

شناسایی منطقه آسیب دیده در اثر حفاری تونل‌ها با استفاده از مدل‌سازی

دوبُعدی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

فاطمه رضوی‌راد^۱، احمد قربانی^{۲*} و زهرا فلسفین^۱^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران^۲ استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۴/۷، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۱۲/۱

چکیده

حفاری‌های زیرزمینی باعث تحریک محیط اطراف می‌شوند و این مسئله ایجاد درز و شکاف‌هایی در سنگ‌های سست شده را در پی دارد. شکل، ابعاد و ویژگی‌های این منطقه آسیب دیده در اثر حفاری، در طراحی و ساخت سدهای ژئوتکنیکی و در مخازن زیرزمینی برای نگهداری زباله‌های سمی اهمیت بسزایی دارد. تغییرات مکانیکی منطقه اغتشاش تنش‌های القایی در اثر حفاری، منجر به تغییر در خواص الکتریکی آنها می‌شود. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش (پلاریزاسیون) القایی قادر به پایش و اندازه‌گیری رفتار مکانیکی این منطقه آسیب دیده در اثر حفاری هستند.

یک مدل دوبُعدی مقاومت ویژه الکتریکی برای برداشت‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی روی یک نیم‌رخ کمانی از دیواره گالری‌ها با شکل مقطع متفاوت (نعل اسبی، دایره‌ای) و آرایش‌های الکترونی گوناگون (ونرآلفا، دوقطبی - دوقطبی، شولمبرگر) توسعه داده شد. در این مدل فضای اطراف گالری به چهارضلعی‌هایی تقسیم شده که مقدار هدایت الکتریکی آنها قابل تغییر است.

معادله پواسون برای همه نقاط فضای مدل، با توجه شرایط مرزی از روش اجزای محدود حل می‌شود، و پتانسیل الکتریکی به‌دست می‌آید. برای هر تزریق جریان در دو الکتروود، یک‌بار برنامه اجرا و مقاومت الکتریکی محاسبه می‌شود. شرط مرزی نیومن برای سطح درونی و بیرونی در نظر گرفته شده است. سطح بیرونی دورتر از دیواره گالری است. مدل‌سازی (مدل پیش‌رو) ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار کمسول اسکریپت صورت گرفته و کدهای مورد نیاز در محیط «مطلب» نوشته شده است. در طول مدل‌سازی از یک فایل ورودی که محل قرارگیری هر چهار الکتروود را برای هر آرایش الکتروودی طبق برداشت تعیین می‌کند، استفاده شده است. سرانجام با استفاده از این برنامه، شبه‌مقطع مقاومت ویژه ظاهری محاسبه می‌شود.

مدل پیش‌گفته برای برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی روی یک نیم‌رخ کمانی با ۴۳ الکتروود (با فواصل مساوی ۲۰ سانتی‌متر) چیده شده بر کف و دیواره‌های گالری در سازند رُسی در سایت آزمایشگاهی تورنمیر واقع در جنوب فرانسه به‌کار گرفته شد. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی نشان می‌دهد که، مقطع تفسیر شده حاصل از مدل‌سازی معکوس دستی، با نتایج برداشت توموگرافی از روی نیم‌رخ خطی برداشت شده از کف تونل، انطباق خوبی دارد (وجود یک منطقه با مقاومت ویژه زیاد، ضخامت کمتر از ۵۰ سانتی‌متر). نتایج نشان می‌دهد که، توموگرافی مقاومت ویژه قادر به تشخیص تغییرات مقاومت ویژه در اعماق نزدیک به سطح گالری است و عمق بررسی به شعاع گالری بستگی دارد و بیشترین مقدار آن با شعاع گالری برابر است.

واژه‌های کلیدی: مقاومت ویژه الکتریکی، توموگرافی الکتریکی، اجزای محدود، معادله پواسون

*Corresponding author:

aghorbani@yazduni.ac.ir

*نگارنده رابط:

Identifying excavation damaged zones using 2D electrical resistivity tomography modeling

Fatemeh Razavi Rad¹, Ahmad Ghorbani^{1*} and Zahra Falsafin¹

¹*Department of Mining and metallurgical Engineering, Yazd University, Iran*

(Received: 28 December 2010, accepted: 28 June 2011, available online: 20 February 2012)

Summary

Underground excavations provoke in their vicinity a region where the rock is disturbed, i.e., loosened due to micro as well as macro fractures. The shapes, dimensions, and properties of such so-called excavation damaged zones (EDZ) are of increasing importance for the planning and construction of geotechnical barriers in underground repositories for toxic and problematic wastes.

Dynamic stability assessment of rocks after underground excavation is important. Mechanical changes related to an excavation damage zone (EDZs) leads to changes the physical properties of rocks. In fractured and unsaturated materials, resistivity is sensitive not only to the matrix electrical properties but also to the saturation of the water phase and to the density and orientation of cracks. Recent studies show that electrical resistivity tomography (ERT) and induced polarization (IP) methods are capable of monitoring the mechanical behaviour of EDZs.

ERT and IP methods are performed in the galleries which are excavated in clay-rocks of the Tournemire test site located in the south of France. The aim of these geophysical investigations is the characterization of EDZ zones and hydro-mechanical behaviour. ERT is performed for an arc profile on the walls of the gallery, with 43 electrodes arranged on the floor and wall with a distance of 20 cm between them. Non-polarizing electrodes of Cu/CuSO₄ were used. Interpretation of the ERT section on the straight line profile, carried out on the floor of the tunnel, confirmed the existence of a high electrical resistivity zone near the surface (a fractured and partially saturated zone with a depth of 50 cm).

A 2D electrical resistivity model was developed to perform a tomography survey for the arc profiles on the walls of the underground excavations (horseshoe section). All the Wenner, dipole-dipole, and Schlumberger electrode arrays can be used for ERT surveying.

Current and potential electrodes can be arranged on the floor, walls and ceiling of the tunnel, with equal intervals. A finite element method was performed in order to solve the Poisson equation for all points of the model space with respect to boundary conditions. The finite element approach involves solving a discretized form of the weak formulation of the Poisson equation. For each quadripole (two current and two measured electrodes), the code is run once and the electrical resistance can be calculated. The geometric factor of electrical array can be calculated when the code is run for a homogeneous electrical conductivity earth around the tunnel.

The space model surrounding the gallery (up to 10 times the distance to the tunnel diameter) is divided into quadrilaterals whose conductivity can be changed. The Neumann boundary condition is considered for the inner and outer surface of the tunnel wall. The outer surface is far from the walls of the gallery.

The code (Forward model) is programmed in COMSOL Script software using Matlab language. An input file was used that determines the location of each quadripole for each

electrode array according data acquisition. Eventually, the apparent resistivity pseudo-section is calculated from the code.

An interpreted cross-section, obtained from manual inverse modelling using the code, shows good conformity with the results of the tomography obtained from the straight profile taken on the floor of the tunnel. The results also show that ERT is capable of investigating the resistivity changes near the surface of tunnel walls. The depth of the investigation is up to the tunnel radius.

Key words: Electrical resistivity tomography (ERT), Finite element method (FEM), Poisson equation

۱ مقدمه

شرایط مساعدی برای دفن زباله‌های پرتوزا هستند. در این نوع از سنگ‌ها، ایجاد و توسعه منطقه آسیب دیده در اثر حفاری، با پارامترهای زمین‌شناسی و هیدرومکانیکی کنترل شده است. این پارامترها عبارت‌اند از: میدان تنش اولیه، ویژگی‌های ماده (ناهمسانگردی مواد)، فرایندهای حفاری، وجود مناطق شکستگی طبیعی یا ناهمگنی‌های محلی توده‌سنگ، و هندسه گالری. تغییرات دما و رطوبت جو تونل‌ها در فصل‌های متفاوت کنترل می‌شود (بلوملینگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ بوسارت و همکاران، ۲۰۰۲؛ متری و کبریا، ۲۰۰۷؛ تیسنگ و همکاران، ۲۰۰۵). فرایندهای خشک شدن و مرطوب شدن منطقه آسیب دیده در اثر حفاری باعث کاهش یا افزایش خواص مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها می‌شود (قربانی و همکاران، ۲۰۰۹).

به منظور تشخیص تغییر شکل برجای منطقه آسیب دیده در اثر حفاری، روش‌های ژئوفیزیکی غیر تخریبی از اهمیت خاصی برخوردارند. تحقیقات اخیر تایید کرده است که روش‌های ژئوفیزیکی می‌توانند منطقه آسیب دیده در اثر حفاری را با دقت (قدرت تفکیک) قابل قبولی نشان دهند و بنابراین دید قابل توجهی برای فهم تغییر شکل ناپایدار (زودگذر) فراهم کنند (اسچاستر و همکاران، ۲۰۰۱؛ اسپایش و ایزنبلاتر، ۲۰۰۱؛ ژیرت و همکاران، ۲۰۰۶؛ کوروسویچ و یارمانکی، ۲۰۰۴؛ مالگرن و همکاران، ۲۰۰۷؛ نیکولین و همکاران، ۲۰۰۸؛ نیکولین و همکاران، ۲۰۱۰). روش لرزه‌ای غیرفعال نشان می‌دهد که

بررسی خواص سنگ‌ها بعد از حفاری فضاهای زیرزمینی، یکی از مهم‌ترین مسائل در ارزیابی پایداری دینامیکی اطراف تونل است. منطقه آسیب دیده در اثر حفاری (Excavation Damaged Zone: EDZ)، محدوده‌ای از سنگ‌های اطراف فضاهای زیرزمینی است که از سطح آن شروع و تا جایی که خواص فیزیکی، هیدرومکانیکی سنگ‌ها در اثر حفاری تغییر می‌کنند، ادامه می‌یابد. این تغییرات به سبب توزیع مجدد تنش‌ها پس از حفاری رخ می‌دهد. توزیع مجدد تنش‌ها، درز و شکاف‌های جدید ایجاد می‌کند که در نهایت تنش‌های اصلی برجا را مغشوش می‌کنند (ساتو و همکاران، ۲۰۰۰). به‌رحال این تغییرات در اجرای فضاهای زیرزمینی موثر است و سبب افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و امنیت افراد و تجهیزات می‌شود.

بررسی منطقه آسیب دیده در اطراف دیواره تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی ناشی از حفاری اهمیت ویژه‌ای دارد. در حقیقت اختلال و آسیب ناشی از حفاری در منطقه نزدیک به سطح فضاهای زیرزمینی می‌تواند ویژگی‌های مطلوب سنگ‌ها را تغییر دهد: سنگ میزبان بخشی از خاصیتش بر دیواره را از دست می‌دهد (بلوملینگ و همکاران، ۲۰۰۷). بررسی ایجاد و توسعه منطقه آسیب‌دیده در اثر حفاری در سنگ‌های رسی، از جمله تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه است. سنگ‌های رسی به دلیل قابلیت نفوذپذیری کم و توانایی جذب مقدار زیادی یون، به طور ذاتی دارای

که در آن، δ تابع دیراک، I_q جریان در الکتروود جریان قرار گرفته در موقعیت r_q ، تعداد الکتروودهای جریان و σ رسانایی الکتریکی ($\sigma = 1/\rho$) است. شرط مرزی نیومن با $J_n = -\sigma \nabla V \cdot n$ و شرط مرزی دریکله با $V = \bar{V}$ نشان داده می‌شود. J_n بردار چگالی جریان عمود بر سطح \bar{V} مقدار متوسط پتانسیل در مرز دریکله است

برای بسیاری از هندسه‌های ساده، حل تحلیلی معادله فوق وجود دارد. در حالات پیچیده‌تر حل عددی با استفاده از روش اجزای محدود به کار می‌رود. یک صورت از معادله پواسون در اجزای محدود، با معادله (ماراسکات و همکاران، ۲۰۰۸)

$$\int_V \sigma \nabla V \cdot \nabla \delta V dv + \int_{\Gamma_N} J_n \delta V d\Gamma = \sum_q I_q \delta V(r_q) \quad (2)$$

نشان داده می‌شود، که در آن، J_n شرط مرزی نیومن در فصل مشترک محیط مورد بررسی و هوا است ($J_n=0$). شرط مرزی دریکله برای نقاط خیلی دور از الکتروودها در نظر گرفته می‌شود. روش اجزای محدود صورت گسسته معادله ۲ را حل می‌کند. فرایند گسسته کردن و جمع سهم همه اجزا به شکل دستگاه خطی $Kp = s$ خلاصه می‌شود که در آن K یک ماتریس بزرگ، اسپارس (*sparse*) متقارن حاوی اطلاعات هندسی و توزیع مقادیر رسانایی است، P بردار محتوی مقادیر میدان پتانسیل محاسبه شده و S بردار منبع است. حل معادله ۲ مقادیر پتانسیل در همه گره‌های شبکه (بردار p) را به دست می‌دهد.

افزایش انتشار امواج صوتی مربوط به دسته‌بندی ریزترک‌ها در منطقه آسیب دیده در اثر حفاری است (اسپاینس و ایزنبلاتر، ۲۰۰۱). روش‌های لرزه‌ای فعال منجر به نتایج قابل قبولی می‌شود، اما آنها به حفاری گمانه‌های شعاعی نیاز دارند که باعث آسیب بیشتری به توده سنگ می‌شود (مالمگرن و همکاران، ۲۰۰۷؛ نیکولین و همکاران، ۲۰۰۸).

پژوهش‌های اخیر روشن ساخته است که توموگرافی الکتریکی، روشی مناسب برای بررسی منطقه آسیب دیده در اثر حفاری است (کوروسویچ و یارمانکی، ۲۰۰۴). توموگرافی مقاومت ظاهری (امپدانس الکتریکی) دارای مزیت‌های روش غیرتخریبی است و روشی کم هزینه است که اجازه بررسی آسان حجم بزرگی از منطقه آسیب دیده در اثر حفاری را می‌دهد. برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی دو بُعدی صورت گرفته روی دیواره گالری در سازند رُسی مونت تری نشان داده است که تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی دیواره گالری تابع تغییر در رطوبت جو داخل گالری است (ژیبرت و همکاران، ۲۰۰۶).

در این پژوهش با استفاده از داده‌های مقاومت الکتریکی روی یک نیم‌رخ کمانی در گالری شرقی ۹۶ از سایت تورنمیر فرانسه برداشت شده است، به توسعه مدل‌سازی دو بُعدی مقاومت ویژه الکتریکی روی نیم‌رخ‌های کمانی شکل پرداخته می‌شود.

۲ مدل‌سازی دو بُعدی مقاومت ویژه الکتریکی

۱-۲ معادلات حاکم

در هر مدل‌سازی مقاومت ویژه الکتریکی، میدان پتانسیل V در یک محیط از حل معادله پواسون به دست می‌آید (ماراسکات و همکاران، ۲۰۰۸):

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = \sum_q I_q \delta(r - r_q) \quad (1)$$

۲-۲ مدل‌سازی عددی با به کار بردن نرم‌افزار

کمسول

با توجه به اینکه در این پژوهش، کار مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کمسول (Cmsol نسخه 3/4) صورت گرفته است، ابتدا، به‌طور مختصر به شرح این نرم‌افزار پرداخته می‌شود.

نمی‌کند. مرز خارجی در فاصله به اندازه کافی دور، جایی که شرط مرزی دریکله اعمال می‌شود، قرار دارد. پتانسیل الکتریکی روی این مرز صفر در نظر گرفته شده است. اغتشاش در پتانسیل الکتریکی در فواصل بزرگ‌تر از ۱۰ برابر قطر گالری قابل صرف‌نظر کردن است (ژیرت و همکاران، ۲۰۰۶). سطح بین مرز داخلی و خارجی به تعدادی سلول تقسیم شده است که مقادیر رسانایی آنها در طول مدل‌سازی ممکن است تغییر کنند. دیواره گالری به تعداد کل الکترودهای قرار گرفته روی آن تقسیم شده و به همان تعداد، سلول ایجاد شده است. این سلول‌ها از تقسیم محیط (بین مرز داخلی و خارجی) به لایه‌های موازی با دیواره گالری به دست می‌آیند. تعداد سلول‌ها در هر لایه برابر است. ضخامت این سلول‌ها در نزدیکی دیواره گالری کم است و به تدریج طی چند مرحله افزایش می‌یابد، به طوری که در نزدیکی مرز خارجی سلول‌ها دارای بزرگ‌ترین ابعاد خود هستند (شکل ۱).

پس از مشخص‌بندی فضای بلوک‌بندی، معادله پواسون با در نظر گرفتن شرایط مرزی به روش اجزای محدود حل می‌شود و پتانسیل در همه فضای مدل، از جمله در محل الکترودهای پتانسیل به دست می‌آید و مقاومت الکتریکی برای هر چهار قطبی جریان و پتانسیل محاسبه می‌شود. نحوه انتخاب الکترودهای جریان و پتانسیل از بین الکترودهای قرار گرفته روی دیواره تونل، با فراخوانی یک فایل به داخل برنامه اصلی صورت می‌گیرد. یک بار با در نظر گرفتن رسانایی الکتریکی همگن در اطراف تونل، فاکتور هندسی آرایش برای هر چهار قطبی، با حل معادله به دست می‌آید. سپس مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری برای هر دسته از الکترودهای جریان و پتانسیل با در نظر گرفتن فاکتور هندسی آرایش محاسبه می‌شود. نحوه انتخاب چهار قطبی‌ها در هر بار تزریق، با فایل ورودی به برنامه وارد می‌شود و در نهایت شبه‌مقطع مقاومت ویژه ظاهری محاسبه می‌شود. انتخاب ابعاد مشخص

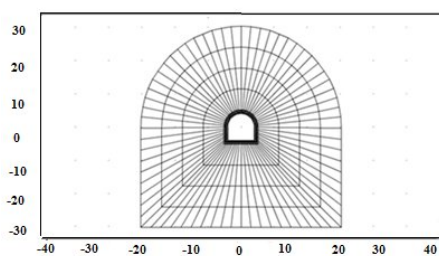
نرم‌افزار کمسول مولتی فیزیک برنامه‌ای برای مدل‌سازی و حل انواع مسائل علمی و مهندسی براساس معادلات مشتق جزئی (PDEs) است. با توجه به توانایی‌های این نرم‌افزار می‌توان به راحتی مدل‌های معمولی برای یک حالت فیزیکی را به مدل‌های چندگانه فیزیکی تبدیل کرد. این نرم‌افزار، ساخت مدل‌ها را با تعریف کمیت‌های فیزیکی مانند خصوصیات اجسام، منابع، بار الکتریکی و جریان الکتریکی ممکن می‌سازد. در هنگام استفاده از برنامه‌های کاربردی می‌توان از انواع متفاوت آنالیزها استفاده کرد که این آنالیزها عبارت‌اند از آنالیزهای غیر قابل تغییر، آنالیزهایی که وابسته به زمان هستند، آنالیزهای خطی و غیرخطی و آنالیزهای بردارهای ویژه.

نرم‌افزار کمسول مولتی فیزیک برای حل معادلات مشتق جزئی از روش اجزای محدود استفاده می‌کند. این نرم‌افزار آنالیز اجزای محدود را به همراه مشخص‌بندی به انجام می‌رساند و برای کنترل خطا از انواع حل‌کننده‌های عددی استفاده می‌کند. یکی از قابلیت‌های این نرم‌افزار این است که در مدت‌زمان کوتاهی می‌توان مدل موردنظر را ایجاد کرد. کمسول مولتی فیزیک قادر به طراحی مدل‌های هندسی در یک بُعد، دو بُعد و سه بُعد است. در برنامه کمسول می‌توان از زبان کمسول اسکریپت (Comsol Script) یا زبان MATLAB برای تعریف خصوصیات اجسام، منابع و موقعیت مرز اجسام استفاده کرد.

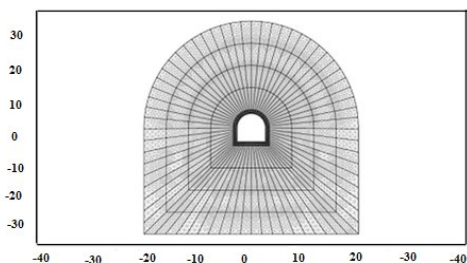
بر پایه اجزای محدود، یک مدل عددی مقاومت ویژه الکتریکی دو بُعدی عرضه شده است. اجرای مدل عددی مقاومت ویژه بحث شده در بخش قبلی با نرم‌افزار کمسول اسکریپت صورت گرفت و شبکه‌بندی بین دو مرز داخلی و خارجی عملی شد. مرز داخلی شامل دیواره گالری است. از میان این مرز به جز در محل الکترودهای جریان A و B (شرط مرزی نیومن) هیچ‌گونه جریانی عبور

فاصله زاویه‌ای بین الکترودهای تزریق جریان الکتریکی A و B بیشتر شود، عمق شعاعی ناحیه معرف اندازه‌گیری افزایش می‌یابد. موقعیت الکترودهای جریان (A و B) و پتانسیل (M و N) تعیین‌کننده موقعیت عمقی نقطه اندازه‌گیری شده هستند. مقاومت ویژه ظاهری روی خط عمود بر فاصله مستقیم بین الکترودهای جریان و در نصف این فاصله برای آرایش‌های الکترودی ونر و شولمرگر در نظر گرفته شد. برای آرایش الکترودی دو قطبی-دو قطبی، مقاومت ویژه ظاهری روی خط عمود بر خط واصل مرکز الکترودهای جریان و پتانسیل و در فاصله نصف آن در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری مقاومت معمولاً با تزریق جریان به داخل زمین از راه دو الکتروود جریان (A و B) و اندازه‌گیری نتایج اختلاف پتانسیل (ولتاژ) با دو الکتروود پتانسیل (M و N) صورت می‌گیرد. با استفاده از مقادیر جریان (I) و ولتاژ (V)، مقدار مقاومت ویژه ظاهری ρ_a (برحسب اهم متر) محاسبه شده است:

$$\rho_a = k \Delta V / I \quad (3)$$



شکل ۱. نمایش بلوک‌بندی تونل نعل اسبی.



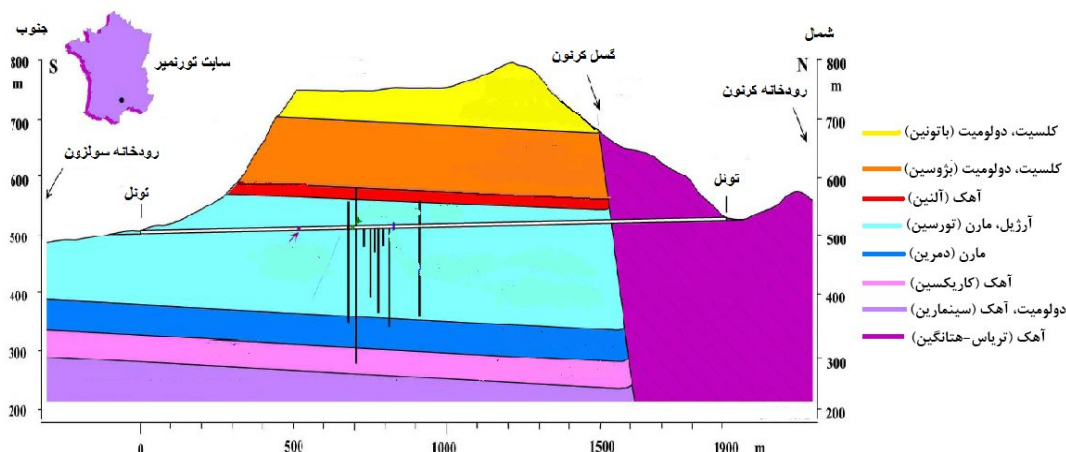
شکل ۲. نمایش مش‌بندی تونل نعل اسبی.

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در حل مسئله به روش اجزای محدود است. در این مسئله مش‌بندی با ابعاد متفاوت برای زمینی با مقاومت ویژه ۱ اهم متر انتخاب و پس از حل آن، مش‌بندی با ابعاد بهینه‌گزی‌نش شد. ابعاد مش‌بندی مناسب، با حل مدل ذکر شده، برای بلوک‌های با مقاومت ویژه یکسان و با در نظر گرفتن خطای به اندازه کافی کوچک به دست آمد (شکل ۲). در این نرم‌افزار شاخص چگالی مش‌بندی با اعداد ۱ تا ۹ مشخص می‌شود. متراکم‌ترین مش‌بندی با عدد ۱ و کمترین چگالی با عدد ۹ نشان داده می‌شود. چگالی مش‌بندی و دقت حل به تعداد بلوک‌های تعریف شده در مدل نیز ارتباط دارد. در مرحله مش‌بندی فضای مدل، چگالی‌های متفاوت اعمال و نتایج بررسی شد. حل مسئله با چگالی مش‌بندی ۱ بسیار زمان‌بر بود. پتانسیل‌های محاسبه شده برای نقاط گوناگون مدل با چگالی‌های مش‌بندی ۱ و ۵ حدود ۱ درصد تفاوت داشت. این امر به دلیل تراکم زیاد بلوک‌های در نظر گرفته شده برای مدل، به خصوص در نزدیکی دیواره گالری است. از طرف دیگر سرعت اجرای مدل با چگالی مش‌بندی مدل بسیار بالاتر از آن در حالت چگالی ۱ است. در نهایت چگالی شبکه بندی (مش) ۵ انتخاب شد. بدین ترتیب مدل‌سازی برای برداشت مقاومت ویژه الکتریکی با هر نوع آرایش الکترودی امکان‌پذیر است.

۳-۲ شبه‌مقطع مقاومت ویژه الکتریکی روی نیم‌رخ

کمانی

نتایج برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری را می‌توان به دو صورت مقاطع تفسیر شده و شبه‌مقاطع نمایش داد. شبه‌مقطع، یک مقطع واقعی به دست آمده از توموگرافی الکتریکی نیست، بلکه یک روش برای نمایش اندازه‌گیری‌های الکتریکی است. در این روش داده‌ها به منزله تابعی از موقعیت الکتروود ترسیم می‌شوند. روش مرتب‌سازی مکانی داده‌ها بدین صورت است که هرچه



شکل ۳. زمین‌شناسی بخشی از سایت آزمایشگاهی تورنمیر (کبررا و همکاران، ۲۰۰۱).

ضخامت دارند. سازند میانی که شامل مارن و سنگ‌های رُسی است و دارای ضخامت ۲۵۰ متر است (کبررا و همکاران، ۲۰۰۱).

گالری ۹۶ در ۱۹۹۶ به منظور بررسی پدیده اشباع شدگی و غیراشباع شدگی سنگ‌های رُسی، حفاری شده است. این گالری شکل نعل اسبی با ارتفاع ۳/۷ متر دارد و عرض آن در امتداد خط کف زمین ۴ متر است. امتداد آن در جهت شرقی-غربی با ۳۰ متر طول است (کبررا و همکاران، ۲۰۰۱).

تعداد ۴۳ الکتروود با فاصله مساوی ۲۰ سانتی‌متر روی یک نیم‌رخ کمانی در کف و دیواره‌های گالری قرار داده شد (شکل ۴). برداشت مقاومت ویژه الکتریکی با دستگاه سیسکال پرو (Syscal pro) و با استفاده از سه آرایش الکتروودی ونر آلفا، ونر-شلومبرگر و دو قطبی- دو قطبی صورت گرفت.

در این گالری علاوه بر نیم‌رخ کمانی، یک نیم‌رخ خطی مقاومت ویژه الکتریکی نیز برداشت شده است. نیم‌رخ خطی در کف گالری در جهت شرقی- غربی و به موازات محور اصلی گالری است و همانند نیم‌رخ کمانی، روی این نیم‌رخ نیز، سه آرایش ونر آلفا، ونر-شلومبرگر و دو قطبی- دو قطبی برداشت شده است. این

که در آن، k فاکتور هندسی است. برای محاسبه فاکتور هندسی، مقاومت ویژه (ρ) محیط اطراف تونل، برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. الکتروودهای جریان و پتانسیل روی دیواره تونل چیده شده و مطابق توالی برداشت داده‌ها با اجرای مدل عددی و تزریق جریان ۱ آمپر در الکتروودهای جریان، اختلاف پتانسیل ΔV بین الکتروودهای پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود. در این حالت فاکتور هندسی آرایش برابر است با $k = 1/\Delta V$.

۳ کاربرد روش برای داده‌های واقعی سایت تورنمیر
سایت تورنمیر یک تونل راه آهن قدیمی با مقطع نعل اسبی است که در سازند رسی تورنمیر فرانسه حفاری شده است. این سایت در حکم یک سایت آزمایشی به منظور مطالعه ویژگی‌های محصور کننده سنگ‌های رُسی برای تحقیقات در زمینه انتخاب محل مناسب برای دفن زباله‌های سمی مانند زباله‌های هسته‌ای که اثرات خطرناک زیست‌محیطی طولانی‌مدت دارند، انتخاب شده است. این سایت در جنوب فرانسه، واقع است. چینه‌شناسی عمومی توده سنگ تورنمیر (شکل ۳) شامل سه سازند عمده است:

سازند پایینی و سازند بالایی که شامل سنگ‌های آهکی و دولومیتی هستند و هر کدام حدود ۳۰۰ متر

که وجود ترک‌های جدید، پس از حفاری، احتمالاً به دلیل برهم خوردن آرایش تنش‌های قدیمی و یا فعلی رخ داده است. این ترک‌های قائم، روی کف زمین قابل رویت هستند که دهانه آنها دارای مقیاس میلی‌متری است و به شکاف‌های (دهانه) بزرگ در مقیاس متریک توسعه یافته‌اند. ثانیاً، ترک‌های پر شده با کلسیت، در کف زمین (دارای ابعاد دهانه ترک‌های جدید تشکیل شده هستند) و همچنین، در انتهای گالری، روی دیواره (شکاف در مقیاس سانتی‌متر) قابل رویت هستند. در نهایت شکاف‌های غیراشباع (موازی با لایه‌بندی) روی دیواره‌های گالری قابل رویت‌اند که با توجه به تغییرات فصلی اندازه دهانه این درز و شکاف‌ها تغییر می‌کند. در زمستان، ترک‌های غیراشباع تا ۲ میلی‌متر باز می‌شوند، در حالی که در تابستان، به دلیل هوای مرطوب، به هم نزدیک می‌شوند.

نیم‌رخ شامل ۴۸ الکتروود با فاصله الکتروودی ۲۰ سانتی‌متر است و طول کلی نیم‌رخ ۹/۴۰ متر است. داده‌های برداشت شده روی این نیم‌رخ با نرم‌افزار رز تو دی اینو (*Res2Dinv*) معکوس شد. نتایج حاصل از این معکوس‌سازی روشن ساخت که یک منطقه تقریباً پیوسته با مقاومت ویژه بالای ۴۰۰ اهم متر و ضخامت کمتر از ۵۰ سانتی‌متر از سطح گالری مشاهده می‌شود. با توجه به مشاهدات قبلی روی نمونه‌های مغزه (متری و کبررا، ۲۰۰۷) و اندازه‌گیری‌های الکتریکی آزمایشگاهی (کسنزا و همکاران، ۲۰۰۷)، این منطقه مربوط به یک بخش غیراشباع با مقاومت ویژه زیاد است که در اثر حفاری، از لحاظ مکانیکی آسیب دیده است.

اطلاعات اولیه مربوط به ناپیوستگی‌ها نشان می‌دهد



شکل ۴. نیم‌رخ کماتی برداشت شده در گالری شرقی ۹۶-سایت.

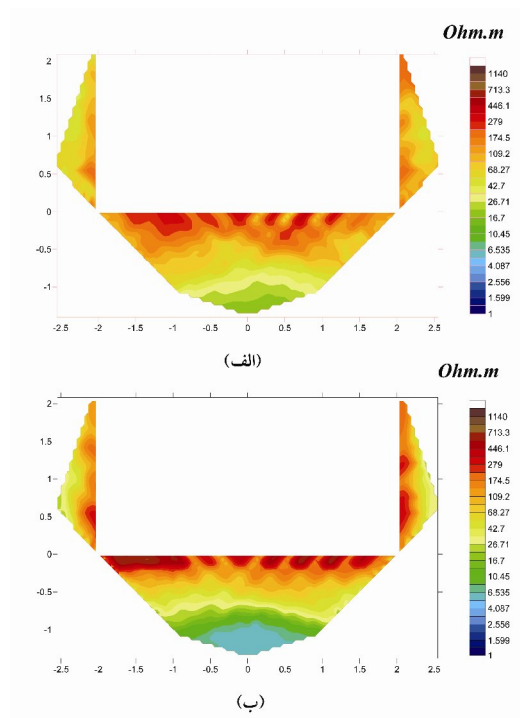
تونل در دو طرف دیواره تونل چیده شده‌اند (۴۳ الکتروود) و برداشت توموگرافی، الکتریکی است، تعداد ۲۸۷ تزریق در حالت آرایش الکتروودی و نر، ۴۱۶ تزریق در حالت آرایش الکتروودی شلومبرگر و ۳۹۰ تزریق با آرایش الکتروودی دوقطبی-دوقطبی صورت پذیرفت. لذا به همین تعداد نیز معادله پواسون حل شده است. اجرای این مدل برای آرایش الکتروودی و نر آلفا با رایانه‌ای با مشخصات CPU T8300, 2/4 GHz، ۶ دقیقه صورت گرفته است. این امر نشان می‌دهد که مدل پیش‌رو حل شده برای قرار گرفتن در تکرارهای یک مسئله معکوس‌سازی قابل استفاده است. سپس مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری برای هر دسته از الکترودهای جریان و پتانسیل با در نظر گرفتن فاکتور هندسی آرایش محاسبه می‌شود. برای دقت بیشتر، فاکتور هندسی آرایش از حل معادله برای فضای اطراف تونل با مقاومت ویژه ۱ اهم متر و جریان تزریقی ۱ آمپر محاسبه شده است. شبه‌مقطع مقاومت ویژه الکتریکی با در اختیار داشتن مقاومت‌های ویژه الکتریکی ظاهری و با استفاده از روش وارون لوک و بارکر (۱۹۹۵) محاسبه شد (شکل ۵-ب و ۶-ب).

شکل‌های ۵-ب و ۶-ب به ترتیب شبه‌مقطع مقاومت ویژه برای آرایش و نر آلفا و دوقطبی-دوقطبی را نشان می‌دهد. به هر حال همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، نتایج در هر دو مقطع شباهت زیادی به یکدیگر دارند. با این تفاوت که تفکیک عمقی و نر آلفا به واقعیت نزدیک‌تر است. مقادیر مقاومت در نزدیکی سطح گالری در آرایش دوقطبی-دوقطبی بزرگ‌تر است.

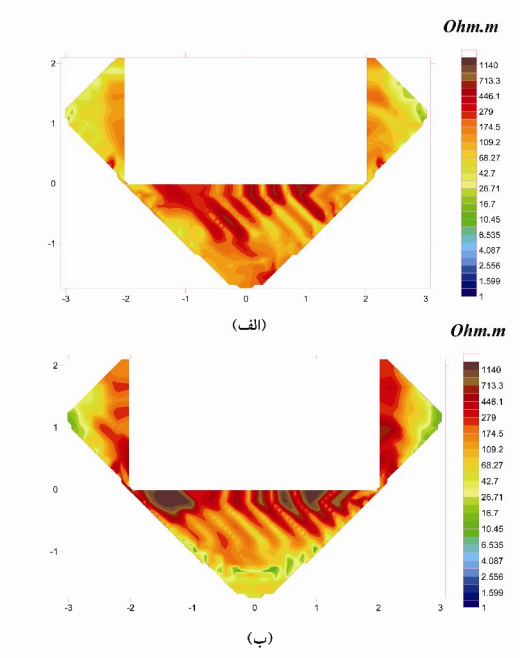
ابعاد مش‌بندی مناسب، با حل مدل ذکر شده، برای بلوک‌های با مقاومت ویژه یکسان و با در نظر گرفتن خطای به اندازه کافی کوچک به دست آمد. مقاومت ویژه ظاهری به دست آمده از توموگرافی الکتریکی روی سطح یک تونل نعل اسبی در یک سازند رُسی با ابعاد ذکر شده در بالا در حکم مشاهدات، در نظر گرفته شده است.

برای تفسیر داده‌های برداشت شده از روی نیم‌رخ کماتی، از روش اجزای محدود برای حل معادله پواسون دو بُعدی، در نرم‌افزار کمسول مولتی فیزیک (COMSOL Multiphysics) استفاده شد.

مدل پیش‌رو جریان الکتریکی در حالت دو بُعدی اطراف یک گالری با مقطع نعل اسبی شکل برای آرایش-های و نر آلفا، و نر-شلومبرگر و دوقطبی-دوقطبی به روش اجزای محدود تهیه شد. در ابتدا اطراف تونل به بلوک‌هایی تقسیم شد. در نزدیکی دیواره تونل، بلوک‌ها دارای ابعاد کوچک تر (۲۰ سانتی‌متر در ۱۰ سانتی‌متر) و بالطبع تعداد زیادتر و با افزایش فاصله از دیواره ابعاد آنها افزایش می‌یابد (شکل ۱). فاصله بین الکترودها برابر ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شرط مرزی نیومن (جریان الکتریکی عبوری عمود بر سطح صفر است) برای سطح داخلی (دیواره تونل) و سطح خارجی (سطح دورترین بلوک‌ها از دیواره تونل) در نظر گرفته شده است. در هنگام حل معادله پواسون به هر بلوک، مقاومت ویژه خاص داده شده است. پس از مش‌بندی فضای بلوک‌بندی با تراکم مناسب، معادله پواسون با در نظر گرفتن شرایط مرزی با روش اجزای محدود حل می‌شود و پتانسیل در همه فضای مدل، از جمله در محل الکترودهای پتانسیل به دست می‌آید و مقاومت الکتریکی برای هر چهارقطبی جریان و پتانسیل محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن رسانایی الکتریکی همگن در اطراف تونل، فاکتور هندسی آرایش برای هر چهارقطبی، از حل معادله به دست می‌آید. سپس مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری برای هر دسته از الکترودهای جریان و پتانسیل با در نظر گرفتن فاکتور هندسی آرایش محاسبه می‌شود. نحوه انتخاب چهارقطبی‌ها در هر بار تزریق، از فایل ورودی به برنامه وارد، و در نهایت شبه‌مقطع مقاومت ویژه ظاهری محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه الکترودها در فواصل ۲۰ سانتی‌متری روی دیواره تونل تا ارتفاع ۲ متری از کف

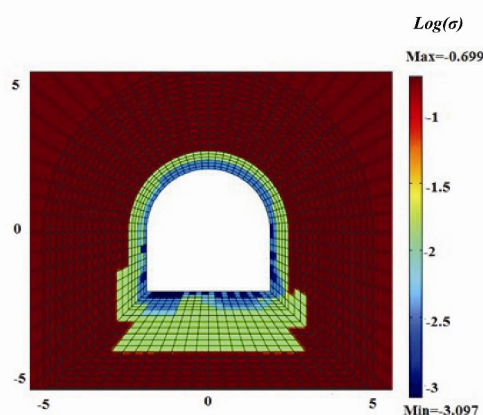


شکل ۵. (الف) شبه‌مقطع مقاومت ویژه مشاهداتی و (ب) شبه‌مقطع مقاومت ویژه محاسباتی نیم‌رخ کماتی برای آرایش ونر آلفا در گالری شرقی ۹۶-سایت تورنمیر. فاصله الکترودی: ۲۰ سانتی‌متر، تعداد الکترودهای چیده شده بر کف و دیواره‌های تونل: ۴۳ مقطع تونل: نعل اسبی با ارتفاع ۳/۷ متر و عرض آن در امتداد خط کف زمین ۴ متر.



شکل ۶. (الف) شبه‌مقطع مقاومت ویژه مشاهداتی و (ب) شبه‌مقطع مقاومت ویژه محاسباتی نیم‌رخ کماتی برای آرایش دوقطبی-دوقطبی در گالری شرقی ۹۶-سایت تورنمیر. فاصله الکترودی: ۲۰ سانتی‌متر، تعداد الکترودهای چیده شده بر کف و دیواره‌های تونل: ۴۳ مقطع تونل: نعل اسبی با ارتفاع ۳/۷ متر و عرض آن در امتداد خط کف زمین ۴ متر.

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب شبه‌مقطع‌های مقاومت ویژه به دست آمده از آرایش‌های الکترودی ونر آلفا و دوقطبی-دوقطبی را در گالری شرقی ۹۶ نشان می‌دهد. در کف تونل و دیواره‌ها، منطقه‌ای تقریباً پیوسته به ضخامت کمتر از ۵۰ سانتی‌متر با مقادیر زیاد مقاومت ویژه مشاهده می‌شود. مقاومت ویژه زیاد می‌تواند معرف خردشدگی زیاد و غیراشباع بودن این منطقه و یا به عبارت دیگر، معرف منطقه آسیب دیده در اثر حفاری باشد. مقاومت ویژه کم، بین ۲ تا ۲۰ اهم‌متر مشاهده شده در بخش پایینی شبه‌مقطع‌ها (شکل‌های ۵-الف و ۵-ب) می‌تواند مرتبط با مقاومت ویژه سنگ رُسی سالم و دست نخورده باشد. سنگ رُسی دست نخورده، کاملاً از آب اشباع و دارای محتوی آب وزنی حدود ۷ درصد است. خردشدگی سنگ‌ها در منطقه آسیب دیده از حفاری، مرتبط با ترک‌های ایجاد شده در اثر حفاری و پر شده با هوا است. تهویه طبیعی تونل باعث کاهش رطوبت هوا و خشک‌شدگی مناطق سطحی نزدیک به دیواره گالری و در نتیجه ایجاد ترک‌های جدید و در نهایت توسعه این منطقه می‌شود (کبررا و همکاران، ۲۰۰۱).



شکل ۷. مقطع مقاومت ویژه تفسیر شده روی نیم‌رخ کماتی به کار رفته برای هر دو آرایش الکترودی ونر آلفا و دوقطبی-دوقطبی در گالری شرقی ۹۶-سایت تورنمیر. فاصله الکترودی: ۲۰ سانتی‌متر، تعداد الکترودهای چیده شده بر کف و دیواره‌های تونل: ۴۳ مقطع تونل: نعل اسبی با ارتفاع ۳/۷ متر و عرض آن در امتداد خط کف زمین ۴ متر.

شبه‌مقطع مقاومت ویژه الکتریکی، با استفاده از روش وارون لوک و بارکر (۱۹۹۵) ترسیم شد (شکل ۵-الف و شکل ۶-الف). سپس با معکوس‌سازی دستی (تعیین مقاومت ویژه بلوک‌های مدل و محاسبه مقاومت ویژه ظاهری)، شبه‌مقطع مقاومت ویژه الکتریکی محاسباتی ترسیم شد (شکل ۵-ب و ۶-ب).

در فرایند معکوس‌سازی دستی، از مدل پیش فرض آورده شده در زیر، برای تغییر مقاومت ویژه بلوک‌ها استفاده شد: نتایج حفاری در داخل گالری و همچنین تفسیر نتایج به دست آمده از برداشت مقاومت ویژه روی نیم‌رخ خطی، یک لایه سطحی (با ضخامت کمتر از ۵۰ سانتی‌متر) با مقاومت ویژه بیش از ۱۰۰۰ اهم‌متر در کف تونل را نشان می‌دهد. در اعماق بیشتر، مقاومت ویژه کاهش می‌یابد، تا به مقاومت ویژه سنگ رُسی اشباع و بکر که حدود ۵۰ اهم متر است، می‌سد. ضخامت منطقه آسیب دیده از حفاری در دیواره‌ها و سقف کاهش می‌یابد. با اعمال مدل پیش‌فرض، به کاهش ریشه میانگین مربعات خطا (*Root Mean Square*) در هر تکرار اقدام شد. خطای *RMS* از رابطه:

$$RMS = 100 * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log(\rho_{a_i}^c) - \log(\rho_{a_i}^d))^2}{n-1}} \quad (4)$$

محاسبه شد. که در آن، $\rho_{a_i}^d$ و $\rho_{a_i}^c$ به ترتیب مقاومت ویژه ظاهری محاسباتی و مشاهداتی مربوط به i امین تزریق جریان و n تعداد کل تزریق جریان الکتریکی است. میزان خطای *RMS* در آخرین تکرار (تکرار دهم) برای آرایش ونر آلفا ۴/۹۷ درصد و برای آرایش دو قطبی-دو قطبی ۸/۶ درصد به دست آمد. در حال، *RMS* معیار دقیقی برای سنجش صحت مدل وارون نیست اما با استفاده از این معیار می‌توان مناسب‌ترین مدل وارون به دست آمده از مدل پیش‌فرض را استخراج کرد.

۴ نتیجه‌گیری

برآورد منطقه آسیب دیده در اثر حفاری نقش مهمی در پایداری سازه‌های زیرزمینی بازی می‌کند. تغییر در مقاومت مکانیکی سنگ‌های نزدیک به دیواره سازه زیرزمینی (ایجاد درز و شکاف)، می‌تواند باعث تغییر در خواص ژئوفیزیکی آنها شود. مدل‌های پیش‌رو و وارون موجود بیشتر برای نیم‌رخ‌های خطی توسعه داده شده‌اند. در این پژوهش با توسعه مدل پیش‌رو توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی روی نیم‌رخ کماتی، به بررسی منطقه آسیب دیده از حفاری پرداخته می‌شود. این مدل دو بُعدی برای تونل با سطح مقطع نعل اسبی و آرایش‌های الکترودی و نر آلفا و دوقطبی-دوقطبی و با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار کمسول اسکریپت برنامه‌نویسی و توسعه داده شد. مدل عرضه شده برای برداشت‌های واقعی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، صورت گرفته در گالری شرقی حفر شده در سازند رُسی تورنمیر واقع در جنوب فرانسه، طی یک فرایند وارون‌سازی دستی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تفسیر دستی با نتایج برداشت توموگرافی در همان گالری روی نیم‌رخ خطی برداشت شده در کف تونل، انطباق خوبی را نشان می‌دهد (وجود منطقه‌ای با مقاومت ویژه الکتریکی زیاد که تا عمق ۵۰ سانتی‌متری گسترش می‌یابد). همچنین می‌توان گفت که، توموگرافی مقاومت ویژه قادر به تشخیص تغییرات مقاومت ویژه در اعماق نزدیک به سطح گالری است و عمق بررسی به شعاع گالری بستگی دارد، به نحوی که بیشترین مقدار آن با شعاع گالری برابر است. مدل پیش‌رو برای ۲۸۷ تزریق جریان الکتریکی در زمان نسبتاً کم ۶ دقیقه اجرا می‌شود، لذا، استفاده از آن در الگوریتم معکوس خودکار (*Inversion*) برای برآورد مقطع مقاومت ویژه واقعی مناسب به نظر می‌رسد.

منابع

- Blümling, P., Bernier, F., Lebon, P., and Derek Martin, C., 2007, The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment: Physics and Chemistry of the Earth, **32**, 588-599.
- Bossart, P., Meier, P., Moeri, A., Trick, T., and Mayor, J., 2002, Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri rock laboratory: Engineering Geology, **66**, 19-38.
- Cabrera, J., Beaucaire, C., Bruno, G., De Windt, L., Genty, A., Ramanbasoa, N., Rejeb, A., Savoye, S., and Volant, P., 2001, Projet Tournemire- synthèse des programmes de recherche 1995-1999: Rapport IPSN DPRE/SERGD 01-19, Paris, France.
- Cosenza, P., Ghorbani, A., Florsch, N., and Revil, A., 2007, Effects of drying on the low-frequency electrical properties of Tournemire argillites: Pure Appl. Geophys., doi.10.1007/s0024-007-0253-0., **164**, 1-24.
- Ghorbani, A., Cosenza, P., Revil, A., Zamora, M., Schmutz, M., Florsch, N., and Jougnot, D., 2009, Non-invasive monitoring of water content and textural changes in clay-rocks using spectral induced polarization: a laboratory investigation: Applied Clay Science, **43**, 493-502.
- Gibert, D., Nicollin, F., Kergosien, B., Bossart, P., Nussbaum, C., Grislin-Mouëzy, A., Conil, F., and Hoteit, N., 2006, Electrical tomography monitoring of the excavation damaged zone of the Gallery 04 in the Mont Terri rock laboratory: Field experiments, modelling, and relationship with structural geology: Applied Clay Science, **33**, 21-34.
- Kruschwitz, S., and Yaramanci, U., 2004, Detection and characterisation of the disturbed rock zone in claystone with the complex resistivity method: Journal of Applied Geophysics, **57**, 63-79.
- Loke, M. H., and Barker, R. D., 1995, Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections: Geophysics, **60**(6), 1682-1690.
- Malmgren, L., Saiang, D., Toyra, J., and Bodare, A., 2007, The excavation disturbed zone (EDZ) at Kiirunavaara mine, Sweden by seismic measurements: Journal of Applied Geophysics, **61**, 1-15.

- Sato, T., Kikuchi, T., and Sugihara, K., 2000, In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan: *Engineering Geology*, **56**(1-2), 97-108.
- Schuster, K., Alheid, H. J., and Böddener, D., 2001, Seismic investigation of the excavation damaged zone in Opalinus clay: *Engineering Geology*, **61**, 189-197.
- Spies, T., and Eisenblatter, J., 2001, Acoustic emission investigation of microcrack generation at geological boundaries: *Engineering Geology*, **61**, 181-188.
- Tsang, C., Bernier, F., and Davies, C., 2005, Geohydromechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurate and plastic clays in the context of radioactive waste disposal: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **42**, 109-125.
- Marescot, L., Lopes, S. P., Rigobert, S., and Green, A. G., 2008, Nonlinear inversion of geoelectric data acquired across 3D objects using a finite-element approach: *Geophysics*, **73**, F121-F133.
- Matray, J. M., and Cabrera, J., 2007, Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite: *Engineering Geology*, **90**, 1-16.
- Nicollin, F., Gibert, D., Bossart, P., Nussbaum, C., and Guervilly, C., 2008, the Mont Terri rock laboratory: *Geophys. J. Int.*, **172**, 226-239.
- Nicollin, F., Gibert, D., Lesparre, N., and Nussbaum, C., 2010, Anisotropy of electrical conductivity of the excavation damaged zone in the Mont Terri Underground Rock Laboratory: *Geophys. J. Int.*, **181**, 303-320.