های باستانی را شناسایی کنند. فرایند شبیه‌سازی شامل ایجاد یک مدل زیرسطحی با استفاده از قابلیت‌های مدل‌سازی بصری نرم‌افزار COMSOL است. در این مرحله، هندسه و ویژگی‌های مواد تشکیل‌دهنده زیرسطح تعریف

محاسبه گردید. با حل عددی مسئله پیش‌رو در توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی، شبیه‌سازی درک بهتری از پاسخ زیرسطح ارائه می‌دهد و امکان محاسبه مقادیر مقاومت ویژه را فراهم می‌سازد. این فرایند به درک رفتار جریان‌ها^{C₂}

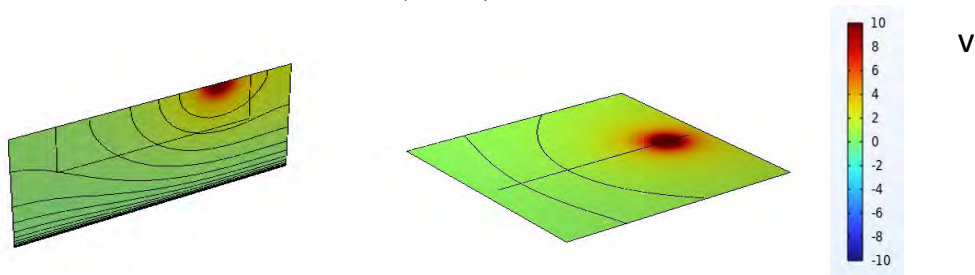


شکل ۹: استوانه‌ای با قطر ۴۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر نمایانگر سطح زیرسطح است. در شبیه‌سازی عددی مسئله توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی، یک خط متشکل از ۲۵ الکتروود با فاصله یکنواخت در بالای استوانه قرار گرفته است که امکان اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل را فراهم می‌سازد.

توزیع حاصل از پتانسیل الکتریکی به‌دست آمده و مقادیر مقاومت برای پیکربندی انتخاب‌شده الکتروودها محاسبه می‌گردد. این مقادیر مقاومت سپس با راه‌حل تحلیلی مقایسه می‌شوند تا دقت شبیه‌سازی عددی ارزیابی شود. این مقایسه، قابلیت اطمینان و دقت شبیه‌سازی عددی را در بازتولید نتایج مورد انتظار در یک زمین همگن با توزیع مقاومت ویژه معلوم نشان می‌دهد. شایان ذکر است که اگرچه برنامه ارائه‌شده فرض را بر زمین همگن قرار

می‌دهد، اما توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی می‌تواند برای شرایط زیرسطحی ناهمگن نیز به‌کار رود. در چنین شرایطی، توزیع مقاومت به‌صورت یکنواخت نبوده و مسئله پیش‌رو پیچیده‌تر می‌شود. معادله حاکم بر مسئله پیش‌روی ژئوالکتریکی در توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی در معادله (۱) ارائه شده است که منبع جریان نقطه‌ای الکتروودهای واقع در موقعیت‌های r_{C1} و r_{C2} را نشان می‌دهد.

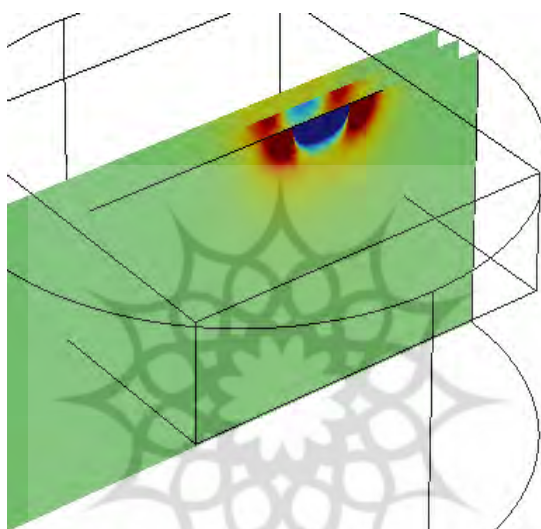
$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = I \cdot \delta(r - r_{C1}) - \delta(r - r_{C2}) \quad (1)$$



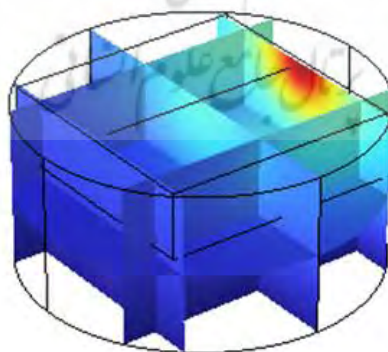
شکل ۱۰: پتانسیل الکتریکی در اطراف جفت الکتروود فعال

روش توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی ارائه داده و به دانش تنظیمات بهینه برای سناریوها و اهداف مختلف کمک می‌کند. ما همچنین نحوه تأثیر تغییرات در فاصله و آرایش الکترودها را بر میزان جزئیاتی که در تصاویر مقاومت ویژه ثبت می‌شود، تحلیل می‌کنیم. افزون بر این، تأثیر فرکانس‌های مختلف بر عمق نفوذ و تفکیک‌پذیری بررسی‌های توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پارامترهای مؤثر مورد بررسی شامل پیکربندی الکترودها، فرکانس جریان اعمال‌شده، و سطح نویز در اندازه‌گیری‌ها هستند. با تغییر سیستماتیک این پارامترها و انجام شبیه‌سازی‌های متعدد، تأثیر آن‌ها بر توزیع مقاومت زیرسطحی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای هر پارامتر، نمودارها و تصاویر بصری تولید می‌شود که رابطه میان آن پارامتر و توزیع مقاومت حاصل را نشان می‌دهند. این نمودارها درک ارزشمندی در مورد حساسیت و تفکیک‌پذیری



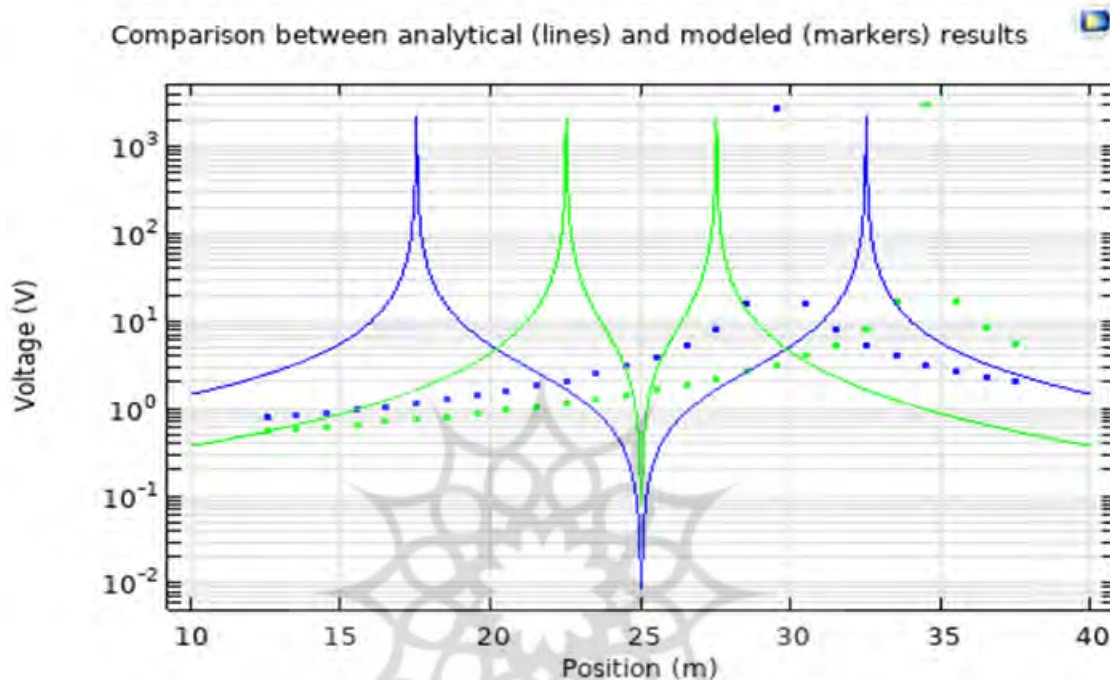
شکل ۱۱: نمودار حساسیت



شکل ۱۲: نمودار سه‌بعدی نتایج شبیه‌سازی نمونه

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های انجام‌شده در نرم‌افزار COMSOL به پیشرفت قابلیت‌ها و کاربردهای توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی کمک خواهد کرد و مسیر را برای بهبود تحقیقات باستان‌شناسی، مطالعات زمین‌شناسی و نظارت محیطی هموار می‌سازد.

از طریق مطالعه شبیه‌سازی، هدف ما تعمیق درک توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی و پارامترهای مؤثر آن است که راهنمایی‌های ارزشمندی برای محققان و دست‌اندرکاران در زمینه تصویربرداری زیرسطحی فراهم خواهد کرد.



شکل ۱۳: مقایسه بین نتایج تحلیلی استوانه مدل‌شده توسط ما (خط‌ها) و مطالعات قبلی مدل جعبه (خط چین)

در شکل ۱۳، نتایج شبیه‌سازی مدل استوانه‌ای که در این تحقیق انجام شده‌است، عملکرد بهتری نسبت به مطالعات قبلی که از مدل جعبه‌ای استفاده کرده‌اند، نشان می‌دهد. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل استوانه‌ای رفتار زیرسطحی مورد بررسی را دقیق‌تر نمایان می‌سازد. نتایج بهتر به‌دست‌آمده از مدل استوانه‌ای نشان می‌دهد که این مدل ویژگی‌ها و فرایندهای فیزیکی اساسی سیستم را به‌طور مؤثرتری شبیه‌سازی می‌کند. این امر می‌تواند به شکل استوانه‌ای که با ساختار واقعی زیرسطح تطابق دارد یا به تکنیک‌های مدل‌سازی بهبود یافته‌ای که در شبیه‌سازی‌های این پژوهش استفاده شده‌اند، نسبت داده شود. مقایسه بین مدل استوانه‌ای و مطالعات قبلی که از مدل جعبه‌ای استفاده کرده‌اند، آگاهی ارزشمندی را در مورد دقت و قابلیت اطمینان رویکرد شبیه‌سازی ارائه می‌دهد. این مقایسه اهمیت در نظر گرفتن نمای هندسی مناسب و فرضیات مدل‌سازی به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر در تحقیقات ژئوفیزیکی یا ژئوالکتریکی را برجسته می‌کند.

در نتیجه، شبیه‌سازی توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل پارامترهای مؤثر و نمودارهای مرتبط با آن‌ها عمل می‌کند. با توانایی در ایجاد مدل‌های زیرسطحی واقع‌گرایانه و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، نرم‌افزار COMSOL به ما این امکان را می‌دهد که جزئیات پیچیده توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی را کاوش کرده و درک جامعی از عواملی که بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارند، به‌دست آوریم.

در شکل ۱۳، نتایج شبیه‌سازی مدل استوانه‌ای که در این تحقیق انجام شده‌است، عملکرد بهتری نسبت به مطالعات قبلی که از مدل جعبه‌ای استفاده کرده‌اند، نشان می‌دهد. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل استوانه‌ای رفتار زیرسطحی مورد بررسی را دقیق‌تر نمایان می‌سازد. نتایج بهتر به‌دست‌آمده از مدل استوانه‌ای نشان می‌دهد که این مدل ویژگی‌ها و فرایندهای فیزیکی اساسی سیستم را به‌طور مؤثرتری شبیه‌سازی می‌کند. این امر می‌تواند به شکل استوانه‌ای که با ساختار واقعی زیرسطح تطابق دارد یا به تکنیک‌های مدل‌سازی بهبود یافته‌ای که در شبیه‌سازی‌های این پژوهش استفاده شده‌اند، نسبت داده شود. مقایسه بین مدل استوانه‌ای و مطالعات قبلی که از مدل جعبه‌ای استفاده کرده‌اند، آگاهی ارزشمندی را در مورد

جدول ۱: مقایسه منابع موجود درباره رویکردهای ژئوفیزیکی در بررسی‌های باستان‌شناختی

اهداف پیمایش	ویژگی‌های محوطه	رویکرد روش‌شناختی	مقالات
بررسی محوطه‌های باستانی زیرآبی؛ ترسیم نقشه ساختارهایی مانند دیوارها و جاده‌ها	N/A	حالت‌های پیمایش ایستا و متحرک در محیط‌های زیرآبی، و الگوریتم‌های وارونه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی	Simyrdanis et al, 2016. Remote Sensing.
اهداف اصلی به‌کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی، شناسایی ساختارهای مدفون مانند دیوارها و ارائه ارزیابی کلی از ویژگی‌های باستان‌شناختی زیرسطحی است	N/A	پیمایش‌های ژئوفیزیکی غیرتتهاجمی با استفاده از ERT سه‌بعدی و EMI همراه با نرم‌افزارها و پروتکل‌های بهبودیافته	Novo et al, 2012.
مستندسازی ویژگی‌های معماری و لایه‌بندی باستان‌شناختی به‌صورت سه‌بعدی	لایه‌های باستان‌شناختی با عمق بیش از ۳۰ متر، خاورمیانه	رادار نفوذی به زمین با فرکانس پایین (GPR) و توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی (ERT)	Casana et al, 2008.
اهداف اصلی شامل شناسایی ویژگی‌های خاصی مانند قبرها، دیوارها یا قنات‌ها و ارائه ارزیابی کلی از ویژگی‌های باستان‌شناختی زیرسطحی است.	روش‌های ژئوفیزیکی تحت تأثیر شرایط محوطه مانند نوع خاک، زمین‌شناسی و چگالی پوشش گیاهی قرار دارند.	استفاده از روش‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) و مقاومت‌سنجی برای شناسایی قبرهای بدون علامت در تحقیقات پزشکی قانونی و باستان‌شناسی می‌پردازد.	Berezowski et al, 2021. Remote Sensing.
شناسایی ساختارهای مدفون جدید و دیدگاه به‌روز شده از میراث باستان‌شناختی	محوطه‌های هلنیستی - ایلیری، رومی و قرون وسطی؛ عمدتاً روستایی	این مطالعه از روش‌های توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی (ERT) و رادار نفوذی به زمین (GPR) برای کاوش باستان‌شناختی استفاده کرده است، با تکنیک‌های دقیق جمع‌آوری و پردازش داده‌ها	Cozzolino et al, 2020. Géosciences.
اهداف اصلی شامل شناسایی قبرها، دیوارها و حفره‌های پنهان با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی برای ارزیابی‌های باستان‌شناسی زیرسطحی است.	کلیسای وارسیا، ساحلی، محیط شهری	این مقاله از آرایه‌های دوقطبی - دوقطبی، گرادیان و قطب - قطب برای پیمایش‌های ژئوفیزیکی در کاوش‌های باستان‌شناختی استفاده کرده است.	Matias et al, 2006.

شده است که پیمایش‌های سه‌بعدی ERT به‌طور فزاینده‌ای رایج و عملی شوند (Bianco et al., 2019). این روش‌های سه‌بعدی با استفاده از ابزارهای جدید برای وارونه‌سازی داده‌ها به‌طور قابل توجهی پیچیده‌تر شده‌اند و

در دهه گذشته، پیشرفت‌های فناوری چشمگیری باعث بهبود قابلیت‌های توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی (ERT) در تحقیقات باستان‌شناسی شده است. توسعه تجهیزات میدانی پیشرفته و برنامه‌های وارونه‌سازی باعث

تازه‌ای در مطالعات باستان‌شناختی گشوده است. این روش بدون نیاز به انجام حفاری‌های گسترده و پرهزینه، امکان شناسایی ساختارهای مدفون، لایه‌های زمین و ویژگی‌های زیرسطحی را با دقت بالا فراهم می‌سازد. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده در محیط نرم‌افزار COMSOL به روشنی نشان می‌دهند که ERT توانایی ارائه تصویری دقیق از توزیع مقاومت الکتریکی در لایه‌های مختلف زمین و رفتار جریان‌های الکتریکی در محیط‌های زیرسطحی را دارد.

افزون بر این، تحلیل پارامترهای مختلف مؤثر بر عملکرد این روش، از جمله نوع و آرایش الکترودها، فرکانس جریان تزریقی و میزان نویز در داده‌ها، نقش مهمی در بهینه‌سازی دقت، وضوح و تفسیر نتایج ایفا می‌کند. در این پژوهش، تأثیر انتخاب مدل‌های هندسی مناسب، از جمله مدل استوانه‌ای، در فرآیند شبیه‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شده است که انطباق هندسه مدل با ویژگی‌های واقعی ساختار مورد مطالعه، می‌تواند منجر به افزایش قابل‌توجه دقت و اعتبار نتایج شود. به‌ویژه در مواردی که با ساختارهای پیچیده یا محیط‌های ناهمگن زمین‌شناختی مواجه هستیم، انتخاب صحیح مدل و پارامترهای ورودی در شبیه‌سازی، اهمیت دوچندان می‌یابد.

در مجموع، روش ERT با بهره‌گیری توأمان از توانمندی‌های شبیه‌سازی عددی و داده‌های میدانی، به ابزاری قدرتمند و غیرمخرب در مطالعات باستان‌شناسی تبدیل شده است. این روش نه تنها در شناسایی ساختارهای پنهان زیرزمینی مؤثر است، بلکه می‌تواند در برنامه‌ریزی حفاری‌های هدفمند و حفاظت از میراث فرهنگی نیز نقش کلیدی ایفا کند. بر این اساس، نتایج این تحقیق به پژوهشگران و متخصصان حوزه باستان‌شناسی توصیه می‌کند که از ظرفیت‌های شبیه‌سازی عددی در کنار روش‌های ژئوفیزیکی، به‌ویژه در محیط‌های پیچیده و آسیب‌پذیر، بهره بگیرند تا ضمن افزایش دقت و بازده مطالعات، از بروز صدمات ناخواسته به محوطه‌های باستانی جلوگیری شود.

امکان بازسازی بهتر توزیع فضایی و شکل اهداف باستان‌شناسی در مناطق کوچک و بزرگ، همچنین در محیط‌های روستایی و شهری را فراهم کرده‌اند (Deiana et al., 2020). یکی از نوآوری‌های برجسته، توسعه سیستم‌های ERT سه‌بعدی غوطه‌ور ایستا و پویا است که اکنون قادر به ارائه مقاطع استراتیگرافی تا عمق ۳-۴ متر زیر بستر دریا هستند، که به‌ویژه در شناسایی و تعیین دقیق حدود و ساختارهای زیرسطحی آثار فرهنگی در محیط‌های زیرآبی مؤثر است (Papadopoulos, 2021). این تکنیک همچنین از طریق ترکیب با دیگر روش‌ها، به‌ویژه اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی در دامنه فرکانس، پیشرفت‌هایی داشته است که کاربردهای آن را در زمینه‌های مختلف زمین‌شناسی و باستان‌شناسی گسترش داده است (Deiana et al., 2020). بهبودهای اخیر روش‌شناختی شامل معرفی توموگرافی مقاومت‌سنجی ظرفیت‌سنجی است که به عنوان یک تکنیک مستقل در تحقیقات و در بررسی‌های باستان‌شناسی نشان داده شده است (Sapia et al., 2021). مطالعات مقایسه‌ای نشان داده‌اند که ERT مدرن نسبت به روش‌های سنتی اندازه‌گیری مقاومت عمودی^۱ رزولوشن فضایی بالاتری ارائه می‌دهد، که آن را برای شناسایی ناهنجاری‌های باستان‌شناسی در مقیاس کوچک به‌ویژه مؤثر می‌سازد (Olatunji et al., 2022). این پیشرفت‌ها از طریق استفاده‌های میدانی متعدد تأیید شده‌اند و پیاده‌سازی‌های موفقیت‌آمیزی در زمینه‌های باستان‌شناسی به ثبت رسیده است (Papadopoulos et al., 2009). تکامل این تکنیک به‌ویژه از طریق بهبود پردازش داده‌ها و قابلیت‌های تجسم، منجر به بازسازی‌های سه‌بعدی دقیق‌تری از ویژگی‌های باستان‌شناسی مدفون شده است (Papadopoulos et al., 2006).

نتیجه‌گیری

کاربرد توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) به عنوان یکی از روش‌های نوین، غیرمخرب و کارآمد ژئوفیزیکی، افق

^۱ vertical electrical sounding

منابع

- tomography in shallow water marine environment for archaeological research. In *Near Surface Geoscience 2016-22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (Vol. 2016, No. 1, pp. cp-495). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Chavez, R. E., Chavez-Hernandez, G., Tejero, A., & Alcantara, M. A. (2011, September). The 'L-Array', a 3D Tool to Characterize a Fracture Pattern in an Urban Zone. In *Near Surface 2011-17th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (pp. cp-253). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Cardarelli, E., Fischanger, F., & Piro, S. (2008). Integrated geophysical survey to detect buried structures for archaeological prospecting. A case history at Sabine Necropolis (Rome, Italy). *Near Surface Geophysics*, 6(1), 15-20.
- Cozzolino, M., Baković, M., Borovinić, N., Galli, G., Gentile, V., Jabučanin, M., Mauriello, P., Merola, P., & Živanović, M. (2020). The contribution of geophysics to the knowledge of the hidden archaeological heritage of Montenegro. *Geosciences*, 10(5), 187.
- Simyrdanis, K., Papadopoulos, N., & Cantoro, G. (2016). Shallow off-shore archaeological prospection with 3-D electrical resistivity tomography: The case of Olous (modern Elounda), Greece. *Remote Sensing*, 8(11), 897.
- Novo, A., Vincent, M. L., & Levy, T. E. (2012). Geophysical surveys at Khirbat Faynan, an ancient mound site in southern Jordan. *International Journal of Geophysics*, 2012(1), 432823.
- Casana, J., Herrmann, J. T., & Fogel, A. (2008). Deep subsurface geophysical prospection at Tell Qarqur, Syria. *Archaeological Prospection*, 15(3), 207-225.
- Berezowski, V., Mallett, X., Ellis, J., & Moffat, I. (2021). Using ground penetrating radar and resistivity methods to locate unmarked graves: a review. *Remote Sensing*, 13(15), 2880.
- Alexakis, D., Agapiou, A., Hadjimitsis, D., & Sarris, A. (2012). Remote sensing applications in archaeological research. *Remote Sensing-Applications*, 435-462.
- Vásconez-Maza, M. D., Martínez-Pagán, P., Aktarakçi, H., García-Nieto, M. C., & Martínez-Segura, M. A. (2020). Enhancing electrical contact with a commercial polymer for electrical resistivity tomography on archaeological sites: A case study. *Materials*, 13(21), 5012.
- Bianco, C., De Giorgi, L., Giannotta, M. T., Leucci, G., Meo, F., & Persico, R. (2019). The Messapic Site of Muro Leccese: New Results from Integrated Geophysical and Archaeological Surveys. *Remote Sensing*, 11(12), 1478.
- Piroddi, L., Calcina, S. V., Trogu, A., & Ranieri, G. (2020). Automated Resistivity Profiling (ARP) to explore wide archaeological areas: The prehistoric site of Mont'e Prama, Sardinia, Italy. *Remote Sensing*, 12(3), 461.
- Milo, P., Vágner, M., Tencer, T., & Murín, I. (2022). Application of geophysical methods in archaeological survey of early medieval fortifications. *Remote Sensing*, 14(10), 2471.
- Di Fiore, B., Mauriello, P., Monna, D., & Patella, D. (2002). Examples of application of tensorial resistivity probability tomography to architectonic and archaeological targets. *Annals of Geophysics*, 45(2).
- Mauriello, P., & Patella, D. (1999). Resistivity anomaly imaging by probability tomography. *Geophysical Prospecting*, 47(3), 411-429.
- Urbini, S., Cafarella, L., Marchetti, M., Chiarucci, P., & Bonini, D. (2007). Fast geophysical prospecting applied to archaeology: results at "Villa ai Cavallacci" (Albano Laziale, Rome) site. *Annals of Geophysics*, 50(3), 291-299.
- Loddo, F., Ranieri, G., Piroddi, L., Trogu, A., & Cogoni, M. (2016, September). On the use of electrical resistivity

- Matias, H. C., Santos, F. M., Ferreira, F. R., Machado, C., & Luzio, R. (2006). Detection of graves using the micro-resistivity method. *Annals of Geophysics*, 49(6).
- Tsourlos, P. I., & Tsokas, G. N. (2011). Non destructive electrical resistivity tomography survey at the south walls of the Acropolis of Athens. *Archaeological Prospection*, 18(3), 173-186.
- Tsokas, G. N., Tsourlos, P. I., Vargemezis, G., & Novack, M. (2008). Non destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea Church in Athens. *Archaeological prospection*, 15(1), 47-61.
- Trogu, A., Ranieri, G., Calcina, S., & Piroddi, L. (2014). The ancient Roman aqueduct of Karales (Cagliari, Sardinia, Italy): Applicability of geophysics methods to finding the underground remains. *Archaeological Prospection*, 21(3), 157-168.
- Moník, M., Lend'áková, Z., Ibáñez, J. J., Muñiz, J., Borell, F., Iriarte, E., Teira, L., & Kuda, F. (2018). Revealing early villages-Pseudo 3D ERT geophysical survey at the pre pottery Neolithic site of Kharaysin, Jordan. *Archaeological Prospection*, 25(4), 339-346.
- Deiana, R., Vicenzutto, D., Deidda, G. P., Boaga, J., & Cupitò, M. (2020). Remote sensing, archaeological, and geophysical data to study the Terramare settlements: The case study of Fondo Paviani (northern Italy). *Remote Sensing*, 12(16), 2617.
- Papadopoulos, N. (2021). Shallow offshore geophysical prospection of archaeological sites in eastern Mediterranean. *Remote Sensing*, 13(7), 1237.
- Sapia, V., Materni, V., Florindo, F., Marchetti, M., Gasparini, A., Voltattorni, N., Civico, R., Giannattasio, F., Miconi, L., Marabottini, M.F., & Urbini, S. (2021). Multi-Parametric Imaging of Etruscan Chamber Tombs: Grotte Di Castro Case Study (Italy). *Applied Sciences*, 11(17), 7875.