

# بررسی تکتونیک فعال و شناسایی گسل‌های جنباً به وسیله روش‌های ژئوفیزیکی مطالعه موردی: گوهر تپه - بهشهر

فرامرز الهوردی میگونی<sup>۱</sup>، مهدی محمدی‌ویژه<sup>۲</sup>، علیرضا فرخ‌نیا<sup>۳</sup>، الهام بوستان<sup>۳</sup> و حمید نظری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، کرج، ایران  
<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور؛ مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، کرج، ایران  
<sup>۴</sup> دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران  
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

## چکیده

بدون شک یکی از شواهد فعالیت‌های زمین‌ساختی در هر منطقه پدیده زمین‌لرزه است که نقش اصلی را در تلفات جانی و خسارات مالی به خود اختصاص می‌دهد. زمین‌لرزه معمولاً با ایجاد گسل‌هایی همراه است که گاهی تا عمق پسته زمین ادامه می‌یابد. در مواردی که هیچ‌گونه نشانه یا عارضه‌ای از این گسل‌ها در سطح زمین دیده نمی‌شود لازم است تا با تلفیق دانش زمین‌شناسی و همچنین ابزارهای دورسنجی و ژئوفیزیکی شناخت دقیق‌تری از این گسل‌ها و شاخه‌های فرعی آن به دست آورد. گسل خزر در منطقه مورد مطالعه گسلی بنیادی و جنباست که حداقل ۶ رخداده زمین‌لرزه تاریخی به آن نسبت داده شده است. با توجه به فعالیت‌های کواترنری این گسل شناخت آن در منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به همین سبب جهت آشکارسازی بخش‌های پنهان آن مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی در سایت تاریخی گوهر تپه از شهرستان بهشهر صورت گرفت. روش‌های مقاومت ویژه با آرایش دوقطبی - دوقطبی در فواصل ۱۰ و ۲۰ متری به منظور تهیه مقاطع و نقشه‌ها استفاده شد و با بررسی آنها و با توجه به موقعیت و عمق بی‌هنجاری‌های به دست آمده در مراحل بعدی پروفیل‌ها و شبکه‌های جدیدی طراحی شد. به منظور دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر، پیمایش مغناطیس‌سنجی سزیم بر روی ۴ پروفیل صورت گرفت. داده‌های به دست آمده از عملیات صحرایی و برداشت داده‌ها و همچنین پردازش‌هایی داده‌ها در نرم‌افزارهای تخصصی تلفیق شده است. بر این اساس تفسیر روشی از ساختارهای زیر سطحی به خصوص گسلش و ناپیوستگی‌ها در منطقه مورد مطالعه به دست آمد که حاکی از انطباق چشمگیر بی‌هنجاری‌های به دست آمده با شواهد صحرایی است.

**کلیدواژه‌ها:** رادار نفوذی به زمین (GPR)، مقاومت ویژه، مغناطیس‌سنجی سزیم، گوهر تپه، گسل خزر، تفسیر ترکیبی  
**\*نویسنده مسئول:** علیرضا فرخ‌نیا

E-mail: Farrokhnia@kiaou.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

کشور ایران با قرار گرفتن در کمربند لرزه‌خیزی آلپ- هیمالیا جزو کشورهای دارای پتانسیل بالای زمین‌ساختی است. بخش البرز مرکزی با توپوگرافی کوهستانی فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیادی دارد. قرارگیری استان مازندران در این منطقه باعث شده است درصد بالایی از مساحت استان و بسیاری از مناطق شهری و روستایی آن بر روی گسل و یا در حاشیه گسل‌های جنباً قرار گیرد. نوع گسل‌های موجود در منطقه عموماً از نوع راندگی و امتدادلغز هستند. بخش زیادی از این مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های جوان شاخه‌های گسل خزر است و هر ساله به دلیل افزایش جمعیت و گسترش شهرها بر وسعت آنها افزوده می‌شود. لذا آشکارسازی بخش‌های مدفون و شناخت کامل سازوکار این گسل در مناطق شهری و همچنین شناخت دقیق و کامل منطقه گسلی گام نخست در راه بررسی لرزه‌زمین‌ساخت و درجه‌بندی خطر زمین‌لرزه و گسلش منطقه است. با توجه به پیچیدگی‌های ساختاری و زمین‌شناسی و نبود شواهد سطحی، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مختلف می‌تواند راهگشای مفیدی برای حل مسائل منطقه باشد. با استفاده از روش‌های مختلف و تلفیق اطلاعات به دست آمده می‌توان پوشش پیوسته‌ای از اطلاعات زیرسطحی ناحیه و همچنین تصویر روشنی از سازوکار گسل‌های ناحیه مورد بررسی به دست آورد. پژوهش‌های مختلفی در بررسی آرایه‌های مختلف الکترونی روش مقاومت ویژه در آشکارسازی گسل منتشر شد که از میان آنها می‌توان به مطالعات (Mooney, 1980) و (Dobrin and Sawit, 1988) و (Telford et al., 1990) در مواجهه با گسل‌های قائم و شیب‌دار اشاره کرد. در ایران نیز اولین پژوهش‌ها در بررسی آرایه‌های مختلف الکترونی روش مقاومت ویژه در آشکارسازی گسل در اواخر دهه ۷۰ صورت گرفت که از آن جمله می‌توان به مطالعات فردوسی و پیروز (۱۳۸۲) اشاره کرد. آنها در این مطالعه مدل ریاضی و نرم‌افزارهای مربوطه برای اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی

## ۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی ناحیه‌ای

تپه تاریخی گوهر تپه با مختصات جغرافیایی ۵° ۲۴' ۲۴" و ۳۶° ۴۰' ۴۲" شمالی در ۱۰۰ متری شمال جاده بهشهر- نکا و به فاصله ۱۲ کیلومتری باختر شهرستان بهشهر و ۹ کیلومتری خاور شهرستان نکا واقع شده و فاصله آن از رستمکلا نیز تقریباً ۲ کیلومتر است (شکل ۱). این محوطه باستانی در دشت رسوبی واقع شده که در جنوب آن ارتفاعات با پوشش جنگلی و کوهستان سرسبز قرار گرفته است. همچنین تراس‌های مناسب و دشت‌های میان‌کوهی در ارتفاعات منتهی به دشت‌ها از نخستین مکان‌های سکونت در منطقه بود که شواهدی از دوران پارینه‌سنگی و فراپارینه‌سنگی در این دره‌ها به دست آمده است. ناحیه بهشهر و گلوگاه از نظر زون زمین‌شناسی در ناحیه زون زمین‌شناسی البرز مرکزی و در واقع باختر زون البرز شرقی و قدیمی‌ترین رخنمون واحد دگرگونه‌های گرگان است که شامل کوارتزیت، کوارتزیت، فلدسپارشیت و ... است.



شکل ۱- راه‌های دسترسی به محدوده گوه‌رته.

### ۳- روش پژوهش

روش‌های ژئوفیزیکی متفاوت، بر اساس خواص فیزیکی مختلف استوار و به خواص فیزیکی مختلف حساس هستند. در هر پروژه انتخاب روش مناسب بسیار حائز اهمیت است. هدف اصلی عمده روش‌های الکتریکی، اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین است. در این روش‌ها برای اینکه یک ویژگی زیرزمینی مشخص شود باید مقاومت ویژه الکتریکی آن به‌طور واضحی متفاوت از محیط اطرافش باشد. بنابراین، استفاده از روش‌های الکتریکی به حالت‌هایی که تباین مقاومت ویژه وجود داشته باشد، محدود می‌شود (حجت و رنجبر، ۱۳۹۱). برای مطالعه‌های ساختگاهی و زمین‌شناسی مهندسی روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی، لرزه‌نگاری و گراوی متری بیشترین کاربرد را دارد. روش مقاومت ویژه الکتریکی اطلاعات مهندسی از وضعیت سنگ کف، ترکیب لایه‌های زمین‌شناسی و وجود و گسترش حفره‌های زیرزمینی ارائه می‌دهد. به عنوان مثال Arbogast and Franklin (1999) از روش مقاومت ویژه الکتریکی برای مطالعه و به نقشه در آوردن لایه‌های زمین‌شناسی، شکستگی‌ها و حفره‌ها در کانال پاناما استفاده کرده‌اند. همچنین در این زمینه می‌توان به مطالعات (Wong et al., 2000)؛ Helle et al. (2001)؛ رجایی و داودی‌راد (۱۳۸۹) و کاظم‌زاده و همکاران (۱۳۸۷) اشاره کرد. در مطالعه حاضر پس از برداشت‌ها و بازدیدهای صحرائی از روش‌های مختلف ژئوفیزیکی برای شناسایی ساختارهای زیر سطحی استفاده شد. ابتدا با استفاده از روش مقاومت ویژه برداشت‌های اولیه انجام گرفت. مقاومت ویژه تصاویری از تغییرات مقاومت ویژه ساختارهای زیر سطحی در اختیار قرار می‌دهند که برای تبدیل این تصاویر به تصاویر زمین‌شناسی، اطلاعاتی در خصوص مقادیر مقاومت ویژه انواع ساختارهای زیر سطحی و همچنین زمین‌شناسی محیط تحت بررسی حائز اهمیت است. هدف از برداشت‌های مقاومت ویژه، تعیین توزیع زیرزمینی مقاومت ویژه با استفاده از اندازه‌گیری‌های سطحی است. برای اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه آرایش‌های الکترودی مختلفی پیشنهاد شده است. که در این مطالعه از آرایش دوقطبی - دو قطبی استفاده شد و واران‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و تهیه مدل دوبعدی مقاومت ویژه با استفاده از نرم‌افزار Res2Dinv صورت گرفت. مدل دوبعدی استفاده شده به وسیله این برنامه شامل یک تعداد بلوک مستطیلی شکل است. در این روش با تغییر مقاومت ویژه بلوک‌ها، اساساً سعی می‌شود

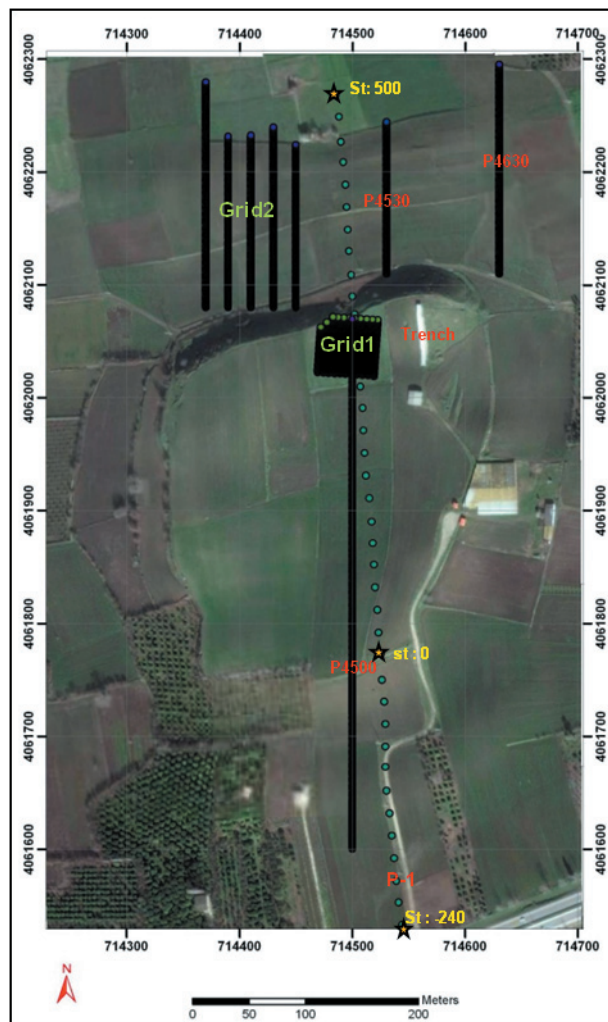
بعد از دگرگونه‌های جنوب گرگان قدیمی‌ترین سنگ‌های ناحیه متعلق به سازند شمشک است و روی آن آهک‌های کرتاسه فوقانی و تحتانی واقع شده و بخش اعظم آن به وسیله رسوبات کواترنری (رودخانه‌ای، دلتایی و ساحلی) پوشیده شده است که به سمت خاور دارای لایه‌های ضخیم لس می‌شود. در تقسیم بندی افتخارنژاد (۱۳۵۹) قسمت اعظم این زون به نام فرونشست دریای خزر ذکر شده است. با توجه به شیب‌های کم دگرگون شده جنوب گرگان، زمان پیدایش این زون را پرکامبرین تصور می‌کنند. گرچه این شیب‌ها را به حرکات کالدونین نیز نسبت داده‌اند (نبوی، ۱۳۵۵). چین‌های منطقه کم‌ارتفاع و کم‌شیب هستند و تحت تأثیر کوهزایی آلپی در کرتاسه پایینی - ترشیاری و طی فاز کوهزایی پاسادین در اواخر پلیوسن - اوایل کواترن، رسوبات نوزن خزر و کنگلومرای پلیوسن فوقانی چین خوردگی پیدا می‌کنند. ارتفاع البرز بین ۵۶۷۱ متر (قله دماوند) در بخش داخلی و ۲۸- متر در ساحل دریای خزر تغییر می‌کند. هیچ ریشه پوسته‌ای در زیر این توپوگرافی مرتفع شناخته نشده است (Dehghani and Makris, 1983). رشته کوه البرز دارای پهنایی محدود (در حدود ۶۰ تا ۱۲۰ کیلومتر) است، به طوری که دامنه‌های آن به‌طور ناگهانی در طول گسل‌های اصلی (گسل‌های مشا، شمال تهران و شمال قزوین در سمت جنوبی، و گسل خزر در سمت شمالی) به دشت متصل می‌شوند (Berberian and Yeats, 1999). آندزیتی و سنگ‌های نفوذی پالئوژن است و به نظر می‌رسد دو حوضه رسوبی مستقل (حوضه خزر جنوبی در شمال و حوضه میوسن ایران مرکزی در جنوب) را از هم جدا کرده است (Stocklin, 1974; Berberian and King, 1981; Jackson et al., 2002). مهم‌ترین عارضه زمین‌ساختی منطقه، گسل خزر (خزر) است که در مدار ۳۰° ۵۱' از گسل شمال البرز جدا می‌شود (Allen et al., 2003). در پژوهش‌های Berberian and Yeats (1999) با توجه به چهار زمین‌لرزه تاریخی در طول بخش باختری گسل خزر، پیشنهاد می‌شود که این گسل به سمت باختر هم کشیده شده است و در زیر دشت امتداد دارد. برخاستگی دامنه شمالی کوه‌های البرز در راستای گسل خزر با درازای ۶۰۰ کیلومتر در جنوب، شیب‌های گرگان به سن پالئوویک را در همبری با رسوبات کواترنری دشت ساحلی خزر قرار داده است که نشان‌دهنده مقدار زیاد برخاستگی قائم است.

پیمایش زمین‌شناسی و برداشت داده‌های مورد نیاز، عملیات ژئوفیزیکی با روش مقاومت ویژه آغاز شد. ابتدا برداشت داده‌ها با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی و با فاصله ایستگاهی ۲۰ متر بر روی پروفیل شماره یک صورت گرفت. به منظور بررسی‌های دقیق‌تر، قسمت‌های بی‌هنجار این پروفیل و همچنین قسمت‌های با تغییرات نامتعارف توپوگرافی در سطح زمین که در بخش برداشت‌هایی زمین‌شناسی به دست آمده بود، با استفاده از فواصل الکترودی کوچک‌تر (۱۰ متر) مورد بررسی قرار گرفته است. در مراحل بعدی مطالعات قسمت‌هایی از این پروفیل با استفاده از روش GPR و مغناطیس‌سنجی سزیم انجام شده است. جهت رسیدن به اهداف طراحی شده چند پروفیل خطی مغناطیس‌سنجی و یک پروفیل خطی GPR با امتداد شمالی-جنوبی برداشت شده است. به منظور بررسی‌های دقیق‌تر و مشخص شدن امتداد ناپیوستگی‌های مشاهده شده در طول پروفیل‌های خطی، دو شبکه با مشخصات شبکه شماره ۱ (Grid1) و شبکه شماره ۲ (Grid2) در نظر گرفته شد. شبکه شماره ۱ با استفاده از روش‌های مغناطیس‌سنجی و GPR و شبکه شماره ۲ با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی مورد پیمایش قرار گرفت.

اختلاف بین مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده و اندازه‌گیری شده کاهش یابد. این اختلاف به وسیله خطای جذر متوسط مربعات RMS ارائه می‌شود. در ادامه با استفاده از نقشه‌ها و مقاطع موقعیت و عمق بی‌هنجاری‌ها به دست آمده و سپس پروفیل‌ها و شبکه‌های جدیدی جهت ادامه عملیات طراحی شده است. برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر و بهتر، پیمایش مغناطیس‌سنجی سزیم بر روی ۲ شبکه شامل ۱۶ پروفیل موازی انجام گرفت. در مرحله بعد با استفاده از رادار نفوذی به زمین بر روی یک شبکه شامل هشت پروفیل موازی برداشت‌های تکمیلی انجام شده است. پس از پردازش کلیه داده‌های به دست آمده از روش‌های مختلف ژئوفیزیکی به وسیله نرم‌افزارهای تخصصی و تلفیق آنها به تحلیل و بررسی ساختارهای زیرسطحی پرداخته شده است.

#### ۴- بحث و بررسی

در این مطالعه ابتدا یک پروفیل (شکل ۲) با امتداد تقریبی شمالی-جنوبی انتخاب شده است که کل تپه باستانی به همراه قسمتی از زمین‌های اطراف آن را دربر می‌گیرد. بعد از



شکل ۲- تصویر هوایی از موقعیت پروفیل‌ها و شبکه‌های برداشت در محدوده گوهرتپه.

#### ۴-۱. بررسی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی

شده است. شروع این آرایش با قرار دادن الکترودهای جریان بر روی ایستگاه‌های ۲۴۰- و ۲۲۰- در جنوب پروفیل (نزدیک خیابان اصلی) آغاز و اندازه‌گیری به سمت شمال پروفیل ادامه یافته است به طوری که آخرین الکترودهای پتانسیل بر روی

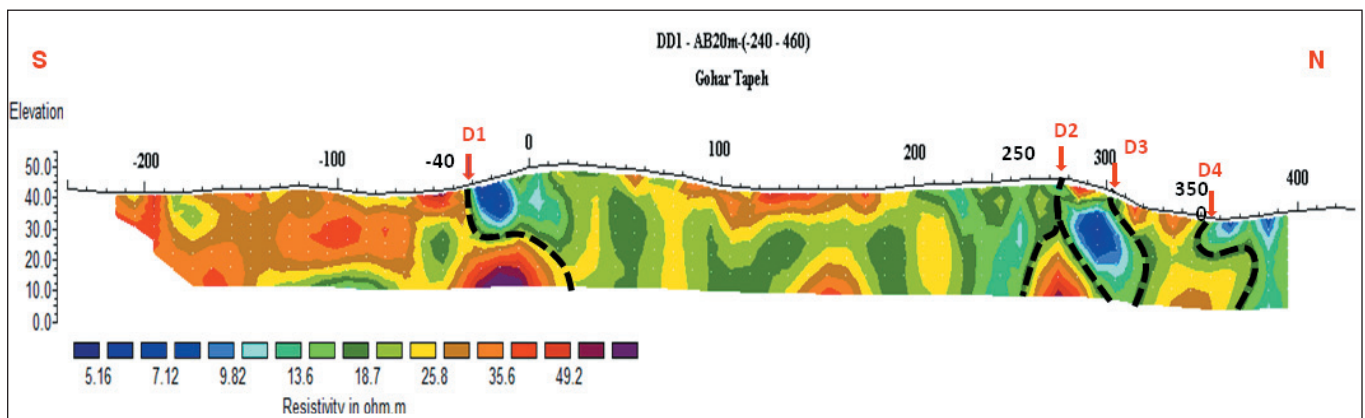
موقعیت مکانی ایستگاه‌های برداشت شده مقاومت ویژه الکتریکی در سیستم UTM و با استاندارد WGS84 در جدول ۱ آورده شده است. بر روی این مقطع برداشت‌ها با فاصله الکترودی ۲۰ متر، پرش ۲۰ متر و تا ۶ پرش برای الکترودهای پتانسیل انجام

بی‌هنجاری قابل تشخیص است. D1 بین ایستگاه‌های ۳۰- و ۱۰، D2 بین ایستگاه‌های ۲۷۰ و ۲۸۰، D3 بین ایستگاه‌های ۳۰۰ و ۳۲۰ و سپس در انتهای شمالی پروفیل D4 منطبق بر ایستگاه ۳۵۰ واقع شده است که در آنها بخش‌های کم‌مقاومت در مجاورت بخش‌های با مقاومت بالا قرار گرفته‌اند. این بخش‌ها در شکل ۳ با استفاده از خط‌چین مشخص شده‌اند.

ایستگاه‌های ۴۶۰ و ۴۴۰ قرار گرفته‌اند. به این ترتیب ۲۹ پرش برای الکتروود جریان و جمعاً ۱۷۲ نقطه بر روی این پروفیل با بیشترین مقدار مقاومت ویژه ظاهری ۴۰/۶ و کمترین مقدار ۸/۷ اهم‌متر برداشت شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات مقاومت ویژه در این منطقه بسیار پایین است و این مسئله از آنجا ناشی می‌شود که این پروفیل بر روی نهشته‌های رسوبی قرار گرفته است. به‌طور کلی در این مدل چهار

جدول ۱- مختصات UTM ایستگاه‌های پروفیل شماره ۱ گوهرتپه.

Rows	Station	X (utm)	Y (utm)	Rows	Station	X (utm)	Y (utm)
1	-240	714544	4061533	20	140	714515	4061911
2	-220	714541	4061553	21	160	714512	4061931
3	-200	714539	4061572	22	180	714511	4061951
4	-180	714537	4061592	23	200	714510	4061971
5	-160	714535	4061612	24	220	714508	4061991
6	-140	714533	4061632	25	240	714507	4062010
7	-120	714530	4061652	26	260	714505	4062029
8	-100	714529	4061673	27	280	714502	4062049
9	-80	714529	4061691	28	300	714502	4062074
10	-60	714529	4061711	29	320	714500	4062090
11	-40	714528	4061731	30	340	714499	4062109
12	-20	714526	4061750	31	360	714497	4062130
13	0	714525	4061773	32	380	714496	4062149
14	20	714523	4061792	33	400	714495	4062169
15	40	714522	4061812	34	420	714494	4062189
16	60	714520	4061832	35	440	714492	4062209
17	80	714519	4061852	36	460	714490	4062227
18	100	714518	4061871	37	480	714488	4062249
19	120	714517	4061890	38	500	714485	4062268



شکل ۳- مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون با فاصله ایستگاهی ۲۰ متر (پروفیل شماره ۱ ایستگاه ۲۴۰ تا ۴۰۰).

بررسی شکل ظاهری این بی‌هنجاری‌ها، مدل‌سازی وارون این فرضیه را تقویت می‌کند که این تغییرات می‌تواند در اثر حرکت لایه‌ها بر روی یکدیگر ایجاد شده باشد. با تلفیق و تطابق مکانی این بی‌هنجاری با بی‌هنجاری خطی حاصل از برداشت‌های مغناطیسی شبکه شماره ۲، دید بهتری از تغییرات زیر سطحی به دست می‌آید که نشان می‌دهد بخش‌های با نمادهای D1، D2، D3 و D4 به ترتیب اهمیت بیشتری دارند و در محدوده‌های بین ایستگاه‌های صفر (۰) تا ۲۰، ۲۸۰ تا ۳۰۰، ۳۵۰ تا ۳۶۰ و ۴۶۰ تا ۴۸۰ واقع شده‌اند. سه بی‌هنجاری D1، D2، D3 و D4 می‌توانند ناشی از فعالیت شدید زمین‌ساختی در ناحیه باشند. شواهد این فعالیت‌ها در ترانشه‌های حفاری شده در مجاورت این بی‌هنجاری‌ها قابل تشخیص است (شکل ۴). محل بی‌هنجاری D1 به صورت برآمدگی و فروافتادگی روی زمین مشخص است که در شکل ۵ نمایش داده شده و به احتمال زیاد حاصل فعالیت‌های زمین‌ساختی منطقه بوده و شاخه فرعی از گسل خرز است (شکل ۶).

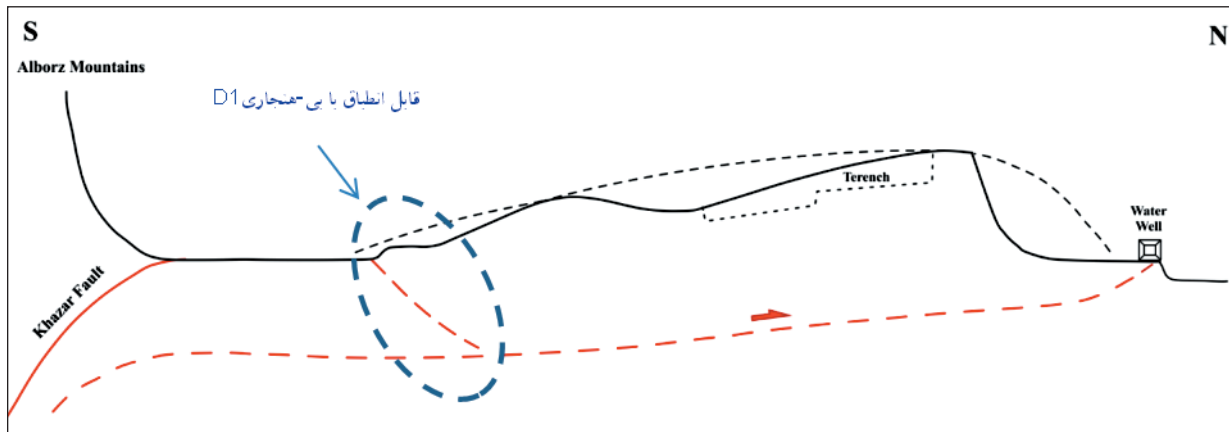
با مشخص شدن مناطق بی‌هنجاری بررسی دقیق‌تر این مناطق، برداشت‌ها با فاصله ایستگاهی ۱۰ متر بر روی مناطق بی‌هنجار صورت پذیرفت. این مناطق شامل دو بخش در فاصله ایستگاهی ۱۶۰- تا ۶۰ و ۳۲۰ تا ۵۰۰ هستند. بیشترین مقدار برای مقاومت ویژه ظاهری ۴۵/۶ و کمترین مقدار ۶/۳ اهم‌متر برداشت شده است. از نتایج قابل توجه در این مدل وجود بخشی با مقاومت ویژه پایین مابین دو ایستگاه ۴۰- و ۲۰- بوده که در مجاورت بخش‌های مقاوم‌تر قرار گرفته است و ادامه آن در عمق تا ایستگاه ۴۰ دیده می‌شود. برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی در فاصله ایستگاهی ۳۲۰ تا ۵۰۰ با استفاده از آرایش دوقطبی- دوقطبی و با فاصله ایستگاهی ۱۰ متر بر روی پروفیل شماره ۱ نیز صورت گرفت. به این ترتیب ۱۴ پرش برای الکتروود جریان و جمعاً ۷۸ نقطه بر روی این پروفیل برای پارامتر مقاومت ویژه ظاهری برحسب اهم‌متر ( $\Omega.m$ ) اندازه‌گیری شد.



شکل ۴- نمایی از ترانشه حفاری شده در منطقه که فعالیت‌های زمین‌ساخت منطقه به صورت جابه‌جایی لایه‌ها در آن قابل بررسی است.



شکل ۵- محل بی‌هنجاری D1 بر روی بخش جنوبی پروفیل شماره ۱۱ از ایستگاه ۲۴۰- تا ۰ که در مجاورت جاده اصلی بهشهر- نکا واقع شده است.

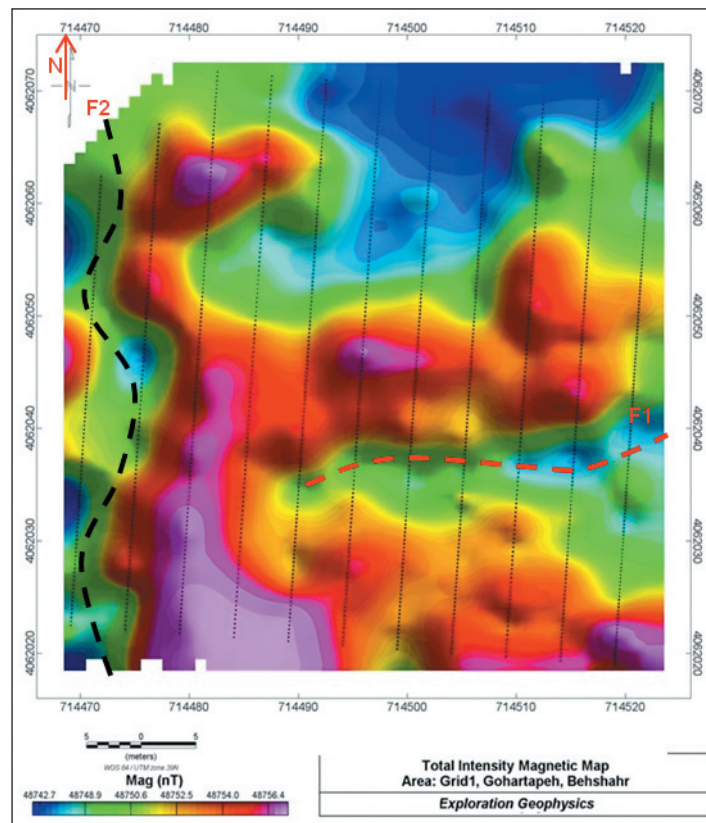


شکل ۶- نمایی شماتیک از تپه باستانی گوهرتپه بر فراز فرادیواره گسل پیشرونده سامانه گسلی خزر.

#### ۴-۲. بررسی برداشت‌های مغناطیس‌سنجی سزیم

کم میدان مغناطیسی است. چنانچه در نقشه شدت کل (شکل ۷) میدان مغناطیسی دیده می‌شود، بی‌هنجاری خطی در دو راستای افقی و عمودی قابل تفکیک و رؤیت است. این بخش‌ها به ترتیب با خطوط منقطع به نام F1 و F2 مشخص شده‌اند. این گونه بی‌هنجاری‌های خطی می‌تواند دلیلی بر وجود عوارضی زیرسطحی مانند ناپیوستگی‌ها و یا اثر سازه‌های تاریخی مدفون در محل بی‌هنجاری‌ها باشد.

شبکه شماره ۱ (Grid1) شامل ۱۱ پروفیل با فاصله ۵ متر و در امتداد شمال-جنوب مغناطیسی است. برداشت مغناطیس‌سنجی سزیم مجموعاً بر روی ۱۴۸۸ ایستگاه به صورت ممتد (Continuous) انجام شد. کمترین مقدار شدت میدان مغناطیسی ۴۸۷۴۳ نانوتسلا و بیشترین مقدار آن، ۴۸۷۶۸ نانوتسلا اندازه‌گیری شده است. اختلاف شدت میدان در این محدوده حدود ۲۵ نانوتسلا و نشان‌دهنده تغییرات بسیار

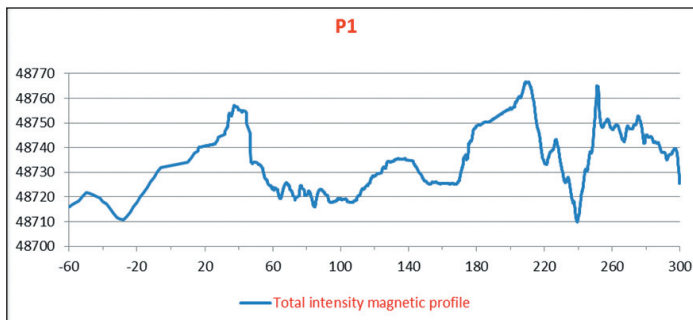


شکل ۷- نقشه شدت کل میدان مغناطیسی شبکه شماره ۱ (آنومالی‌های خطی F1 و F2).

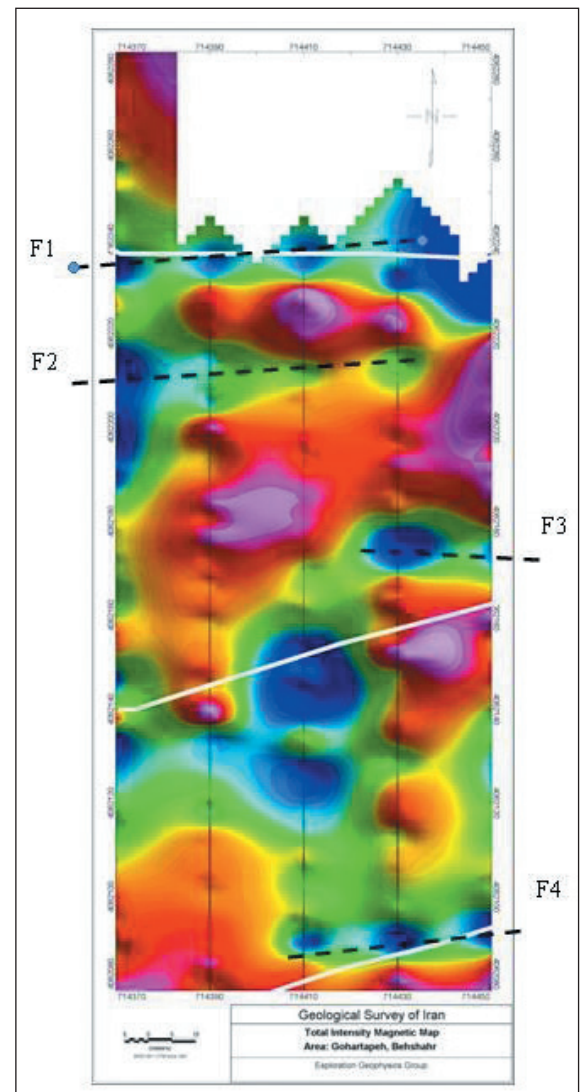
### ۴-۳. بررسی نتایج برداشت‌های مغناطیسی سنجی

شکل ۸ نمودار تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی بر روی پروفیل شماره ۱ را نشان می‌دهد. کمترین مقدار شدت میدان مغناطیسی ۴۸۷۰۵ نانوتسلا و مربوط به ایستگاه ۳۰- و بیشترین مقدار ۴۸۷۶۷ نانوتسلا و مربوط به ایستگاه ۲۱۰ و اختلاف شدت میدان در این پروفیل ۶۲ نانوتسلا است. تغییرات شدت میدان مغناطیسی در قسمت‌هایی از این پروفیل می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات ساختارهای زیرسطحی و وجود ناپیوستگی در محل پروفیل باشد. قسمت‌هایی از نمودار پروفیل شماره ۱ که از اهمیت بیشتری برخوردارند، به صورت جداگانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بررسی بخش‌های مختلف نشان داد که کمترین و بیشترین حد به ترتیب در دو ایستگاه ۱۱۰ و ۲۰۰ است. در این بخش با وجود پایین بودن مقدار میدان مغناطیسی، بی‌هنجاری به صورت High و Low قابل رؤیت است. این بی‌هنجاری در محلی واقع شده است که در روی زمین هیچ گونه عارضه سطحی مرتبط با آن دیده نمی‌شود. همچنین در برداشت‌های مقاومت‌سنجی نیز در این فاصله بی‌هنجاری مشخصی مشاهده نمی‌شود و نمی‌توان این بی‌هنجاری را به عوارض زیر سطحی نسبت داد. تغییرات شدت کل

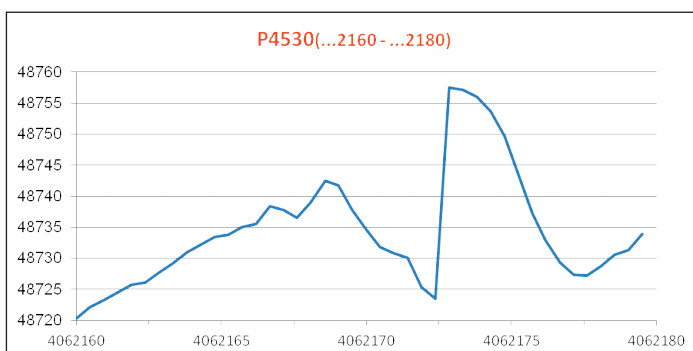
میدان مغناطیسی بین دو ایستگاه ۲۰۰ و ۳۰۰ یعنی بخش انتهایی از پروفیل شماره ۱ را نشان می‌دهد که کمترین مقدار شدت میدان مغناطیسی مربوط به ایستگاه ۲۴۰ و بیشترین مقدار مربوط به ایستگاه ۲۱۰ است. این بی‌هنجاری نشان‌دهنده تغییرات جانبی در مواد تشکیل‌دهنده و از محل‌های مستعد جهت وجود عوارض زیرسطحی مانند ناپیوستگی است. همان‌طور که انتظار می‌رفت در این نمودار اختلاف در ایستگاه‌های ۴۰۶۲۱۱۰ تا ۴۰۶۲۱۲۰ دارای بی‌هنجاری High و Low است. این بی‌هنجاری در امتداد بی‌هنجاری مقاومت‌سنجی در ایستگاه ۳۵۰ از پروفیل شماره ۱ (شکل ۳) و بی‌هنجاری مغناطیسی و خطی F2 از شبکه شماره ۲ است (شکل ۹). در نمودار شکل ۱۰ تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی بر روی ایستگاه‌های ۴۰۶۲۱۶۰ تا ۴۰۶۲۱۸۰ از پروفیل ۴۵۳۰ است. این بی‌هنجاری می‌تواند در ارتباط با بی‌هنجاری مغناطیسی و خطی F3 از شبکه شماره ۲ باشد. در نمودار شکل ۱۱ تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی بر روی ایستگاه‌های ۴۰۶۲۱۶۰ تا ۴۰۶۲۱۹۰ از پروفیل ۴۶۳۰ است. این بی‌هنجاری می‌تواند با بی‌هنجاری مغناطیسی خطی F3 از شبکه شماره ۲ از لحاظ مکانی قابل تطبیق باشد.



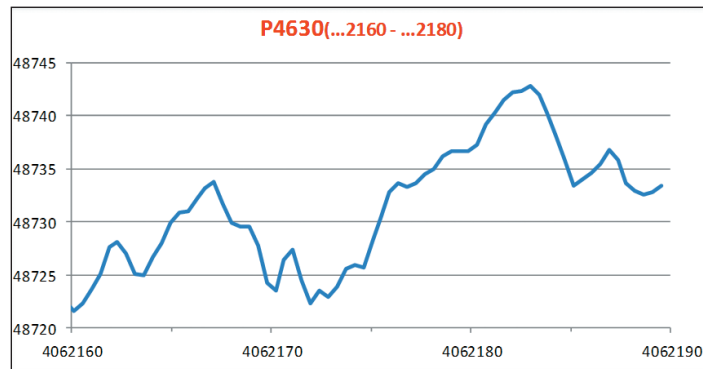
شکل ۹- نقشه شدت کل میدان مغناطیسی بر روی شبکه شماره ۲.



شکل ۸- نمودار شدت کل میدان مغناطیسی بر روی پروفیل شماره ۱.



شکل ۱۰- نمودار تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی در ارتباط با بی‌هنجاری خطی F2 از شبکه ۲.

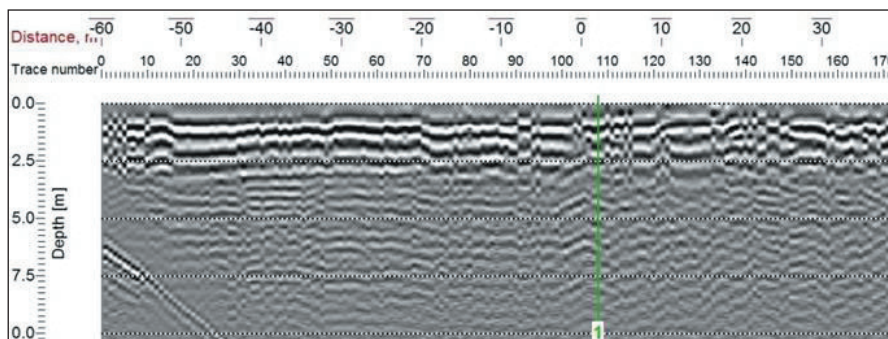


شکل ۱۱- نمودار تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی در ارتباز با بی‌هنجاری خطی F3 از شبکه ۲.

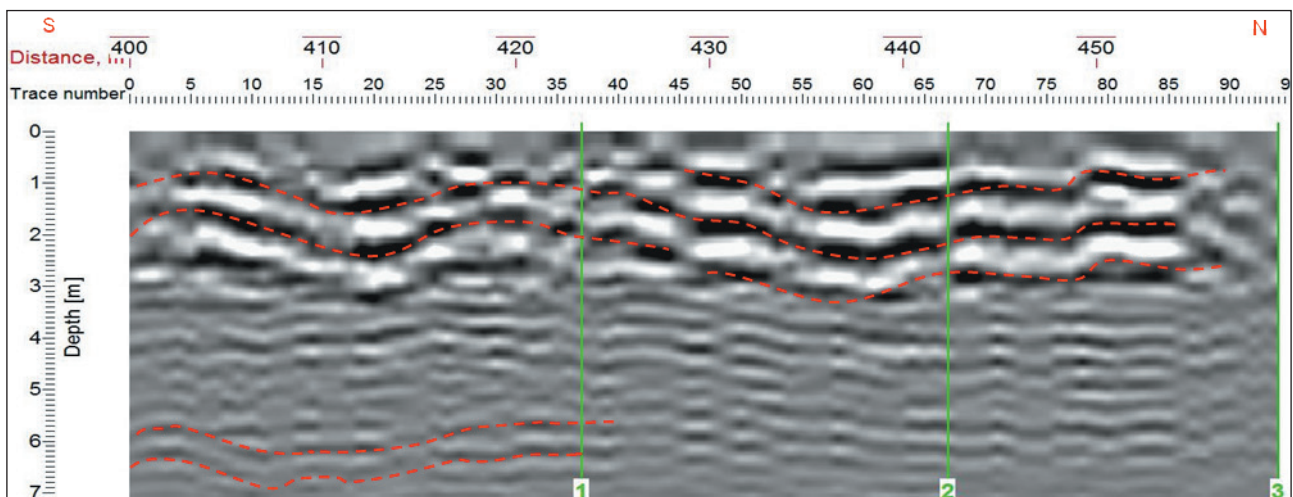
انتظار نیست. هر چند که تغییراتی در بازتاب‌های عمقی نیز مشاهده می‌شود ولی نسبت دادن آنها به جابه‌جایی لایه‌های زیرسطحی به واسطه نیروهای تکتونیکی در این مرحله غیرمنطقی به نظر می‌رسد. ناپوستگی دیگری در بازتاب نزدیک به سطح در زون پروفیل دیده می‌شود (شکل ۱۳). بازتاب‌های عمقی احتمالاً مربوط به فصل مشترک لایه رسوبی در این نواحی است. با توجه به اینکه بازتاب افقی نیست نشان از تغییرات عمقی لایه دارد. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ تلفیقی از روش‌های مختلف آورده شده است که بی‌هنجاری‌های را در روش‌های مختلف نشان می‌دهد.

#### ۴-۴. بررسی نتایج برداشت‌های GPR در محدوده کوه‌رته

برای بررسی صحت و تکمیل اطلاعات زیرسطحی، پیمایش GPR بر روی یک شبکه مستطیلی (Grid1) و یک پروفیل خطی انجام شد که این کار با استفاده از دو آنتن ۱۰۰ و ۲۵۰ مگا هرتز غیر پوششی صورت گرفت. در شکل ۱۲ تنها یک بی‌هنجاری خطی در محدوده اعماق ۵ تا ۱۰ متری پروفیل دیده می‌شود که مربوط به ساختارهای سطحی زمین است. در ایستگاه‌های ۱۸۰- تا ۸۰- از این پروفیل نیز بازتاب‌های نزدیک سطح قابل رویت است. از آنجا که زمین این ناحیه به منظور مقاصد کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد، این گسستگی‌های سطحی دور از

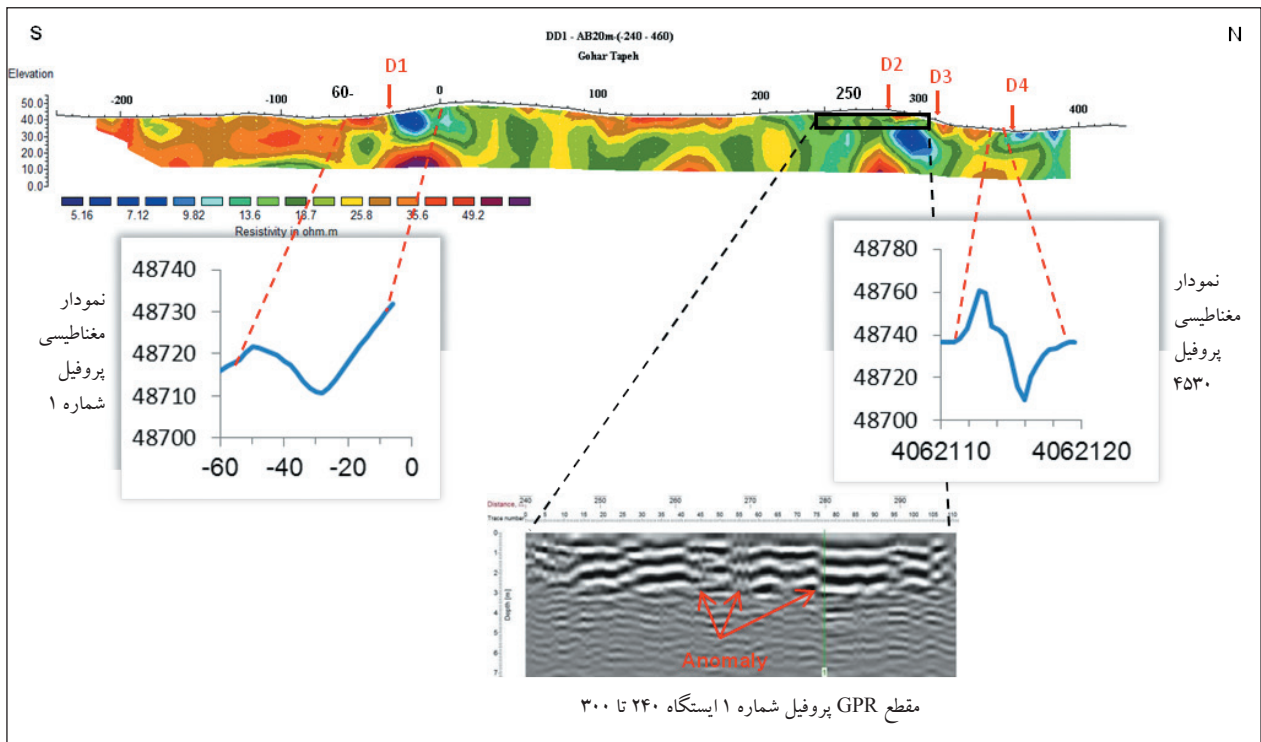


شکل ۱۲- مقطع عمقی پروفیل شماره ۱ از ایستگاه ۶۰- تا ۴۰ با استفاده از آنتن ۱۰۰ مگاهرتز غیرپوششی.

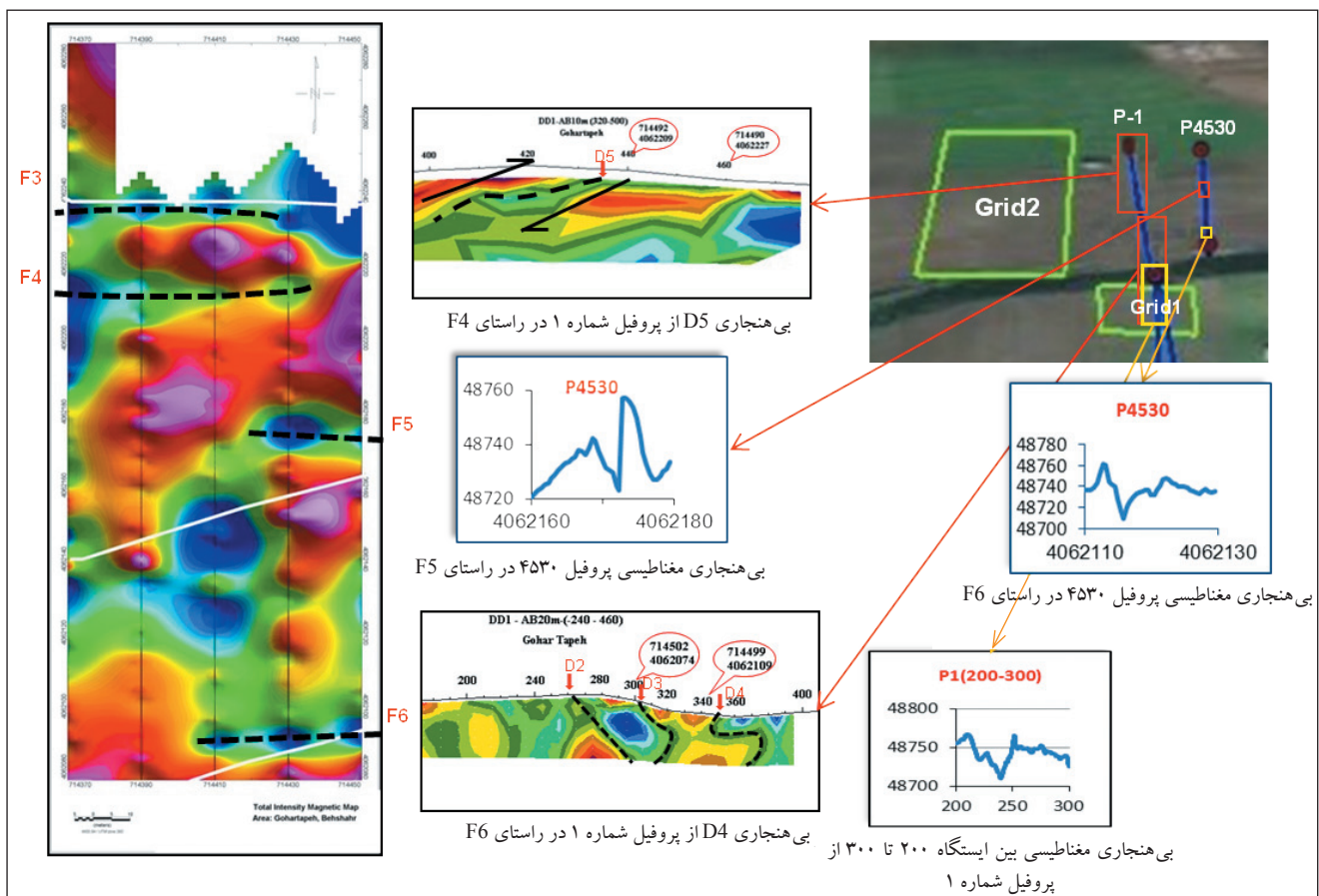


شکل ۱۳- مقطع عمقی پروفیل شماره ۱ از ایستگاه ۴۰ تا ۴۶۰ با استفاده از آنتن ۱۰۰ مگاهرتز غیرپوششی.





شکل ۱۴- تلفیق نتایج مقاومت سنجی، مغناطیس سنجی و GPR در محل آنومالی های D1، D2، D3 از پروفیل شماره ۱.



شکل ۱۵- تلفیق نتایج و تأیید آنها توسط روش های مختلف.

## ۵- نتیجه‌گیری

لایه‌ها به دلیل پیشینه تاریخی به صورت لایه‌هایی افقی باشند. اما بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی در بخش‌های مختلف این محدوده، نشان‌دهنده بهم‌ریختگی و جابه‌جایی لایه‌های رسوبات و خارج شدن آنها از حالت افقی است. در داخل ترانشه نیز خارج شدن چینه‌ها از حالت افقی و وجود گسل‌ها و جابه‌جایی‌ها مؤید مطالعات حاضر و نیز وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد در این منطقه است.

### سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به دلیل فراهم آوردن امکانات لازم برای انجام این پژوهش تشکر و قدرانی کنند. همچنین از سازمان میراث فرهنگی و گردشگری و مدیریت این سازمان در استان مازندران جهت صدور مجوزهای لازم برای برداشت‌های میدانی صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

با توجه به مطالعات انجام گرفته در این پژوهش به دلیل نزدیکی مقاومت لایه‌های تشکیل دهنده علاوه بر روش مقاومت ویژه روش‌های تکمیل‌کننده، مغناطیس‌سنجی سزیم و GPR، جهت شناسایی بی‌هنجاری‌ها استفاده شده است که نتیجه آن شناسایی ناپیوستگی‌های زیرسطحی حاصل از فعالیت‌های زمین‌ساختی است. با توجه به تلفیق اطلاعات برداشت صحرائی و روش‌های مختلف ژئوفیزیکی، از بین ناپیوستگی‌های به دست آمده چند ساختار خطی با ویژگی‌های گسل‌های مدفون با راستای خاوری-باختری شناسایی شد. می‌توان از ناپیوستگی‌هایی که حرکت لایه‌ها را در مدل وارون به خوبی نمایان می‌کنند به بی‌هنجاری‌های D3، D2، D3 و D4 اشاره کرد که در اثر فعالیت‌های شدید زمین‌ساختی در ناحیه ایجاد شده و شواهد این فعالیت‌ها در ترانشه‌های حفاری شده در مجاورت این بی‌هنجاری‌ها قابل تشخیص است. این شکستگی‌ها در حقیقت می‌توانند شاخه‌های فرعی گسل‌های اصلی البرز و گسل خزر باشند. بر اساس مطالعات انجام شده در تپه باستانی گوهر تپه، انتظار می‌رفت تمامی

### کتابنگاری

- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۹- تفکیک بخش‌های مختلف ایران از نظر وضع ساختمانی در ارتباط با حوزه‌های رسوبی، نشریه انجمن نفت، شماره ۸۲، حجت، آ. و رنجبر، ح.، ۱۳۹۱- اصول ژئوالکترونیک کاربردی، مؤسسه انتشارات ستایش.
- رجایی، م. و داودی‌راد، ن.، ۱۳۸۹- مطالعات زمین‌شناسی و مکانیک سنگی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، مجله علوم و زمین، جلد ۱۳، صص. ۱۵ تا ۱۹.
- علیان‌نژاد، ع.، مرادی هرسینی، ک.، قرشی، م. و خادمی، س.، ۱۳۹۲- ارزیابی کارایی روش‌های ژئوالکترونیک و ژئورادار در شناخت گسل‌های فرعی تهران، هشتمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- فردوسی، ح. و پیروز، ا.، ۱۳۸۲- تهیه مدل‌های ریاضی و نرم‌افزارهای مربوط برای اندازه‌گیری‌های ژئوالکترونیک گسل‌ها و دایک‌های قائم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کاظم‌زاده، ع.، بیدهدی، م. و رضایی، م.، ۱۳۸۷- مطالعه مقاومت ویژه سازندی با استفاده از روش واحدهای جریان هیدرولیکی در مخازن کربناته، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۹۱، شماره ۱، صص. ۱۹ تا ۷۱.
- محمدی ویژه، م. و کامکار روحانی، ا. ق.، ۱۳۹۰- بررسی ساختارهای مدفون نزدیک سطح زمین با استفاده از روش‌های GPR و مقاومت ویژه: یک مورد مطالعاتی: فصلنامه علمی- پژوهشی علوم زمین، شماره ۸۰، صص. ۱۶۳ تا ۱۷۰.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵- دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۲۹ ص.

### References

- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M. and Qorashi, M., 2003- Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology* 25, 659- 672.
- Arbogast, J. S. and Franklin, M. H., 1999- Artificial neural networks and high speed resistivity modeling software speed reservoir characterization, *Petroleum engineering international*, Vol. 72, No. 5, pp. 57- 61.
- Berberian, M. and King, G. C. P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210- 265.
- Berberian, M. and Yeats, R. S., 1999- Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America* 89, 120- 139.
- Dehghani, G. A. and Makris, J., 1983- The gravity field and crustal structure of Iran, *Geol. Surv. Iran, Rep. No. 51*, pp. 51-68.
- Dobrin, M. B. and Savit, C. H., 1988- Introduction to geophysical prospecting, McGraw-Hill 867.
- Helle, H. B., Bhatt, A. and Ursin, B., 2001- Porosity and permeability prediction from wireline logs using artificial neural networks a North Sea case study, *Geophysical Prospecting*, No. 49, pp. 43- 444.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. and Berberian, M., 2002- Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophysical Journal International* 148, 214- 245.
- Mooney, H. M. 1980- Hand book of engineering geophysics, Vol. 2, Bison Instrument, Minneapolis.
- Rashed, M., Kawamura, D., Nemoto, H. and Nakagawa, K., 2004- Ground penetrating radar investigations across the Uemachi Fault, Osaka, Japan, *Journal of Applied Geophysics*, 53(2-3): 63-75, DOI: 10.1016/S0296-9851(03)00028-4.
- Stocklin, J., 1974- Northern Iran: Alborz Mountains. In: Spencer, A.M. (Ed.), *Mesozoic- Cenozoic Belts: Geological Society of London, Special Publications*, 4, pp. 213- 234.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E., 1990- Applied geophysics, second edition.
- Wong, P., Tamhane, D. and Aminzadeh, F., 2000- A soft computing Approach to Integrate Well logs and geological clusters for Petrophysical Prediction, Third conference and Exposition on petroleum Geophysics, New Delhi, 4pp.

# Investigation of active tectonics and identification of active faults by geophysical methods case study: Gohartapeh- Behshahr

F. Alahverdi Maygooni<sup>1</sup>, M. Mohamadi Vizheh<sup>2</sup>, A.R. Farrokhnia<sup>3\*</sup> and E. Boostan<sup>3</sup> and H. Nazari<sup>4</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Department of Geology, Islamic Azad University, Karaj Branch, Karaj, Iran

<sup>2</sup>M.Sc., Geological Survey of Iran; Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Geology, Islamic Azad University, Karaj Branch, Karaj, Iran

<sup>4</sup>Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2017 February 05

Accepted: 2017 December 31

## Abstract

Undoubtedly, one of the evidence of tectonic activity in each region is earthquake, which has a major role in casualties and financial losses. The earthquake is usually caused by faults that sometimes extend to the depths of the earth's crust. In cases where no signs or complications of these faults are observed on the surface of the earth, it is necessary to get a better understanding of these faults and its sub branches by combining geological knowledge as well as remote sensing and geophysical instruments. The Kazar fault in the study area is a fundamental fault that has been attributed to at least six historical earthquake events. Due to quaternary activities, recognition of this fault is very important in the region. Therefore, geological and geophysical studies were carried out on the historical site of Gohartapeh in Behshahr city to reveal its hidden parts. Specific resistive methods with bipolar bipolar arrangement at 10 and 20 meters intervals are used to provide sections and maps. By examining them and considering the position and depth of the anomalies obtained in the next stages, new profiles and networks were designed. In order to obtain more accurate results, the cesium magneto metric scanning was performed on 4 profiles. Data obtained from field operations and data acquisition as well as final processing of data in specialized software have been incorporated and clearly interpreted from sub-surface structures, especially faults and discontinuities in the study area, which indicate an impressive anomalous adaptation obtained with field evidence.

**Keywords:** Ground penetrating radar (GPR), Resistivity, Cesium magnetometry, Gohartapeh, Khazar fault, Joint Interpretation

For Persian Version see pages 227 to 236

\*Corresponding author: A.R. Farrokhnia; E-mail: Farrokhnia@kia.ac.ir