

## مطالعه حفره های زیر سطحی با استفاده از روش تصویر سازی سه بعدی مقاومت الکتریکی

احمد نیامد پور

گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجدسلیمان، مسجدسلیمان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۹

a.npou@yahoo.com

### چکیده

کاربرد سه نوع آرایه الکترونی جهت شناسایی یک حفره زیرزمینی بررسی گردید. تصویر سازی سه بعدی مقاومت الکتریکی در امتداد هشت پروفیل موازی با استفاده از آرایه های الکترونی قطبی-قطبی، قطبی-دوقطبی و دوقطبی-دوقطبی با فاصله بین الکترونی یک متر و شبکه مستطیلی صورت گرفت. برگردان سازی داده ها توسط یک الگوریتم وارون سازی سه بعدی مبتنی بر روش برگردان سازی هوشمند انجام گردید. جهت بدست آوردن نتایج بهتر، برگردان سازی الحاقی جفت داده های قطبی-قطبی + قطبی-دوقطبی، قطبی-دوقطبی + دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی + دوقطبی انجام شد. ابعاد افقی و قائم حفره در نتایج وارون سازی الحاقی داده های مقاومت الکتریکی بخوبی مشخص گردید. مدل‌های ایجاد شده با نتایج برگردان سازی هر کدام از آرایه های الکترونی بصورت مجزا مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان دادند که وارون سازی الحاقی داده ها ضمن بهبود تفسیر ابعاد قائم حفره وضوح افقی قابل قبولی را در اختیار می گذارد.

**کلمات کلیدی:** تصویر سازی سه بعدی، مقاومت الکتریکی ظاهری، حفره زیر زمینی، وارون سازی الحاقی، آرایه الکترونی

### مقدمه

کاوشهای مقاومت ویژه الکتریکی برای مطالعه خواص الکتریکی ساختارهای زیر زمینی مورد استفاده قرار گرفته اند. از جمله اولین تحقیقات انجام شده برای مطالعات مقاومت ویژه الکتریکی در علوم زمین توسط Gray و Wheeler در سال ۱۷۲۰ و Watson در سال ۱۷۴۲ می باشند (Van and Cook, 1966؛ Jakosky, 1950). Gray و Wheeler رساندگی الکتریکی مواد زیر سطحی گوناگون را اندازه گیری نمودند و Watson دریافت که زمین الکتریسیته را منتقل می کند. با این وجود، این مطالعات به تکنیکهای اندازه گیری کمی منجر نشد. اولین کار موفق از کاربرد جریانهای الکتریکی برای ارزیابی مقاومت ویژه الکتریکی زمین توسط کنراد شلومبرژه در سال ۱۹۲۰ انجام شد (Loke, 2009). اگرچه مطالعات مقاومت ویژه الکتریکی در زمین شناسی در اوایل قرن هجدهم انجام شد، کاربردهای آن پس از پیشرفت تکنولوژی محاسباتی در فاصله زمانی ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ بطور گسترده مورد توجه قرار گرفت (Reynolds, 1997). تجهیزات چند کاناله اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی کاربرد کاوشهای مقاومت ویژه الکتریکی را در مناطق وسیع و با ساختارهای زیرسطحی پیچیده امکان پذیر نمود.

در چند سال گذشته روش تصویرسازی مقاومت ویژه الکتریکی یکی از مهمترین شیوه های ژئوفیزیکی برای بررسی ساختارهای زیرزمینی نزدیک به سطح شده است. در کاوش تصویر سازی مقاومت الکتریکی، داده های صحرائی در امتداد یک پروفیل بطور معمول بصورت توزیع زیرسطحی مقاومت ویژه الکتریکی بدست می آیند. یک روش معمول برای بدست آوردن توزیع مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی، وارون سازی مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری می باشد. وارون سازی داده های مقاومت ویژه الکتریکی بخاطر خاصیت غیر خطی آن بسیار پیچیده است (Singh et al., 2005). این موضوع مخصوصاً در مورد مناطق با تباين مقاومت ویژه الکتریکی بالا صحیح می باشد (El-Qady

and Ushijima, 2001). در طول دهه های گذشته مطالعاتی روی رهیافت های گوناگون برای وارون سازی داده های یک بعدی مقاومت ویژه الکتریکی انجام شده است (Loke and Barker, 1996). وارون سازی داده های مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی که بر اساس روش تفاضلهای محدود یا المان های محدود استوار می باشند، برای تفسیر داده های مقاومت ویژه الکتریکی بکار گرفته شد (Dey and Morrison, 1979؛ Loke and Barker 1996).

از آنجا که بسیاری از مشکلات وابسته به اکتشافات ژئوفیزیکی ناشی از طبیعت سه بعدی ساختارهای زیر زمینی می باشد، چندین الگوریتم برای حل مشکل تصویر سازی سه بعدی مقاومت ویژه الکتریکی توسعه داده شد (Loke and Dahlin and Loke ؛ Zhang et al., 1995 ؛ and Barker , 1996 ؛ Spitzer, 1998 ؛ Thomas, 2004). این الگوریتمها نیز بر مبنای المان های محدود، تفاضلهای محدود و روشهای انتگرالی استوار می باشند. ارتقاء یک راه حل پایدار برای مساله وارون سازی که همزمان ساختارهای زمین شناسی پیچیده را آشکار نماید همچنان یک موضوع مهم در مورد تفسیر داده های ژئوفیزیکی می باشد (El-Qady and Ushijima, 2001).

روش کاوش مقاومت ویژه الکتریکی یک شیوه سنتی و مرسوم جهت ارزیابی مقاومت ویژه الکتریکی مواد زیر سطحی زمین می باشد. این روش یکی از محبوب ترین تکنیکهای ژئوفیزیکی در کاوشهای ژئوالکتریکی است. بدلیل ایجاد سیستمهای اتوماتیک جمع آوری داده ها، این روش توانایی تهیه تصاویر با کیفیت از ساختارهای زیر زمینی را دارد شکل (۱) روش مقاومت ویژه الکتریکی را بصورت شماتیک نشان می دهد.

دو الکتروود جریان C1 و C2 جریان الکتریکی را درون زمین تزریق می کنند. دو الکتروود پتانسیل P1 و P2 تغییرات پتانسیل الکتریکی را با تعیین افت پتانسیل الکتریکی در سطح زمین اندازه گیری می کنند. با در

جدول ۱. مقایسه آرایه های الکترودی مختلف مورد استفاده در کاوش های مقاومت ویژه الکتریکی دوعدی. اعداد درون جدول که از ۱ تا ۴ طبقه بندی شده اند جهت مقایسه پارامترها بکار برده شده اند.

عمق کاوش	حساسیت به ساختارهای قائم	حساسیت به ساختارهای افقی	پوشش افقی داده ها	قدرت سیگنال	نوع آرایه
۱	۱	۴	۱	۴	W
۲	۲	۲	۲	۳	WS
۳	۴	۱	۳	۱	DD
۳	۱	۲	۳	۲	PD
۴	۲	۲	۴	۴	PP

### اندازه گیری داده های مقاومت الکتریکی ویژه

در این بخش زمین شناسی منطقه مورد مطالعه به اختصار توضیح داده شده است. همچنین عملیات اندازه گیری داده های مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری توسط آرایه های الکترودی PP، DD و PD با ذکر جزئیات گسترش الکترودها و تعداد داده های اندازه گیری شده ارائه شده است.

### زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه به وسعت ۱۶۰ متر مربع در ابعاد ۸×۲۰ متر (جدول ۲) در فاصله ۲۸ کیلومتری شمال شرق مسجد سلیمان (۸/۵ کیلومتر بعد از سه راهی لالی) واقع شده است.

جدول ۲. مختصات محدوده مورد مطالعه

نقطه	مختصات
P1	N32 06 04.4 E49 05 29.1
P2	N32 06 04.1 E49 05 29.1
P3	N32 06 04.1 E49 05 28.3
P4	N32 06 04.4 E49 05 28.3

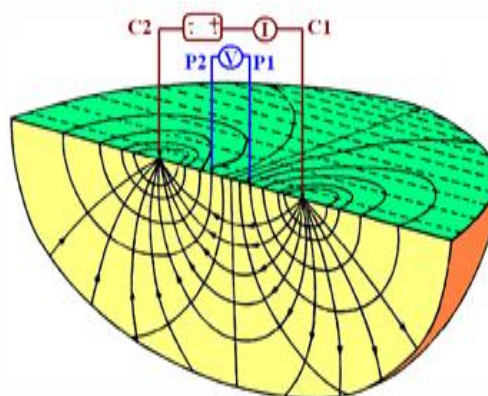
این محدوده بر روی سازند آغاچاری به سن میوسن واقع شده است که از نظر لیتولوژی شامل توالیهای ماسه سنگی با میان لایه های ژیبسی می باشد و به شدت تحت هوازدگی فیزیکی قرار گرفته است و در آن درز و شکاف فراوانی به وجود آمده است، که این مطلب موجب نفوذ آبهای جوی به داخل سازند آغاچاری شده و سبب انحلال میان لایه های ژیبسی آن شده، در نتیجه موجب تشکیل فضای خالی و غار ماندگی در زیر این قسمت شده است (شکل ۲).

لذا هدف از انجام این تحقیق تعیین محدوده و مشخصات این حفره تشکیل شده در زیر سطح زمین با استفاده از اندازه گیری مقاومت الکتریکی نقاط زیر سطحی بصورت سه بعدی می باشد.

دست داشتن اختلاف پتانسیل و مقدار جریان تزریق شده و موقعیت الکترودها می توان مقاومت ظاهری را بر اساس رابطه زیر به دست آورد .

$$\rho_a = K \times \frac{\Delta V}{I} \quad (1) \text{ رابطه}$$

با استفاده از این اندازه گیریها، توزیع مقاومت ویژه الکتریکی مواد زیر سطحی زمین بدست می آید و در نتیجه مدل فیزیکی ساختار زیر سطحی پس از تفسیر داده ها تهیه می گردد.



شکل ۱. نمایی شماتیک از روش اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی

### آرایه های مرسوم برای کاوش های دوعدی مقاومت ویژه الکتریکی

چندین آرایش الکترودی معمولاً برای کاوشهای مقاومت ویژه الکتریکی بکار برده می شوند. این آرایه ها مزیتها و محدودیتهای ویژه ای دارند. سهولت استفاده در کارهای صحرائی و قدرت تفکیک یا وضوح داده ها برای نا همسانگردی های زیر سطحی، نقش اساسی در انتخاب نوع آرایه مناسب برای یک کاوش بخصوص بازی می کنند. بدلیل اینکه قدرت سیگنال به نوبه با انتخاب انواع مختلف پیکربندی الکترودها تغییر می کند، کیفیت داده های اندازه گیری شده به شدت متأثر از نوع آرایه انتخاب شده می باشد. آرایه هایی که در عمل برای کاوشهای تصویرسازی دو - بعدی کاربرد بیشتری دارند عبارتند از: ونر (W)، دو قطبی - دو قطبی (DD)، ونر - شلمبرژه (WS)، قطبی - قطبی (PP) و قطبی - دو قطبی (PD). جدول (۱) مشخصه های زیر را برای آرایه های نام برده شده مقایسه می کند؛ (i) قدرت سیگنال، (ii) پوشش افقی داده ها، (iii) حساسیت آرایه نسبت به ساختارهای افقی، (iv) حساسیت آرایه نسبت به ساختارهای قائم و (v) عمق کاوش (Loke, 2009; Hesse, 1986; Griffiths and Barker, 1993).

### کاوشهای دو و نیم بعدی (2.5D) یا شبه سه بعدی

روش کاوش سه بعدی واقعی بخاطر نیاز آن به تعداد زیاد الکترودها و کابل در کاوشهای بزرگ مقیاس، بیشتر در کاوشهای مربوط به مناطق کم سطح استفاده می شود. یک شیوه جایگزین مناسب برای کاوش های بزرگ مقیاس، روش 2.5D است.

در این روش داده های دو بعدی در امتداد خطوط موازی و عمود بر هم جمع آوری می شوند (Dahlin and Loke, 1997). بنابراین جمع آوری داده های سه بعدی به روش فوق با تعداد کابل و الکترودهای کمتر و زمان کمتر امکان پذیر می شود.

در صورتیکه از شرایط هندسی به نحو مطلوب بهره گرفته شود، روش 2.5D برای جمع آوری داده ها و پردازش و تفسیر آنها مناسب خواهد بود (Gharibi et al, 2005).

این فایل های سه بعدی فایل های جداگانه ای برای وارون سازی الحاقی ( ترکیبی) برای ترکیبهای:  $DD + PP$ ،  $PD + PP$  و همچنین  $DD + PD$  تهیه گردیدند. تعداد داده های اندازه گیری شده در فایل های سه بعدی که با استفاده از پروفیل های موازی بدست آمده اند در جدول (۴) ارائه شده اند.

#### وارون سازی داده های اندازه گیری شده

داده های اندازه گیری شده در فایل های سه بعدی توسط نرم افزار Res3Dinv به داده های مقاومت ویژه الکتریکی تبدیل شدند. در کلیه موارد از روش Incomplete Gauss Newton استفاده شده است. شکل های (۴) الی (۶) مقاطع مربوط به داده های مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه گیری شده برای آرایه های  $PD$ ،  $DD$ ،  $PP$  و  $PD$  را نشان می دهند که بیانگر قابل اعتماد نبودن داده های مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری برای شناسایی ساختارهای زیر زمینی پیچیده بوده و لزوم عملیات وارون سازی داده ها به مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی را نشان می دهد.

جدول ۴. تعداد نقاط اندازه گیری شده در هر فایل سه بعدی

نام آرایه الکترودی	تعداد اندازه گیریها
قطبی - قطبی	۱۶۸۰
دوقطبی - دو قطبی	۱۶۶۴
قطبی - دوقطبی	۲۹۸۴
قطبی - قطبی + قطبی - دوقطبی	۴۶۶۴
قطبی - قطبی + دوقطبی - دو قطبی	۳۳۴۴
قطبی - دوقطبی + دوقطبی - دو قطبی	۴۶۴۸

#### تفسیر نتایج وارون سازی داده های مقاومت ویژه الکتریکی

در این بخش نتایج وارون سازی داده های مربوط به آرایه های سه بعدی مختلف تفسیر شده اند و بر اساس آنها موقعیت مکانی حفره زیر زمینی آب موجود در محل مورد مطالعه، تعیین شد.

#### آرایه DD

داده هایی که در محل مورد مطالعه توسط آرایه  $DD$  اندازه گیری شده اند، توسط نرم افزار Res3Dinv به مقادیر حقیقی مقاومت ویژه الکتریکی برگردانده شده و شکل (۷) با استفاده از این اطلاعات تهیه شده است. لایه های ۱ و ۲ دارای مقاومت های ویژه الکتریکی ۲۵۰ - ۸۰ اهم متر می باشند که بیانگر خاکهای سطحی بوده و عارضه با اهمیتی را نشان نمی دهند. در لایه شماره ۲، حد فاصل ۱۶-۱۴ متر یک منطقه با مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۳۰۰ اهم متر در راستای حفره زیرزمینی دیده می شود که احتمالاً ناشی از مصالح ساختمانی حفره و اجزا سازنده دیواره های آن می باشد. در سایر نقاط لایه شماره ۲ کاهش مقاومت ویژه الکتریکی زمینه نسبت به لایه شماره ۱ مشهود است. لایه شماره ۳ بطور کامل واضح حفره زیرزمینی را با مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از ۵۰۰ اهم متر نشان می دهد.



شکل ۲. نمایی از حفره زیر زمینی آب که در منطقه مورد مطالعه ایجاد شده است. ورودی حفره در جهت تقریبی شمال جنوب است.

#### اندازه گیری داده های صحرایی مقاومت الکتریکی ویژه

در عملیات صحرایی انجام شده در محدوده مورد مطالعه، تعداد هشت پروفیل موازی در راستای شرقی - غربی که در شکل (۳) نشان داده شده اند، توسط آرایه های الکترودی  $PD$ ،  $PP$  و همچنین  $DD$  بطور جداگانه اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی انجام شده است. تعداد الکترودهای مورد استفاده در هر پروفیل ۲۱ می باشد. فاصله الکترودهای مجاور در هر پروفیل مساوی یک متر بوده و فاصله پروفیل های متوالی نیز یک متر می باشد. جدول (۳) تعداد نقاط اندازه گیری شده توسط هر آرایه را نشان می دهد.

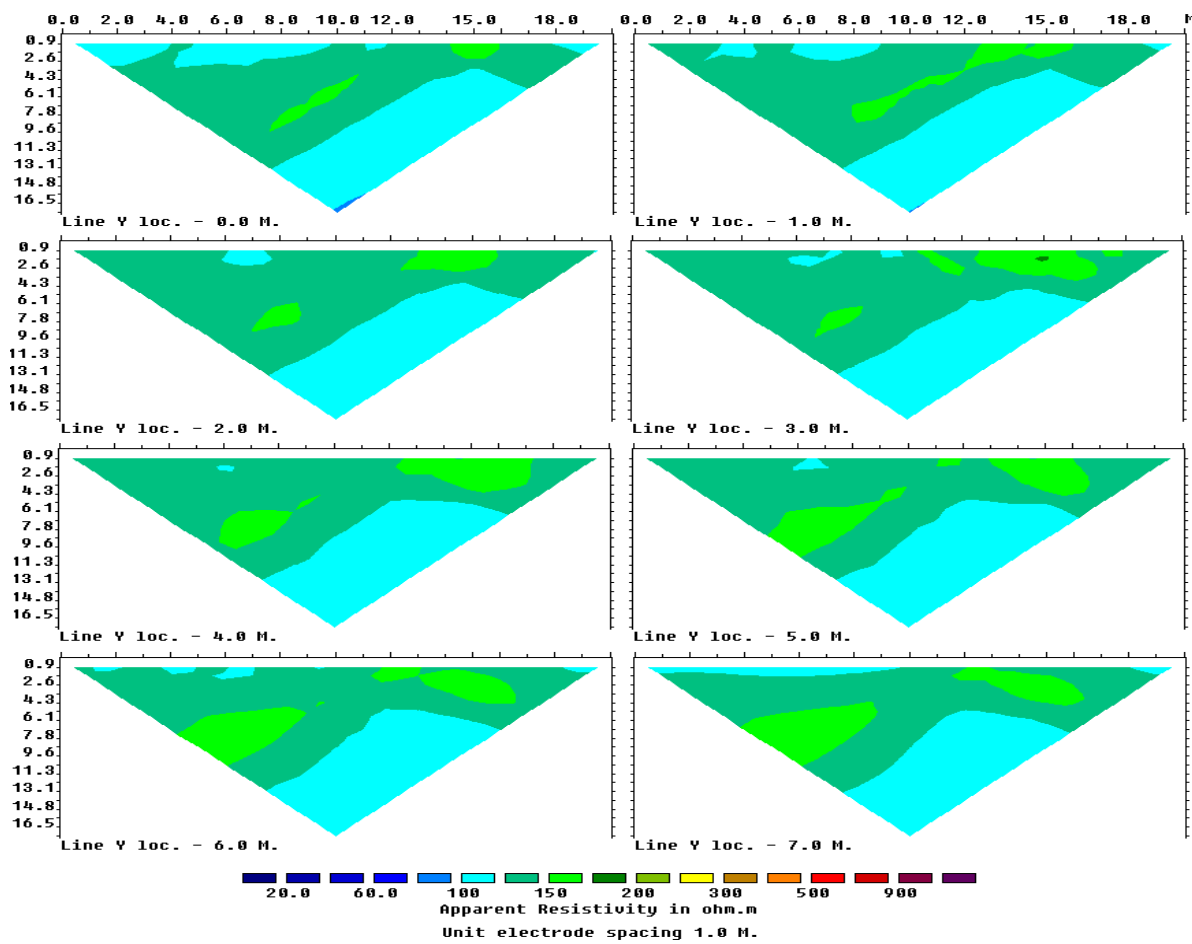


شکل ۳. نمایی از موضع گیری شرقی - غربی پروفیل ها در محدوده مورد مطالعه. مختصات چهار گوشه شبکه مستطیلی در جدول (۱) ارائه شده است.

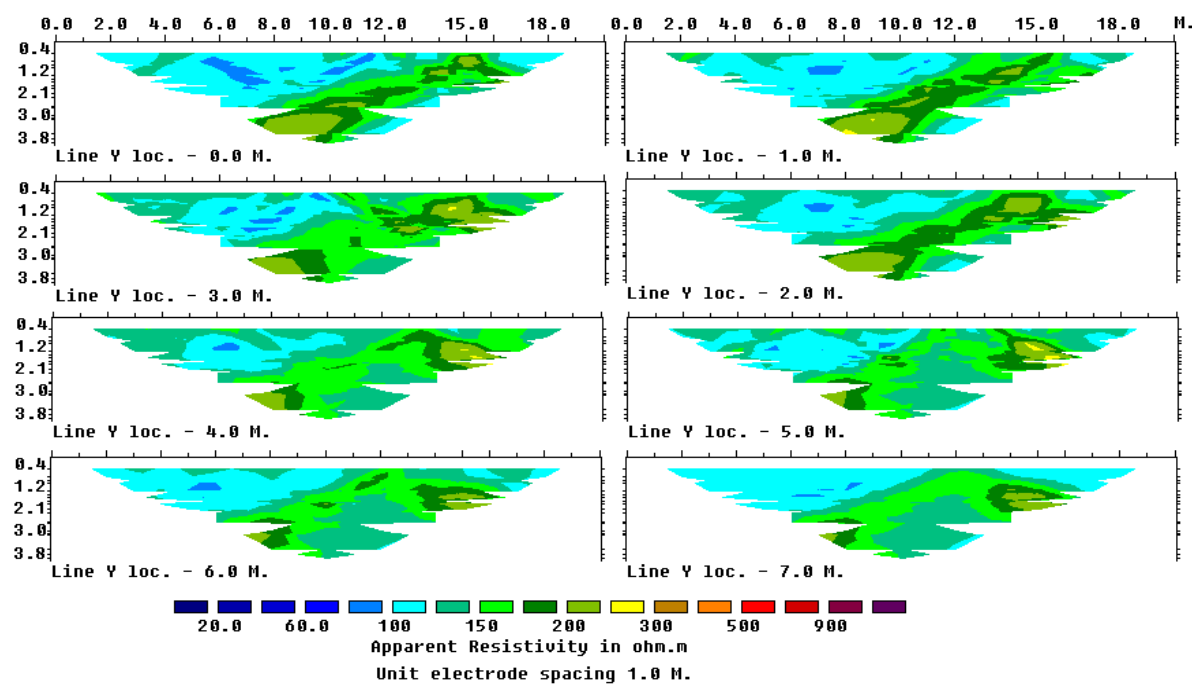
جدول ۳. تعداد نقاط اندازه گیری شده در هر پروفیل

نام آرایه الکترودی	تعداد نقاط اندازه گیری شده
قطبی - قطبی	۲۱۰
دوقطبی - دو قطبی	۲۰۸
قطبی - دوقطبی	۳۷۳

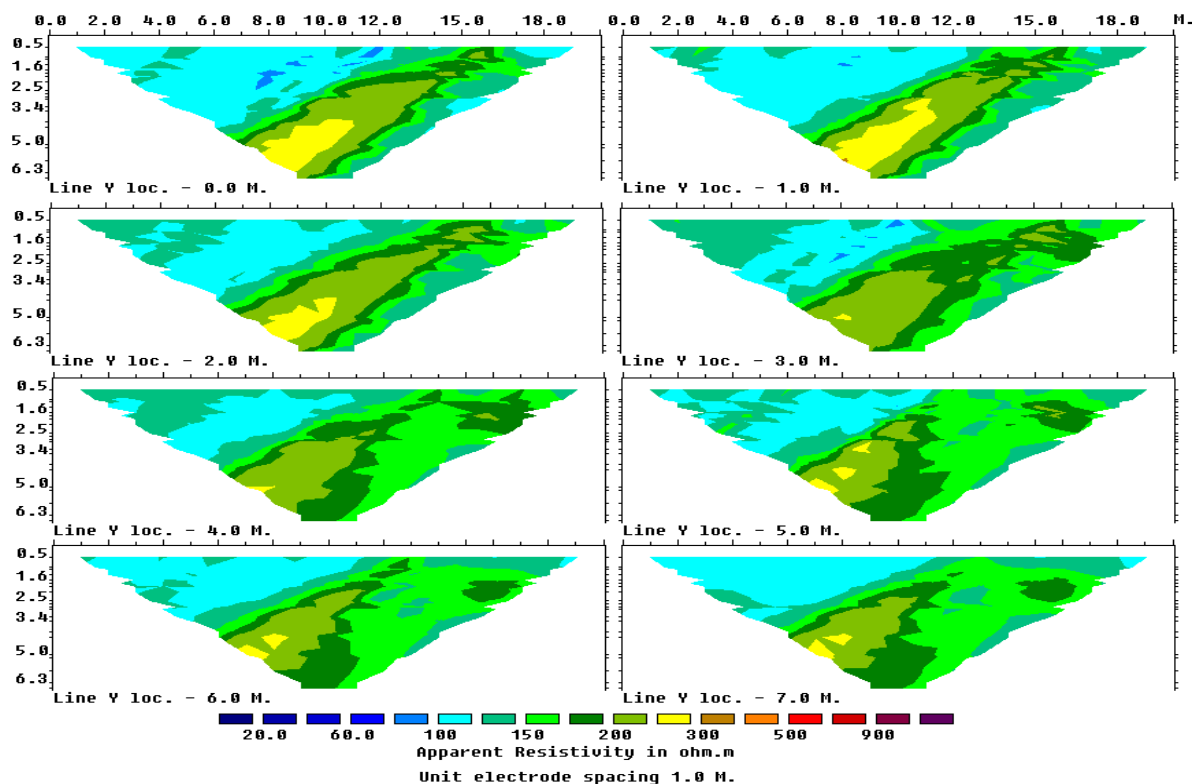
با استفاده از این داده ها و ترکیب مناسب آنها فایل های مورد نیاز برای وارون سازی داده ها توسط نرم افزار Res3Dinv تهیه شدند. سپس با استفاده از



شکل ۴. تعداد ۸ مقطع مربوط به داده های مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری که توسط آرایه PP اندازه گیری شده اند.



شکل ۵. تعداد ۸ مقطع مربوط به داده های مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری که توسط آرایه DD اندازه گیری شده اند.



شکل ۶. تعداد ۸ مقطع مربوط به داده های مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری که توسط آرایه PD اندازه گیری شده اند.

های ویژه الکتریکی ۲۵۰ - ۸۰ اهم متر می باشند که بیانگر خاکهای سطحی می باشد. در لایه شماره ۲، حد فاصل ۱۶-۱۵ متر یک منطقه با مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۴۰۰ - ۲۵۰ اهم متر در راستای حفره زیرزمینی دیده می شود که احتمالاً ناشی از مصالح ساختمانی و اجزا سازنده دیواره های حفره می باشد. لایه شماره ۳ بطور تقریباً آشکاری حفره زیرزمینی را با مقاومت ویژه الکتریکی بین ۵۰۰ - ۳۰۰ اهم متر نشان می دهد. بر اساس اطلاعات این لایه، ضخامت افقی این حفره در تمام نقاط آن تقریباً یکسان و یکنواخت بوده و از ۱۳/۵ - ۱۳/۵ متر در قسمت جنوب غرب شروع شده و تا حد فاصل ۱۳/۷ - ۱۱/۰ متر در شمالی ترین قسمت آن در این لایه بصورت مایل امتداد دارد. حضور بی هنجاری A با اندازه مقاومت الکتریکی ۲۵۰ - ۱۵۰ اهم متر در این لایه قابل مشاهده است. همچنین بی هنجاری B در قسمت شرقی این لایه نیز دارای مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۱۵۰ اهم متر میباشد که نسبت به آرایه های DD و PP اندازه مقاومت ویژه الکتریکی آن کمتر است. در لایه شماره ۴ حضور بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به حفره زیرزمینی با ابعاد افقی که بزرگتر از مقادیر ذکر شده برای لایه قبل میباشد قابل مشاهده است. بر اساس اطلاعات اینلایه، ضخامت افقی این حفره در تمام نقاط آن تقریباً یکسان بوده و از ۱۶/۰ - ۱۳/۰ متر در قسمت جنوب غرب شروع شده و تا حد فاصل ۱۳/۹ - ۱۱/۰ متر در شمالی ترین قسمت آن در این لایه بصورت مایل امتداد دارد. در قسمت غرب آن و تقریباً در ناحیه مرکزی حفره، گسترش عمقی بی هنجاری تایید نشده در لایه ۳ با مقاومت ویژه الکتریکی ۳۰۰ - ۱۵۰ اهم متر دیده می شود. در این لایه در قسمت شرقی و در حد فاصل ۳ - ۱ متری شرقی - غربی حضور بی هنجاری B با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۳۰۰ - ۲۰۰ اهم متر قابل مشاهده است.

بر اساس اطلاعات این لایه، ضخامت افقی این حفره در تمام نقاط آن تقریباً یکسان و یکنواخت بوده و از ۱۶ - ۱۳ متر در قسمت جنوب غرب شروع شده و تا حد فاصل ۱۴ - ۱۱ متر در شمالی ترین قسمت آن در این لایه بصورت مایل امتداد دارد. حضور یک بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی (A) با اندازه ۴۰۰ - ۲۵۰ اهم متر در قسمت غرب این حفره و در محدوده ۱۸ متری راستای شرقی - غربی و ۶-۳ متری شمالی - جنوبی در این لایه دیده می شود. این بی هنجاری در مشاهدات صحرایی قابل رویت نمی باشد. در لایه شماره ۴ حضور بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به حفره زیرزمینی با همان ابعاد افقی ذکر شده در لایه ۳ کاملاً مشهود میباشد. در قسمت غرب آن و تقریباً در ناحیه مرکزی حفره، گسترش عمقی بی هنجاری تایید نشده در لایه ۳ با مقاومت ویژه الکتریکی ۴۵۰ - ۲۵۰ اهم متر دیده می شود. در این لایه در قسمت شرقی و در حد فاصل ۴ - ۱ متری شرقی - غربی حضور یک بی هنجاری تایید نشده دیگر (B) با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۴۰۰ - ۲۵۰ اهم متر قابل مشاهده است. حضور این بی هنجاری در لایه های شماره ۵ و ۶ نیز دیده می شود. در لایه شماره ۵ بی هنجاری مقاومت الکتریکی مربوط به حفره زیر زمینی قابل تایید می باشد، با این تفاوت که اندازه گستره افقی حفره در قسمت جنوب آن با لایه های بالایی یکسان بوده اما در قسمت شمالی آن ابعاد افقی حفره بتدریج کمتر شده تا به ۲/۵ متر (۱۳/۵ - ۱۱ متر) می رسد. در لایه شماره ۶ بی هنجاریهایی که احتمالاً بقایای مواد ساختمانی حفره بوده، دیده می شوند و حضور حفره زیر زمینی در این عمق دیده نمی شود. لایه ۷ با عمق ۹/۰ - ۷/۰ متر هیچ بی هنجاری قابل توجهی را نشان نمی دهد.

#### آرایه PD

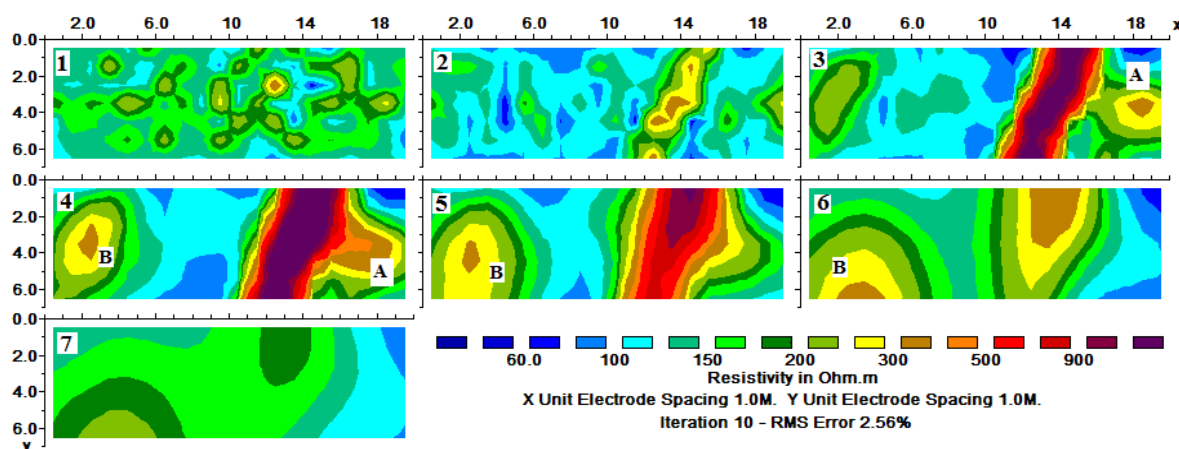
اندازه گیری های انجام شده توسط آرایه PD توسط نرم افزار Res3Dinv به مقادیر حقیقی مقاومت ویژه الکتریکی برگردانده شده اند و شکل (۸) توسط این داده ها تهیه شده است. لایه های ۱ و ۲ دارای مقاومت

حضور این بی هنجاری در لایه شماره ۵ و لایه شماره ۶ نیز دیده می شود. بی هنجاری A در لایه شماره ۵ نیز دیده می شود اما در لایه ۶ اثری از آن دیده نمی شود. در لایه شماره ۵، بی هنجاری مقاومت الکتریکی مربوط به حفره زیر زمینی قابل تایید می باشد، اندازه گستره افقی حفره با لایه های بالایی تقریباً یکسان میباشد. اندازه مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به حفره زیر زمینی در این لایه نسبت به لایه های فوقانی در همین شکل تا حدی کاهش نشان داده است. در لایه شماره ۶ بی هنجاریهایی که احتمالاً بقایای مواد ساختمانی حفره بوده، با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۵۰۰-۳۰۰ اهم متر دیده می شوند که این گستره نسبت به مقادیر ارائه شده توسط آرایه DD بزرگتر میباشد و اثر ساختمان بدنه حفره زیر زمینی را بهتر نشان میدهد. حضور حفره زیر زمینی فقط در قسمت جنوب غربی این لایه در حدفاصل ۱۵/۵-۱۴/۰ متری دیده می شود. مشابه داده های مربوط به آرایه DD، لایه ۷ هیچ بی هنجاری قابل توجهی را نشان نمی دهد.

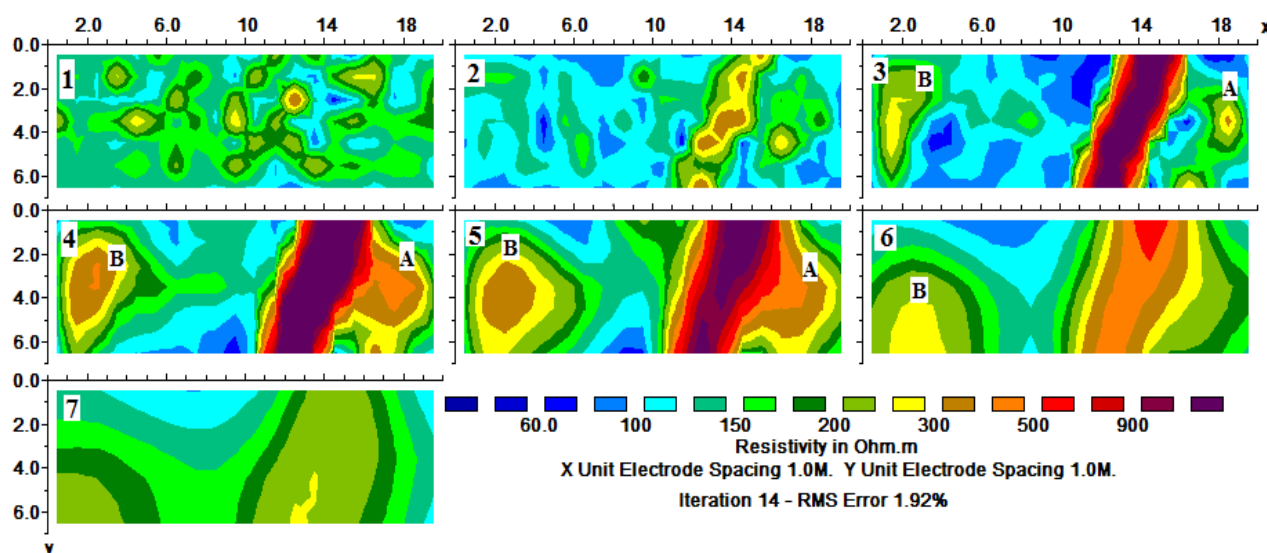
**آرایه PP**

بطور مشابه با آرایه های DD و PD، اندازه گیری های انجام شده توسط آرایه PP در محل مورد مطالعه نیز توسط نرم افزار Res3Dinv به مقادیر حقیقی مقاومت ویژه الکتریکی برگردانده شده اند و شکل ۹ به کمک این داده ها تهیه شده است. در تهیه این شکل سعی شده است شرایط یکسانی از نظر تعداد لایه ها، ضخامت هر لایه و گستره مقاومت ویژه الکتریکی راهنمای شکلها با نتایج ایجاد شده برای آرایه های DD و PD برقرار شود تا مقایسه نتایج امکان پذیر گردد. لایه های ۱ و ۲ دارای مقاومت های ویژه الکتریکی ۲۵۰-۸۰ اهم متر می باشند که بیانگر خاکهای سطحی می باشد. در لایه شماره ۲، حد فاصل ۱۳/۵-۱۵/۵ متر یک منطقه با مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۳۰۰-۱۸۰ اهم متر در راستای حفره زیرزمینی دیده می شود که احتمالاً ناشی از مصالح ساختمانی و اجزا سازنده دیواره های حفره زیر زمینی می باشد. در سایر نقاط لایه شماره ۲ کاهش مقاومت ویژه الکتریکی زمینه نسبت به لایه شماره ۱ مشهود است. نتایج مقاومت ویژه الکتریکی برای این دو لایه به مراتب کمتر از آرایه های DD و PD میباشد. لایه شماره ۳ بطور کامل واضح حفره زیر زمینی مربوط به مسیر آب چشمه را با مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از ۵۰۰ اهم متر نشان می دهد. بر اساس اطلاعات این لایه، ضخامت افقی این حفره زیر زمینی در تمام نقاط آن تقریباً یکسان و یکنواخت بوده و از ۱۶/۵-۱۳/۰ متر در قسمت جنوب غرب شروع شده و تا حد فاصل ۱۴/۰-۱۰/۸ متر در

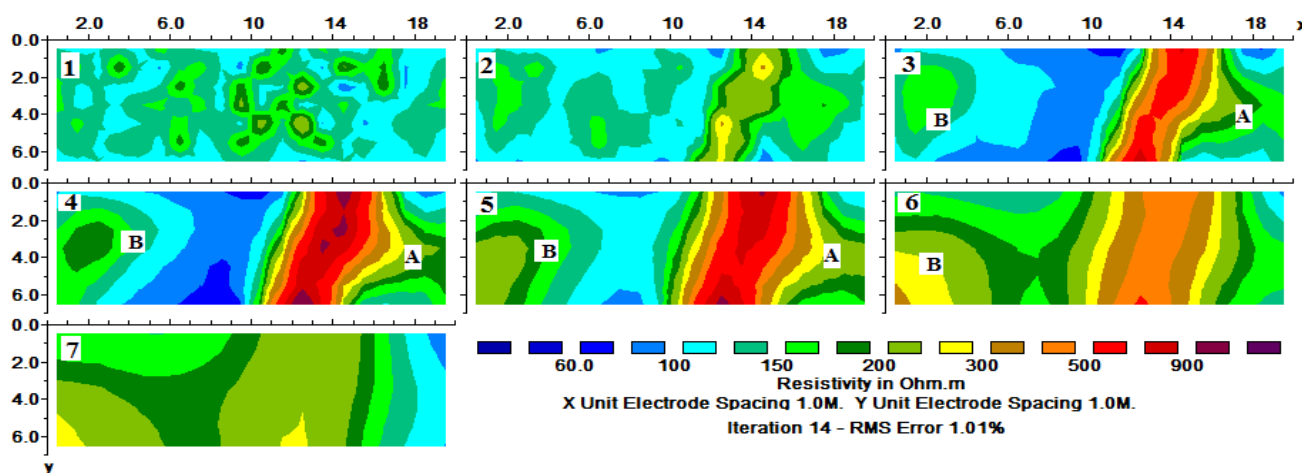
شمالی ترین قسمت آن در این لایه بصورت مایل امتداد دارد. حضور بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی (A) با اندازه ۴۰۰-۲۵۰ اهم متر در قسمت غرب این حفره و در محدوده ۱۸ متری راستای شرقی - غربی و ۵-۳ متری شمالی - جنوبی در این لایه دیده می شود. همچنین بی هنجاری (B) در قسمت شرقی این لایه دیده می شود که دارای مقاومت ویژه الکتریکی بین ۳۰۰-۲۵۰ اهم متر میباشد. این بی هنجاری نیز در حدفاصل ۲-۱ متری راستای شرقی - غربی بوده و تقریباً تمام راستای شمالی جنوبی منطقه مورد مطالعه را در بر میگیرد. در لایه شماره ۴ حضور بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به حفره زیرزمینی با ابعاد افقی که بزرگتر از مقادیر ذکر شده برای لایه قبل میباشد قابل مشاهده است. بر اساس اطلاعات این لایه، ضخامت افقی این حفره زیر زمینی در تمام نقاط آن تقریباً یکسان بوده و از ۱۶/۶-۱۲/۷ متر در قسمت جنوب غرب شروع شده و تا حد فاصل ۱۴/۰-۱۰/۹ متر در شمالی ترین قسمت آن در این لایه بصورت مایل امتداد دارد. در قسمت غرب آن و تقریباً در ناحیه مرکزی حفره، گسترش عمقی بی هنجاری تایید نشده در لایه ۳ با مقاومت ویژه الکتریکی ۵۰۰-۳۰۰ اهم متر دیده می شود. در این لایه در قسمت شرقی و در حدفاصل ۴-۱ متری شرقی - غربی حضور بی هنجاری B با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۵۰۰-۲۰۰ اهم متر قابل مشاهده است. حضور این بی هنجاری در لایه های شماره ۵ و ۶ نیز دیده می شود. بی هنجاری A در لایه شماره ۵ نیز دیده می شود اما در لایه ۶ اثری از آن دیده نمی شود. در لایه شماره ۵، بی هنجاری مقاومت الکتریکی مربوط به حفره زیر زمینی قابل تایید می باشد، با این تفاوت که اندازه گستره افقی حفره در قسمت جنوب آن با لایه های بالایی یکسان بوده اما در قسمت شمالی آن ابعاد افقی حفره بتدریج کمتر شده تا به ۳/۰ متر (۱۴-۱۱ متر) می رسد. اندازه مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به حفره زیر زمینی در این لایه نسبت به لایه های فوقانی در همین شکل تا حدی کاهش نشان داده است. در لایه شماره ۶ بی هنجاریهایی که احتمالاً بقایای مواد ساختمانی حفره بوده، با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۵۰۰-۲۵۰ اهم متر دیده می شوند که این گستره نسبت به مقادیر ارائه شده توسط آرایه DD بزرگتر میباشد. حضور حفره زیر زمینی فقط در قسمت شمال شرقی این لایه در حدفاصل ۱۳/۵-۱۲/۰ متری دیده می شود. مشابه داده های مربوط به آرایه های DD و PD، لایه ۷ با عمق ۷/۰-۹/۰ متر هیچ بی هنجاری قابل توجهی را نشان نمی دهد.



شکل ۷. لایه های افقی با ضخامت یک متر که توسط داده های مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی بوسیله آرایه DD تهیه شده اند. عمق متناظر با لایه های این شکل عبارت است از: (۱) ۰/۵ - ۰ - (۲) ۱/۵ - ۱/۵ (۳) ۲/۵ - ۱/۵، (۴) ۳/۵ - ۲/۵، (۵) ۴/۵ - ۳/۵، (۶) ۷/۰ - ۴/۵، (۷) ۹/۰ - ۷/۰ متر.



شکل ۸. لایه های افقی با ضخامت یک متر که توسط داده های مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی بوسیله آرایه PD تهیه شده اند. عمق متناظر با لایه های این شکل عبارت است از: (۱) ۰/۵ - ۰ - ۱/۵ (۲)، ۰/۵ - ۲/۵ (۳)، ۱/۵ - ۳/۵ (۴)، ۲/۵ - ۳/۵ (۴)، ۳/۵ - ۴/۵ (۵)، ۴/۵ - ۷/۰ (۶)، ۴/۵ - ۷/۰ (۶)، ۷/۰ - ۹/۰ (۷) متر.



شکل ۹. لایه های افقی با ضخامت یک متر که توسط داده های مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی بوسیله آرایه PP تهیه شده اند. عمق متناظر با لایه های این شکل عبارت است از: (۱) ۰/۵ - ۰ - ۱/۵ (۲)، ۰/۵ - ۲/۵ (۳)، ۱/۵ - ۳/۵ (۴)، ۲/۵ - ۳/۵ (۴)، ۳/۵ - ۴/۵ (۵)، ۴/۵ - ۷/۰ (۶)، ۴/۵ - ۷/۰ (۶)، ۷/۰ - ۹/۰ (۷) متر.

### برگردان الحاقی داده های DD و PD

داده هایی که توسط آرایه های DD و PD اندازه گیری شده اند، ابتدا با هم ترکیب شدند سپس توسط نرم افزار Res3Dinv به روش برگردان الحاقی به مقادیر حقیقی مقاومت ویژه الکتریکی برگردانده شده و شکل (۱۰) با استفاده از این اطلاعات تهیه شده است. لایه شماره ۳ بطور کاملاً واضح حفره زیرزمینی مربوط به مسیر آب چشمه را با مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از ۵۰۰ اهم متر نشان می دهد. بر اساس اطلاعات این لایه، ضخامت افقی این حفره زیر زمینی در تمام نقاط آن تقریباً یکسان و یکنواخت بوده و از ۱۶ - ۱۳ متر در قسمت جنوب غرب شروع شده و تا حد فاصل ۱۴ - ۱۱ متر در شمالی ترین قسمت آن در این لایه بصورت مایل امتداد دارد. در لایه شماره ۴ حضور بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به حفره زیرزمینی با ابعاد افقی که تا اندازه کمی بیشتر از مقادیر ذکر شده در لایه ۳ است، کاملاً مشهود می باشد. در لایه شماره ۵ بی هنجاری مقاومت الکتریکی مربوط به حفره زیر زمینی قابل تایید می باشد، با این تفاوت که اندازه گستره افقی

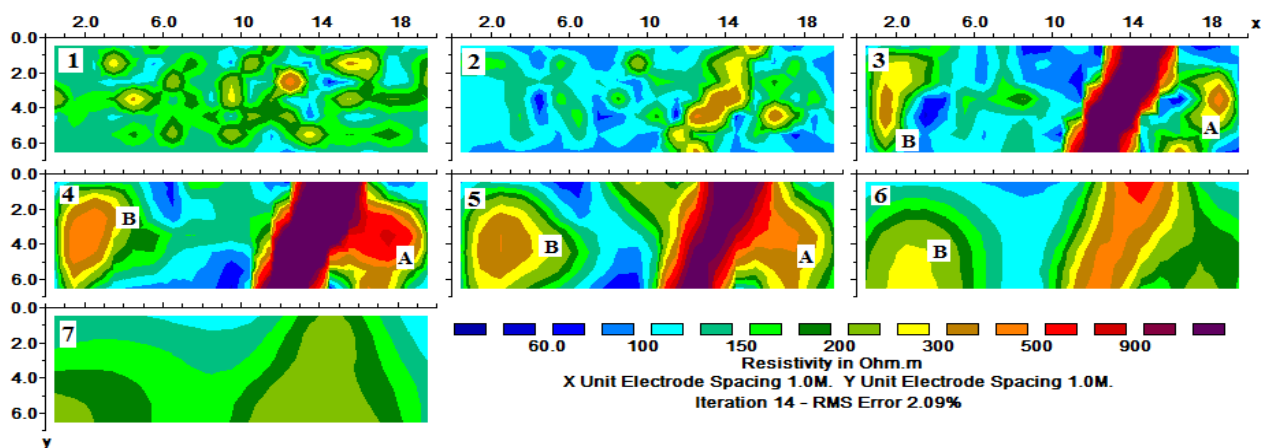
حفره در قسمت جنوب آن با لایه های بالایی یکسان بوده اما در قسمت شمالی آن ابعاد افقی حفره بتدریج کمتر شده تا به ۲/۵ متر (۱۳/۵ - ۱۱/۰ متر) می رسد. مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی در این لایه برای حفره زیر زمینی بیشتر از مقادیر مشابه با نتایج حاصل از هر کدام از آرایه های یاد شده به تنهایی می باشد. حضور بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی (A) با اندازه ۵۰۰ - ۲۵۰ اهم متر در قسمت غرب این حفره و در محدوده ۱۹ متری راستای شرقی - غربی و ۵ - ۲ متری شمالی - جنوبی در لایه ۳ دیده می شود. در این لایه در قسمت شرقی و در حفاصل ۳ - ۱ متری شرقی - غربی حضور بی هنجاری B با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۴۰۰ - ۲۵۰ اهم متر قابل مشاهده است. حضور این بی هنجاری در لایه های شماره ۴ و ۵ نیز دیده می شود بطوریکه ابعاد آن مخصوصاً در لایه های ۴ و ۵ بزرگتر شده است. در لایه شماره ۶ بی هنجاریهایی که احتمالاً بقایای مواد ساختمانی بوده، با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۳۰۰ - ۵۰۰ اهم متر دیده می شوند که این گستره نسبت به مقادیر ارائه شده توسط آرایه DD بزرگتر می باشند حضور

حفره زیر زمینی فقط در قسمت جنوب غربی این لایه در حدفاصل ۱۵/۰-۱۳/۵ متری دیده می شود. مشابه داده های مربوط به آرایه های PD و DD، لایه ۷ هیچ بی هنجاری قابل توجهی را نشان نمی دهد.

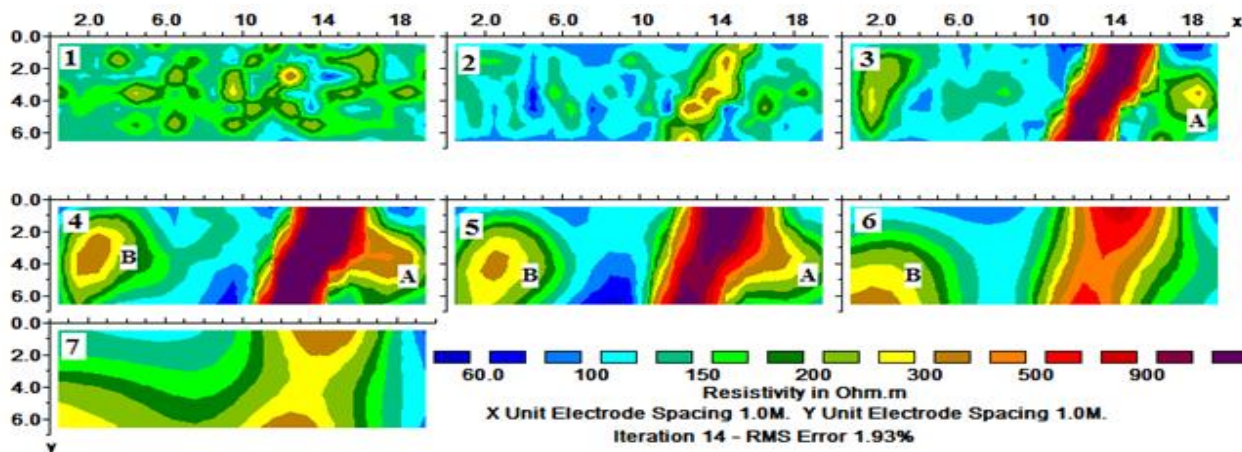
**برگردان الحاقی داده های DD و PP**

داده هایی که توسط آرایه های DD و PP اندازه گیری شده اند نیز پس از ترکیب شدن با هم، توسط نرم افزار Res3Dinv به روش برگردان الحاقی به مقادیر حقیقی مقاومت ویژه الکتریکی برگردانده شده و شکل (۱۱) با استفاده از این اطلاعات تهیه شده است. لایه شماره ۳، بطور کاملا واضح حفره زیرزمینی مربوط به مسیر آب چشمه را با مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از ۵۰۰ اهم متر نشان می دهد. بر اساس اطلاعات این لایه، ضخامت افقی این حفره در تمام نقاط آن تقریباً یکسان و یکنواخت بوده و از ۱۶ - ۱۳/۲ متر در قسمت جنوب غرب شروع شده و تا حد فاصل ۱۳/۹ - ۱۱ متر در شمالی ترین قسمت آن در این لایه بصورت مایل امتداد دارد. در لایه شماره ۴، حضور بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به حفره زیرزمینی با ابعاد افقی که تا اندازه ای بیشتر از مقادیر ذکر شده در لایه ۳ است، کاملا مشهود می باشد. بطوریکه از ۱۶/۳ - ۱۲/۹ متر در قسمت جنوب غرب شروع شده و تا حد فاصل ۱۴/۰ - ۱۰/۸ متر در شمالی ترین قسمت آن در این لایه بصورت مایل امتداد دارد. در لایه شماره ۵، بی هنجاری مقاومت الکتریکی مربوط به حفره زیر

زمینی نیز قابل تایید می باشد، با این تفاوت که اندازه گستره افقی حفره در قسمت جنوب آن با لایه های بالایی یکسان بوده اما در قسمت شمالی آن ابعاد افقی حفره بتدریج کمتر شده تا به ۳/۰ متر (۱۴ - ۱۱ متر) می رسد. مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی در این لایه برای حفره زیر زمینی بیشتر از مقادیر مشابه با نتایج حاصل از هرکدام از آرایه های یادشده به تنهایی میباشد. حضور بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی A با اندازه ۳۰۰ - ۲۵۰ اهم متر در قسمت غرب این حفره و در محدوده ۱۹-۱۸ متری راستای شرقی - غربی و ۵-۲ متری شمالی- جنوبی در لایه ۳ دیده می شود. حضور بی هنجاری B در لایه شماره ۴، ۵ دیده می شود. در لایه شماره ۶ بی هنجاریهایی که احتمالا بقایای مواد ساختمانی حفره بوده، با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۵۰۰-۳۰۰ اهم متر دیده می شوند. حضور حفره زیر زمینی در قسمت جنوب غربی این لایه در حدفاصل ۱۶/۰ - ۱۳/۰ متری دیده می شود همچنین اثر حفره زیرزمینی در قسمت شمالی این لایه در حد فاصل ۱۴-۱۳ متری دیده می شود. نتایج آرایه های دیگر گسترش عمقی حفره زیر زمینی را تا این عمق با این وضوح نشان نمی دهند. لایه ۷ در این شکل منطقه با مقاومت بالایی حدود ۵۰۰-۲۵۰ اهم متر را که بیانگر ساختمان بدنه حفره زیر زمینی است را نشان می دهد.



شکل ۱۰. لایه های افقی با ضخامت یک متر که توسط داده های مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی مربوط به الحاق داده های آرایه DD و PD تهیه شده اند. عمق متناظر با لایه های این شکل عبارت است از: (۱) ۰ - ۰/۵، (۲) ۰/۵ - ۱/۵، (۳) ۱/۵ - ۲/۵، (۴) ۲/۵ - ۳/۵، (۵) ۳/۵ - ۴/۵، (۶) ۴/۵ - ۷/۰، (۷) ۷/۰ - ۹/۰ متر.



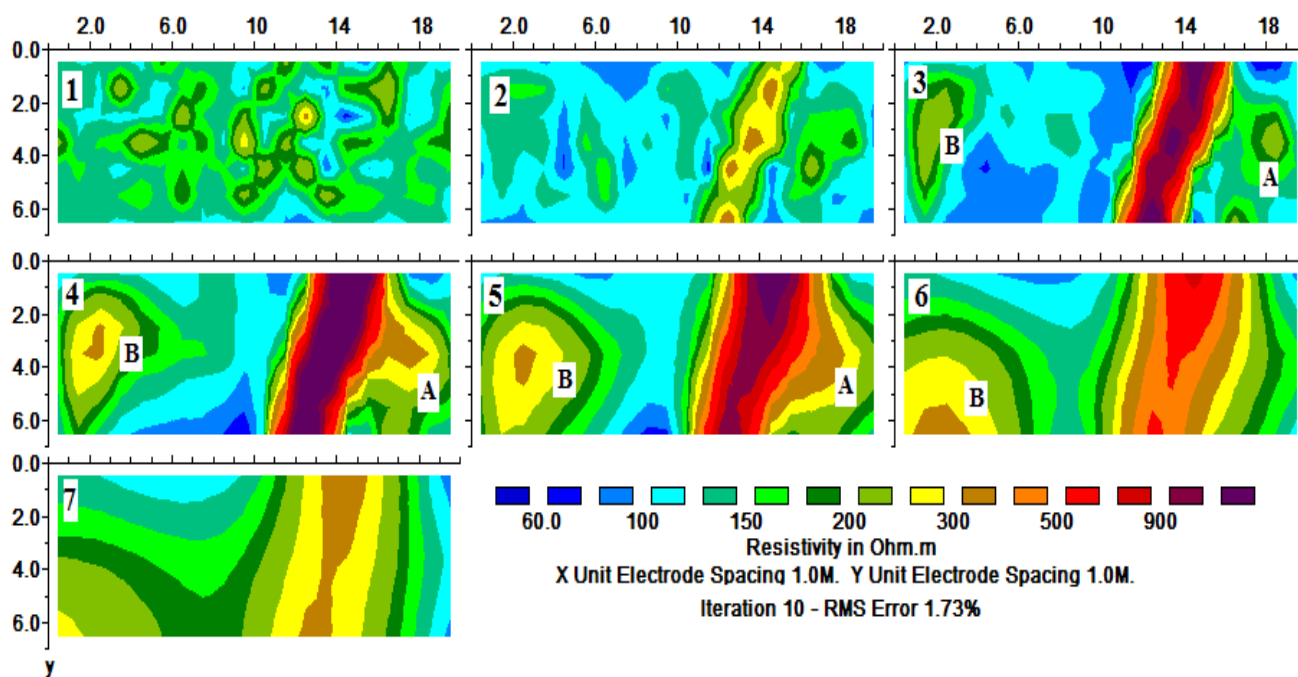
شکل ۱۱. لایه های افقی با ضخامت یک متر که توسط داده های مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی مربوط به الحاق داده های آرایه DD و PP تهیه شده اند. عمق متناظر با لایه های این شکل عبارت است از: (۱) ۰ - ۰/۵، (۲) ۰/۵ - ۱/۵، (۳) ۱/۵ - ۲/۵، (۴) ۲/۵ - ۳/۵، (۵) ۳/۵ - ۴/۵، (۶) ۴/۵ - ۷/۰، (۷) ۷/۰ - ۹/۰ متر.



## برگردان الحاقی داده های PP و PD

داده هایی که توسط آرایه های PP و PD اندازه گیری شده اند نیز ابتدا با هم ترکیب شده، سپس توسط نرم افزار Res3Dinv به روش برگردان الحاقی به مقادیر حقیقی مقاومت ویژه الکتریکی برگردانده شده و شکل (۱۲) با استفاده از این اطلاعات تهیه شده است. لایه شماره ۳، بطور کاملا واضح حفره زیرزمینی مربوط به مسیر آب چشمه را با مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از ۵۰۰ اهم متر نشان می دهد. بر اساس اطلاعات این لایه، ضخامت افقی این حفره زیر زمینی در تمام نقاط آن تقریبا یکسان و یکنواخت بوده و از ۱۶ - ۱۳/۷ متر در قسمت جنوب غرب شروع شده و تا حد فاصل ۱۳/۸ - ۱/۳ متر در شمالی ترین قسمت آن در این لایه بصورت مایل امتداد دارد. در لایه شماره ۴ حضور بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به حفره زیرزمینی با ابعاد افقی که تا اندازه ای بیشتر از مقادیر ذکر شده در لایه ۳ است، کاملا مشهود میباشد. در لایه شماره ۵ بی هنجاری مقاومت الکتریکی مربوط به حفره زیر زمینی قابل تایید می باشد، با این تفاوت که اندازه گستره افقی حفره در قسمت جنوب آن با لایه های زیرین یکسان بوده اما در قسمت شمالی آن ابعاد افقی حفره بتدریج کمتر شده تا به ۲/۶ متر (۱۴/۰ -

۱۱/۴ متر) می رسد. مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی در این لایه برای حفره زیر زمینی بیشتر از مقادیر مشابه با نتایج حاصل از هرکدام از آرایه های یادشده به تنهایی میباشد. حضور بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی A با اندازه ۲۵۰ - ۱۵۰ اهم متر در قسمت غرب این حفره و در محدوده ۱۹ متری راستای شرقی - غربی و ۵-۲ متری شمالی - جنوبی در لایه ۳ دیده می شود. در این لایه در قسمت شرقی و در حدفاصل ۴-۱ متری شرقی - غربی حضور بی هنجاری B با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۲۵۰ - ۱۵۰ اهم متر قابل مشاهده است. حضور این بی هنجاری در لایه شماره ۴، ۵ و ۶ نیز دیده می شود بطوریکه ابعاد آن در این لایه ها بزرگتر شده است. در لایه شماره ۶ بی هنجاریهایی که احتمالا بقایای مواد ساختمانی حفره بوده، با گستره مقاومت ویژه الکتریکی ۵۰۰-۳۰۰ اهم متر دیده می شوند که این گستره نسبت به مقادیر ارائه شده توسط آرایه DD بزرگتر میباشند. اثر حفره زیرزمینی در قسمت شمالی این لایه در حد فاصل ۱۴-۱۳ متری دیده می شود. لایه ۷ در این شکل، منطقه ای با مقاومت بالایی حدود ۵۰۰-۲۵۰ اهم متر را که بیانگر ساختمان بدنه حفره زیر زمینی است را نشان می دهد.



شکل ۱۲. لایه های افقی با ضخامت یک متر که توسط داده های مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی مربوط به الحاق داده های آرایه DD و PP تهیه شده اند. عمق متناظر با لایه های این شکل عبارت است از: (۱) ۰/۵ - ۰، (۲) ۱/۵ - ۰/۵، (۳) ۲/۵ - ۱/۵، (۴) ۳/۵ - ۲/۵، (۵) ۴/۵ - ۳/۵، (۶) ۷/۰ - ۴/۵، (۷) ۹/۰ - ۷/۰ متر.

## نتیجه گیری

آرایه PP دارای سیگنال قوی بوده و پوشش افقی داده های آن نسبت به بقیه آرایه های بکار برده شده بهتر بود. این آرایه علی رغم داشتن بیشترین عمق کاوش، اما حساسیتش نسبت به ساختارهای قائم از آرایه DD کمتر می باشد. در صورتی که حساسیتش نسبت به ساختارهای افقی از آرایه DD بهتر است. پوشش افقی داده های PD و DD با هم برابر میباشد، اما آرایه PD نسبت به آرایه DD به ساختارهای افقی حساس تر اما به ساختارهای قائم حساسیت کمتری دارد. با توجه به نتایج کمی وارون سازی داده های مقاومت الکتریکی، میتوان چنین نتیجه گیری کرد که هرچند هر سه آرایه DD، PD و DD نتایج قابل قبولی در کاوشهای سه بعدی مقاومت ویژه

الکتریکی ارائه می دهند اما برای حصول نتایج قابل اطمینان تر باید از نتایج تفسیر الحاقی DD + PP، DD + PD و PP + PD بطور همزمان استفاده کرد. قابل ذکر است که این موضوع به طور قابل توجهی تحت تاثیر پارامترهایی از قبیل هزینه انجام عملیات صحرایی و زمان می باشد.

## قدردانی

این مقاله نتیجه طرح پژوهشی میباشد که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجدسلیمان صورت گرفته است.

## منابع

- Dahlin, T., and Loke, M.H. 1997. Quasi-3D resistivity imaging-mapping of three dimensional structures using two dimensional DC resistivity techniques. 3rd Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society, Aarhus, Geophysical Society.
- Dey, A., and Morrison, H. F. 1979. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Geophysics* 44(4): 753-780.
- El-Qady, G., Ushijima, K., and El-Sayed A. 2001. Inversion of DC resistivity data using neural networks. *Geophysical Prospecting* 49: 417-430.
- 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(4): 339-349.
- Griffiths, D. H., and Barker, R.D. 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics* 29: 211-226.
- Hesse, A., Jolivet, A., and Tabbagh, A. 1986. New prospects in shallow depth electrical surveying for archeological and pedological applications. *Geophysics* 51: 585-594.
- Jakosky, J. J. 1950. *Exploration geophysics Los Angeles*, Trija Pub. Co, 1195 pp.
- 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. 2009. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. [www.goelectrical.com](http://www.goelectrical.com)
- Reynolds, J. M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons.
- Singh, U. K., Tiwari, R. K., and Singh, S. B. 2005. One-dimensional inversion of geoelectrical resistivity sounding data using artificial neural networks-a case study. *Computers & Geosciences* 31: 99-108.
- Spitzer, K. 1998. The three-dimensional dc sensitivity for surface and subsurface sources. *Geophysical Journal international* 134: 736-746.
- Thomas, G. 2004. *Inversion Methods and Resolution Analysis for the 2D/3D Reconstruction of Resistivity Structures from DC Measurements*, university of Freiberg, pp.160 Ph.D thesis.
- Van, N. R., and Cook, K.L. 1966. *Interpretation of resistivity data*. Washington: 310.
- Zhang, J., Mackie, R. L., and Madden, T. R. 1995. 3D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients. *Geophysics* 60(5): 1313-1325.