

بهره‌گیری از توموگرافی مقاومت الکتریکی در باستان‌شناسی: مطالعه‌ای با رویکرد مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار کامسول

چکیده

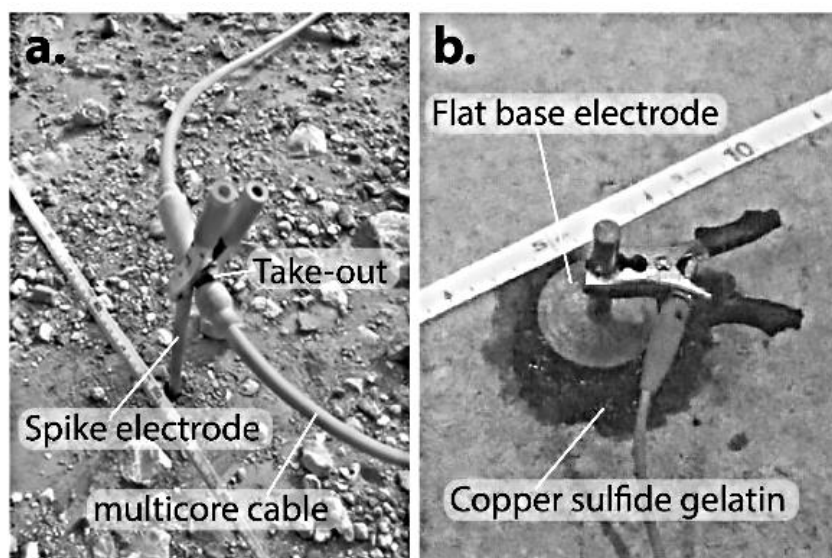
باستان‌شناسی به عنوان دانشی میان‌رشته‌ای، همواره به دنبال روش‌هایی نوین برای کاوش غیرمخرب و دقیق در لایه‌های زیرزمینی بوده است. یکی از روش‌های نوظهور و بسیار کارآمد در این حوزه، توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) است که با بهره‌گیری از تغییرات مقاومت الکتریکی در زیرسطح، امکان شناسایی ساختارهای مدفون، قبرها، زیرساخت‌ها و دیگر شواهد فرهنگی را فراهم می‌سازد. این مقاله با تمرکز بر کاربرد باستان‌شناختی ERT، به تحلیل عددی این روش در محیط شبیه‌سازی پیشرفته‌ی 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 الکتروود به صورت خطی در سطح قرار گرفتند. شبیه‌سازی عددی انجام شده، 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 الکتروودها، 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.

واژگان کلیدی: توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT)، تصویربرداری زیرسطحی، COMSOL، اکتشافات باستانی

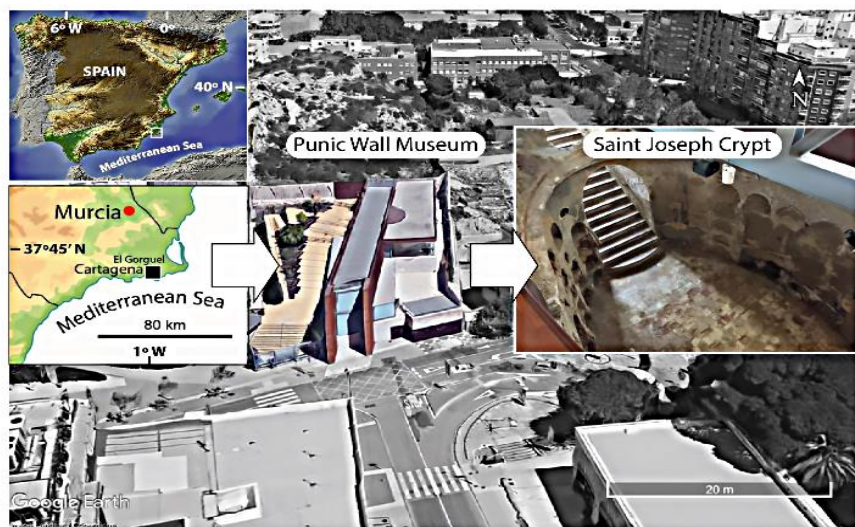
مقدمه

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 الکتروودها 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 اندازه‌گیری شده 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 فاصله‌ی 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 توسعهٔ توموگرافی احتمالاتی که نیازمند فرضیات پیشین درباره‌ی 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 ۰٫۵ 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).

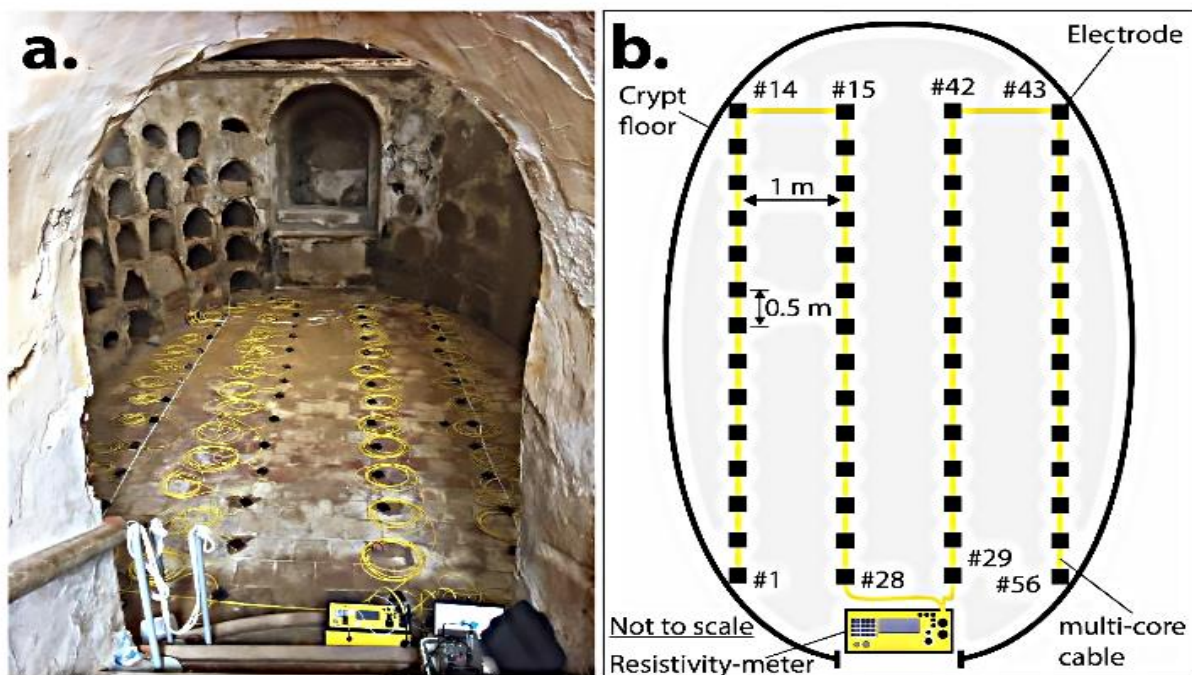


شکل ۱. انواع الکترودهای مورد استفاده در مطالعات توموگرافی مقاومت الکتریکی: (الف) الکترودهای میله‌ای مرسوم (spike electrode)، (ب) الکترودهای تخت (flat-based electrode) (Vásconez-Maza et al., 2020)



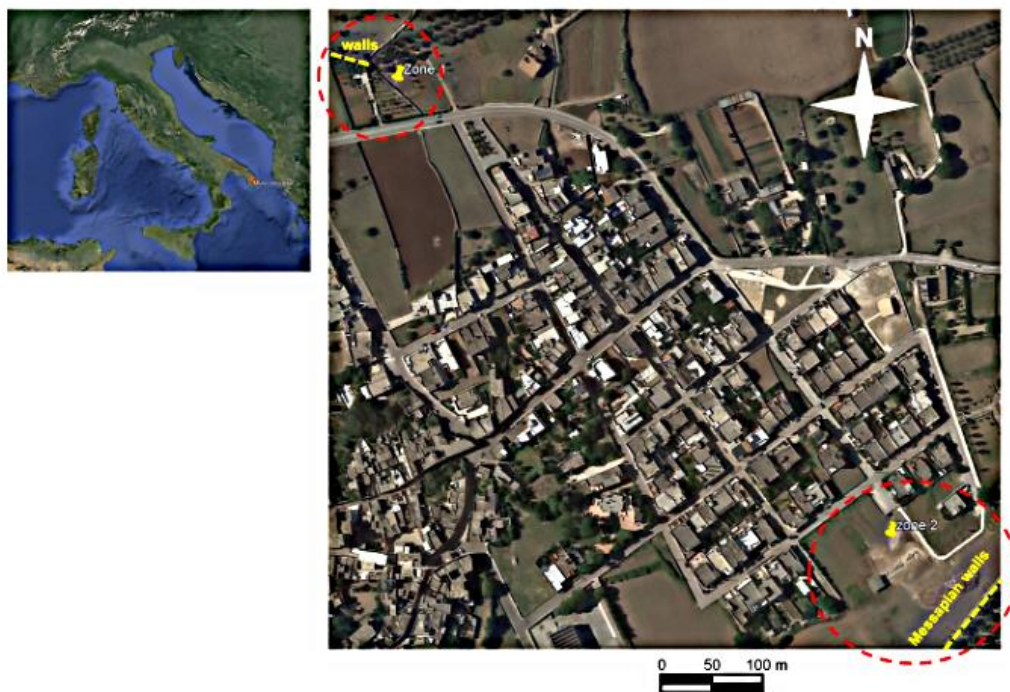
شکل ۲. نمای کلی و موقعیت محل بررسی شده: سرداب سنت جوزف در داخل موزه دیوار پونیک (کارتاخنا، اسپانیا)

(Vásconez-Maza et al., 2020)

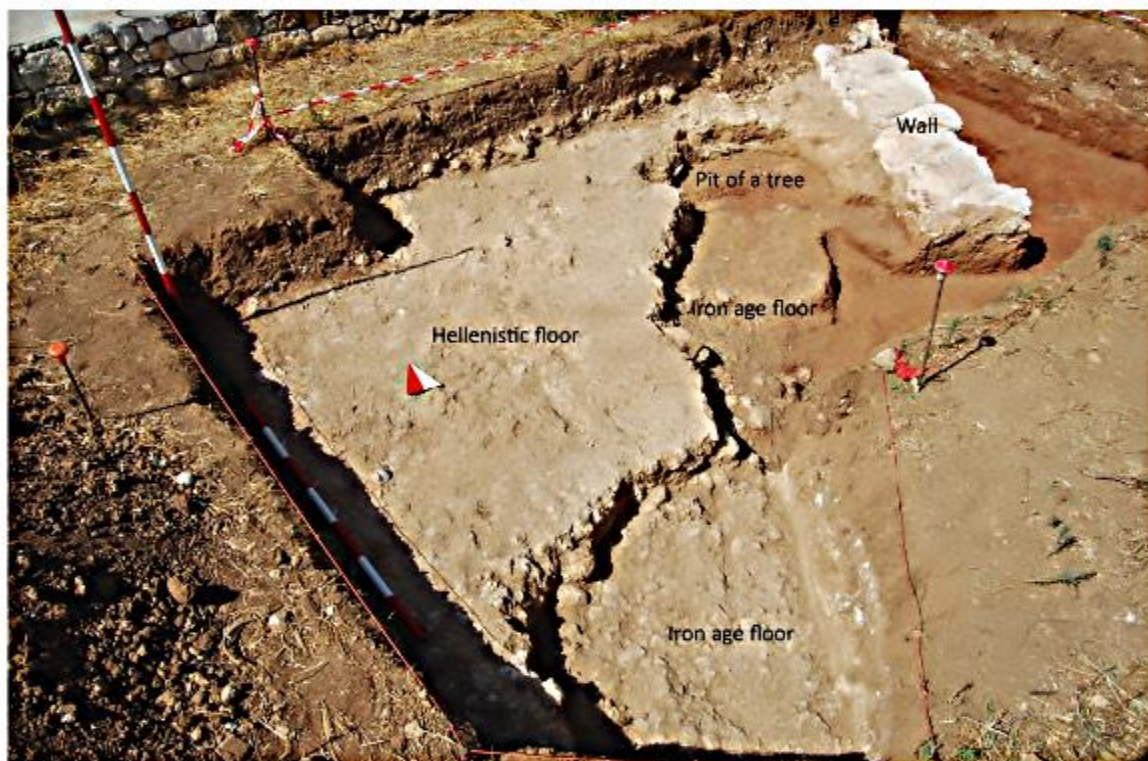


شکل ۳. الف) پیکربندی سه بعدی ERT بر روی کف سرداب سنت جوزف، ب) نمودار نحوه قرارگیری الکترودهای غیرفعال و

کابل ها (Vásconez-Maza et al., 2020)



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



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



a



b

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



a



b

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 ساخته شده باستانی شامل دیوارها، ساختمان‌ها و جاده‌ها، حتی در سایت‌های باستان‌شناسی غرق شده (Simyrdanis et al., 2016). این روش در مکان‌های باستانی مانند تل‌های نواحی خاورمیانه بسیار موفقیت آمیز بوده است، جایی که امکان نقشه‌برداری از ویژگی‌ها در لایه‌های بسیار عمیق و استراتیژی وجود دارد (Casana et al., 2008) (Novo et al., 2012). 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 ویژگی‌هایی مانند دیوارها، ساختارهای زیرزمینی و جاده‌ها را که به دلیل فشار لایه‌های بالایی در عمق قرار دارند، شناسایی کرد.

۲- محل‌های دفن و قبرها

- شناسایی قبرهای پیچیده و دفن‌های ساده از طریق تغییرات مقاومت (Berezowski et al., 2021). این روش به طور موفقیت آمیز گور دامیو دی گوئیس (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 (Matias et al., 2006) (Berezowski et al., 2021).
- 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 کند، مانند دیوارهای مقبره‌ها و تغییرات ناشی از فرآیند تجزیه اجساد، که باعث تغییرات ویژه‌ای در مقاومت خاک و ساختارهای دفن شده می‌شود.

۳- یادمان‌های تاریخی و کلیساها

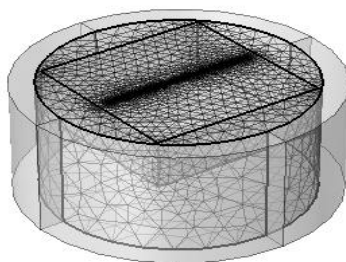
- تحقیق و بررسی یادمان‌های موجود با استفاده از روش‌های غیرمخرب، مانند بررسی‌ها و تحقیق در آکروپولیس آتن (Tsourlos et al., 2011) (Novo et al., 2012). اکتشافات زیر زمین در زیر کف کلیساها به منظور شناسایی فضاهای توخالی، چاه‌های باستانی و سایر ساختارهای پنهان (Tsokas et al., 2008). در این بخش، استفاده از 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 چالش برانگیز با لایه‌های سطحی هدایت شونده (Trogu et al., 2014) (Cozzolino et al., 2020). این روش برای

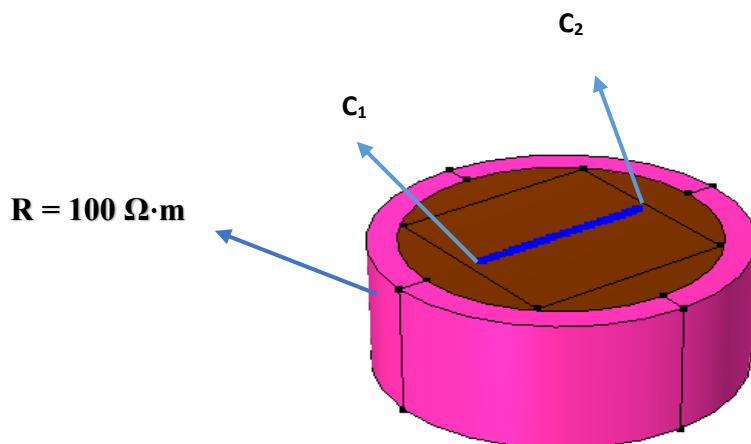
شناسایی و نقشه برداری از زیرساخت های زیرزمینی نظیر آکودوکت ها، که ممکن است در عمق های زیاد و زیر لایه های ضخیم زمین دفن شده باشند، بسیار مفید است و به باستان شناسان این امکان را می دهد که در شرایط سخت، مانند لایه های سطحی که مقاومت بالایی دارند، زیرساخت های باستانی را شناسایی کنند.

فرایند شبیه سازی شامل ایجاد یک مدل زیرسطحی با استفاده از قابلیت های مدل سازی بصری نرم افزار COMSOL است. در این مرحله، هندسه و ویژگی های مواد تشکیل دهنده زیرسطح تعریف می شود و لایه ها، ساختارها و ویژگی های باستان شناختی مورد نظر در مدل گنجانده می گردند. با اختصاص دادن مقادیر مناسب مقاومت الکتریکی به هر ناحیه، پیچیدگی و ناهمگونی زیرسطح به طور دقیق بازنمایی می شود. معادله لاپلاس رابطه بین پتانسیل الکتریکی و توزیع مقاومت در سطح زیرین را بیان می کند.



شکل ۸ ساختار شبکه بندی هندسه محیط شبیه سازی

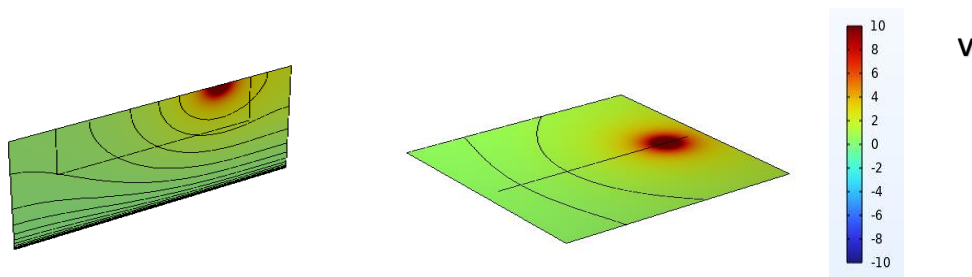
در حالت زمین همگن، معادله لاپلاس به معادله پواسون ساده می شود. معادله پواسون برای هندسه ها و شرایط مرزی ساده، به صورت تحلیلی قابل حل است. با این حال، در شرایط واقعی، توزیع مقاومت ویژه در زیرسطح معمولاً پیچیده و ناهمگن است، و این امر حل تحلیلی را غیرعملی می سازد. برای مقابله با این پیچیدگی، روش های عددی مانند روش اجزای محدود یا روش تفاضل محدود به کار گرفته می شوند. این روش ها زیرسطح را به یک شبکه یا مش تقسیم کرده و معادله حاکم را به صورت عددی برای به دست آوردن توزیع پتانسیل الکتریکی حل می کنند. در شبیه سازی انجام شده، از یک رویکرد عددی برای حل مسئله پیش رو در توموگرافی مقاومت سنجی الکتریکی (ERT) سه بعدی استفاده شد. در این شبیه سازی، زمینی همگن با مقاومت ویژه ای معادل ۱۰۰ اهم متر در نظر گرفته شد. مجموعه ای از ۲۵ الکتروود برای انجام اندازه گیری های ژئوالکتریکی به کار رفت. در فرایند شبیه سازی، جریان الکتریکی به الکتروودها تزریق شده و اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود مشخص با نام های C1 و C2 اندازه گیری شد. مقاومت از طریق نسبت اختلاف پتانسیل به جریان تزریقی محاسبه گردید. با حل عددی مسئله پیش رو در توموگرافی مقاومت سنجی الکتریکی، شبیه سازی درک بهتری از پاسخ زیرسطح ارائه می دهد و امکان محاسبه مقادیر مقاومت ویژه را فراهم می سازد. این فرایند به درک رفتار جریان های الکتریکی در زیرسطح کمک کرده و تفسیر داده های توموگرافی مقاومت سنجی الکتریکی حاصل از برداشت های میدانی واقعی را تسهیل می کند.



شکل ۹. استوانه‌ای با قطر ۴۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر نمایانگر سطح زیرسطح است. در شبیه‌سازی عددی مسئله توموگرافی مقاومت سنجی 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 به دست آمده و مقادیر مقاومت برای پیکربندی انتخاب شده الکتروودها محاسبه می‌گردد. این مقادیر مقاومت سپس با راه حل تحلیلی مقایسه می‌شوند تا دقت شبیه‌سازی عددی ارزیابی شود. این مقایسه، قابلیت اطمینان و دقت شبیه‌سازی عددی را در باز تولید نتایج مورد انتظار در یک زمین همگن با توزیع مقاومت ویژه معلوم نشان می‌دهد. شایان ذکر است که اگرچه برنامه ارائه شده فرض را بر زمین همگن قرار می‌دهد، اما توموگرافی مقاومت سنجی الکتریکی می‌تواند برای شرایط زیرسطحی ناهمگن نیز به کار رود. در چنین شرایطی، توزیع مقاومت به صورت یکنواخت نبوده و مسئله پیش‌رو پیچیده‌تر می‌شود. معادله حاکم بر مسئله پیش‌روی ژئوالکتریکی در توموگرافی مقاومت سنجی الکتریکی در معادله (۱) ارائه شده است که منبع جریان نقطه‌ای الکتروودهای واقع در موقعیت‌های r_{C1} و r_{C2} را نشان می‌دهد.

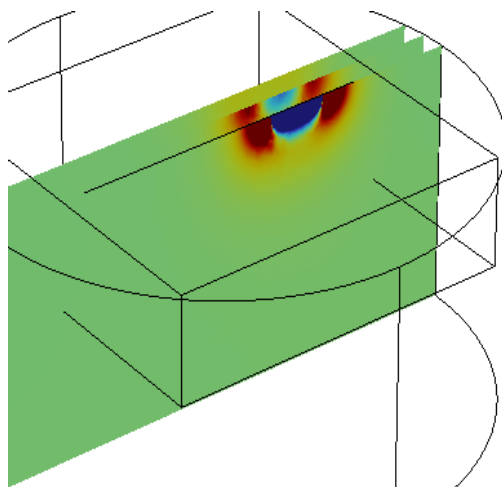
$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = I \cdot \delta(r - r_{C1}) - \delta(r - r_{C2}) \quad (1)$$



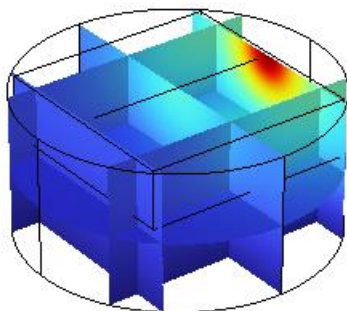
شکل ۱۰. پتانسیل الکتریکی در اطراف جفت الکتروود فعال

پارامترهای مؤثر مورد بررسی شامل پیکربندی الکتروودها، فرکانس جریان اعمال شده، 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 روش توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی ارائه داده و به دانش تنظیمات بهینه برای سناریوها و اهداف مختلف کمک می‌کنند. 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.



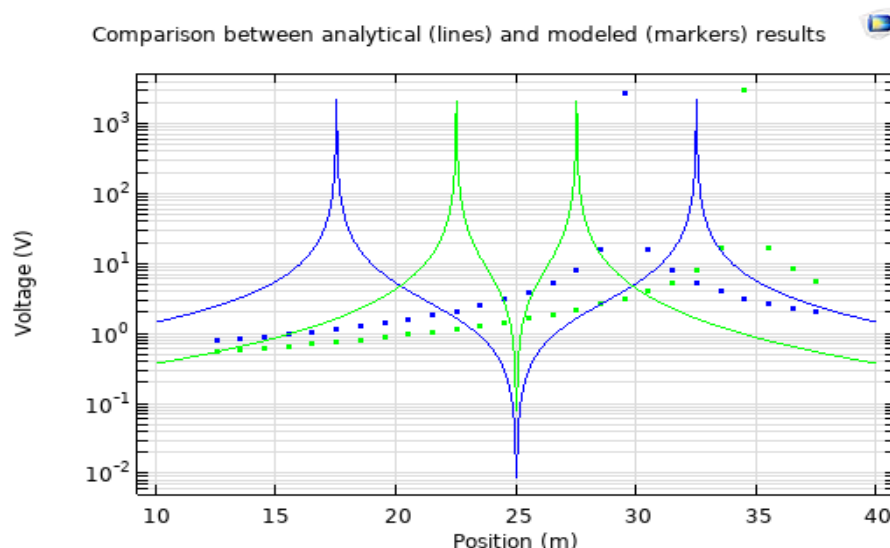
شکل ۱۱. نمودار حساسیت



شکل ۱۲. نمودار سه بعدی نتایج شبیه‌سازی نمونه

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. نتایج

به دست آمده از تحلیل های انجام شده در نرم افزار COMSOL به پیشرفت قابلیت ها و کاربردهای توموگرافی مقاومت سنجی الکتریکی کمک خواهد کرد و مسیر را برای بهبود تحقیقات باستان شناسی، مطالعات زمین شناسی و نظارت محیطی هموار می سازد.



شکل ۱۳. مقایسه بین نتایج تحلیلی استوانه مدل شده توسط ما (خط ها) و مطالعات قبلی مدل جعبه (خط چین)

در شکل ۱۳، نتایج شبیه سازی مدل استوانه ای که در این تحقیق انجام شده است، عملکرد بهتری نسبت به مطالعات قبلی که از مدل جعبه ای استفاده کرده اند، نشان می دهد. این مقایسه نشان می دهد که مدل استوانه ای رفتار زیرسطحی مورد بررسی را دقیق تر نمایان می سازد. نتایج بهتر به دست آمده از مدل استوانه ای نشان می دهد که این مدل ویژگی ها و فرآیندهای فیزیکی اساسی سیستم را به طور مؤثرتری شبیه سازی می کند. این امر می تواند به شکل استوانه ای که با ساختار واقعی زیرسطح تطابق دارد یا به تکنیک های مدل سازی بهبود یافته ای که در شبیه سازی های این پژوهش استفاده شده اند، نسبت داده شود. مقایسه بین مدل استوانه ای و مطالعات قبلی که از مدل جعبه ای استفاده کرده اند، آگاهی ارزشمندی را در مورد دقت و قابلیت اطمینان رویکرد شبیه سازی ارائه می دهد. این مقایسه اهمیت در نظر گرفتن نمای هندسی مناسب و فرضیات مدل سازی به منظور دستیابی به نتایج دقیق تر در تحقیقات ژئوفیزیکی یا ژئوالکتریکی را برجسته می کند. در نتیجه، شبیه سازی توموگرافی مقاومت سنجی الکتریکی با استفاده از نرم افزار COMSOL به عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل پارامترهای مؤثر و نمودارهای مرتبط با آنها عمل می کند. با توانایی در ایجاد مدل های زیرسطحی واقع گرایانه و شبیه سازی سناریوهای مختلف، COMSOL به ما این امکان را می دهد که جزئیات پیچیده توموگرافی مقاومت سنجی الکتریکی را کاوش کرده و درک جامعی از عواملی که بر عملکرد آن تأثیر می گذارند، به دست آوریم.

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 به کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی، شناسایی ساختارهای مدفون مانند دیوارها و ارائه‌ی ارزیابی کلی از ویژگی‌های باستان‌شناختی زیرسطحی است	N/A	پیمایش‌های ژئوفیزیکی غیرتهاجمی با استفاده از ERT سه‌بعدی و EMI همراه با نرم‌افزارها و پروتکل‌های بهبودیافته	Novo et al, 2012.
مستندسازی ویژگی‌های معماری و لایه‌بندی باستان‌شناختی به صورت 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 به‌روزشده 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.
--	---------------------------------	--	---------------------

در دهه گذشته، پیشرفت‌های فناوری چشمگیری باعث بهبود قابلیت‌های توموگرافی مقاومت‌سنجی الکتریکی (ERT) در تحقیقات باستان‌شناسی شده است. توسعه تجهیزات میدانی پیشرفته و برنامه‌های وارون‌سازی باعث شده است که پیمایش‌های سه‌بعدی ERT به طور فزاینده‌ای رایج و عملی شوند (Bianco et al., 2019). این روش‌های سه‌بعدی با استفاده از ابزارهای جدید برای وارونه‌سازی داده‌ها به طور قابل توجهی پیچیده‌تر شده‌اند و 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 ۴-۳ 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، به ویژه 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 روش شناختی شامل معرفی توموگرافی مقاومت‌سنجی ظرفیت‌سنجی است که به عنوان یک تکنیک مستقل در تحقیقات و در بررسی‌های باستان‌شناسی نشان داده است (Sapia et al., 2021). مطالعات مقایسه‌ای نشان داده‌اند که ERT مدرن نسبت به روش‌های سنتی اندازه‌گیری مقاومت عمودی (vertical electrical sounding) 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 در 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، چشم‌اندازی نوین در مطالعات باستان‌شناختی فراهم ساخته 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 می‌آورد. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده در محیط نرم‌افزار COMSOL به روشنی نشان می‌دهند که ERT توانایی ارائه تصاویری 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 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 قابل توجه 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 نقش کلیدی ایفا کند. بر این اساس، نتایج این تحقیق به پژوهشگران و متخصصان حوزه باستان‌شناسی توصیه می‌کند که از ظرفیت‌های شبیه‌سازی‌های عددی در کنار روش‌های ژئوفیزیکی، به‌ویژه در محیط‌های پیچیده و آسیب‌پذیر، بهره‌برداری نمایند تا ضمن افزایش دقت و بازده مطالعات، از بروز صدمات ناخواسته به محوطه‌های باستانی جلوگیری شود.

منابع

- D. Alexakis, A. Agapiou, D. Hadjimitsis, A. Sarris. Remote Sensing Applications in Archaeological Research. 2012.
- M. Vásconez-Maza, Pedro Martínez-Pagán, H. Aktarakçi, M. C. García-Nieto, M. Martínez-Segura. Enhancing Electrical Contact with a Commercial Polymer for Electrical Resistivity Tomography on Archaeological Sites: A Case Study. 2020. Materials.
- Catia Bianco, L. Giorgi, M. Giannotta, G. Leucci, F. Meo, R. Persico. The Messapic Site of Muro Leccese: New Results from Integrated Geophysical and Archaeological Surveys. 2019. Remote Sensing.
- L. Piroddi, S. Calcina, A. Trogu, G. Ranieri. Automated Resistivity Profiling (ARP) to Explore Wide Archaeological Areas: The Prehistoric Site of Mont'e Prama, Sardinia, Italy. 2020. Remote Sensing.
- P. Milo, Michal Vágner, T. Tencer, I. Murín. Application of Geophysical Methods in Archaeological Survey of Early Medieval Fortifications. 2022. Remote Sensing.
- B. D. Fiore, P. Mauriello, D. Monna, D. Patella. Examples of application of tensorial resistivity probability tomography to architectonic and archaeological targets. 2002.
- P. Mauriello, D. Patella. Resistivity anomaly imaging by probability tomography. 1999.
- S. Urbini, L. Cafarella, M. Marchetti, Pino Chiarucci, Davide Bonini. Fast geophysical prospecting applied to archaeology: results at «Villa ai Cavallacci» (Albano Laziale, Rome) site. 2007.
- F. Loddo, G. Ranieri, L. Piroddi, A. Trogu, M. Cogoni. On the use of electrical resistivity tomography in shallow water marine environment for archaeological research. 2016.
- R. Chávez, G. Chavez-Hernandez, A. Tejero, M. A. Alcantara. The 'L-Array', is a 3D Tool to Characterize a Fracture Pattern in an Urban Zone. 2011.

- E. Cardarelli, F. Fischanger, S. Piro. Integrated geophysical survey to detect buried structures for archaeological prospecting. A case history at Sabine Necropolis (Rome, Italy). 2008.
- M. Cozzolino, Mile Baković, Nikola Borovinić, G. Galli, V. Gentile, Marija Jabučanin et al. The Contribution of Geophysics to the Knowledge of the Hidden Archaeological Heritage of Montenegro. 2020. Géosciences.
- K. Simyrdanis, N. Papadopoulos, G. Cantoro. Shallow Off-Shore Archaeological Prospection with 3-D Electrical Resistivity Tomography: The Case of Olous (Modern Elounda), Greece. 2016. Remote Sensing.
- A. Novo, Matthew L. Vincent, T. Levy. Geophysical Surveys at Khirbat Faynan, an Ancient Mound Site in Southern Jordan. 2012.
- Jesse Casana, Jason T. Herrmann, Aaron S. Fogel. Deep subsurface geophysical prospection at Tell Qarqur, Syria. 2008.
- Victoria Berezowski, Xanthé Mallett, Justine Ellis, I. Moffat. Using Ground Penetrating Radar and Resistivity Methods to Locate Unmarked Graves: A Review. 2021. Remote Sensing.
- H. Matias, F. Santos, F. Ferreira, C. Machado, R. Luzio. Detection of graves using the micro-resistivity method. 2006.
- P. Tsourlos, G. Tsokas. Non-destructive Electrical Resistivity Tomography Survey at the South Walls of the Acropolis of Athens. 2011.
- G. Tsokas, P. Tsourlos, G. Vargemezis, M. Novack. Non-destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea Church in Athens. 2008.
- A. Trogu, G. Ranieri, S. Calcina, L. Piroddi. The Ancient Roman Aqueduct of Karales (Cagliari, Sardinia, Italy): Applicability of Geophysics Methods to Finding the Underground Remains. 2014.
- Martin Moník, Z. Lendáková, J. Ibáñez, J. Muñiz, Ferrán Borell, E. Iriarte et al. Revealing early villages – Pseudo-3D ERT geophysical survey at the pre-pottery Neolithic site of Kharaysin, Jordan. 2018. Archaeological Prospection.
- R. Deiana, D. Vicenzutto, G. Deidda, J. Boaga, M. Cupitò. Remote Sensing, Archaeological, and Geophysical Data to Study the Terramare Settlements: The Case Study of Fondo Paviani (Northern Italy). 2020. Remote Sensing.
- N. Papadopoulos. Shallow Offshore Geophysical Prospection of Archaeological Sites in Eastern Mediterranean. 2021. Remote Sensing.
- V. Sapia, V. Materni, F. Florindo, M. Marchetti, A. Gasparini, N. Voltattorni et al. Multi-Parametric Imaging of Etruscan Chamber Tombs: Grotte Di Castro Case Study (Italy). 2021. Applied Sciences.