

تشخیص منطقه آلودگی حاصل از زه آب اسیدی با استفاده از مدل سازی سه بُعدی داده های ژئوالکتریک در محدوده کارخانه زغال شویی البرز شرقی

علی مرادزاده^{۱*}، مهدی زارع^۱ و فرامرز دولتی ارده جانی^۱

^۱دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۴/۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۶)

چکیده

در سال های اخیر، روش های ژئوفیزیکی الکتریکی خصوصاً روش های سه بُعدی ژئوالکتریک، به طور موفقیت آمیزی در بررسی های زیست محیطی مورد استفاده قرار گرفته اند. باطله های تولید شده از کارخانجات زغال شویی، اغلب حاوی مواد سولفیدی هستند. حضور این مواد در مجاورت آب و اکسیژن هوا، باعث تولید زهاب اسیدی می شود. زهاب تولیدی به دلیل داشتن pH کم و غلظت های زیاد SO_4^{2-} و Fe^{2+} سبب بروز مشکلات زیست محیطی در درازمدت می شود. در این مقاله، هدف این است تا آلودگی های تولیدی حاصل از انباشت باطله کارخانه زغال شویی البرز شرقی شاهرود با استفاده از روش های ژئوفیزیکی الکترومغناطیس با بسامد بسیار کم (VLF-EM) و همچنین روش مقاومت ویژه (DC) با استفاده از روش برداشت و مدل سازی سه بُعدی مورد بررسی قرار بگیرد. نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد که روش VLF آشکار کردن مسیرهای حرکت آلودگی در پایین دست محل دپوی باطله ها، خوب عمل کرده است ولی دقیقاً نتوانسته گسترش عمقی مناطق آلوده را مشخص کند. این در حالی است که مدل سازی سه بُعدی داده های ژئوالکتریک، زون آلوده ای به ضخامت حدود ۳۰ متر را در اعماق بین ۳۰ تا ۶۰ متری در بخشی از پایین دست منبع آلودگی مشخص کرده است.

واژه های کلیدی: برداشت های ژئوفیزیکی الکتریکی، روش VLF، باطله های زغال شویی، مدل سازی سه بُعدی، زهاب اسیدی معدن

Recognition of the pollution zone related to acid mine drainage using three-dimensional modeling of geoelectrical data at Alborz-e- Sharghi coal washing plant area, Semnan Province, Iran

Ali Moradzadeh^{1*}, Mehdi Zare¹ and Faramarz Doulati Ardejani¹

¹ Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(Received: 27 June 2010, accepted: 6 March 2012)

Summary

Nowadays, geophysics, and three-dimensional (3D) ground geoelectrical methods in particular are successfully associated with environmental investigations. The waste produced by coal washing operations often contains sulfide materials specifically pyrite.

*Corresponding author:

amoradzadeh@shahroodut.ac.ir

*نگارنده رابط:

The appropriate atmospheric conditions and moisture favor rapid pyrite oxidation and subsequent acid mine drainage (AMD) formation. This AMD that contains high concentrations of iron, sulfate, low pH and variable concentrations of toxic metals is a major cause of long-term environmental problems.

Since, the pollutants produced by pyrite oxidation processes in the groundwater flow system may change considerably the conductivity of the polluted zone, the electric and electromagnetic (EM) geophysical methods could effectively be used to map these zones. Resistivity and very low frequency electromagnetic (VLF-EM) are commonly used for this purpose.

This paper discusses the results of a geophysical survey incorporating two different methods comprising VLF-EM and 3D electrical resistivity and attempts to detect the pollution emanated from the wastes produced by Alborz Sharghi Coal Washing Plant. This plant, which is located at 380 km northeast of Tehran and 57 km northwest of Shahrood City in Semnan Province, has been working for 30 years. The input feed of the processing plant is 500,000 ton per year. The coal recovery in the plant is 50%. The rest of the input feed is dumped as wastes around the plant. Depending on the method used for coal processing, two kinds of the waste are produced and dumped in the distinct places. The first kind is produced by a jig machine while the second is produced by a flotation process. It is expected that the amount of the coal waste to be about 3 million tons in the study area.

A geophysical survey using the VLF-EM method was first performed with a measuring spacing of 5 meters on 4 parallel profiles of 30-m distance in the downstream of the waste dump in order to investigate the likely polluted zones. The VLF measurements were carried out using a portable WADI-VLF digital instrument of ABEM Co. The measured data was then processed using RAMAG computer software. To simplify the data interpretation, the VLF raw data were filtered using the Karous-Hjelt technique and a set of vertical current density pseudo-sections were provided. The results of interpretation detected two polluted zones in the downstream of the waste dump. These polluted zones can be easily recognized between profiles 1 and 3 with high values of current density. The VLF survey was found to be good in identifying the path ways for pollution movement downstream the coal washing dump, but limited in its ability to exactly distinguish the depth of polluted zones. Due to this problem, the area located between profiles 1 and 3 was then selected for a 3D geoelectrical survey to better investigate the pollutant leaching process. The electrical resistivity method produces an image and/or an approximate model of the subsurface resistivity. Various arrays including pole-pole, pole-dipole, and dipole-dipole arrays are normally used for 3D resistivity surveys. In the present research, a 3D geoelectrical survey using a pole-dipole array was carried out on a 6×6 rectangular grid with different electrode spacing of 15 m and 30 m in x- and y directions, respectively by a portable SAS 1000 instrument from ABEM Co. As the pole-dipole array is an asymmetrical array, measurements were made with the forward and reverse arrangements of the electrodes on each profile in x- and y directions. Two more profiles were also considered in the direction of diameters of the rectangular grid.

A computer software called RES3DINV which incorporates a smoothness-constrained least-squares approach was then used to perform an inverse modeling on the measured apparent resistivity data. To perform a 3D inverse modeling, the subsurface of the survey area was divided into several layers and each layer was further subdivided into a number of rectangular blocks with unknown resistivities. The interior blocks within each layer had the same size. The main objective of the inversion process was to determine the resistivity of each block in a manner that the model response fitted well the measured

apparent resistivity data. The RES3DINV program utilizes least squares Gauss-Newton and quasi-Newton optimization methods for modeling process. This model can apply both numerical finite difference (FD) and finite element (FE) methods for calculation purposes.

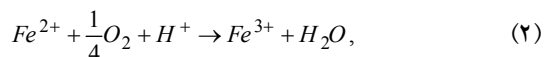
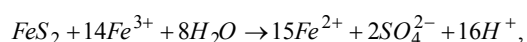
The results of inversion have been provided as sets of horizontal and vertical resistivity sections and also a 3D resistivity model was finally presented using Slicer\Dicer software. This 3D geoelectrical model illustrated a polluted zone with a thickness of about 30 meters at the depths between 30 and 60 meters.

Key words: 3D geoelectrical survey, VLF method, Alborz Sharghi, coal washing wastes, 3D modeling, AMD

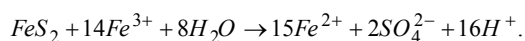
۱ مقدمه

Fe^{2+} آزاد شده و در مجاورت اکسیژن اکسید می شود و مطابق با واکنش (۲) به آهن سه ظرفیتی (Fe^{3+}) تبدیل می شود. در شرایط اسیدی ایجاد شده امکان رشد گونه ای از باکتری ها به نام تیوباسیلوس فرواکسیدان افزایش می یابد، که این باکتری مانند کاتالیزور عمل می کند، و می تواند سرعت واکنش را تا یک میلیون بار افزایش دهد. در نتیجه در حضور این باکتری مطابق با واکنش (۲)، آهن دو ظرفیتی به آهن سه ظرفیتی تبدیل می شود و یون فریک ایجاد شده مثل اکسیژن به صورت عامل اکساینده برای پیریت در شرایط غیر اکسیدان عمل می کند و AMD بیشتری تولید خواهد شد (سینگر و استوم، ۱۹۷۰).

(۱)



(۳)



نرخ اکسید شدن پیریت با عواملی مثل نوع کانی سولفور، اندازه دانه های سنگ یا باطله حاوی پیریت، درجه حرارت، غلظت و درصد اکسیژن، شرایط pH و Eh، درصد سولفور و اثرات کاتالیزوری و حضور باکتری ها کنترل می شود (سحران و همکاران، ۱۹۹۵). همان طوری که در بالا اشاره شد وجود پیریت و دیگر

زغال سنگ هم اکنون یکی از مهم ترین سوخت های فسیلی در تامین انرژی برای فولادسازی و صنایع گوناگون در جهان است. برای تهیه کک متالورژی در صنعت فولادسازی هر گونه مواد معدنی و ناخالصی مضر مانند گوگرد و سایر ناخالصی های معدنی موجود در زغال سنگ (به اصطلاح خاکستر) بایستی به حداقل ممکن برسد. از این رو ضروری است تا زغال های استخراجی معادن گوناگون در کارخانه های فرآوری زغال مورد شست و شو قرار گیرد. در اثر شست و شوی زغال، قسمتی به صورت باطله زغال که اغلب حاوی مواد سولفیدی و واکنشی (FeS_2) است، ایجاد می شود و در اطراف کارخانه شست و شو به شکل های گوناگون روی هم انباشته می شوند و تشکیل انباشت (دمپ) باطله می دهند. مواد سولفیدی موجود در باطله ها در مجاورت آب و هوا، تولید زهاب اسیدی (AMD) می کند. یکی از ویژگی های زهاب تولیدی از باطله های زغال، خاصیت اسیدی آن است که می تواند فلزات سنگین را از باطله ها بشوید و ممکن است اثرات مخربی روی آب های سطحی، زیرزمینی و خاک ها داشته باشد (تیواری، ۲۰۰۱).

مطابق واکنش (۱)، تشکیل زهاب اسیدی از اکسایش مستقیم پیریت با اکسیژن و آب حاصل شده که نتیجه آن تولید Fe^{2+} ، SO_4^{2-} و H^+ است. در نتیجه اکسایش پیریت،

ذرات سولفیدی و اکسایش آنها در مجاورت آب و اکسیژن باعث به وجود آمدن زهاب اسیدی و تولید اسید سولفوریک و دیگر کانی‌های ثانویه مثل همتیت، جاروسیت و گوتیت می‌شود. ورود این زهاب اسیدی به چرخه آب زیر زمینی اثرات مخرب زیست‌محیطی را در بر خواهد داشت. مطابق واکنش‌های (۱) تا (۳) یون‌های فلزی و سولفات‌ها به وجود می‌آیند که ورود آنها به چرخه آب زیر زمینی به طور قابل توجهی رسانایی ویژه الکتریکی آن را افزایش می‌دهد. شکل ۱ نقش بعضی از یون‌ها را در رسانایی ویژه آب زیر زمینی نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته روی نمونه‌های آب گرفته شده از محل سد باطله کارخانه فرآوری مس رسانایی ویژه آنها را به مقدار ۱۰۰ میلی‌موهوس بر متر (یا میلی‌زیمنس بر متر) نشان می‌دهد. این در حالی است که رسانایی ویژه آب در رودخانه‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی از ۱ تا ۲۰ میلی‌موهوس بر متر در تغییر است (کینگ، ۱۹۹۴). افزایش رسانایی ویژه نمونه‌های آب زیر زمینی اخذ شده از بخش‌های تحتانی سد باطله به خاطر وجود یون‌های H^+ و SO_4^{2-} و تحرک پذیری زیاد آنها در داخل آب زیرزمینی است. با توجه به این ویژگی مهم فیزیکی مناطق آلوده شده محیط زیست در اطراف محدوده‌های معدن کاری و کارخانه‌های فرآوری وابسته به آنها را با زهاب اسیدی تولیدی می‌توان بسته به وسعت محدوده بررسی، به کمک انواع روش‌های ژئوفیزیکی الکتریکی و الکترومغناطیسی زمینی و هوایی به نقشه در آورد (پترسون، ۱۹۹۷). به همین دلیل و لزوم حفظ محیط زیست در سال‌های اخیر، روش‌های ژئوفیزیکی خصوصاً روش‌های الکتریکی به طور چشم‌گیری به منزله روشی غیر مستقیم برای کنترل و بررسی آلودگی‌های زیست‌محیطی به کار گرفته شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای تشخیص محدوده آلودگی آب‌های زیرزمینی، روش‌های مقاومت ویژه و

روش الکترومغناطیس (EM)، نسبت به روش‌های دیگر کارایی بهتری دارد (پلرین، ۲۰۰۲). الدنبرگ (۱۹۹۶) با تلفیق مدل‌های حاصل از اندازه‌گیری مقاومت ویژه و قطبش القایی و مقایسه آنها با اطلاعات کیفی آب مانند میزان ذرات جامد معلق (TDS) آلودگی ناشی از دمپ‌های باطله مس را در شمال آمریکا به خوبی نشان داد. بنسون و همکاران (۱۹۹۷) با به کارگیری و تلفیق نتایج به دست آمده از روش‌های سونداژ مقاومت ویژه و VLF-EM، آلودگی ناشی از نشت فرآورده‌های نفتی را در شمال آمریکا مورد بررسی قرار دادند. کامکار روحانی (۲۰۰۱) آلودگی‌های ناشی از باطله‌های تر کارخانه بوکسیت را با استفاده از روش‌های نیم‌رخ‌زنی دوقطبی-دوقطبی با فواصل متفاوت در ایالت استرالای غربی مورد بررسی قرار داده است. فارینگر (۲۰۰۲) با استفاده از روش الکترومغناطیس کم‌عمق، آلودگی ناشی از تشکیل زهاب‌های اسیدی معدن در لایه‌های زیرین معدن زغال زیرزمینی در ایالت ویرجینیا را مورد بررسی قرار داد. هامک و همکاران (۲۰۰۳) اثرات زیست‌محیطی ناشی از دیپو ایجاد شده از معدن گوگرد مرکوری در ایالت کالیفرنیا را با روش‌های ژئوفیزیکی مورد بررسی قرار دادند. وگا و همکاران (۲۰۰۳) با برداشت دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه با آرایش‌های ونر و دوقطبی-دوقطبی و مدل‌سازی ترکیبی داده‌های حاصل توانستند زون‌های آلوده در اثر نشت مواد نفتی از ترک‌های موئین یک مخزن بتنی را در مسیر یک لوله انتقال نفت شناسایی کنند. سوپوز و همکاران (۲۰۰۶) و فرید و همکاران (۲۰۰۷) محل دفع باطله و زباله‌ها را به روش‌های ژئوفیزیکی مورد ارزیابی قرار دادند. اجیلوی و همکارانش (۲۰۰۹) روشن ساختند که با اندازه‌گیری و توموگرافی الکتریکی می‌توان به طور موثری نسبت به شناسایی و ردیابی محدوده آلوده به پساب‌های معدنی پرداخت. در سال‌های اخیر از روش الکترومغناطیس VLF-EM و

دپوی باطله‌های معادن فقط به چند مورد خلاصه می‌شود که آن‌هم در عمده موارد، برداشت و مدل‌سازی داده‌ها به صورت یک‌بعدی است و یا اینکه برداشت‌های دوبعدی در محدوده‌های کوچک صورت گرفته است (یوال و الدنبرگ، ۱۹۹۶؛ اسپیندلر و یفنت، ۲۰۰۴). اگرچه مرور منابع نشان می‌دهد که روش مقاومت ویژه سه‌بعدی با موفقیت خوبی برای شناسایی مسیرهای عبور زهاب اسیدی ناشی از یک معدن طلای بازسازی شده در امریکا در یک منطقه نسبتاً وسیع مورد استفاده قرار گرفته است (راکر و همکاران، ۲۰۰۹b)، ولی متأسفانه مورد مستندی وجود ندارد تا عملکرد چنین روش برداشت سه‌بعدی را در تعیین مناطق آلوده مرتبط با محل انباشت باطله حاصل از فرایند زغال‌شویی نشان دهد. هرچند برداشت‌های دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه به روش Time Laps به‌منظور تعیین آلودگی ناشی از محل دپوی باطله ایجاد شده از کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی ایران صورت گرفته است (جدیری و همکاران، ۱۳۸۸) ولی همان‌طور که قبلاً اشاره شد با بررسی‌های سه‌بعدی در محل انباشت باطله‌های زغال‌شویی، می‌توان شدت، وسعت و گسترش آلودگی را در زیر سطح زمین با دقت بهتری مشخص کرد.

در این مقاله سعی بر این است که ابتدا با استفاده از روش الکترومغناطیس VLF زون‌های آلوده در پایین‌دست محل انباشت (دمپ) باطله کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی شاهرود شناسایی شود و سپس به دنبال آن شبکه برداشت سه‌بعدی مقاومت ویژه طراحی و برای اولین بار در ایران، آثار آلودگی احتمالی این نوع مواد با استفاده از روش برداشت و مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه، مورد بررسی قرار گیرد.

EM-34 به‌نحو موثری برای بررسی اثرات آلودگی ناشی از دفن زباله‌های شهری بر محیط زیست و همچنین تاثیر آن‌ها روی آب‌های زیرزمینی مناطق اطراف استفاده شده است (سنتوز و همکاران، ۲۰۰۶؛ التراز و همکاران، ۲۰۰۸). مرادزاده و همکاران (۱۳۸۷)، آلودگی ناشی از فعالیت‌های معدنی را در یک معدن سرب و روی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی VLF، IP و مقاومت ویژه مورد بررسی قرار دادند.

برداشت و مدل‌سازی داده‌های روش مقاومت ویژه نیز به‌طور موفقیت آمیزی در بررسی‌های زیست محیطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (داهلین و برنستون، ۱۹۹۷). از آنجاکه در غالب موارد آلودگی‌های زیست محیطی ساختاری دو تا سه‌بعدی دارند از این‌رو در بررسی‌های زیست محیطی به کمک این روش، برداشت و مدل‌سازی داده‌ها برای کسب نتایج دقیق‌تر غالباً به صورت دو و سه‌بعدی صورت گرفته است. برای مثال می‌توان به برداشت و مدل‌سازی سه‌بعدی روش مقاومت ویژه برای مطالعات زیست محیطی مناطق اطراف محل دفن زباله‌های شهری (سمسودین و همکاران، ۲۰۰۶؛ رادولسکیو و همکاران، ۲۰۰۷)، آلودگی ناشی از نشت نفت و گاز از مخازن سطحی و ایستگاه‌های ذخیره زیرزمینی آنها (بتلی و غریبی، ۲۰۰۴)، بررسی میزان نشت زهاب از محل‌های دفن زباله‌های مواد رادیولوژی، زباله‌های صنعتی مایع و مواد سمی خطرناک (راکر و فینک، ۲۰۰۷؛ پرازی و هولیگر، ۲۰۰۸)، آلودگی آب‌های زیرزمینی با نترات موجود در کودهای شیمیایی (کاسس و همکاران، ۲۰۰۸) و همچنین ارزیابی محل مناسب و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از دفن زباله‌های اتمی (راکر و همکاران، ۲۰۰۹a) اشاره کرد.

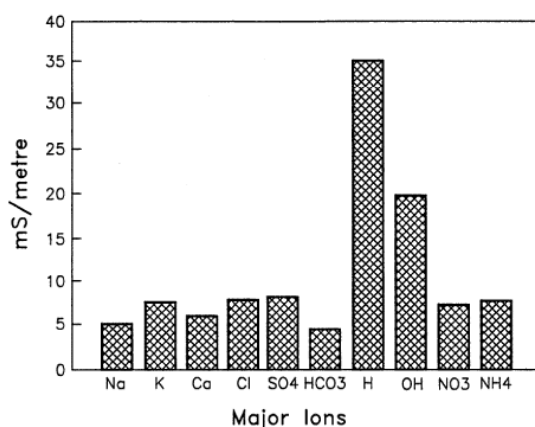
علی‌رغم کاربرد گسترده روش مقاومت ویژه در بررسی‌های زیست محیطی، متأسفانه استفاده از این روش در ارتباط با آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از محل‌های

۲ موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

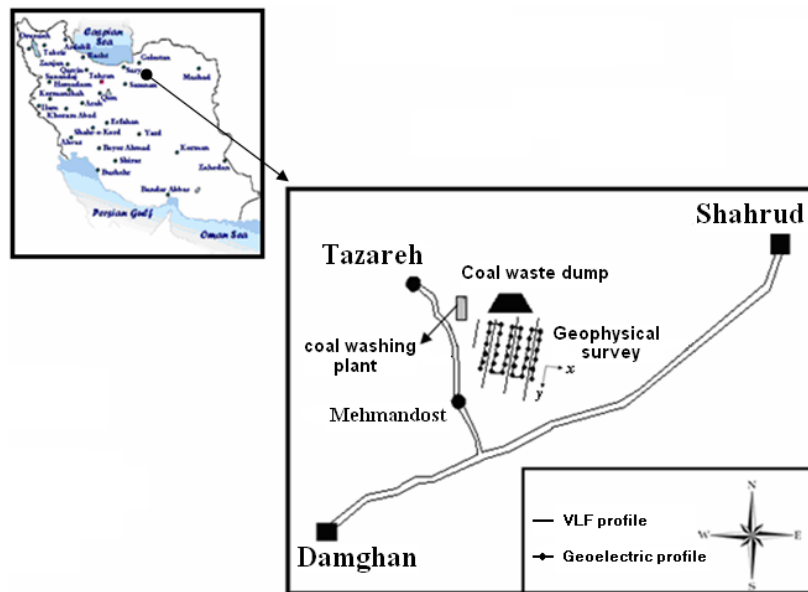
کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی در شمال‌شرقی دامغان و در کیلومتر ۵۷ شاهرود، بین مناطق مهماندوست و جنوب معادن زغال طزره و در حدود ۱۱ کیلومتری منطقه رزمجا قرار گرفته است. منطقه دارای آب و هوای کوهستانی و حداکثر ارتفاع ۲۶۰۰ متر است و زمستانی سرد و تابستانی معتدل تا گرم دارد. شکل ۲ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

از نظر سنی رسوبات زغالی منطقه مربوط به دوره تریاس بالایی و ژوراسیک پایینی هستند و این سری رسوبات بین دو لایه آهکی دولومیتی الیکا در قسمت تحتانی و آهک‌های ضخیم لار در قسمت فوقانی قرار گرفته است. سنگ‌هایی که در این رسوبات یافت می‌شوند مربوط به سازند شمشک‌اند و شامل دولومیت، آهک‌های تریاس و ژوراسیک فوقانی و سری گچ‌دار است که در نزدیکی دره رزمجا دیده می‌شود (شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، ۱۳۶۰). سیلت در منطقه به صورت پادگانه‌های آبرفتی بیشتر به چشم می‌خورد. در حوضه زغالی البرز شرقی، زغال‌سنگ در تناوب‌های شیلی سازند شمشک در سرتاسر حوضه به صورت رگه‌ها و عدسی‌هایی گسترش دارد (شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، ۱۳۵۷). زغال‌سنگ خام حاصل از معادن متفاوت این حوضه به‌منظور

شست‌وشو به کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی با ظرفیت ۵۰۰ هزار تن در سال ارسال می‌شود. راندمان تبدیل زغال‌سنگ خام به کنسانتره در این کارخانه حدود ۵۵ درصد است که با وجود این ظرفیت تولید کنسانتره زغال حدود ۲۷۵ هزار تن در سال خواهد بود و در نتیجه حدود نیمی از خوراک ورودی تبدیل به باطله می‌شود (شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، ۱۳۸۶). از باطله‌های ایجاد شده در نتیجه شست‌وشوی زغال، حدود ۸۰ درصد مربوط به دستگاه جیگ و ۲۰ درصد باقی‌مانده متعلق به فرایند فلوتاسیون است که این باطله‌های حاوی پیریت در اطراف کارخانه زغال‌شویی به شکل‌های گوناگون روی هم انباشته می‌شوند و بنا به دلایل ذکر شده در درازمدت موجب اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌شوند. با توجه به نتایج به دست آمده از قابلیت تولید زهاب اسیدی دپوی باطله‌های قدیمی دستگاه جیگ (دولتی و همکاران، ۲۰۰۸)، تصمیم گرفته شد تا تحقیقات بیشتری برای شناسایی مناطق آلوده و همچنین گسترش آلودگی در منطقه پایین دست دپوی باطله‌های قدیمی صورت گیرد. به همین لحاظ برداشت‌های ژئوفیزیکی VLF، سونداژنی مقاومت ویژه و متعاقب آن برداشت سه‌بُعدی ژئوالکتریک صورت گرفت.

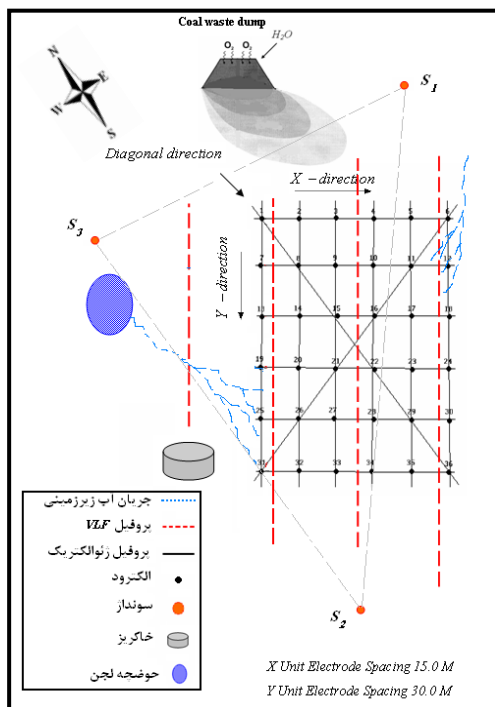


شکل ۱. نقش بعضی از یون‌های اصلی در رسانایی ویژه آب زیرزمینی (کیگ، ۱۹۹۴).



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه و محل نیم‌رخ‌های اندازه‌گیری ژئوفیزیکی.

نیم‌رخ‌های برداشت داده‌های VLF به همراه موقعیت سونداژهای الکتریکی و شبکه برداشت داده‌های سه‌بُعدی مقاومت ویژه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. موقعیت نیم‌رخ‌های VLF همراه با محل سونداژها و شبکه برداشت سه‌بُعدی داده‌های ژئوالکتریک نسبت به محل دپوی باطله.

۳ برداشت الکترومغناطیس VLF و نتایج مربوط به آن

روش VLF یکی از انواع روش‌های الکترومغناطیسی است که امکان برداشت‌های EM را بدون استفاده از فرستنده‌های محلی فراهم می‌کند. در این روش از فرستنده‌های رادیویی پُر قدرت نظامی با دامنه بسامدی ۱۰ تا ۲۵ کیلوهرتز که در سراسر جهان پراکنده‌اند استفاده می‌شود (میلسون، ۲۰۰۲). گیرنده‌های این روش مؤلفه‌های حقیقی (هم‌فاز) و مجازی (ناهم‌فاز) میدان‌های EM ثانویه القا شده از توده‌های رسانای مدفون را به کمک امواج EM ارسالی با کمک این فرستنده‌ها ثبت می‌کنند.

تحقیقات ژئوفیزیکی زیست‌محیطی با اندازه‌گیری‌های VLF در امتداد چهار نیم‌رخ موازی به فواصل ۳۰ متر از یکدیگر و نقاط اندازه‌گیری ۵ متر با توجه به وسعت منطقه، در پایین‌دست محل انباشت باطله زغال صورت گرفت. هدف از این اندازه‌گیری، تشخیص محدوده مناطق آلوده ناشی از اکسایش پیریت همراه باطله زغال و به دنبال آن طراحی شبکه برداشت ژئوفیزیکی سه‌بُعدی مقاومت ویژه برای بررسی‌های دقیق‌تر بود. موقعیت

چگالی جریان در یک صفحه افقی واقع در عمق برابر فاصله نقاط اندازه گیری (Δx) را با استفاده از نظریه فیلتر خطی محاسبه و سپس با محاسبه این فیلتر برای اعماق متفاوت (یعنی Δx , $2\Delta x$, $3\Delta x$) به محاسبه تغییرات چگالی جریان نسبت به عمق پرداختند. این فیلتر به صورت زیر بیان می شود که در آن مقدار چگالی جریان ظاهری (I_a) در هر نقطه به کمک شش مولفه حقیقی میدان مغناطیسی القایی که در طرفین نقطه مورد نظر اندازه گیری شده اند محاسبه می شود.

$$I_a(\Delta x / 2) = \frac{2\pi}{\Delta z} \{0.102H_{-3} - 0.059H_{-2} + 0.561H_{-1} - 0.561H_1 + 0.059H_2 - 0.102H_3\}. \quad (4)$$

آب در شمال غرب و غرب و جنوب غربی منطقه) به مثابه لایه آبدار تفسیر شده است. اگرچه مدل سازی داده ها سونداژ الکتریکی مناسب ترین عمق لایه آبدار را در محل سونداژهای S1 و S3 در ۲۶/۵۸ و ۲۲/۴ متری نشان می دهد ولی آنالیز مدل های هم ارز صورت گرفته برای همین داده ها تغییرات عمق لایه آبدار را در محل سونداژ S1 و S3 به ترتیب در محدوده های ۲۴ تا ۲۹ متری و ۲۰ تا ۲۶/۸ متری نشان می دهد. علاوه بر آن علت بالاتر بودن سطح آب زیرزمینی در محل سونداژ S3 ممکن است نزدیکی این سونداژ به حوضچه لجن حاصل از فلوتاسیون زغال باشد.

۴ طراحی شبکه سه بُعدی و انتخاب آرایه مناسب

با توجه به اطلاعات به دست آمده از تفسیر داده های ژئوفیزیکی پیش گفته، محدوده بین نیم رخ اول و سوم برداشت داده های VLF، به منظور بررسی دقیق تر از نحوه گسترش و عمق آلودگی برای برداشت سه بُعدی ژئوالکتریک انتخاب شد. برای برداشت های سه بُعدی بسته به وسعت منطقه، آرایش الکتروودی و فواصل بین آنها، حجم زیادی داده بایستی برداشت شود که در نتیجه

اندازه گیری های VLF با دستگاه رقومی سوئدی WADI (ایم، ۲۰۰۰) صورت گرفت. در منطقه ای که این اندازه گیری ها به انجام رسید، بهترین ایستگاه فرستنده، ایستگاه فرستنده NSS واقع در آنابلیس (Annapolis) امریکا با توان تقریبی ۴۰۰ کیلو وات و بسامد ۲۱/۴ کیلوهرتز انتخاب شد. داده های اندازه گیری شده با نرم افزار تخصصی RAMAG (ایم، ۲۰۰۲) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مدل های تهیه شده شامل نمودارهای خام، نمودارهای فیلتر شده داده ها و شبه مقاطع عرضی چگالی جریان بودند. برای محاسبه چگالی جریان القایی از فیلتر خطی کاروس و هجالت استفاده شده است (کاروس و هجالت، ۱۹۸۹). آنها میدان مغناطیسی ناشی از تغییرات

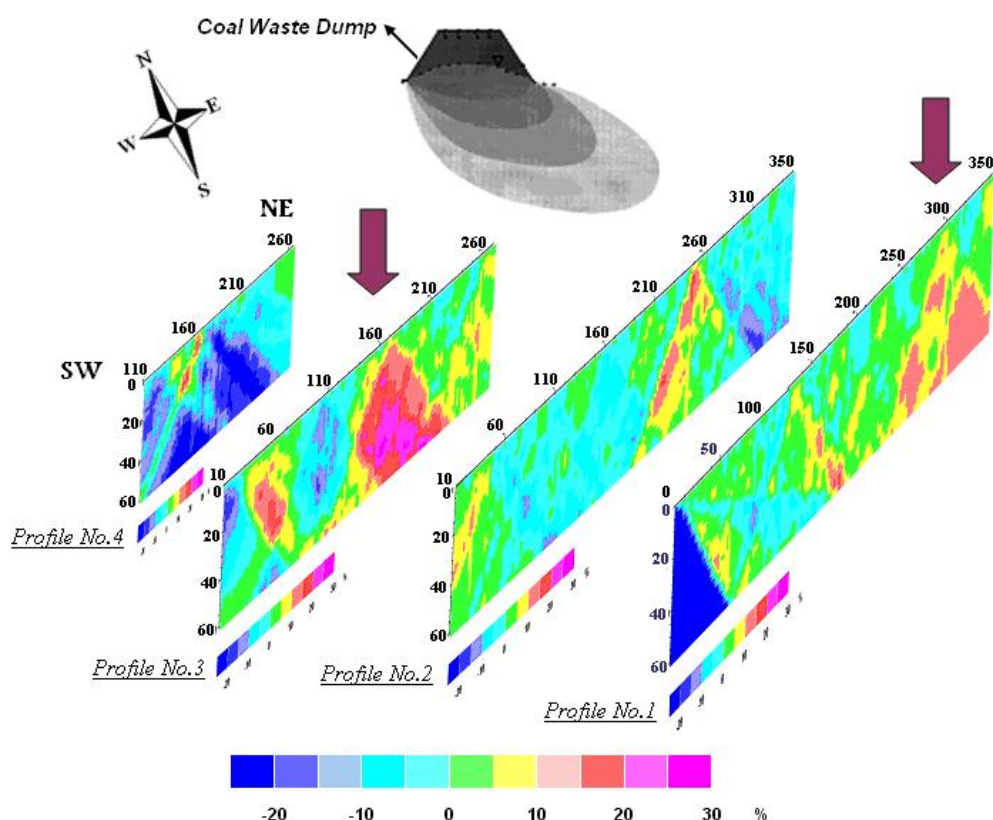
در تهیه شبه مقاطع چگالی جریان داده های برداشت شده حداکثر عمق فیلتر ۶۰ متر انتخاب شد. شبه مقطع عرضی چگالی جریان مربوط به چهار نیم رخ و موقعیت آنها نسبت به محل انباشت باطله به صورت طرحوار در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، زون آلودگی احتمالی از محل انباشت باطله به سمت مناطق پایین دست گسترش می یابد و حضور آلودگی در حد فاصل نیم رخ های اول تا سوم که با علامت پیکان در شکل نشان داده شده است، به صورت برجسته به شکل مناطق چگالی جریان بالا آشکار می شوند.

قبل از برداشت سه بُعدی داده های مقاومت ویژه و به منظور تعیین عمق سطح آب زیرزمینی سه سونداژ مقاومت ویژه با آرایش شولومبرژه در محدوده اطراف نیم رخ های VLF صورت گرفت (شکل ۳). نتایج مدل سازی داده های سونداژ الکتریکی لایه ای با مقاومت ویژه بین ۴۰ تا ۵۰ اهم متر (لایه آبدار) را در محل سونداژهای S1، S2 و S3 به ترتیب در اعماق ۲۶/۵۸، ۳۵/۲ و ۲۲/۴ متر نشان داده است که این لایه با توجه به اطلاعات زمین شناسی و هیدرولوژیکی موجود (وجود چاه

سه‌بعدی بدین شیوه صورت می‌گیرد (راکر و همکاران، ۲۰۰۹b). چنانچه فواصل خطوط برداشت داده‌ها و فواصل الکترودی مناسب انتخاب شود تفسیر سه‌بعدی داده‌های برداشت شده بدین روش دقت مناسبی در ارزیابی‌های زیست‌محیطی دارد (غریبی و بنتلی، ۲۰۰۵).

با عنایت به موارد فوق نیم‌رخ‌های برداشت سه‌بعدی ژئوالکتریک مطابق شکل ۳ در یک شبکه مستطیلی 6×6 و با فواصل الکترودی متفاوت در راستای $x=15$ متر و $y=30$ متر طراحی شد. آرایه‌های قطبی-قطبی، دو قطبی-دو قطبی و دو قطبی-دو قطبی و روش E-SCAN (لی و الدنبرگ، ۱۹۹۲) بیشتر اوقات برای برداشت‌های سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این بدین دلیل است که آرایه‌های دیگر پوشش ضعیفی در شبکه برداشت دارند. در این تحقیق، آرایه قطبی-دو قطبی به‌منزله روش برداشت مناسب برای اندازه‌گیری‌های سه‌بعدی انتخاب شد. زیرا این آرایه یک انتخاب معقول برای شبکه‌های متوسط است و کیفیت بهتری نسبت به آرایه قطبی-قطبی دارد. به‌علاوه، در این آرایه فقط یک الکتروود دور (الکتروود C_2) مورد نیاز است و نسبت به نوفه حساسیت کمتری دارد. همچنین در مقایسه با آرایه دو قطبی-دو قطبی نیز دارای شدت سیگنال بیشتری است (لوک، ۱۹۹۹). داده‌های ژئوالکتریک با آرایش قطبی-دو قطبی با دستگاه ABEM SAS1000 (اییم، ۱۹۹۹) به صورت رفت و برگشت روی هر یک از نیم‌رخ‌های موازی عمود بر هم و همچنین دو نیم‌رخ قطری روی شبکه طراحی شده (شکل ۳) صورت گرفت. این کار به دلیل افزایش دقت و کاهش خطا در نتایج مدل‌سازی بود.

عملیات برداشت در مقایسه با برداشت دو‌بعدی زمان‌بر و پرهزینه‌تر خواهد بود. از این رو تلاش زیادی صورت گرفته است تا برداشت داده‌ها در این روش بهینه شود. برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی سه‌بعدی معمولاً با سامانه اندازه‌گیری مقاومت ویژه چندکاناله در امتداد یک سری خطوط مارپیچی (serpentine roll-along) صورت می‌گیرد (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). گاهی اوقات برداشت با خطوط شعاعی حول یک نقطه مشترک (نایکوئیست و راس، ۲۰۰۵) و یا روی یک سری دایره هم‌مرکز با شعاع‌های متفاوت (برونر و همکاران، ۱۹۹۹) به کمک سامانه چندکاناله با تعداد زیادی الکتروود که متصل به یک کابل چند هسته‌ای (Multi-core cable) هستند، استفاده می‌شود. یک لپ‌تاپ به همراه یک سوئیچ الکترونیکی به‌طور خودکار چهار الکتروود مناسب برای هر بار اندازه‌گیری را انتخاب می‌کند. روش‌های فوق برای برداشت داده‌ها در یک منطقه کوچک و هنگامی که سامانه چندکاناله همراه با سوئیچ و کابل‌های لازم در اختیار باشد مناسب است. برای برداشت داده‌ها، به‌منزله گزینه‌ای دیگر از یک سری خطوط موازی نزدیک به هم (اجیلوی و همکاران، ۲۰۰۲) و یا یک سری خطوط موازی و عمود بر هم (منصور و اسلیتر، ۲۰۰۷؛ راکر و همکاران، ۲۰۰۹b) که در آن معمولاً الکتروودها در یک شبکه مربعی و با فواصل یکسان و یا یک شبکه مستطیلی و با فواصل غیر یکسان در راستای x و y قرار می‌گیرند، می‌توان استفاده کرد. در روش آخر برداشت بدین صورت است که بعد از اندازه‌گیری مقاومت ویژه تمام نیم‌رخ‌ها در راستای x ، در مرحله بعد اندازه‌گیری در راستای y صورت می‌گیرد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که غالب برداشت‌های



شکل ۴. نمایش سه‌بُعدی شبه مقاطع چگالی جریان ظاهری نیم‌رخ‌های اندازه‌گیری VLF نسب به محل انباشت باطله زغال همراه با گسترش زون‌های آلوده (مناطق با چگالی جریان بالا).

۵ روش معکوس‌سازی سه‌بُعدی

با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (اختلاف پتانسیل، ΔV) و داشتن شدت جریان (I) تزریقی و لحاظ کردن فاکتور هندسی آرایش الکترودی، مقاومت ویژه ظاهری طبقات زیرسطحی محاسبه می‌شود که برای برآورد کردن مقاومت ویژه واقعی (ρ) باید از مدل‌سازی معکوس استفاده کرد. در مدل‌سازی معکوس سه‌بُعدی براساس حاکم بودن معادله دیفرانسیل (با مشتقات جزئی) زیر، مقاومت ویژه‌های مدل زیرسطحی طوری محاسبه می‌شود که پاسخ مدل برابر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده در نقاط مشخص روی سطح زمین باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + I = 0. \quad (5)$$

از آنجا که رابطه بین پارامترهای مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده رابطه‌ای غیر خطی است از این رو به منظور معکوس‌سازی، فرایند تکرار محاسبات برای حل مسئله مورد نیاز است. معکوس‌سازی داده‌های مقاومت ویژه به صورت زیر بیان می‌شود (ساساکی، ۱۹۹۴؛ سنتوز و سلطان، ۲۰۰۸).

$$\Delta d = J \Delta p, \quad (6)$$

که $\Delta d = d^c - d^{ob}$ بردار اختلاف بین پاسخ مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده، Δp بردار تصحیح پارامترهای مدل نسبت به مقدار اولیه اش p_0 و J ماتریس ژاکوبی یا ماتریس مشتقات جزئی پاسخ مدل نسبت به پارامترهای مدل $(J_{ij} = \partial d_i^c / \partial p_j)$ است. برای پارامتری کردن مدل طبق رویه معمول، آن را به تعدادی بلوک با مقاومت ویژه

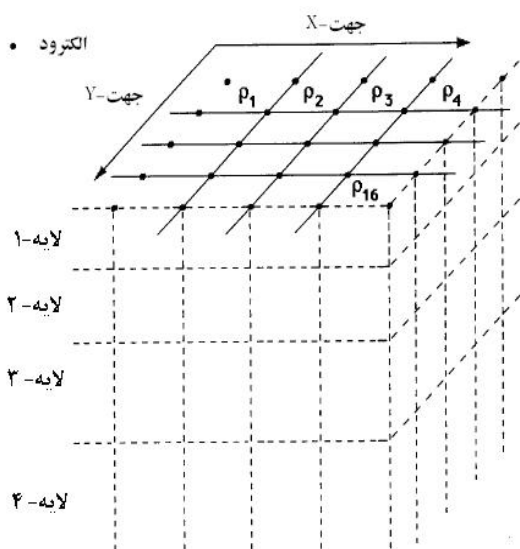
$$(J^T J + \lambda C^T C) \Delta p = J^T \Delta d, \quad (9)$$

در این نرم‌افزار $C^T C$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$C^T C = f_x f_x^T + f_z f_z^T, \quad (10)$$

که f_x و f_z به ترتیب فیلتر هموارساز افقی و عمودی در مدل‌سازی هستند.

برای حل مسئله معکوس‌سازی داده‌ها و پارامتری کردن مدل، ساختار زیرسطحی مدل موردنظر مطابق شکل ۵ به چندین لایه تقسیم‌بندی شده است و هر لایه نیز به تعدادی بلوک‌های (سلول‌های) مکعب مستطیلی شکل که هر یک از آنها دارای مقاومت ویژه متفاوت ولی مجهول هستند تقسیم می‌شود. با تقسیم این سلول‌ها به اجزای کوچک‌تر، تعداد پارامترهای مدل و نیز زمان موردنیاز برای معکوس‌سازی این دسته از داده‌ها به‌نحو چشمگیری افزایش می‌یابد. در مدل‌سازی معکوس هدف این است تا مقاومت ویژه هر یک از سلول‌های مدل به طریقی تعیین شوند تا پاسخ مدل در تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه باشد.



شکل ۵. پارامتری کردن مدل سه‌بُعدی زمین مورد بررسی در نرم‌افزار RES3DINV که در آن از تعدادی لایه و بلوک‌های مکعبی شکل که هر یک دارای مقاومت ویژه نامعلوم خاص خودشان هستند برای مدل زیرسطحی استفاده شده است.

ثابت و نامعلوم تقسیم می‌کنند. برای پایداری عملیات معکوس‌سازی از لگاریتم مقاومت ویژه مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود و سپس در صورتی که خطای داده‌های اندازه‌گیری شده در اختیار باشد، برای برآورد صحیح Δp در هر فرایند تکرار محاسبات تابع هدف زیر باید کمینه شود (ساساکی، ۱۹۹۴).

$$Q = \|W_d (\Delta d - J \Delta p)\|^2 + \lambda \|C \Delta p\|^2, \quad (7)$$

با کمینه کردن رابطه فوق، معادلات معمولی زیر نتیجه می‌شود.

$$(J^T W_d^T W_d J + \lambda C^T C) \Delta p = J^T W_d^T W_d \Delta d, \quad (8)$$

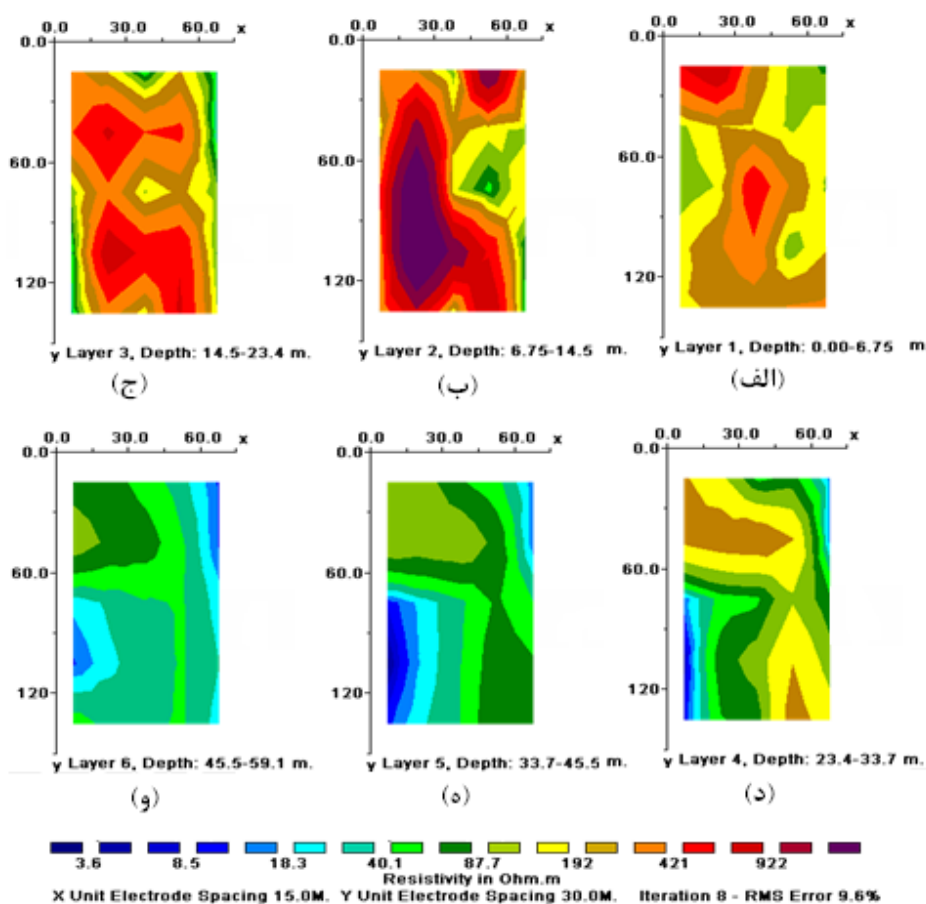
که W_d ماتریس قطری وزنی است که عناصر آن را عکس مقدار خطای (انحراف معیار) داده‌ها تشکیل می‌دهند و عملگر C نیز ماتریس ناهمواری مدل است. پارامتر λ یک ضریب لاگرانژ است که همواری مدل را حین فرایند مدل‌سازی کنترل می‌کند. با حل دستگاه معادلات معمولی (۸) با روش‌های متفاوت مثل روش تجزیه مقادیر تکین و یا روش گرادیان مزدوج و با اضافه کردن بردار Δp به مقدار اولیه p_0 ، پارامترهای مدل به‌هنگام (update) می‌شود. این فرایند به صورت تکراری تا جایی ادامه پیدا می‌کند تا آنکه منطبق نبودن پاسخ مدل موردنظر با داده‌های اندازه‌گیری شده کاهش یابد و به حد قابل قبول تعیین شده برسد. به عبارت دیگر پاسخ مدل برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده صحرائی داشته باشد.

در نرم‌افزار RES3DINV (لوک، ۲۰۰۲) به‌منظور مدل‌سازی معکوس سه‌بُعدی داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده از روش کمترین مربعات هموار مقید شده (Smoothness constrained least squares) استفاده می‌شود. در این روش با فرض بر آنکه خطای داده‌های اندازه‌گیری شده در اختیار نباشد، دستگاه معادلات معمولی داده شده در معادله (۸) به صورت زیر اصلاح می‌شود.

۶ نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی

پس از برداشت داده‌های مقاومت ویژه در یک شبکه سه‌بعدی، مقادیر مقاومت ویژه ظاهری با توجه به فاکتور هندسی مربوط به آن محاسبه شد. برای مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های برداشت شده، از نرم‌افزار RES3DINV استفاده شده است. داده‌ها به صورت فرمت ورودی نرم‌افزار مرتب و سپس مدل‌سازی شد. شکل‌های ۶ تا ۸ نتایج مدل‌سازی معکوس داده‌های اندازه‌گیری شده با نرم‌افزار پیش‌گفته را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج به صورت شش مقطع افقی (الف تا و) مقاومت ویژه در بازه‌های متفاوت عمقی آورده شده‌اند.

این برنامه برای مدل‌سازی، روش کمترین مربعات و روش گاوس - نیوتن را به کار می‌برد. محاسبات عددی در این نرم‌افزار با روش‌های تفاوت‌های محدود و اجزای محدود صورت می‌گیرد. در روش کمترین مجموع مربعات در هر بار تکرار، برخلاف روش گاوس - نیوتن، ماتریس ژاکوبی ساخته نمی‌شود، بلکه ماتریس قبلی تصحیح می‌شود. این روش ده مرتبه سریع‌تر است و حافظه رایانه‌ای کمتری را برای محاسبات به خود اختصاص می‌دهد. در ضمن روش سنتی گاوس - نیوتن را نیز می‌توان در این برنامه به کار برد. این روش دقیق‌تر است و برای نواحی که اختلاف مقاومت ویژه بین آنها زیاد است، جواب بهتری می‌دهد. این برنامه این قابلیت را نیز دارد که دو یا سه تکرار اول را با روش گاوس - نیوتن انجام دهد (لوک، ۲۰۰۲).

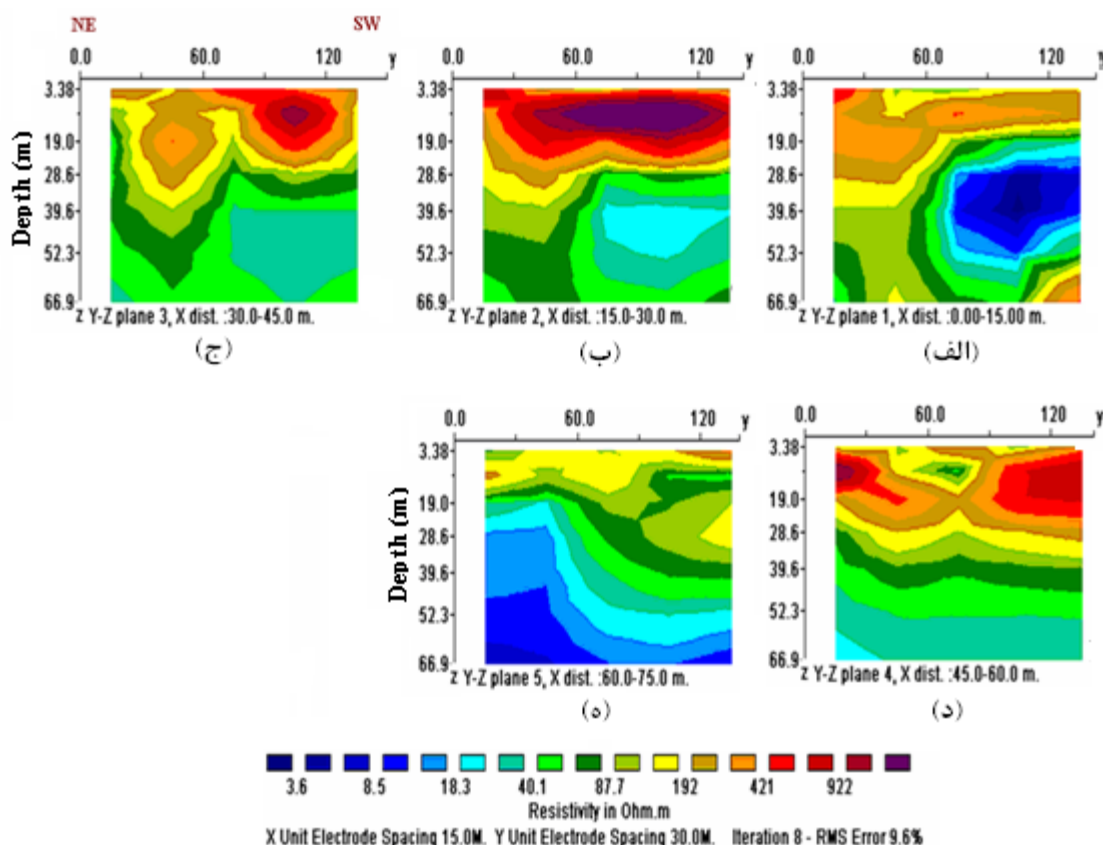


شکل ۶. مقاطع افقی مقاومت ویژه به دست آمده از مدل‌سازی معکوس با نرم‌افزار RES3DINV

مقاومت ویژه کمتر از ۱۸ اهم متر هستند، به خوبی مشاهده می شوند. رینولدز مقاومت ویژه شیرابه های محل دفن زباله ها را در دامنه ۵۰ تا کمتر از ۱۰ اهم متر و مقاومت ویژه زهاب اسیدی معدن را کمتر از ۱۰ اهم متر تعیین کرد (رینولدز، ۱۹۹۷). بنابراین نواحی با رنگ آبی تا آبی تیره در مقطع پنجم (شکل ۶-ه) که در محدوده عمقی ۳۳/۷ تا ۴۵/۵ متری قرار گرفته اند بیشتر به نظر می آید ناشی از آلودگی زهاب اسیدی حاصل از انباشت باطله های مناطق بالا دستی و همچنین به دلیل تأثیر نفوذ آب آلوده از طریق حوضچه سد باطله باشند.

شکل ۷ نتایج مدل سازی سه بُعدی را به صورت مقاطع قائم در جهت y نشان می دهد.

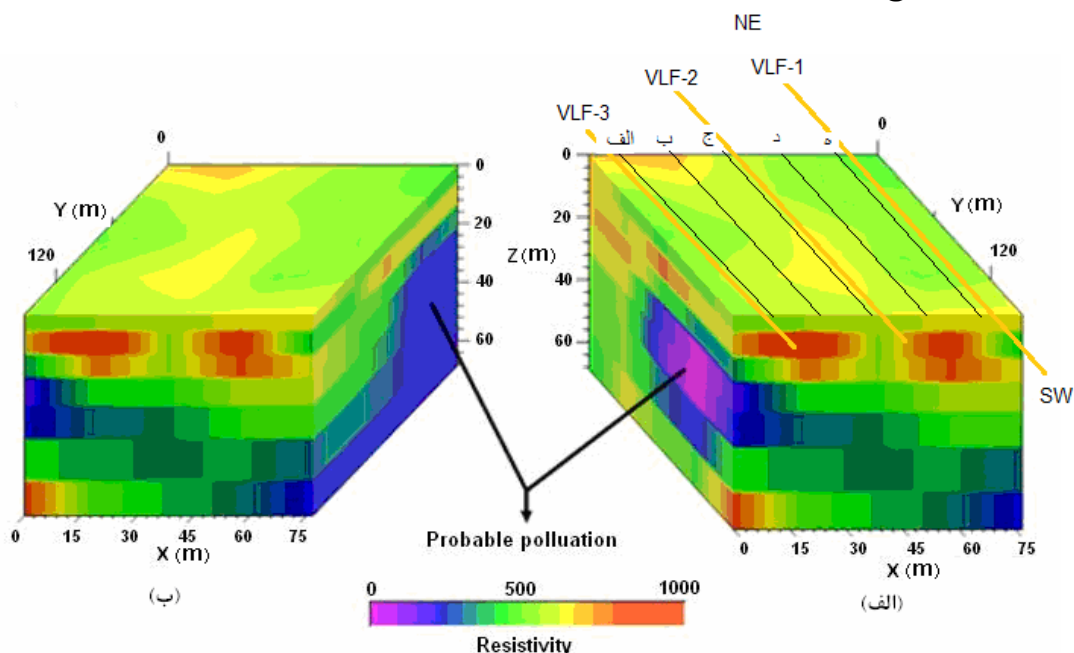
با توجه به مقاطع به دست آمده، لایه های سطحی به دلیل هوازدگی رسوبات آبراهه ای مقاومت ویژه زیادی را آشکار می سازند که این نواحی با رنگ های سرخ تیره به خوبی مشخص اند. ولی در نتایج مدل سازی، مقطع سطحی نسبت به دومین مقطع، دارای مقاومت ویژه کمتری است، که این شاید به دلیل پراکندگی ذرات ریز ناشی از دیو باطله زغال شویی در اثر باد، و قرارگیری آنها روی خاک منطقه پایین دست آن باشد. از مقطع سوم (شکل ۶-ج) به سمت عمق در قسمت شمال شرقی و جنوب غربی از شبکه برداشت، کاهش در مقاومت ویژه مشاهده می شود که این نواحی در مقطع سوم با رنگ سبز فسفری با مقاومت ویژه بین ۴۰-۵۰ اهم متر شروع و در مقاطع (د)، (ه)، (و) با رنگ آبی تا آبی تیره که دارای



شکل ۷. مقاطع قائم مقاومت ویژه (در امتداد محور y) حاصل از مدل سازی سه بُعدی با نرم افزار RES3DINV

VLF نیم‌رخ ۱ (شبه‌مقطع چگالی جریان نیم‌رخ ۱ شکل ۴) را در کل و البته با تفاوت‌هایی تأیید می‌کند. علاوه بر آن مقاطع مقاومت ویژه در امتداد محور X نیز تهیه شده است که به دلیل محدودیت فضا از آوردن آن اجتناب شده است. شکل ۸ مدل سه‌بعدی منطقه پایین‌دست دپو باطله را که توسط نرم‌افزار RES3DINV حاصل شده و به کمک نرم‌افزار Slicer\Dicer (www.Slicerdicer.com) تهیه شده در دو زاویه متفاوت نشان می‌دهد. نواحی آلوده که دارای مقاومت ویژه کم هستند در این مدل به خوبی با رنگ آبی و آبی مایل به صورتی قابل مشاهده‌اند. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، در جهت عمق، گسترش آلودگی احتمالی در قسمت شمال‌شرقی و جنوب‌غربی از شبکه برداشت مشاهده می‌شود. بنابراین نتایج به دست آمده از مدل‌سازی حاکی از حضور آلودگی احتمالی و همچنین گسترش آلودگی به سمت عمق در منطقه پایین‌دست دپوی باطله است.

با توجه به شکل فوق، حضور نواحی آلوده با مقاومت ویژه کم (کمتر از ۱۸ اهم‌متر) که به رنگ آبی تا آبی تیره هستند، در سمت راست مقطع اول (شکل ۷-الف) به خوبی مشاهده می‌شوند و در مقاطع دوم (ب) تا چهارم (د) شدت آلودگی کم شده است. مرکز آلودگی در مقطع اول (شکل ۷-الف) تقریباً در عمق ۳۶ متری است که این عمق تطابق خوبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های VLF (شبه‌مقاطع چگالی جریان شکل ۴) مربوط به نیم‌رخ ۳ و همچنین نتایج سونداژزنی در قسمت پایین‌دست این منطقه دارد (سونداژ S2). عمق سطح آب-زیرزمینی در محل این سونداژزنی همان‌طور که قبلاً اشاره شد، تقریباً در ۳۵ متری مدل شده است. این در حالی است که در مقطع پنجم (شکل ۷-ه) زون آلوده احتمالی با مقاومت ویژه کمتر از ۱۸ اهم‌متر در عمق ۲۸ متری در سمت چپ شکل قرار گرفته و به طرف راست عمق قرارگیری آن به ۵۵ متری می‌رسد. زون احتمالی آلوده مدل شده در این شکل نتایج مربوط به مدل‌سازی داده‌های



شکل ۸. مدل سه‌بعدی مقاومت ویژه منطقه پایین‌دست دپو باطله کارخانه زغال‌سنگ البرز شرقی با دو زاویه دید شمال‌غربی (الف) و شمال‌شرقی (ب) علاوه بر آن در سطح بالایی شکل (۸-الف) موقعیت سه نیم‌رخ VLF و مقاطع پنج‌گانه مقاومت ویژه نشان داده شده در شکل ۷ نیز آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود راستای نیم‌رخ‌های VLF و مقاطع مقاومت ویژه شمال شرق (NE)-جنوب غرب (SW) است.

می‌تواند در تشخیص محدوده آلودگی، تعیین جهت گسترش آن و عرضه راهکارهای کنترلی به منظور کاهش تولید آلودگی برای جلوگیری از صرف هزینه‌های کلان برای پاک‌سازی مناطق آلوده در منطقه مورد بررسی و یا مناطق مشابه، مفید واقع شود.

منابع

شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، ۱۳۵۷، اکتشافات تفصیلی منطقه زغالی پشکلات: گروه تهیه گزارش‌های دفتر فنی اکتشافات شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، ۱۸۳.

شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، ۱۳۶۰، اکتشافات تفصیلی منطقه زغالی رزمجا: گروه تهیه گزارش‌های دفتر فنی اکتشافات شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، ۲۴۱.

شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، ۱۳۸۶، گزارش اطلاعات مربوط به زغال‌شویی و آزمایشگاه کیفیت زغال: آرشیو شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی، ۸۵.

جدیری شکری، ب، مراد زاده، ع، دولتی ارده جانی، ف، و انصاری جعفری، م، ۱۳۸۸، شناسایی آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از محل انباشت باطله‌های کارخانه زغال‌شویی با استفاده از مطالعات ژئوفیزیکی: فصلنامه علمی-پژوهشی علوم و تکنولوژی محیط زیست (در نوبت چاپ).

مرادزاده، ع، دولتی ارده جانی، ف، و فلاح پیشه، س، ۱۳۸۷، مطالعه محدوده آلودگی ناشی از معدن کاری سرب و روی تاش با روش‌های ژئوفیزیکی VLF، IP و مقاومت ویژه: سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، ۲۸۸-۲۸۳.

نتایج حاصل از مدل‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده در برداشت‌های ژئوفیزیکی بیانگر تطابق بین این روش‌ها و حاکی از نشانه‌های آلودگی احتمالی در نواحی شمال شرقی و جنوب غربی از شبکه است. در همه مقاطع حاصل از مدل‌های سه‌بعدی، وجود آلودگی احتمالی با توجه با کاهش مقادیر مقاومت ویژه (کمتر از ۱۸ اهم‌متر) از عمق تقریبی ۳۰ متری شروع می‌شود و تا عمق ۶۰ متری ادامه دارد. با مقایسه مدل‌ها می‌توان گسترش و عمق قرارگیری مرکز آلودگی احتمالی را مورد توجه قرار داد.

۷ نتیجه‌گیری

در این مقاله برای تعیین مناطق آلوده در پایین دست باطله‌های حاصل از شست‌وشوی زغال‌سنگ در منطقه زغال‌شویی البرز شرقی ابتدا روش الکترومغناطیس VLF در امتداد چهار نیم‌رخ به فواصل ۳۰ متر از یکدیگر و نقاط اندازه‌گیری ۵ متر مورد استفاده قرار گرفت. سپس به دنبال آن شبکه برداشت سه‌بعدی مقاومت ویژه طراحی شد. در این برداشت، نیم‌رخ‌های اندازه‌گیری سه‌بعدی ژئوفیزیکی در یک شبکه مستطیلی 6×6 و با فواصل الکتروودی متفاوت در راستای $x=15$ متر و $y=30$ متر طراحی شد. اندازه‌گیری سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه با آرایش قطبی-دوقطبی به صورت رفت و برگشت و همچنین به صورت قطری روی شبکه طراحی شده صورت گرفت. سپس داده‌های اندازه‌گیری شده با نرم‌افزار RES3DINV به روش معکوس مدل‌سازی و مورد تفسیر قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی گسترش نواحی با مقاومت کم از عمق تقریبی ۳۰ متری به سمت اعماق پایین‌تر را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر منطقه آلوده احتمالی تقریباً دارای گسترش ۳۰ متر است که از عمق حدود ۳۰ متری شروع و تا عمق ۶۰ متری ادامه دارد. با مقایسه مقاطع حاصل از مدل‌ها می‌توان گسترش و عمق قرارگیری مرکز آلودگی احتمالی را مورد توجه قرار داد. نتایج حاصل از این تحقیق

ABEM, 1999, Instruction manual for Terameter SAS 1000.

ABEM, 2000, ABEM instruction manual, WADI-VLF instrument.

ABEM, 2002, RAMAG instruction manual, VLF survey planning and interpretation software.

Al-Tarazi, E., Abu Rajab, J., Al-Naqa, A., and El-Waheidi, M., 2008, Detecting leachate plumes and groundwater pollution at Ruseifa

- Extended Abstracts, 734-738.
- Karous, M., and Hjelt, S. E., 1989, Linear filtering of VLF dip angle measurements: *Geophysical Prospecting*, **31**, 782-794.
- King, A., 1994, Application of geophysical methods for monitoring acid mine drainage: CANMET Library.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1992, Approximate inverse mappings in DC resistivity problems: *Geophys. J. Int.*, **109**, 343-362.
- Loke, M. H., and Barker, R. D., 1996, Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion: *Geophysical Prospecting*, **44**, 499-523.
- Loke, M. H., 1999, Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, a practical guide to 2-D and 3-D surveys: Geotomo Software Co.
- Loke, M. H., 2002, RES3DINV, Rapid 3D resistivity & IP inversion using the least squares method: Geotomo Software Co.
- Mansoor, M., and Slater, L., 2007, Aquatic electrical resistivity imaging of shallow-water wetlands: *Geophysics*, **75**, 211-221.
- Milson, J., 2002, *Field geophysics*: Cambridge University Press.
- Nyquist, J. E., and Roth, M. J. S., 2005, Improved 3D pole-dipole resistivity surveys using radial measurement pairs: *Geophysical Research Letters*, **32**, L21416.
- Ogilvy, R. D., and Lee, A. C., 1991, Interpretation of VLF-EM in-phase data using current density pseudo-section: *Geophysical Prospecting*, **39**, 567-580.
- Ogilvy, R., Meldrum, P., Chambers, J., and Williams, G., 2002, The use of 3D electrical resistivity tomography to characterize waste and leachate distributions within a closed landfill, Thriplow, UK: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **7**, 11-18.
- Ogilvy, R. D., Kuras, O., Palumbo-Roe, B., Meldrum, P. I., Wilkinson, P. B., Chambers, J. E., and Klinck, B. A., 2009, The detection and tracking of mine-water pollution from abandoned mines using electrical tomography: *International Mine Water Conference*. Pretoria, South Africa.
- Oldenburg, D. W., 1996, DC resistivity and IP methods in acid mine drainage problems, results from the Copper Cliff mine tailings impoundments: *J. Appl. Geophys.*, **34**, 187-198.
- Paterson, N., 1997, Remote Mapping of Mine Wastes: 4th decennial international conference municipal landfill utilizing VLF-EM method: *J. Appl. Geophys.*, **65**, 121-131.
- Benson, A. K., Payne, K. L., and Stubben, M. A., 1997, Mapping groundwater contamination using DC resistivity and VLF geophysical methods: *Geophysics*, **62**, 80-86.
- Bentley, L. R., and Gharibi, M., 2004, Two- and three-dimensional electrical resistivity imaging at a heterogeneous remediation site: *Geophysics*, **69**, 674-680.
- Brunner, I., Friedel, S., Jacobs, F., and Danckwardt, E., 1999, Investigation of a tertiary Maar structure using three-dimensional resistivity imaging: *Geophys. J. Int.*, **136**, 771-780.
- Casas, A., Himi, M., Diaz, Y., Pinto, V., Font, X., and Tapias, J., 2008, Assessing aquifer vulnerability to pollutants by electrical resistivity tomography (ERT) at a nitrate vulnerable zone in NE Spain: *Environ. Geology*, **54**, 515-520.
- Dahlin, T., and Bernstone, C., 1997, A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays: SAGEEP'97, Reno, Nevada, Extended Abstracts, 927-935.
- Doulati Ardejani, F., Jodieri Shokri, B., Moradzadeh, A., Soleimani, E., and Ansari Jafari, M., 2008, A combined mathematical-geophysical model for prediction of pyrite oxidation and pollutant leaching associated with a coal washing waste dump: *International Journal of Environmental Science and Technology (IJEST)*, **5**, 517-526.
- Fahringer, P., 2002, Shallow EM investigations of AMD at an abandoned coal mine in northern West Virginia: *The Leading Edge*, 478-481.
- Frid, V., Liskevich, G., Doudkinski, D., and Korostishevsky, N., 2007, Evaluation of landfill disposal boundary by means of electrical resistivity imaging: *Environ. Geology*, **49**, 839-853.
- Gharibi, M., and Bentley, L. R., 2005, Resolution of 3-D electrical resistivity images from inversions of 2-D orthogonal lines: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **10**, 339-349.
- Hammack, R. W., Sams, J. I., Veloski, G. A., and Mabie, J. S., 2003, Geophysical investigation of the Sulphur Bank Mercury Mine Superfund Site, Lake County, California: *Mine Water and the Environment*, **22**, 69-79.
- Kamkar Rouhani, A., 2001, Developments in resistivity methods for detection of subsurface pollution: 31st Congress of International Association of Hydro-geologists (IAH),

- 22.
- Santos, F. A. M., Mateus, A., Jorge Figueiras, J., and Gonçalves, M. A., 2006, Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method, a case study: *J. Appl. Geophys.*, **60**, 115-125.
- Santos, F. A. M., and Sultan, S. A., 2008, On the 3-D inversion of vertical electrical soundings; Application to the South Ismailia area-Cairo desert road, Cairo, Egypt: *J. Appl. Geophys.*, **65**, 97-110.
- Sasaki, Y., 1994, 3-D resistivity inversion using the finite-element method: *Geophysics*, **59**, 1839-1848.
- Singer, P. C. and Stumm, W., 1970, Acidic mine drainage, The rate determining step: *Science*, **167**, 1121-1123.
- Soupios, P., Papadopoulos, I., Kouli, M., Georgaki, I., Vallianatos, F., and Kokkinou, E., 2006, Investigation of waste disposal areas using electrical methods, a case study from Chania, Crete, Greece: *Environ. Geology*, **51**, 1249-1261.
- Spindler, K., and Olyphant, G., 2004, Geophysical investigations at an abandoned mine site subjected to reclamation using a fixated scrubber sludge cap: *Environmental Eng. Geosciences*, **10**, 243-251.
- Tiwary, R. K., 2001, Environmental impact of coal mining on water regime and its management: *Water, Air, and Soil Pollution*, **132**, 185-199.
- Vega, M., Osella, A., and Lascano, E., 2003, Joint inversion of Wenner and dipole-dipole data to study a gasoline-contaminated soil: *J. Appl. Geophys.*, **54**, 97-109.
- Yuval, D., and Oldenburg, W., 1996, DC resistivity and IP methods in acid mine drainage problems; results from the Copper Cliff mine tailings impoundments: *J. Appl. Geophys.*, **34**, 187-198.
- on mineral exploration, Canada, 905-916.
- Pellerin, L., 2002, Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations: *Surveys in Geophysics*, **23**, 101-132.
- Perozzi, L., and Holliger, K., 2008, Detection and characterization of preferential flow paths in the downstream area of a hazardous landfill: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **13**, 343-350.
- Radulescu, M., Valerian, C., and Yang, J., 2007, Time-lapse electrical resistivity anomalies due to contaminant transport around landfills: *Annals of Geophysics*, **50**, 453-468.
- Reynolds, J.M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics: John Wiley & Sons Ltd., Chapter 7, 422-423.
- Rucker, D., and Fink, J., 2007, Inorganic plume delineation using surface high resolution electrical resistivity at the BC Gribs and Trenches Site, Hanford: *Vadose Zone J.*, **6**, 946-958.
- Rucker, D.F., Levitt, M.T., and Greenwood, W.J., 2009a, Three-dimensional electrical resistivity model of a nuclear waste disposal site: *J. Appl. Geophys.*, **69**, 150-164.
- Rucker, D. F., Glaser, D. R., Osborne, T., and Maehl, W. C., 2009b, Electrical resistivity characterization of a reclaimed gold mine to delineate acid rock drainage pathways: *Mine Water and the Environment*, **28**, 146-157.
- Saharan, M. R., Gupta, K. K., Jamal, A., and Sheoran, A. S., 1995, Management of acidic effluents from tailing dams in metalliferous mines: *Mine Water and the Environment*, **14**, 85-94.
- Samsudin, A. R., Yaacob, W. Z., and Hamzah, U., 2006, Mapping of contamination plumes at municipal solid waste disposal sites using geoelectric imaging technique, Case studies in Malaysia: *Journal of Spatial Hydrology*, **6**, 13-