

تهیه مدل مفهومی و ساز و کار شکل گیری چشمه کارستی روانسر با تلفیق داده های ژئوفیزیکی و

هیدروژئولوژی

حمیدرضا باغزندانی^{۱*} و حمید آقاجانی^۲

۱- دکتری تخصصی مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶

* نویسنده مسئول مکاتبات: hbaghzendani@yahoo.com

چکیده

واژگان کلیدی

منابع آب های سطحی و زیرزمینی از مؤلفه های اساسی توسعه پایدار، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک به شمار می روند که بخش قابل توجهی از آن ها در سازندهای کربناته و محیط های کارستی ذخیره شده اند. زون ساختاری زاگرس به دلیل ضخامت زیاد و گسترش وسیع سنگ های کربناته، یکی از مهم ترین نواحی کارستی ایران محسوب می شود و نقش اساسی در تأمین آب زیرزمینی دارد. چشمه کارستی روانسر در استان کرمانشاه، با منشأ سازند آهکی بیستون (کرتاسه)، از منابع آبی شاخص این منطقه است که توسعه آن به شدت تحت تأثیر گسل های اصلی با روندهای غالب $E30^{\circ}N$ و $W60^{\circ}N$ قرار دارد. به منظور شناسایی و تصویرسازی حفرات زیرسطحی کارستی، از تلفیق روش های میکروگرانی و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شد. داده های گرانی سنجی در قالب حدود ۱۷۰۰ ایستگاه برداشت و آنومالی های منفی بوگه با دامنه ای در حدود -0.14 تا -0.17 میلی گال استخراج گردید که بیانگر حضور فضاهای خالی و کاهش چگالی در زیرسطح است. بر اساس نتایج مدل سازی، چگالی واحدهای کارستی نسبت به سنگ آهک سالم کاهش یافته و به مقادیر تقریبی 2.45 تا 2.55 گرم بر سانتی متر مکعب می رسد.

تشخیص حفرات پنهان

میکروگرانی

مقاومت الکتریکی

کارست

مدل مفهومی

روانسر

در ادامه، دو پروفیل ژئوالکتریکی با آرایش های قطبی-دوقطبی و دوقطبی-دوقطبی طراحی و داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی برداشت و با استفاده از الگوریتم های وارون سازی دوبعدی مبتنی بر روش حداقل مربعات پردازش شدند. نتایج نشان می دهد که نواحی کارستی و حفرات پر شده از آب دارای مقاومت ویژه پایین در بازه 30 تا 100 اهم متر بوده، در حالی که حفرات خشک و سنگ های آهکی سالم مقادیر مقاومت بالاتر از 800 تا 1500 اهم متر را نشان می دهند. ابعاد جانبی حفرات و فروچاله های شناسایی شده بین 20 تا 50 متر و عمق آن ها در برخی بخش ها بیش از 30 تا 60 متر برآورد می شود. مقایسه مقاطع چگالی و مقاومت ویژه الکتریکی نشان می دهد که فضاهای خالی خشک با مقاومت الکتریکی بالا و کاهش چگالی همراه هستند، در حالی که حفرات پر شده از آب با مقاومت کمتر و کاهش نسبی چگالی مشخص می شوند. در نهایت، با تلفیق نتایج حاصل از دو روش ژئوفیزیکی و تطبیق آن ها با شواهد زمین شناسی و تکتونیکی، مدل زمین شناسی و مدل مفهومی کارست محدوده روانسر تهیه شد که گسترش جانبی و عمقی سیستم کارستی را تا عمق تقریبی 80 تا 120 متر نشان می دهد. نتایج این مطالعه کارایی بالای تلفیق روش های گرانی سنجی و ژئوالکتریک را در تفکیک نواحی کارستی از ساختارهای گسلی و شناسایی دقیق مسیرهای جریان آب زیرزمینی تأیید می کند.

۱- مقدمه

بر اساس مطالعات، حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد از مساحت ایران را سازندهای کربناته و پهنه‌های مستعد توسعه کارست تشکیل می‌دهند. این پهنه‌ها عمدتاً در زون‌های ساختاری زاگرس، البرز، ایران مرکزی و کپه‌داغ گسترش یافته‌اند و نقش بسیار مهمی در ذخیره و انتقال منابع آب زیرزمینی کشور ایفا می‌کنند. زاگرس به‌عنوان مهم‌ترین ناحیه کارستی ایران، با دارا بودن ضخامت بالای سنگ‌های آهکی، شکستگی‌های تکتونیکی گسترده و شرایط اقلیمی مناسب، بیشترین تمرکز چشمه‌های بزرگ کارستی را در خود جای داده است (احمدی، ۱۳۹۱). چرخه هیدرولوژیکی به‌طور مداوم در طبیعت رخ می‌دهد (Yang et al., 2021) و این تغییرات می‌توانند باعث بروز پدیده‌هایی مانند سیل و خشکسالی شوند (Raghunath, 2006). با توجه به قرارگیری ایران در نواحی گرم و خشک بیابانی و نیاز روزافزون به منابع آب قابل شرب و کشاورزی، شناخت و مدیریت منابع آب، به‌ویژه منابع کارستی، اهمیت ویژه‌ای دارد. این منابع و چشمه‌های مرتبط با کارست نقش بسزایی در تأمین آب سالم ایفا می‌کنند (Geravand et al., 2022).

سنگ‌های آهکی از لحاظ هیدروژئولوژیکی اهمیت بالایی دارند. در مراحل اولیه تشکیل، تخلخل و نفوذپذیری این سنگ‌ها پایین است، اما با گذشت زمان و تحت تأثیر عوامل تکتونیکی، شکاف‌ها و گسل‌ها شکل می‌گیرند که با بارش و انحلال، مناطق کارستی ایجاد می‌شود. این مناطق دارای چشمه‌های کارستی هستند که جریان آب آن‌ها به شدت تحت تأثیر بارش است. آب‌های زیرزمینی در کارست‌ها از طریق سیستم‌های مجاری و غارها جریان می‌یابند و چشمه‌ها در مرزهای کارست و دره‌های رودخانه‌ای ظاهر می‌شوند. چشمه‌های کارستی به دلیل داشتن مخازن زیرزمینی بزرگ، تغییرات دبی آب قابل توجهی دارند (Audra et al., 2006).

آب کارستی معمولاً در نتیجه تجزیه شیمیایی در مناطقی با سنگ‌های کربناته پدید می‌آید. بسته به سطح گسترش کارست، این تشکیلات در اعماق مختلفی یافت می‌شوند و دارای گستره‌های هندسی و اندازه‌های مختلف هستند. در تشکیل کارست، سیستم‌های آب‌زیرزمینی و مورفولوژی سطحی به طور مستقیم نقش به سزایی دارد (Ford & Williams, 2007). بنابراین، سیستم‌های کارست بسیار پیچیده هستند و اغلب با خطرات ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی مرتبط هستند (De Giorgi et al., 2011; Leucci, 2014; De Waele et al., 2011). برای توصیف غیرمستقیم گسترش کارست‌ها، باید از تکنیک‌های ژئوفیزیکی استفاده شود (Martínez-Moreno et al., 2014). محدوده کاربرد هر روش توسط ویژگی فیزیکی که در حال تحقیق است تعیین می‌شود. نوسانات قوی افقی و عمودی در پارامترهای فیزیکی مورد بررسی نشان می‌دهند که چقدر محیط‌های کارست در ژئوفیزیک پیچیده هستند. شکاف‌ها حفرات کارست ممکن است با هوا، خاک، آب یا ترکیبی از اینها پر شوند. این موضوع تأثیر زیادی بر واکنش آن‌ها به تغییرات ویژگی‌های فیزیکی مانند چگالی، مقاومت الکتریکی یا سرعت لرزه‌ای دارد. انجام یک بررسی ژئوفیزیکی با استفاده از ترکیب حداقل دو روش، به عنوان روش قابل

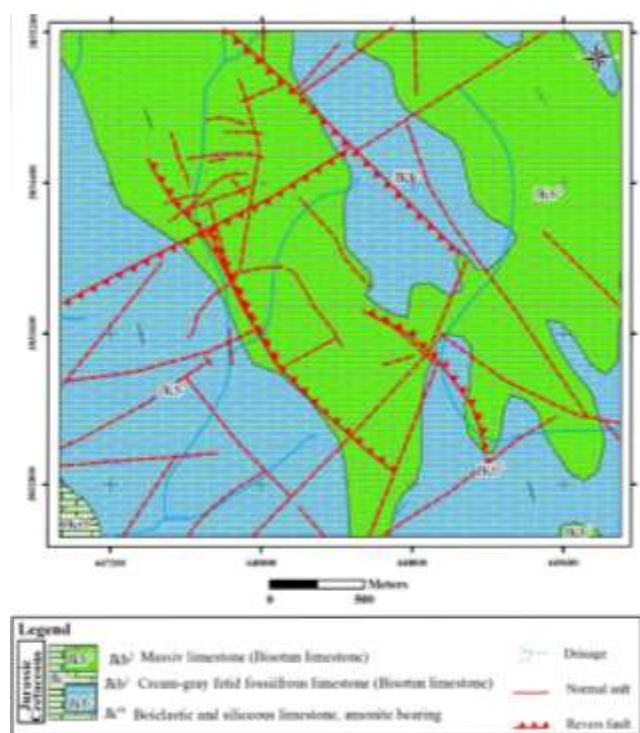
اعتمادتر در نظر گرفته می‌شود زیرا هر ویژگی فیزیکی می‌تواند تحت تأثیر متغیرهای مختلفی قرار بگیرد (Cardarelli et al., 2006).

در این زمینه تعداد کارهای ژئوفیزیکی از جمله گرانی سنجی، مقاومت ویژه الکتریکی، لرزه نگاری و توموگرافی لرزه‌ای در ارتباط با مسائل هیدروژئولوژی در کارست توسط افراد مختلفی صورت گرفته است که در ادامه به بخشی از این موارد اشاره می‌شود. آلیس و هونت در سال ۱۹۸۶ از روش گرانی سنجی برای شناسایی سفره آب‌دار فرو رو یا فرو افتاده در میدین زمین گرمایی ویراکی استفاده کردند که در آن پایش میزان افت سطح آب انجام شد (Allis & Hunt, 1986).

تشخیص غارها با استفاده از روش‌های گرانشی از دهه ۱۹۶۰ انجام شده است (Butler, 1984; Chico, 1964). توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) به عنوان یک روش کارآمد برای تصویربرداری از ساختارهای زمین‌شناسی نزدیک سطح، از جمله شناسایی غارها، مورد استفاده گسترده قرار گرفته است (Abd El Aal, 2017; Abu-Cardarelli et al., 2010; Shariah, 2009). این روش در شناسایی آبراهه‌های کارستی پر شده (Taslim, 2018)، و تشخیص حفره‌های زیرزمینی در مناطق شهری و پروژه‌های ساختمانی مهم، کارآمد بوده است (Cardarelli et al., 2006; Metwaly & AlFouzan, 2013; Yene Atangana et al., 2023). حفره‌ها، که ممکن است حاوی آب، رسوبات سست یا هوا باشند، مقادیر مقاومت الکتریکی مشخصی را نشان می‌دهند که با محیط اطرافشان متفاوت است (Jabrane et al., 2023). با این حال، شرایط خاصی مانند مقاومت بسیار بالا یا وجود لایه‌های معدنی هادی اطراف حفره‌ها، می‌تواند شناسایی دقیق آن‌ها را دشوار سازد (Putiška et al., 2012). علاوه بر این، ترک‌های کوچک، درزها و شکستگی‌ها که از ویژگی‌های کارست محسوب می‌شوند، ممکن است در فرآیند وارون‌سازی به‌وضوح شناسایی نشوند، اما با توجه به اندازه، چگالی و نوع مواد پرکننده، می‌توانند بر پاسخ مقاومت الکتریکی کل تأثیرگذار باشند.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که ترکیب روش‌های مختلف ژئوفیزیکی می‌تواند توانایی شناسایی ویژگی‌های زیرسطحی را بهبود دهد؛ به عنوان مثال، مک‌گراث و همکاران (۲۰۰۲) با ترکیب میکروگرانی و ERT به بررسی حفره‌های کارستی زیرسطحی پرداختند و گامبتا و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از ترکیب روش‌های گرانی و الکتریکی، یک غار شناخته شده در عمق ۳۰ متری زمین را شناسایی کردند. علاوه بر این، بررسی‌های ژئوفیزیکی شامل روش‌های مغناطیسی، مقاومت ویژه و قطبش‌لقایی (IP) به طور گسترده برای مطالعه ساختارهای زیرسطحی استفاده شده‌اند (El-Qady et al., ۲۰۰۵; Gambetta et al., ۲۰۱۱). استفاده از ابزارهای ژئوفیزیکی مناسب برای جمع‌آوری داده‌ها، پردازش، تصویربرداری و وارون‌سازی، اهمیت بالایی دارد، زیرا نتایج تحلیل داده‌ها بینش‌های ارزشمندی درباره زمین‌شناسی زیرسطحی ارائه می‌کنند. به عنوان نمونه، میرزایی و همکاران (۲۰۲۱) روشی مبتنی بر توموگرافی ژئوالکتریکی را برای تعیین محل دقیق حفاری چاه آب در سنگ‌های آهکی کارستی ایذه، جنوب غربی ایران، ارائه نمودند.

با توجه به حجم کار تعریف شده فاصله ایستگاه‌ها ۲۵ و فاصله پروفیل‌ها ۵۰ و تعداد ۱۷۰۰ ایستگاه می‌باشد. سپس نقشه برداری نیز به کمک جی پی اس مولتی فرکانس انجام شد. برای تصحیحات زون دور و زون نزدیک نقشه برداری منطقه به کمک پهپاد نقشه برداری با دقت بالا انجام گرفت. در منطقه مورد مطالعه لیتولوژی غالب از آهک‌های بیستون با گسل-خوردگی‌های و ساختارهای چین‌خورده متعدد تشکیل شده است که این ساختارها در جهت‌های شمال غرب-جنوب شرق و شمال شرق-جنوب غرب قرار دارند. بهترین جهت برای برداشت‌ها که هر دو ساختار را قطع کند جهت شمالی-جنوبی می‌باشد. نقاط طراحی شده در ابتدا بر روی زمین پیاده‌سازی و سپس برداشت نقشه برداری و گرانی‌سنجی به صورت همزمان انجام شده است (شکل ۲).



شکل ۱: نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه.

در این مطالعه، ایستگاه پروفایل اول به عنوان نقطه مرجع محلی برای کنترل تغییرات زمانی (مانند دریافت ابزار و اثرات جزر و مد) استفاده شد و اندازه‌گیری‌ها هر ۳ ساعت یک بار تکرار شد. مقادیر گرانش مطلق ایستگاه‌های ناحیه با استفاده از نقاط پایه گرانشی مطلق که در شبکه‌های جهانی و ملی مشخص شده‌اند، محاسبه شد. برای این منظور، مقدار گرانش مطلق ایستگاه پایه محلی نسبت به ایستگاه مرجع با مقدار مشخص، تعیین گردید. از ایستگاه پایه ژئودتیک شماره ۲۲۰۵ با مقدار گرانش مطلق ۹۷۹۳۲۱،۲۳۵ میلی‌گال استفاده شد و اصلاحات لازم بر روی داده‌های گرانشی از جمله تصحیح رانش، عرض جغرافیایی، هوای آزاد، بوگر و توپوگرافی انجام شد. بعد از پردازش‌های لازم بر اطلاعات خام گرانی‌سنجی برداشت شده، نقشه آنومالی بوگه تهیه شده است. این نقشه نشان‌دهنده تأثیرات توده‌های به‌وجود آورنده آنومالی‌ها در اعماق

در این مقاله، به منظور شناسایی میزان ذخیره آب، گسترش عمقی و شکل مخزن سفره کارستی روانسر بر مبنای مطالعات زمین‌شناسی بزرگ مقیاس، تکتونیک و هیدروژئولوژی محدوده‌ی مناسب برای مطالعات ژئوفیزیکی و برداشت داده‌ها مشخص شد. پس از آن در محدوده مورد نظر در فصل پر آبی داده‌های گرانی سنجی برداشت شد و سپس در محل آنومالی‌های حاصل از روش گرانی پروفیل‌های ژئوالکتریک برداشت شد. بعد از برداشت داده‌ها ژئوفیزیکی لازم است که تصحیحات، پردازش و تفسیر مورد نیاز انجام و لایه‌های مربوطه برای تلفیق با هم تهیه شود. به‌منظور انجام مدل‌سازی وارون با استفاده از کد *UBC* وارون‌سازی داده‌ها و تفسیر همزمان آن‌ها با مد نظر قرار دادن اطلاعات زمین‌شناسی تکتونیکی و هیدروژئولوژی گسترش و همچنین مدل چشمه کارستی تهیه شد.

۲- روش کار

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

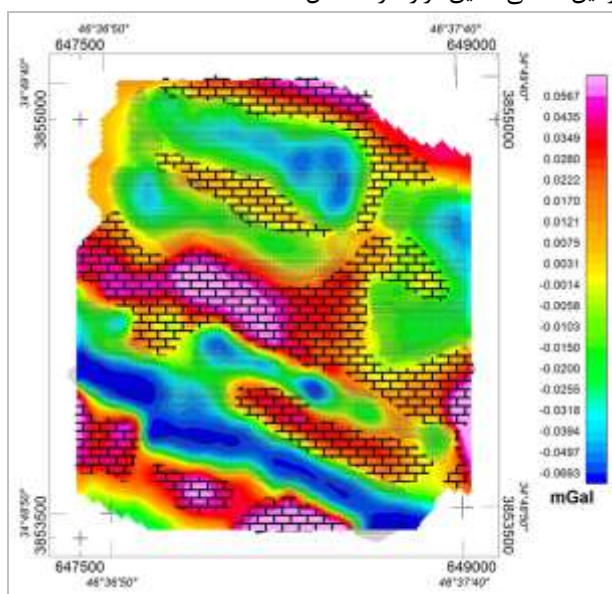
منطقه مورد مطالعه در غرب ایران و استان کرمانشاه قرار دارد و به زون ساختاری زاگرس تعلق دارد. مرز شمالی این منطقه معمولاً بر خط القعر رودخانه منطبق است، در حالی که مرزهای غربی و جنوبی آن نیز به جاده روانسر-پاوه متصل می‌شود. از سمت شرق، این منطقه به گردنه نعل‌شکن محدود می‌شود. در این ناحیه، ناهمواری‌های شاهو شامل چندین قله بلندتر از ۳۰۰۰ متر می‌شود، با مرتفع‌ترین قله آن، قله زاوالی که ارتفاع آن به ۳۳۹۰ متر می‌رسد. کمترین ارتفاع منطقه نیز در مجاورت روانسر و در دشت‌های کشاورزی واقع شده است.

رشته‌کوه‌های کارستیک کرمانشاه، روانسر و شاهو به طول ۱۵۰ کیلومتر و عرض ۱۵ تا ۲۵ کیلومتر به سمت مرز عراق گسترش یافته‌اند. این منطقه دارای سنگ‌های آهکی و فلیش کربناته از دوره‌های کرتاسه تا نفوژن است و ساختار زمین‌شناسی پیچیده‌ای دارد. رادیولاریت‌های تریاس-کرتاسه و آهک‌های کرتاسه نقش مهمی در تشکیل سازندهای منطقه دارند (شکل ۱). منطقه روانسر به دلیل وجود گسل‌ها و ترک‌های متعدد، شرایط مناسب برای تشکیل اشکال کارستی مانند غارها و چشمه‌ها را فراهم کرده است (احمدی، ۱۳۹۱).

۲-۲ برداشت داده‌های گرانی سنجی

روش گرانی‌سنجی تغییرات میدان گرانی زمین را برای شناسایی توده‌های با چگالی متفاوت بررسی می‌کند. این روش با تخمین چگالی سنگ‌ها به شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و جنس سنگ‌ها کمک می‌کند. گرانی‌سنجی، مانند مغناطیس‌سنجی و رادیومتری، یک روش با استفاده از منبع طبیعی است و تغییرات چگالی سنگ‌ها باعث تغییر در میدان گرانی می‌شود. این روش در شناسایی حفره‌ها و غارهای انحلالی در سنگ‌های آهکی نیز کاربرد دارد (Hinze et al., 2013). پس از بررسی‌های زمین شناسی و تکتونیکی مختلف مساحتی در حدود ۲۲۰ هکتار مورد پایش زمینی به کمک این روش قرار گرفت، شبکه برداشت در نظر گرفته شده

تغییرات میدان گرانی در کارست‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به محیط‌های پیرامون خود دارای اختلاف گرویده پایین است، که با بررسی-های میدانی صورت گرفته در هر یک از تغییرات منفی یا کاهشی ثبت شده اثرات سطحی پیشرفت فیزیکی کارست قابل مشاهده و بعضاً این تغییرات کاهشی با یک گسل خوردگی و چین خوردگی‌ها در ارتباط هستند. که در اطراف این محل‌ها آثاری از انحلال آهک شکستگی‌های فراوان و همچنین کارن‌ها دیده می‌شود. مناطق مستعد جهت توسعه کارست‌های بعدی در قسمت شمال غرب و جنوب غرب است که از نظر موقعیت مکانی این مناطق در محل تقاطع گسل خوردگی‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی عمیق قرار دارد (شکل ۴).



شکل ۴: نقشه مربوط به روند سطحی شماره ۳ و تفکیک آنومالی‌های مثبت و منفی.

۲-۳ ترکیب اطلاعات تکتونیکی و ژئوفیزیکی

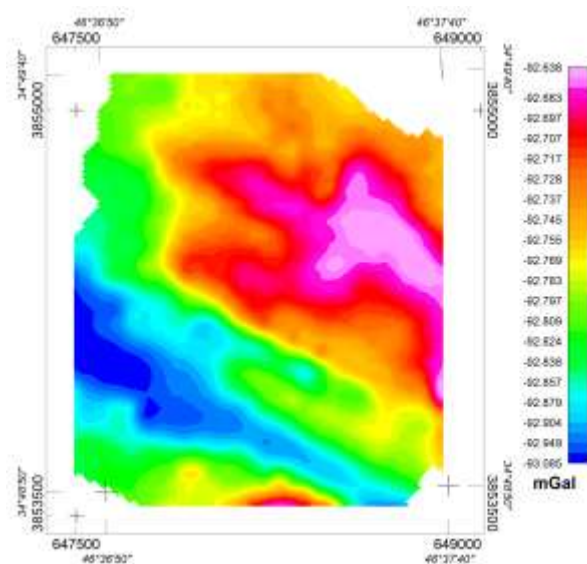
در سطوح مرتفع روانسر و شاهو، علاوه بر راندگی‌های ذکر شده، گسل‌های اصلی و فرعی با امتداد شمال‌غرب-جنوب‌شرق و همچنین گسل‌های پهنابر (عرضی) با امتداد شمال-جنوب، منطقه را تحت تأثیر قرار داده‌اند. به دلیل عدم انعطاف‌پذیری سازندهای سخت منطقه، به‌ویژه تشکیلات کربناته، در برابر پدیده‌های تکتونیکی، این سازندها به شدت گسلیده شده و سیستم‌های درز و شکاف ثانویه در آن‌ها به شدت توسعه یافته است. این پدیده منجر به ایجاد منابع آب کارستیک مهمی در این ناحیه شده است.

به علت فشارهای شدید زمین‌ساختی که شکستگی‌های وسیعی را به همراه داشته، نمی‌توان طاق‌دیس‌ها و ناودیس‌های مشخصی را در مقیاس وسیع در منطقه مشاهده کرد. فروچاله‌هایی که در امتداد سطوح لایه‌بندی شکل گرفته‌اند، با روندهای ساختمانی زاگرس هماهنگ هستند (روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی). علاوه بر گسل‌ها، سیستم درز و شکاف در سنگ‌های آهکی منطقه به وضوح قابل مشاهده است. شکل‌گیری این درز و شکاف علاوه بر تأثیرات زمین‌ساخت شکننده در منطقه، به خصوصیات طبیعی سنگ‌های آهکی نیز مربوط می‌شود. سنگ‌های آهکی به دلیل استحکام در برابر نیروهای زمین‌ساختی، مقاومت کرده و نقش

مختلف می‌باشد که از سطح پایین‌تر زمین تا نزدیک سطح اثر کرده و تغییرات شتاب ثقل را در منطقه مذکور به وجود آورده است. شکل (۳) نقشه تغییرات آنومالی بوگه را بعد از تصحیحات به نمایش گذاشته است.



شکل ۲: موقعیت نقاط برداشتی روی نقشه گوگل ارث.



شکل ۳: نقشه آنومالی بوگه کامل.

برای استخراج آنومالی باقیمانده، از روش روند سطحی استفاده شده است. روند درجه سوم، شواهد سطحی و تغییرات ساختاری موجود در منطقه را با دقت قابل توجهی تأیید کرده و حتی در مناطقی که توسعه فیزیکی کارست هنوز به‌صورت مشهود قابل مشاهده نیست، توانسته است پیشروی و گسترش ساختارهای کلیدی منطقه را آشکار سازد. این روش امکان تفکیک و جداسازی آنومالی‌ها را به صورت علمی و قابل اعتماد فراهم می‌کند (Guo et al., 2013).

گرفته است. این گسل خوردگی‌ها در دو بخش ارتفاعات منطقه واقع شده است. و به دو نام گسل $F1$ و گسل $F2$ نامگذاری شده است. این گسل‌های دارای امتدادی هم‌روند با امتداد راندگی زاگرس و شیب آن در بخش گسل $F1$ به سمت جنوب غربی شیب این گسل حدود ۴۶ درجه و در توالی‌های مختلف به سمت جنوب این گسل خوردگی ادامه دارد. در راستای این گسل خوردگی بزرگ درزه‌ها و شکاف‌های کوچکی قابل مشاهده هستند. که این درزه‌ها دارای جهات مختلفی می‌باشند. این گسل در این بخش شرایط ایجاد کارست و یا عوامل توسعه کارست را ایجاد کرده است. گسل $F1$ به نوعی حوضه آبریز چشمه کارستی روانسر را از بخش‌های شمالی محدود کرده، و سبب ایجاد نوعی گذرگاه برای انتقال آب از بخش‌های شمالی به این منطقه شده است. گسل $F2$ که در بخش جنوبی محدوده و در ابتدای پروفیل‌های گرانی سنجی قرار گرفته است. با روند زاگرس $N30W$ و در برخی موارد $N60W$ به صورت یک راندگی در این بخش رخنمون‌های از آینه گسل (خش لغز) مشاهده می‌شود. این گسل خوردگی سبب ایجاد گسل‌های فرعی زیادی در امتداد عمود بر $N30W$ کرده، که بعضاً تا بخش‌های شمالی و تا نزدیکی گسل $F1$ ادامه دارد. این گسل دارای شیب حدود ۶۰ درجه به سمت شمال است. و در بخش‌هایی این شیب به نزدیک ۷۰ درجه می‌رسد. این گسل‌ها به عنوان گسل‌های اصلی منطقه سبب شده است. در دو بخش شمالی و جنوبی شیب و جهت لایه‌بندی تغییر کند و شرایط مناسبی در بخش مرکزی برای توسعه کارست و منافذ عبور سیالات ایجاد کند. علاوه بر این موضوع برخی از توده‌های نفوذی در مناطق اطراف که در نقشه‌های کوچک مقیاس کامیاران قرار دارد نیز به عنوان محرکه‌های در مقیاس ناحیه عمل می‌کند.

گسل $F3$ در بخش جنوب شرقی منطقه قرار دارد. و این گسل و گسل $F2$ هر دو تا پایین دست منطقه و محل خروجی چشمه روانسر ادامه دارد. گسل $F3$ دقیقاً مرز بین تغییرات ماکزیمم و تغییرات مینیمم داده‌های گرانی سنجی است و در مشاهدات صحرایی کارن‌های عمیقی در این راستا قابل مشاهده است که محل بسیار مستعدی به وجود خواهد کارست‌های عمیق می‌باشد (شکل ۶).

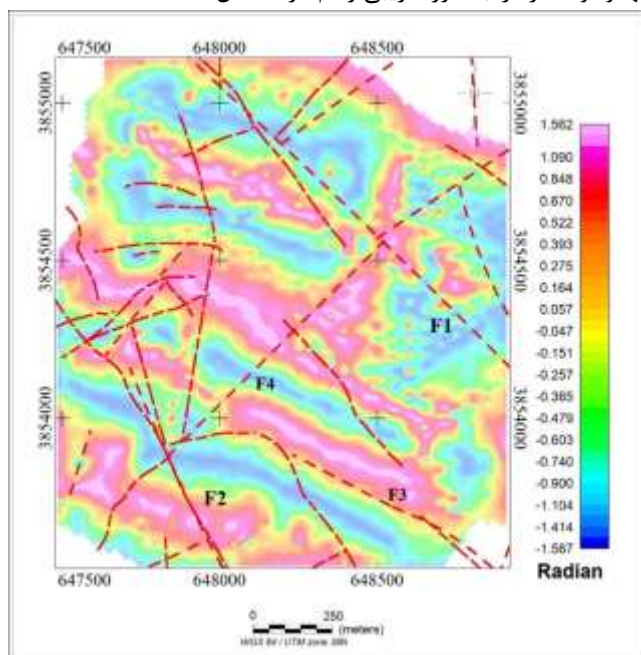
گسل خوردگی $F4$ عمود بر گسل‌های $F1$ ، $F2$ است. این گسل خوردگی دارای شیب ۴۵ درجه به سمت شرق می‌باشد که در این راستا کارن‌ها و علائم توسعه کارست به تعداد زیاد قابل مشاهده است و یکی از پروفیل ژئوالکتریک از این محل عبور می‌کند تا بررسی‌های عمیق‌تری بر روی این بخش‌ها انجام شود.

نتایج نشان می‌دهد که اغلب فروچاله‌های شناسایی شده بر روی یا در مجاورت آنومالی‌های منفی گرانی با دامنه بیش از -0.1 mGal و نواحی با مقاومت ویژه کمتر از ۱۰۰ اهم‌متر قرار گرفته‌اند که مؤید ارتباط مستقیم آن‌ها با فضاهای خالی و حفرات کارستی زیرسطحی است.

نیروهای زمین‌ساخت را مضاعف می‌کنند.

با توجه به بررسی‌های اولیه صورت گرفته از منطقه به نظر بیشتر شرایط ذخیره و یا انتقال آب (کارست‌ها، کارن‌ها) از ارتفاعات به سمت چشمه‌های جنوبی و حتی توسعه کارست‌های موجود به شرایط تکتونیکی خاص منطقه بر می‌گردد.

لازم به ذکر است. در برداشت‌های زمین‌شناسی و تکتونیک انجام شده، برخی از گسل خوردگی‌ها که دارای شواهد سطحی قابل مشاهده هستند، به کمک کمپاس اطلاعات آنها برداشت شده است. ولی به کمک فیلتر مشتقات ژئوفیزیکی می‌توان، برخی از گسل‌ها و یا خطواره‌هایی (که می‌تواند تغییرات لیتولوژی را نیز شامل شود) که بر روی سطح رخنمونی از آنها وجود ندارد را به طور تقریبی رسم کرد (شکل ۵).



شکل ۵: نقشه گسل‌ها و خطواره‌ها



شکل ۶: محل گسل $F3$ در بخش‌های جنوبی منطقه

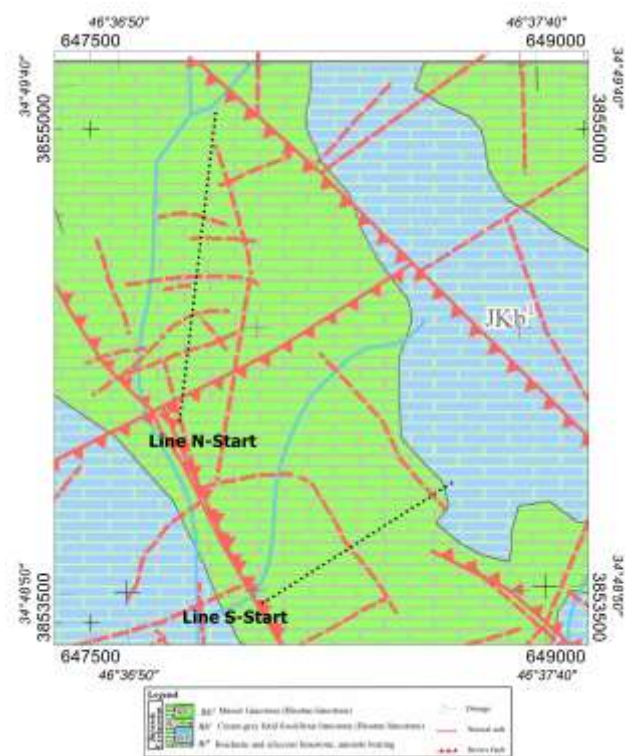
بر اساس بازدیدهای به عمل آمده و چک آنومالی‌های منطقه دو گسل خوردگی اصلی در بخش شمالی و جنوبی محدوده به صورت موازی قرار

۴-۲ مدل‌سازی و پردازش داده‌های صحرایی ژئوالکتریک

انجام برداشت با استفاده از آرایه دو قطبی - دو قطبی و قطبی - دو قطبی انجام شد، برداشت‌ها با فواصل ایستگاهی ۲۰ متر و تا عمق ظاهری ۱۲۰ متر و عمق مدل‌سازی تا حدود ۸۰ متر انجام شده است، تعداد پرش‌های قابل قبول ۸ و در برخی نقاط ۱۰ می باشد. برای الکترودهای جریان از الکترودهای بلند استفاده شد و بعد از آن با محلول آب و نمک پر شده تا اتصال جریان الکتریکی با زمین به راحتی برقرار شود. برای الکترودهای پتانسیل نیز در تمام نقاط از الکترودهای برنجی استفاده گردید. با دور شدن الکترودها پتانسیل از الکترودها جریان، ولتاژ اندازه‌گیری شده افت قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. تا جایی که ولتاژ اندازه‌گیری شده در حد نویز منطقه پایین می‌آید. در محیط‌های آهکی و کلاً محیط‌های با مقاومت بالا امکان افت ولتاژ در فواصل دورتری وجود دارد. و در نتیجه می‌توان به عمق نفوذهای بیشتری (البته با فرض طول AB و MN ثابت) دست یافت.

با توجه به خصوصیات منطقه مورد مطالعه، امکان اندازه‌گیری بیشتر از ۸ پرش در برداشت دو قطبی - دو قطبی در بیشتر جاها امکان پذیر نبود و با ترکیب دو آرایش با یکدیگر برداشت‌ها با پرش‌های بالاتر و با کیفیت خوب داده برداری شد.

شکل (۷) محل پروفیل‌های مقاومت ویژه الکتریکی و همچنین کادر برداشت داده‌های گرانی سنجی با توجه به اطلاعات هیدروژئولوژی انتخاب شد و در بخش‌هایی که بیشترین مقدار بارش‌های منطقه وجود دارد، به عنوان منبع اصلی کارست‌ها تشخیص داده شده است و عملیات برداشت بر روی این بخش تمرکز یافته است.

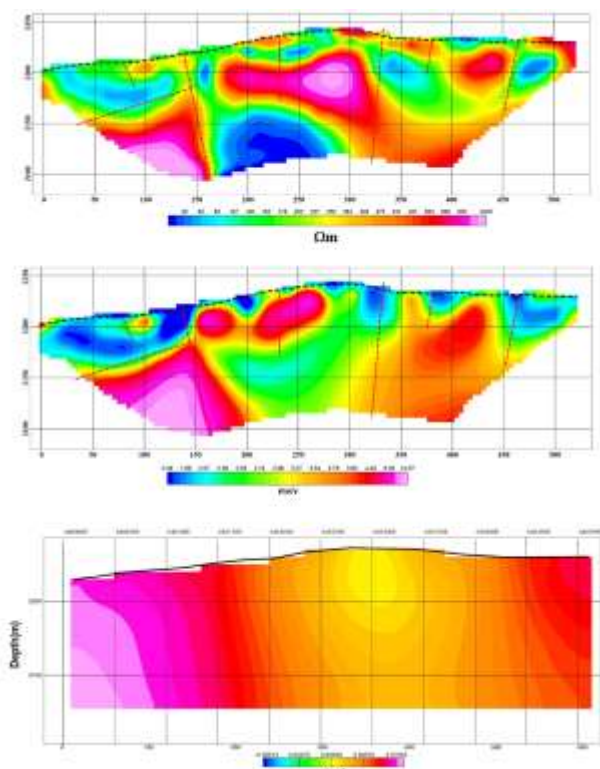


شکل ۷: محل پروفیل‌های ژئوالکتریک بر روی نقشه زمین شناسی

با توجه به برداشت‌های همزمان داده‌های میدان پتانسیل و ژئوالکتریک در منطقه، مدل‌سازی داده‌های گرانی به صورت سه‌بعدی انجام و نیز در دو بخش برداشت ژئوالکتریک با استفاده از پروفیل‌های بلند و فاصله الکترودی ۲۰ متری صورت گرفته است. حال به منظور تفسیر همزمان مدل‌های ژئوالکتریکی و مدل میدان پتانسیل از مدل میدان پتانسیل در محل‌های پروفیل‌های ژئوالکتریک مقاطع عمقی تهیه شده است.

پروفیل شمالی (N)

کاهش مقاومت الکتریکی در زیر ایستگاه ۴۰۰ متر ادامه دارد، که نشان‌دهنده وضعیت ساختار افقی می‌باشد. این کاهش در بخش مرکز با چگالی متوسط تا پایین در مرکز همراه است و به وجود ساختاری با تخلخل بیشتر نسبت به محیط اطراف اشاره دارد. افزایش قابل توجهی که در پروفیل مدل‌سازی میدان پتانسیل در سمت چپ، یعنی در اطراف ایستگاه‌های ۲۰ تا ۸۰ متر مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده چگالی بالای تشکیل کربنات است. که به نظر می‌رسد، تحت تأثیر لایه‌های بالایی سنگ‌های آهکی و مجاورت با گسل خوردگی عمیق قرار گرفته است. همچنین، قسمت‌های عمیق‌تر زیر افق ۲۲۰۰ متر دارای تخلخل بیشتری هستند. در بخش شارژپذیری، ناحیه‌ای که با کاهش مقاومت ویژه الکتریکی همراه است، با افزایش نسبی (هرچند در سطح پایین) شارژپذیری مرتبط است که تا حدی نشان‌دهنده افزایش تخلخل قابل اشباع توسط مایع می‌باشد. در بخش میانی پروفیل، افزایش قابلیت بارگذاری با افزایش مقاومت الکتریکی همزمان است و به نظر می‌رسد ناشی از ساختار خاص واحد کربنات و وجود چندین گسل در واحد سنگ آهک متراکم و بلوری باشد که موجب ایجاد قابلیت بارگذاری نسبی شده است. گسل‌ها یا شکستگی‌ها در اطراف ایستگاه‌های ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ به راحتی قابل شناسایی هستند. به نظر می‌رسد زیر ایستگاه‌های ۳۶۰ تا ۴۰۰، به دلیل فعالیت گسل‌ها، محیط خاصی با مقدار بسیار کم شارژپذیری وجود دارد که یک کانال عمودی ایجاد کرده و تا عمق ادامه دارد. در بخش مقاومت الکتریکی، این ناحیه با کاهش مقاومت الکتریکی و در بخش‌هایی با چگالی متوسط مرتبط است. در نتیجه، به نظر می‌رسد وجود فضاهای خالی ناشی از توسعه شبکه کارستی باشد که گاهی اوقات توسط مایعات اشباع می‌شود. این نقاط ممکن است مکان‌های فروچاله یا گذرگاه‌های سیالات باشند که در زمان جمع‌آوری داده‌ها خشک بودند و دارای مقاومت الکتریکی نسبتاً بالایی بودند. همچنین، افزایش مقاومت الکتریکی در بازه ۲۰۰ تا ۴۲۰ متر وجود دارد که تحت تأثیر چندین گسل قطع شده و نشان‌دهنده جابجایی‌های عمودی است. مقادیر بالای مقاومت و چگالی به طور همزمان نشان‌دهنده چگالی بالای سنگ کربنات است که مقدار کمی شارژپذیری دارد؛ اما در قسمت شرقی با کاهش شارژپذیری مرتبط است که نشان‌دهنده خرد شدن و تغییر نوع سنگ می‌باشد.



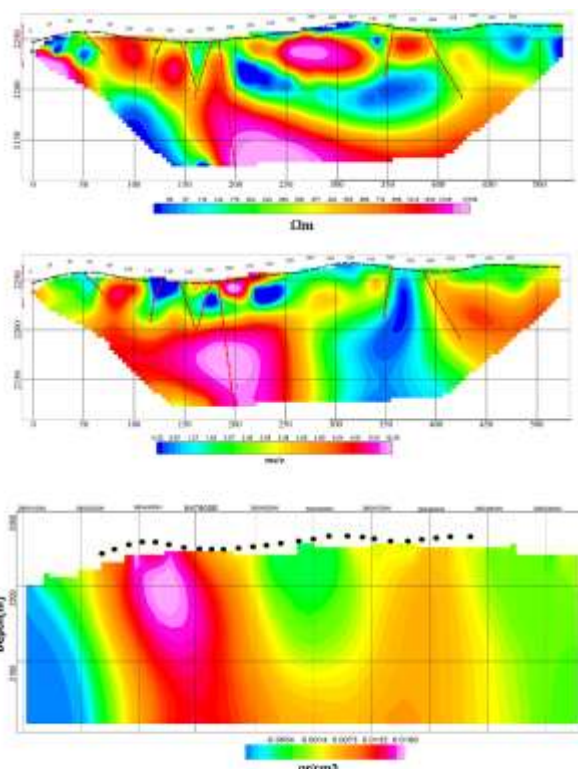
شکل ۹: مقطع مقاومت ویژه پروفیل جنوبی

۳ مدل‌سازی کارست

تلاش برای شناسایی ساختارهای مدفون و دستیابی به منابع زیرسطحی در سال‌های اخیر به شدت گسترش یافته است و ژئوفیزیک به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در این زمینه شناخته می‌شود. هدف اصلی در روش‌های ژئوفیزیکی، شناسایی دقیق‌تر خصوصیات ساختارهای زمین‌شناسی است. برای دستیابی به این هدف، مدل‌سازی دو و سه‌بعدی به عنوان یکی از موفق‌ترین روش‌های تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی شناخته می‌شود. این مدل‌سازی‌ها به ما کمک می‌کنند تا درک بهتری از ساختارهای زیرسطحی به دست آوریم، شکل منبع، عمق، گستردگی سطحی و کشیدگی عمقی از جمله پارامترهای مجهول برای شناسایی یک ساختار زیر سطحی محسوب می‌شود.

شناسایی پارامترهای مربوط به ساختارهای زیرسطحی تأثیر قابل توجهی در تصمیم‌گیری‌های اکتشافی دارد و می‌تواند به بهینه‌سازی مدیریت هزینه‌ها کمک کند. از دهه ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ میلادی، تلاش‌های زیادی برای حل مسائل میدان پتانسیل و انطباق آنومالی‌های مغناطیسی و گرانی با ساختارهای زمین‌شناسی انجام شده است. محققان متعددی از روش مدل‌سازی پیشرو برای تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی استفاده کرده‌اند (Grant & West, 1965).

در زمینه به‌کارگیری روش مدل‌سازی وارون برای تفسیر نتایج گرانی‌سنجی، الگوریتم‌های متنوعی ارائه شده که توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است. که شامل وارون‌سازی هموار^۱ (Li &

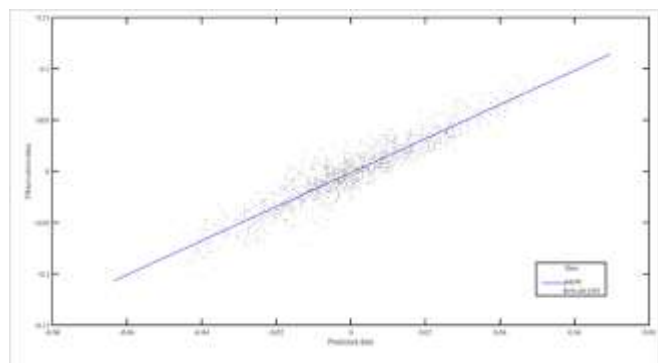


شکل ۸: مقطع مقاومت ویژه پروفیل شمالی

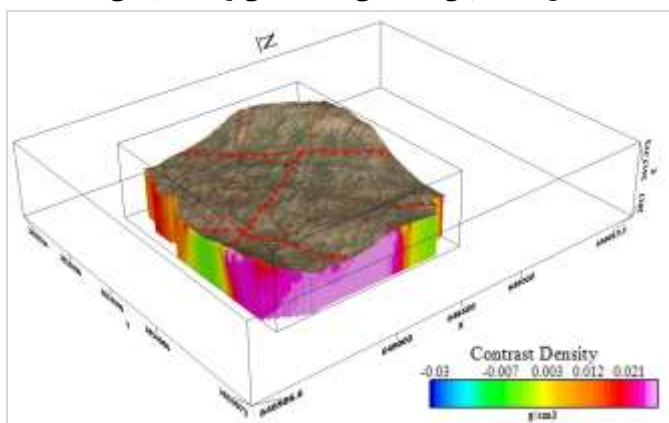
پروفیل جنوبی (S)

پروفیل مقاومت الکتریکی در بخش جنوبی نسبت به بخش شمالی تغییرات کمتری نشان می‌دهد که نشان‌دهنده یک محیط زمین‌شناسی پایدارتر است. این منطقه نشانه‌های قابل توجهی از توسعه کارست را به نمایش می‌گذارد، از جمله یک چاه مسدود شده با تغییرات چگالی حداقل، که حدود ۰/۱- گرم بر سانتی‌متر مکعب است. مقاومت الکتریکی از ابتدای پروفیل تا ۱۴۰ متر پایین باقی می‌ماند و تا عمق حدود ۳۰ متر ادامه دارد. با این حال، با افزایش عمق، روند افزایشی در مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود که ناشی از نفوذ بیشتر جریان است. تحلیل داده‌های الکتریکی و جاذبه نشان می‌دهد که این بخش از مناطق مجاور خود توسط یک گسل نسبتاً عمیق جدا شده است که در فاصله ۱۶۰ متری از بخش مقاومت الکتریکی قرار دارد. کاهش مشاهده شده در چگالی نشان‌دهنده افزایش فضاهای خالی و تخلخل بیشتر نسبت به مناطق اطراف است. گسترش افقی این فضاها قابل توجه است و مرزهای مربوطه آن‌ها در بخش قابلیت بارگذاری نشان‌دهنده افزایش نسبی قابلیت بارگذاری است که احتمالاً حاوی مایعاتی با نمک‌های آهکی می‌باشد. افزایش مقادیر مقاومت الکتریکی در این مقطع عرضی، که به ۴۰۰ میلی‌اوم می‌رسد، نمی‌تواند تنها به وجود فضاهای خالی یا فضاهای متخلخل بدون آب نسبت داده شود. بلکه داده‌های قابلیت بارگذاری همراه با کاهش چگالی در مدل‌سازی جاذبه نشان‌دهنده وجود ویژگی‌های کارستی است که حاوی آب می‌باشد.

¹ Smooth inversion



شکل ۱۰: انطباق داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای.



شکل ۱۱: مدل سازی سه بعدی مربوط به داده‌های صحرایی گرانی به همراه نقشه اورتوموزاییک پهبادی و محل گسل خوردگی‌های منطقه

در پردازش مربوط به داده‌های ژئوالکتریک داده‌های سطحی گرانی سنجی به صورت پروفیلی با داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شد و نتایج آن مورد بحث قرار گرفت. حال به منظور بررسی‌های زیر سطحی داده‌های مربوطه بر روی هر پروفیل ژئوالکتریک یک پروفیل از مدل تهیه شده جدا و در مورد نتایج و ارتباط بین تغییرات مقاومت ویژه و تباین دانسیته بحث می‌شود.

در شکل (۱۲) و (۱۳) مدل سازی داده‌های گرانی سنجی بر روی محل پروفیل ژئوالکتریک نمایش داده شده است. در این بخش نیز میزان تغییرات چگالی با توجه به ثابت بودن نوع لیتولوژی و همچنین ارتباط نزدیک محل‌های توسعه کارست‌ها با شواهد تکتونیکی خیلی مقدار بزرگی ندارد. و این مورد نقش عوامل زمین شناسی و ساختاری را پررنگ‌تر می‌کند. با استناد به شواهد سطحی که در گزارش در مورد آن بحث شد. گسل خوردگی‌های جنوبی که در حال حاضر در ابتدای مقطع قرار گرفته و گسل خوردگی‌های شمالی منطقه شیب لایه بندی را در این فاصله نزدیک به ۱/۵ کیلومتری به طور کامل تغییر داده است و سبب ایجاد طاق‌دیس‌ها و ناودیس‌های تکرار شونده شده، این طاق‌دیس‌ها و ناودیس‌ها در نقش‌های کوچک مقیاس نیز تا حدودی رسم شده اند. که در این منطقه نیز شاهد این موضوع به صورت محلی هستیم. پس این گسل‌ها که حاصل از راندگی زاگرس است. نقش بزرگی در انتقال سیالات در منطقه دارد. با بررسی نقشه‌های مغناطیسی هواپرد مناطق اطراف و نقشه‌های بزرگ مقیاس بیشتر توده‌های نفوذی منطقه در شرق و در فاصله ۲ تا ۳ کیلومتری منطقه نیز در مقیاس بزرگ بر روند توسعه‌ای کارست‌های این

وارون سازی تمرکز یافته^۲ (Zhdanov, 2002)، Oldenburg, 1996)، وارون سازی به کمک ترکیب مدل‌های ریاضی^۳ (Boulanger & Chouateau, 2001)، وارون سازی بر مبنای کواریانس^۴ (Chouateau, 2003)، وارون سازی بر مبنای سنگ‌شناسی احتمالاتی^۵ (Guillen et al., 2004)، وارون سازی ساختاری با برنامه‌ریزی خطی^۶ (Van Zon & Roy-Chowdhury, 2006) و وارون سازی با استفاده از شبکه انطباقی^۷ (Fullagar et al., 2007) است. در طی سال‌های اخیر از روش‌های ترکیبی نیز برای حل مسائل ژئوفیزیکی استفاده شده است. وارون سازی و مدلسازی صورت گرفته در این گزارش بر مبنای الگوریتم هموار لی-اولدنبورگ در نرم افزار Grav3D دانشگاه British Colombia صورت گرفته است. به منظور مدل سازی داده‌های گرانی در مرحله نخست یک نقشه باقیمانده از داده‌های گرانی را به عنوان ورودی با در نظر گرفتن توپوگرافی زمین آماده سازی کرده، و سپس با مشخص کردن عمق کف و انتهای مدل مدل‌سازی داده‌ها را انجام می‌دهیم. میزان چگالی میانگین زمینه با استناد به نقشه زمین‌شناسی و محاسبات چگالی در حدود ۲٫۶۲ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد. به منظور درک بهتر ترکیب اطلاعات در داده‌های گرانی سنجی محل گسل خوردگی، آنومالی‌های مثبت و منفی با دقت بالا مشخص شده است و مطابق داده‌های موجود یک نقشه با ترکیب اطلاعات مدل سازی و اطلاعات ذکر شده تهیه شده است و نتایج آن در شکل زیر ارائه شده است. با ترکیب این اطلاعات ارتباط خوبی بین افتادگی‌های جنوبی و شمالی با قسمت‌های کاهشی مقدار گرانی و همچنین مدل تهیه شده وجود دارد. این افتادگی‌ها در هنگام بازدید صحرایی محل شکستگی بسیار وسیع هستند، که گاه‌گاه‌ها و حفراتی با گسترش‌های بیش از ۵۰ متر و عمق‌های بالاتر از ۲۰ را نشان می‌دهد.

برای مدل سازی داده‌های گرانی محدوده، از آنومالی باقیمانده حاصل از روند درجه سوم به عنوان داده‌های ورودی استفاده شد. نقشه روند سوم دارای تغییرات ۰/۱۱- تا ۰/۱۳ میلی گال می‌باشد. با توجه به اینکه کل محدوده برداشت دارای واحد سنگی آهکی است. تغییرات حاصل بیشتر مربوط به ساختارهای خطی و حفرات زیرسطحی هستند، که بعضاً بر روی زمین شواهدی دارند. به کمک این شواهد می‌توان بین زمین‌شناسی و این تغییرات ارتباط معنا داری ایجاد کرد. برای آماده‌سازی مدل‌سازی داده‌ها، ابتدا باید توپوگرافی زمین را در نظر گرفت و سپس عمق کف و انتهای مدل را مشخص کرد. براساس نقشه زمین‌شناسی و بازدیدهای میدانی و نمونه‌گیری از واحدهای آهکی چگالی میانگین زمینه حدود ۲/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب تخمین زده شده است. مدل‌سازی در یک شبکه منظم با اندازه مش ۲۵ متری انجام شده است. تعداد تکرارها در مدلسازی ۵ تکرار و میزان انطباق بین داده‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای حدود ۸۳ درصد بوده است (شکل ۱۰).

² Focused inversions

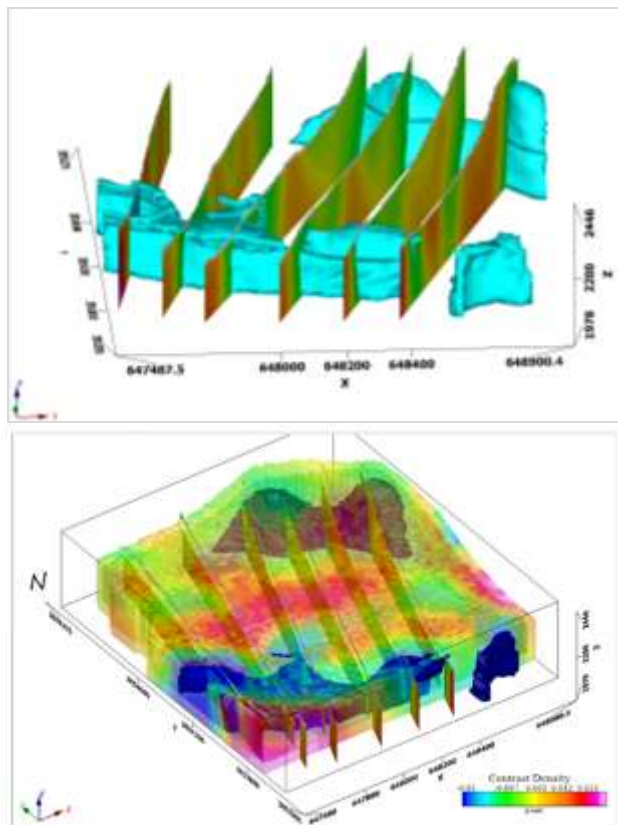
³ Combinations of mathematical model forms

⁴ Covariance-based inversion

⁵ Stochastic lithology-based inversion

⁶ Structural inversion using linear programming

⁷ Inversion using an adaptive mesh



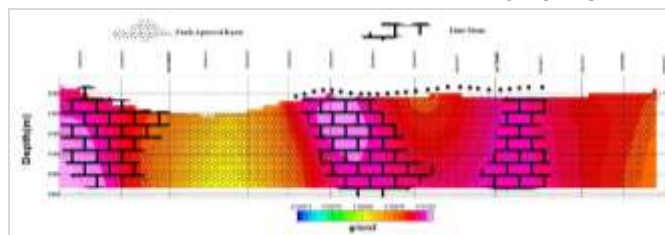
شکل ۱۶: مدل مفهومی تهیه شده به کمک اطلاعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی

۴ نتیجه‌گیری

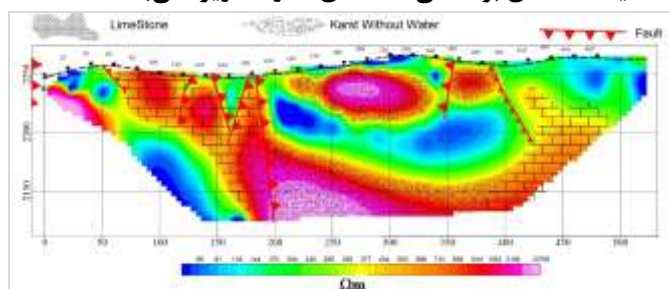
این تحقیق به بررسی جوانب مختلف مطالعات کارست در محدوده شمال غرب چشمه روانسر پرداخته است. تجزیه و تحلیل ژئومورفولوژی منطقه نشان‌دهنده بیش از ده ساختار فروافتاده است که عمدتاً به دلیل لیتولوژی آهکی و تحت تأثیر فرسایش سنگ‌های کربناته سطح خشن ایجاد کرده‌اند. عوامل موثر در منطقه باعث تشکیل فروچاله، چاله، کارن و دیگر پدیده‌های کارستی شده‌اند که در سطح زمین قابل مشاهده است.

عملیات گرانی با بررسی‌های مختلف زمینی و همچنین اطلاعات تکمیلی زمین‌شناسی محل برداشت گرانی سنجی انتخاب شد و سپس داده برداری انجام و نقشه آنومالی گرانی باقیمانده رسم شد. تحلیل داده‌های گرانی نشان داد که چهار روند اصلی شمال‌غرب-جنوب‌شرق آنومالی کمینه وجود دارد و در برخی نقاط به دلیل عملکرد گسل‌ها، آنومالی‌ها جابجا شده یا به صورت توده‌ای بسته ظاهر شده‌اند. مدلسازی سه‌بعدی داده‌های گرانی نشان داد که کارستی شدن در برخی نقاط توسعه یافته و سبب تخلخل زیاد در واحدهای سنگی شده است. آنومالی اصلی منفی گرانی در بخش جنوبی محدوده با ساختار زمین‌شناسی و عملکرد گسل همخوانی دارد و بخش غربی توسط گسل عمود بر آن جابجا شده است. پروفیل‌های تهیه شده از داده‌های گرانی، همراه با برداشت‌های مقاومت ویژه، نشان داد که مناطق کارستی دارای مقاومت ویژه کمتر هستند و با

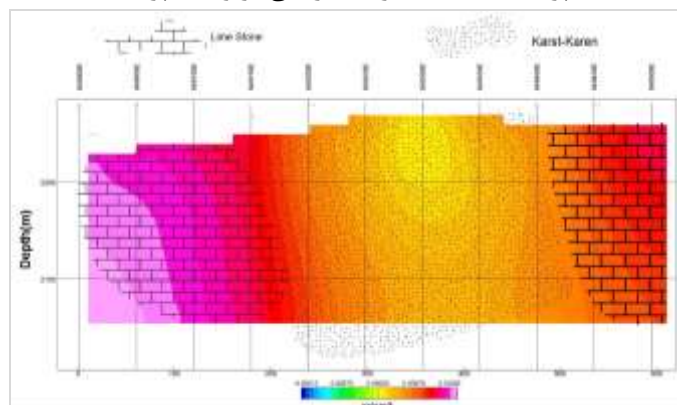
منطقه نیز نقش خواهد داشت.



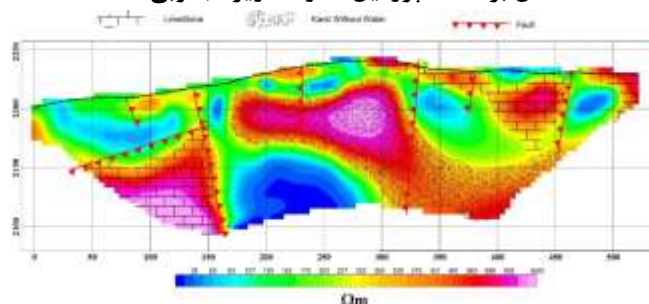
شکل ۱۲: مقطع دوبعدی استخراج شده از مدلسازی سه بعدی در محل برداشت پروفیل مقاومت ویژه شمالی (نقاط سیاه رنگ محل ایستگاه‌های برداشتی داده‌های مقاومت ویژه می‌باشد).



شکل ۱۳: پروفیل مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به پروفیل N



شکل ۱۴: مقطع دوبعدی استخراج شده از مدلسازی سه بعدی در محل برداشت پروفیل مقاومت ویژه جنوبی



شکل ۱۵: پروفیل مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به پروفیل S

مطابق ارزیابی‌های صورت گرفته و همچنین بررسی بارش‌ها و عوامل موثر در توسعه کارست مدل مفهومی منطقه را به صورت حدودی می‌توان به شکل (۱۶) ارزیابی کرد. به طور کلی، تلفیق شواهد ژئوفیزیکی و بازدیدهای میدانی امکان شناسایی بیش از ده ساختار فروافتاده را در منطقه فراهم کرده است.

- Cardarelli, E., Cercato, M., Cerreto, A., & Di Filippo, G. (2010). Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical prospecting*, 58(4), 685-695. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>
- Cardarelli, E., Di Filippo, G., & Tuccinardi, E. (2006). Electrical resistivity tomography to detect buried cavities in Rome: a case study. *Near Surface Geophysics*, 4(6), 387-392. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2006012>
- Chasseriau, P., & Chouteau, M. (2003). 3D gravity inversion using a model of parameter covariance. *Journal of Applied Geophysics*, 52(1), 59-74. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00240-9](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00240-9)
- Chico, R. J. (1964). Detection of caves by gravimetry. *International Journal of Speleology*, 1(1), 11. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.1.1.11>
- De Giorgi, L., & Leucci, G. (2014). Detection of hazardous cavities below a road using combined geophysical methods. *Surveys in Geophysics*, 35, 1003-1021. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9277-4>
- De Waele, J., Gutiérrez, F., Parise, M., & Plan, L. (2011). Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review. *Geomorphology*, 134(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.001>
- El-Qady, G., Hafez, M., Abdalla, M. A., & Ushijima, K. (2005). Imaging subsurface cavities using geoelectric tomography and ground-penetrating radar. *Journal of cave and karst studies*, 67(3), 174-181.
- Ford, D., & Williams, P. D. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Fullagar, P., Pears, G., & Milkereit, B. (2007). Towards geologically realistic inversion. *Proceedings of exploration*,
- Gambetta, M., Armadillo, E., Carmisciano, C., Stefanelli, P., Cocchi, L., & Tontini, F. C. (2011). Determining geophysical properties of a near-surface cave through integrated microgravity vertical gradient and electrical resistivity tomography measurements. *Journal of cave and karst studies*, 73(1), 11-15. <https://doi.org/10.4311/jcks2009ex0091>
- Geravand, F., Hosseini, S. M., Maghsoudi, M., & Yamani, M. (2022). Quantitative and Qualitative Methods for the Characterization of Karst Springs (case study: Lorestan province, Zagros Mountain, Iran). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1101538/v>
- Grant, F. S., & West, G. F. (1965). *Interpretation theory in applied geophysics*. McGraw-Hill Companies.
- Guillen, A., Courrioux, G., Calcagno, P., Lane, R., Lees, T., & McNerney, P. (2004). Constrained gravity 3D litho-inversion applied to Broken Hill. *ASEG Extended Abstracts*, 2004(1), 1-6. <https://doi.org/10.1071/ASEG2004ab057>
- Guo, L., Meng, X., Chen, Z., Li, S., & Zheng, Y. (2013). Preferential filtering for gravity anomaly separation. *Computers & Geosciences*, 51, 247-254. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.012>
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R., Von Frese, R., & Saad, A. H. (2013). *Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.
- آنومالی گرانی همخوانی دارند. تلفیق نتایج گرانی و مقاومت ویژه با مشاهدات صحرایی، امکان تهیه مقاطع زمین‌شناسی و شناسایی دقیق مناطق کارستی را فراهم کرد.
- پردازش داده‌های گرانی به روش‌های مختلف نشان داد روند اصلی آنومالی‌های منفی با روند زاگرس همخوانی دارد، ولی گسل‌های شمال‌شرق-جنوب‌غرب سبب جابجایی محلی آنومالی‌ها شده‌اند. دامنه تغییرات آنومالی بوگه محلی بین ۰.۱۳۷ تا ۰.۱۶۷ میلی‌گال است که ناشی از کارستی شدن، گسل‌خوردگی، دولومیتی شدن و انحلال سنگ‌ها و افزایش تخلخل است.
- بر اساس این مطالعات، تلفیق روش‌های گرانی و مقاومت ویژه ابزار موثری برای شناسایی حفرات زیرسطحی در سنگ‌های آهکی، به ویژه در اعماق کم، محسوب می‌شود. با استفاده از این داده‌ها، مدل مفهومی کارست و انتقال آب زیرسطحی در منطقه تهیه شد. این روش‌ها نسبت به استفاده تنها از داده‌های مقاومت ویژه مشکلات ناشی از گسل‌خوردگی را کاهش داده و امکان تفکیک گسل‌ها و مناطق کارستی را فراهم کرده است.
- ## ۵ منابع
- احمدی ح، (۱۳۹۱)، " کتاب ژئومرفولوژی کاربردی "، جلد ۱، انتشارات دانشگاه تهران.
- میرزایی ل. حفیظی م ک و ریاحی م ع، (۱۳۹۹)، " اکتشاف آب‌زیرزمینی کارستی با استفاده از توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و سنجش از دور، شمال شرق خوزستان"، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۶، شماره ۲، ص ۲۶۴.
- Abd El Aal, A. (2017). Identification and characterization of near surface cavities in Tuwaiq Mountain Limestone, Riyadh, KSA, "detection and treatment". *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(1), 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.04.004>
- Abu-Shariah, M. I. (2009). Determination of cave geometry by using a geoelectrical resistivity inverse model. *Engineering Geology*, 105(3-4), 239-244. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.02.006>
- Allis, R. G., & Hunt, T. M. (1986). Analysis of exploitation-induced gravity changes at Wairakei geothermal field. *Geophysics*, 51(8), 1647-1660.
- Audra, P., Bini, A., Gabrovsek, F., Häuselmann, P., Hobléa, F., Jeannin, P.-Y., Kunaver, J., Monbaron, M., Sustersic, F., & Tognini, P. (2006). Cave genesis in the Alps between the Miocene and today: a review. *Zeitschrift für Geomorphologie NF*, 50(2), 153-176. <https://doi.org/10.1127/zfg/50/2006/153>
- Boulanger, O., & Chouteau, M. (2001). Constraints in 3D gravity inversion. *Geophysical prospecting*, 49(2), 265-280. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2001.00254.x>
- Butler, D. K. (1984). Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities. *Geophysics*, 49(7), 1084-1096. <https://doi.org/10.1190/1.1441723>

- Jabrane, O., Martínez-Pagán, P., Martínez-Segura, M. A., Alcalá, F. J., El Azzab, D., Váscquez-Maza, M. D., & Charroud, M. (2023). Integration of electrical resistivity tomography and seismic refraction tomography to investigate subsiding sinkholes in Karst areas. *Water*, 15(12), 2192. <https://doi.org/10.3390/w15122192>
- Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1996). 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61(2), 394-408. <https://doi.org/10.1190/1.1443968>
- Martínez-Moreno, F., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T., Ruano, P., Peña, J., González-Castillo, L., Ruiz-Constán, A., López-Chicano, M., & Martín-Rosales, W. (2014). Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 107, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>
- Metwaly, M., & AlFouzan, F. (2013). Application of 2-D geoelectrical resistivity tomography for subsurface cavity detection in the eastern part of Saudi Arabia. *Geoscience Frontiers*, 4(4), 469-476. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.12.005>
- Putiška, R., Nikolaj, M., Dostál, I., & Kušnirák, D. (2012). Determination of cavities using electrical resistivity tomography. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 42(2), 201-211. <https://doi.org/10.2478/v10126-012-0018-3>
- Raghunath, H. M. (2006). *Hydrology: principles, analysis and design*. New Age International.
- Taslim, I. (2018). Identification of Groundwater Karst Reservoir With 3D Cave Mapping And 2D Inverse Resistivity. EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering.
- Van Zon, T., & Roy-Chowdhury, K. (2006). Structural inversion of gravity data using linear programming. *Geophysics*, 71(3), J41-J50. <https://doi.org/10.1190/1.2197491>
- Yang, D., Yang, Y., & Xia, J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability*, 2(2), 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>
- Yene Atangana, J. Q., Menanga Tokouet, R., Mbida Yem, L., Onana Enama, L., Ntyame Ella, M. O., & Ndjigui, P.-D. (2023). Electrical resistivity imaging and 3D geological modelling of the sedimentary architecture of the Sanaga floodplain (Cameroon, Central Africa). *Acta Geophysica*, 71(2), 735-755. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00945-x>
- Zhdanov, M. S. (2002). *Geophysical inverse theory and regularization problems* (Vol. 36). Elsevier.