

## تفسیر منبع احتمالی زمین‌گرمایی منطقه شمال سبلان با استفاده از مدل‌سازی معکوس سه‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک

رضا قائدرحمتی<sup>۱\*</sup>، علی مرادزاده<sup>۲</sup>، نادر فتحیان پور<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه لرستان، ایران، r.ghaedrahmati@yahoo.com

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، a\_moradzadeh@ut.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، fathian@cc.iut.ac.ir

(دریافت ۱۵ دی ۱۳۹۲، پذیرش ۴ اسفند ۱۳۹۳)

### چکیده

با توجه به این که ساختارهای واقعی زمین به صورت سه‌بُعدی هستند، به همین دلیل تفسیر سه‌بُعدی ساختارها از نظر دقت بسیار مؤثرتر از روش‌های یک و دو بُعدی است. در این مقاله هدف این است تا با استفاده از مدل‌سازی سه‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک منطقه شمال سبلان، منابع احتمالی زمین‌گرمایی در این منطقه بررسی می‌شود. برای این منظور با بررسی داده‌های مگنتوتلوریک در این منطقه و تحلیل‌های ابعادی با استفاده از روش‌های چولگی حساس به فاز و نامتغیرهای چرخشی، نشان داده شده است که ساختارهای منطقه بخصوص در دوره‌های تناوب بلند (بالای ۲ ثانیه) دارای ماهیت سه‌بُعدی می‌باشند و مدل‌سازی سه‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک امری اجتناب‌ناپذیر است. سپس با طراحی یک شبکه مناسب و بکارگیری الگوریتم مدل‌سازی معکوس سه‌بُعدی، مدل مناسب مقاومت‌ویژه برای داده‌های مگنتوتلوریک منطقه به دست آمده است. با استفاده از نتایج مدل‌سازی سه‌بُعدی، اطلاعات زمین‌شناسی و نتایج مدل‌سازی دو بُعدی موجود، میدان زمین‌گرمایی در این منطقه بررسی شده و موقعیت منطقه داغ‌تر، معرف منبع زمین‌گرمایی و همچنین مناطق دگرسانی مرتبط با این منبع مشخص شده است.

### کلمات کلیدی

مدل‌سازی سه‌بُعدی، مگنتوتلوریک، زمین‌گرمایی، شمال سبلان

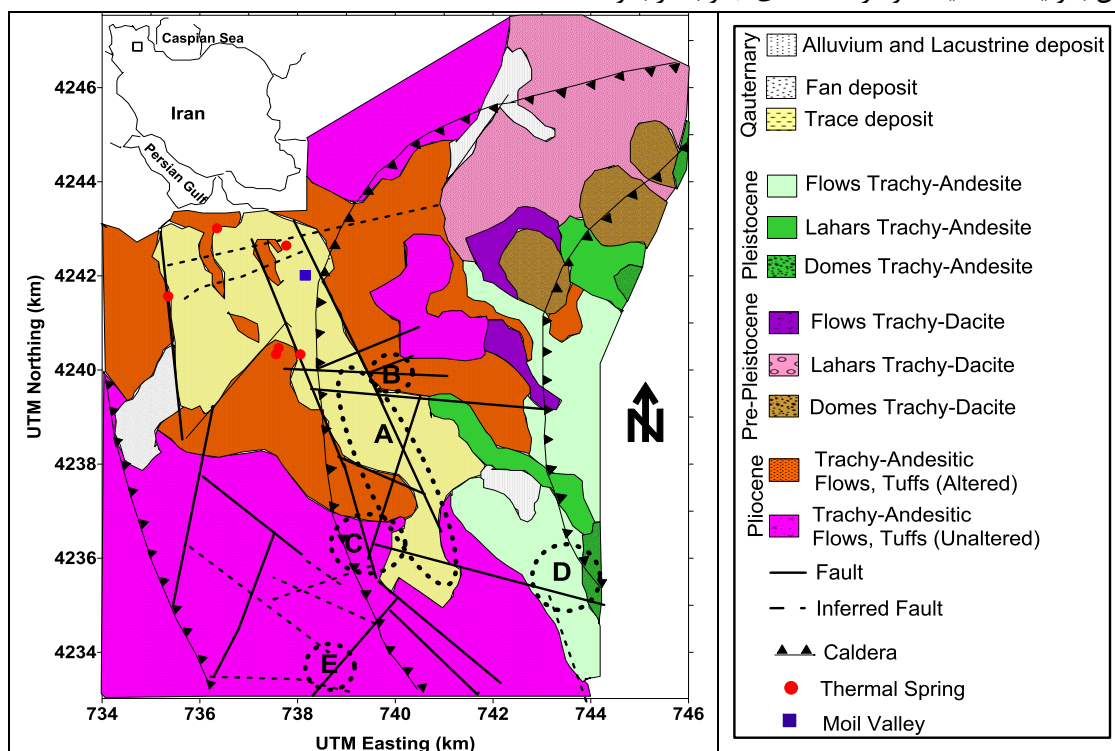
۱- مقدمه

میدان زمین‌گرمایی سبلان شامل نواحی شمال تا شمال غرب و غرب تا جنوب غرب کوه سبلان در استان اردبیل است. پروژه زمین‌گرمایی سبلان به منظور اکتشاف و توسعه منابع زمین-گرمایی مرتبط با فعالیت‌های گرمایی سطحی در این منطقه است. بیشتر این فعالیت‌های گرمایی سطحی مثل چشمه‌های آب گرم در دامنه غربی کوه سبلان واقع شده‌اند.

شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه را نشان می‌دهد. سبلان یک عضو جوان از مجموعه آتشفشانی سنوزوئیک و متعلق به کمان ماگمایی البرز است. کمان ماگمایی البرز حاصل فرورانش بخشی از حوزه اقیانوسی نئوتتیس در زیر لیتوسفر قاره‌ای شمال غرب ایران است. فعالیت‌های آذرین در ائوسن با تجمع ولکانیک‌های پتاسیک بر روی توالی از رسوبات پالئوزوئیک و مزوزوئیک آغاز شد. این مجموعه ولکانیکی در اوایل میوسن توسط باتولیت موزونیتی که در امتداد شمال غربی-جنوب شرقی در خط الرأس کوه سبلان رخنمون یافته، دچار دگرگونی حرارتی شده‌اند. بالا آمدگی و فرسایش قابل ملاحظه این باتولیت ادامه یافته و در امتدادهای جنوب غرب و

جنوب شرق روی باتولیت را توالی از رسوبات اواخر میوسن می‌پوشاند [۱،۲].

در سال ۱۹۹۸ سازمان انرژی‌های نو ایران طی قراردادی با مشاور نیوزیلندی<sup>۱</sup> SKM اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی را با استفاده از روش‌های مگنتوتلوریک، الکترومغناطیس حوزه زمانی<sup>۲</sup> و جریان مستقیم<sup>۳</sup> انجام داد و تعدادی آنومالی رسانا مرتبط با منابع زمین‌گرمایی در منطقه سبلان را مشخص کرد [۲،۳]. بزرگترین آنومالی‌ها در دره مویل (شکل ۱) ثبت شد. بر اساس این آنومالی‌ها سه چاه اکتشافی بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ در یک آنومالی رسانا در دره مویل حفاری شد. متأسفانه در این مرحله از حفاری‌ها نتایج موفق‌آمیزی به دست نیامد. بر اساس نتایج تفسیر دوباره کارهای اکتشافی تلفیقی، احتمال داده شد که سیالات با درجه حرارت بالا از جنوب یا جنوب شرق این منطقه جریان می‌یابد [۲]. سپس حفاری‌های جدیدی در محل‌های D و E (شکل ۲) برای اکتشافات بیشتر توصیه شد.



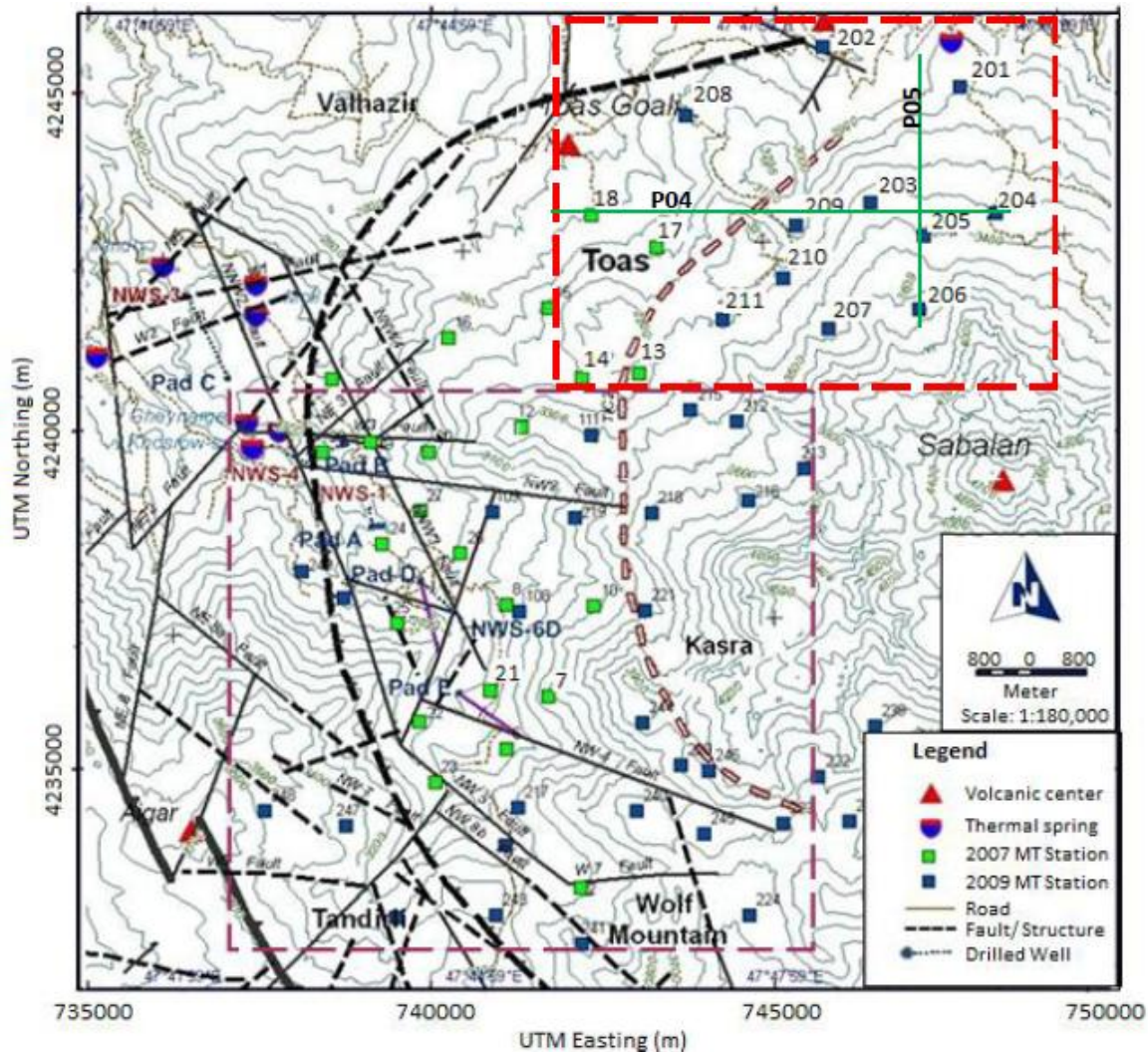
شکل ۱: زمین‌شناسی منطقه زمین‌گرمایی سبلان [۱و۲].

ها برای فرکانس‌های کمتر از ۲ هرتز کیفیت خوبی نداشتند و برای همین قادر به ثبت پاسخ‌های مربوط به عمق‌های قابل

داده‌های مگنتوتلوریک ثبت شده در سال ۱۹۹۸ در محدوده فرکانسی ۱۰۰۰-۲ هرتز کیفیت مطلوبی داشتند. اما این داده-

ایستگاه‌های مگنتوتلوریک در تعیین مرزهای این آنومالی به- خصوص در بخش شرق و جنوب شرق آن، اندازه‌گیری‌های مجدد برای پوشش کامل‌تر منطقه توسط شرکت EDC در سال ۲۰۰۹ صورت گرفت [۵]. تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ توسط مدل‌های دو بُعدی، یک منطقه داغ تر<sup>۵</sup> در شرق محل حفاری D را به عنوان منبع اصلی زمین گرمایی برای منطقه غرب و جنوب غرب سبلان مشخص کرد.

ملاحظه نبودند. در سال ۲۰۰۷ سازمان انرژی‌های نو سری جدید اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک با زمان تناوب طولانی را به کمک شرکت فیلیپینی<sup>۴</sup> EDC طراحی و اجرا کرد. هدف از این کار تعیین موقعیت منبع احتمالی و همچنین موقعیت چاه‌های حفاری جدید برای توسعه تجهیزات بهره‌برداری زمین گرمایی بود [۴]. نتایج این مطالعه تعیین یک آنومالی با مقاومت ویژه کم در شرق محل حفاری E به عنوان منبع زمین گرمایی سبلان بوده است. با توجه به ناکافی بودن



شکل ۲: موقعیت محدوده‌های مورد مطالعه روی نقشه توپوگرافی منطقه زمین گرمایی سبلان [۵]. چهار گوش قرمز محدوده شمال سبلان (مورد مطالعه در این مقاله) و چهار گوش بنفش محدوده غرب و جنوب غرب سبلان [۶] را نشان می‌دهند.

و مدل‌سازی سه بُعدی این داده‌ها یک تفسیر کامل برای منبع زمین گرمایی در این بخش ارائه کردند. با توجه به نتایج مطالعه می‌توان اشاره کرد که موقعیت منبع زمین گرمایی

قائدرحمتی و همکاران [۶] با بررسی مجدد داده‌های مگنتوتلوریک ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ منطقه غرب و جنوب غرب کوه سبلان (شکل ۲) با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل ابعادی

افزایش عمق، پیچیدگی ساختار و میل به سه‌بُعدی بودن بیشتر می‌شود.

نتایج تحلیل ابعادی توسط نامتغیرهای چرخشی برای ۵ ایستگاه اندازه‌گیری مگنتوتلوریک، به‌عنوان ایستگاه‌های معرف منطقه مورد مطالعه، در جدول ۱ نشان داده شده است. این تحلیل‌ها برای ۶ محدوده زمان تناوب در هر ایستگاه انجام شده است. نتایج این بررسی‌ها نیز نشان می‌دهد که ساختارهای زیر سطحی از نظر ابعادی اغلب سه‌بُعدی بوده مگر برای برخی زمان‌های تناوب کوتاه، که در این محدوده‌های زمان تناوب، ساختارها یک‌بُعدی، یک‌بُعدی متأثر از اثرات سه‌بُعدی یا دو-بُعدی هستند. نتایج تحلیل ابعادی باهر (شکل ۳) و همچنین نتایج تحلیل نامتغیرهای چرخشی (جدول ۲) بیان‌کننده پیچیدگی و ماهیت سه‌بُعدی ساختارهای زیر سطحی منطقه شمال سبلان، به خصوص برای زمان‌های تناوب بلند می‌باشند. به‌همین دلیل با توجه به موارد بیان‌شده ضرورت مدل‌سازی سه‌بُعدی برای داده‌های مگنتوتلوریک این منطقه مشخص می‌شود.

**۳- مدل‌سازی معکوس سه‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک**  
برای اجرای الگوریتم معکوس‌سازی سه‌بُعدی [۹] روی داده‌های مگنتوتلوریک، ابتدا یک مدل اولیه با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم-متر ساخته شده است. در این مدل ۲۲ بلوک مقاومت‌ویژه در جهت X (شمال-جنوب)، ۲۶ بلوک در جهت Y (شرق-غرب) و ۲۳ لایه در جهت قائم طراحی شده است. ضخامت لایه‌ها به طرف عمق‌های بیشتر با ضریب ۱/۲ افزایش یافته است. در ضمن ۷ لایه هوا نیز در سطح منظور شده است. همچنین برای داده‌های مؤلفه‌های اصلی و کمکی امپدانس به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد خطای کف در نظر گرفته شده است. به همین دلیل برخی از داده‌های پرت و با خطای بالای ۲۰۰ درصد نیز قبل از ورود به معکوس‌سازی حذف شده‌اند. در عملیات معکوس‌سازی ۱۵ ایستگاه مورد مطالعه در ۱۶ زمان-تناوب با محدوده ۰/۱ تا ۱۰۰ ثانیه استفاده شده‌اند. همچنین بنا بر دلایل بیان‌شده توسط قائدرحمتی و همکاران (۲۰۱۳) که داده‌های حاوی نوفه مؤلفه‌های کمکی امپدانس باعث کاهش کیفیت مدل‌سازی می‌شوند، در اینجا فقط از داده‌های مربوط به مؤلفه‌های اصلی امپدانس در معکوس‌سازی سه‌بُعدی استفاده شده است.

شکل ۴ نتایج مدل‌سازی معکوس سه‌بُعدی حاصل از داده‌های مگنتوتلوریک شمال سبلان را به صورت مقاطع افقی مقاومت-ویژه در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین شکل ۵

(یعنی منطقه داغ‌تر) در غرب و جنوب غرب سبلان به شکل بهتری نسبت به نتایج مدل‌سازی‌های دو‌بُعدی تعیین شده است. به‌طوری که، پیش‌بینی شد این منبع در مرکز ناحیه مورد مطالعه در زیر ایستگاه‌های ۷ و ۲۱ در منطقه‌ای بیضی شکل و با مساحت حدود ۷ کیلومتر مربع قرار گرفته است (شکل ۲). همچنین آن‌ها نشان دادند که مرکز جدید این منطقه داغ‌تر حدود یک کیلومتر نسبت به منطقه داغ قبلی که توسط نتایج مدل‌سازی‌های دو‌بُعدی تعیین شده است، به طرف جنوب جابجا شده است. به علاوه آن‌ها با استفاده مدل‌سازی سه‌بُعدی و تلفیق نتایج با اطلاعات زمین‌شناسی موقعیت مناطق دگرسانی مرتبط با منبع گرمایی مذکور را به خوبی مشخص کردند.

بر اساس مطالعات انجام شده توسط شرکت EDC [۵] یک منبع محلی زمین‌گرمایی در منطقه شمال کوه سبلان گزارش شده است. این منبع توسط پروفیل‌های P4 و P5 در شکل ۳ ثبت شده است. در این مطالعه هدف این است که با بررسی مجدد داده‌های مگنتوتلوریک ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ این منطقه (شکل ۲) و تفسیر سه‌بُعدی این داده‌ها، منبع احتمالی زمین-گرمایی در این منطقه به طور کامل‌تر مورد بررسی قرار گیرد و با نتایج مدل‌سازی دو‌بُعدی موجود مقایسه شود.

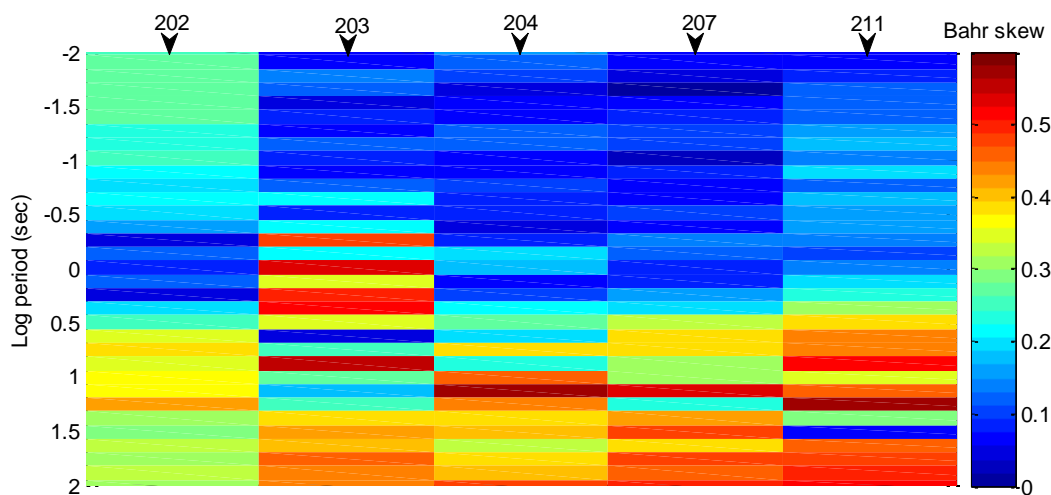
## ۲- داده‌های مگنتوتلوریک و تحلیل‌های ابعادی

داده‌های مگنتوتلوریک در اینجا، شامل داده‌های ۱۵ ایستگاه مگنتوتلوریک در منطقه شمال سبلان است که در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ توسط شرکت EDC اندازه‌گیری شده‌اند (شکل ۲). قبل از مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک، این داده‌ها بررسی می‌شوند و با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل ابعادی داده‌های مگنتوتلوریک، ابعاد ساختارهای ژئوالکتریکی منطقه بررسی می‌شوند. در این بخش تحلیل‌های ابعادی برای داده‌های مگنتوتلوریک دو منطقه غرب و جنوب غرب، و شمال سبلان انجام می‌شود.

در اینجا از روش‌های چولگی حساس به فاز باهر [۷] و تحلیل نامتغیرهای چرخشی [۸] استفاده می‌شود. شکل ۳ نتایج تحلیل باهر را برای ۵ ایستگاه مگنتوتلوریک که معرف منطقه مورد مطالعه هستند، نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج به‌طور تقریبی در زمان‌های تناوب بیشتر از ۳ ثانیه، مقایسه پارامتر باهر برای تمامی ایستگاه‌ها بیشتر از ۰/۳ بوده که ممکن است ناشی از اثرات سه‌بُعدی باشد. این نتایج نشان می‌دهد که با

با توجه به این که در ناحیه مورد نظر هیچ داده مستقل دیگری (مثل حفاری) وجود ندارد که بتوان از آن برای ارزیابی اعتبار نتایج مدل سازی سه بُعدی استفاده کرد، از این رو مقاطع قائم مقاومت ویژه در راستای پروفیل های P04 و P05 (شکل ۲) حاصل از مدل سازی سه بُعدی مذکور با مقاطع متناظر حاصل از مدل سازی معکوس دو بُعدی [۵] در شکل ۶ مقایسه شده اند. با مقایسه مقاطع حاصل از مدل سه بُعدی با مقاطع حاصل از مدل های دو بُعدی (شکل ۶)، دیده می شود که نتایج مدل سازی سه بُعدی با نتایج مدل سازی دو بُعدی انطباق مناسبی را نشان می دهند.

مقایسه پاسخ های تئوری و داده های مشاهده ای متناظر را برای این مدل معکوس سه بُعدی نشان می دهد. با توجه به این شکل در کل پاسخ های مدل، برازش به نسبت خوبی را با داده های مشاهده ای نشان می دهند. البته مقداری اختلاف بین داده های مشاهده ای و پاسخ مربوطه در هر دو مؤلفه امپدانس برای زمان های تناوب حدود ۱ تا ۱۰۰ ثانیه در ایستگاه های قرار گرفته در طول ۷۴۲ تا ۷۴۴ کیلومتری وجود دارد. این مقدار اختلاف به خاطر عدم وجود داده مشاهده ای در محدوده زمان-تناوب ۱ تا ۱۰۰ ثانیه برای ایستگاه های بیان شده است. در دیگر زمان های تناوب برای این ایستگاه ها و دیگر ایستگاه ها، داده های مشاهده ای و پاسخ مدل در هر دو مؤلفه اصلی امپدانس به خوبی قابل مقایسه هستند.

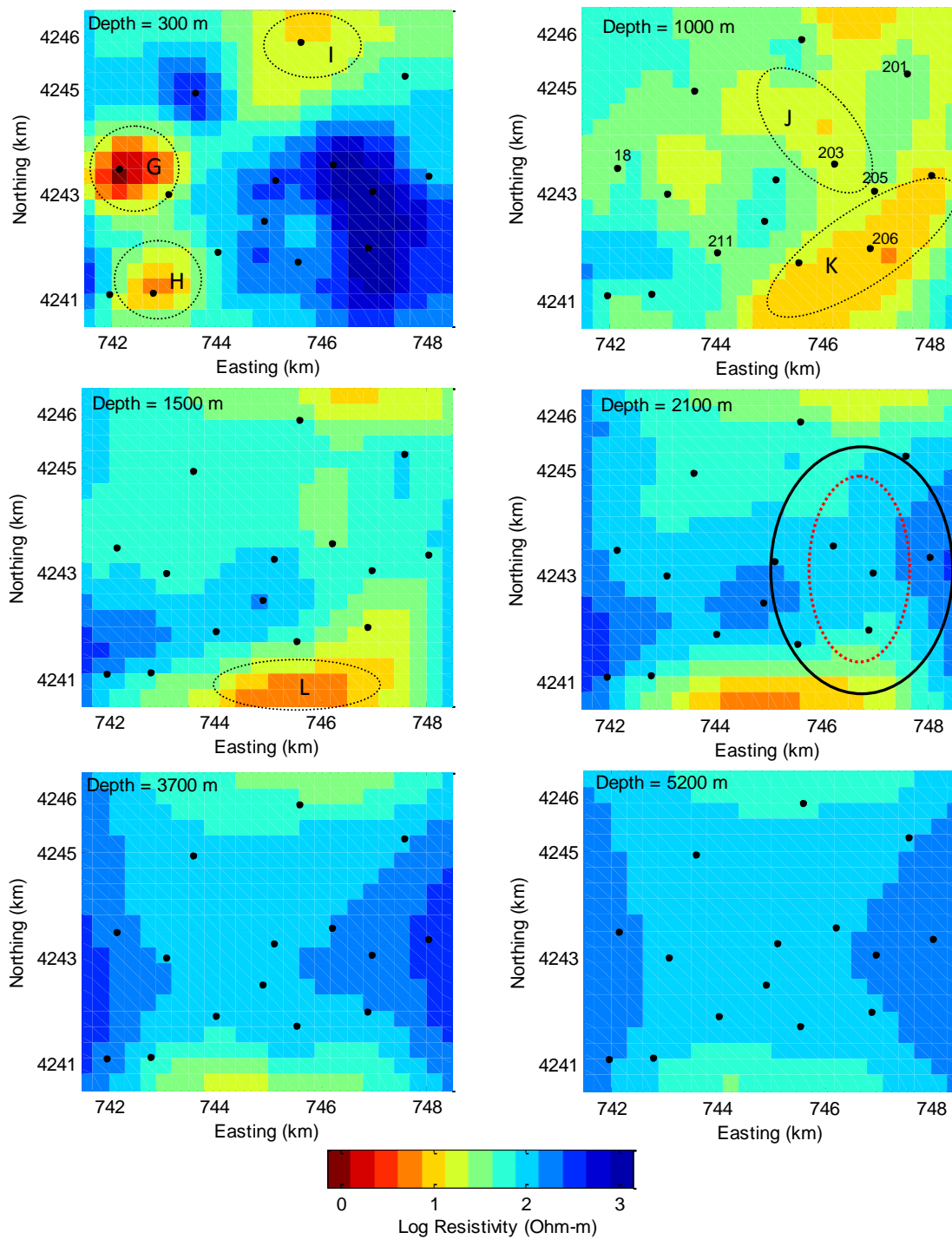


شکل ۳: مقادیر چولگی حساس به فاز (چولگی باهر) در زمان های تناوب ۰/۱ تا ۱۰۰ ثانیه، برای ۵ ایستگاه مگنتوتلوریک که پوشش دهنده کل محدوده مورد مطالعه شمال سیلان می باشند.

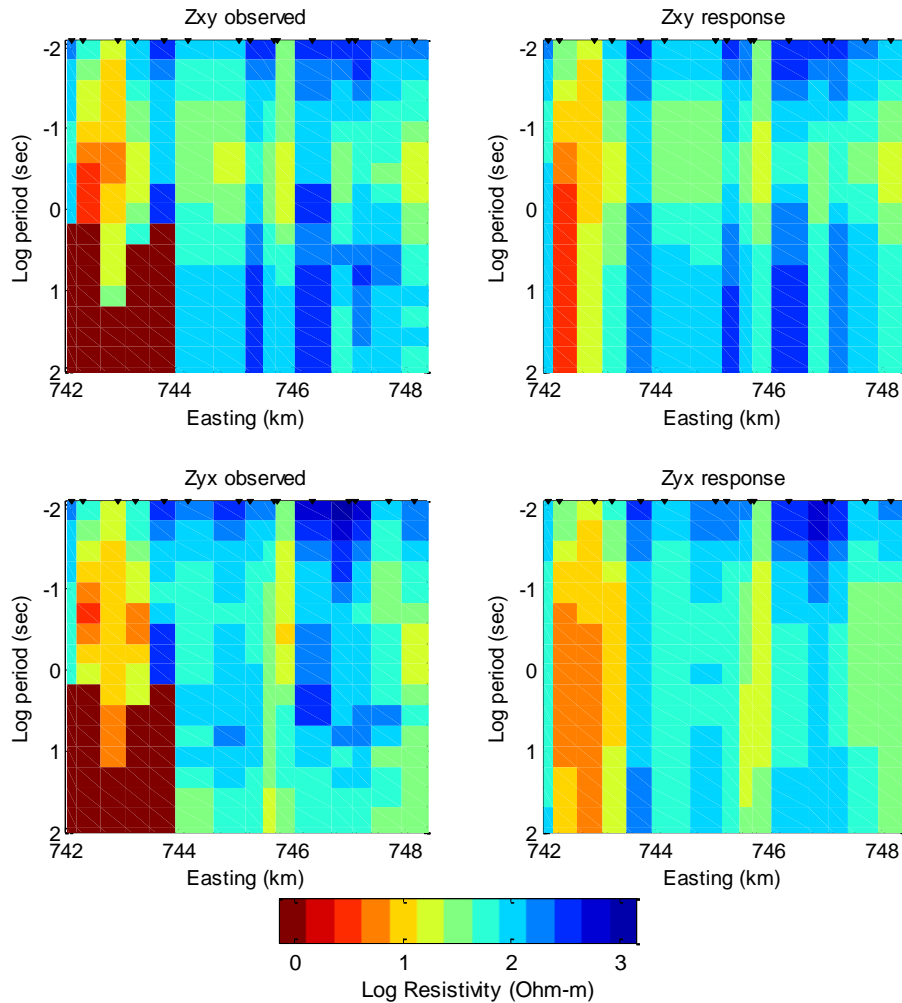
جدول ۱: نتایج تحلیل ابعادی ۵ ایستگاه مگنتوتلوریک معرف در منطقه شمال سبلان توسط نامتغیرهای چرخشی. شاخص‌های 1D، 2D و 3D به ترتیب مشخص کننده ساختارهای ژئوالکتریکی یک، دو و سه بُعدی هستند. شاخص 3D/1D2D مشخص کننده آشفتگی‌های گالوانیک روی یک ساختار یک یا دو بُعدی است و دلالت بر عدم به دست آوردن امتدادی برای این ساختارها است. همچنین 3D/2D نشان دهنده یک حالت عمومی از آشفتگی‌های گالوانیک سه بُعدی روی ساختار دو بُعدی است.

ایستگاه مگنتوتلوریک	محدوده زمان- تناوب	کمترین زمان- تناوب (ثانیه)	بیشترین زمان- تناوب (ثانیه)	تعداد زمان تناوب در محدوده	ابعاد	امتداد
۱۳	۱	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۸۷	۲	2D	۵۱/۹۲
	۲	۰/۰۱۰۳	۰/۰۸۹۳	۱۱	3D	-
	۳	۰/۱۰۶۴	۰/۹۸۰۴	۱۳	2D	۴۶/۴۲
	۴	۱/۱۶۲۸	۹/۳۴۵۸	۱۱	3D	-
۲۰۲	۱	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۸۷	۷	3D	-
	۲	۰/۰۱۰۳	۰/۰۸۹۳	۱۳	3D	-
	۳	۰/۱۰۶۴	۰/۹۸۰۴	۱۴	3D	-
	۴	۱/۱۶۲۸	۹/۳۴۵۸	۱۱	3D	-
۲۰۴	۶	۱۰۸/۶۹۵۷	۲۱۷/۳۹۱۳	۴	3D/2D	۲۸/۲۱
	۱	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۸۷	۴	3D	-
	۲	۰/۰۱۰۳	۰/۰۸۹۳	۱۱	1D	-
	۳	۰/۱۰۶۴	۰/۹۸۰۴	۱۴	3D/2D	۲۳/۹۲
	۴	۱/۱۶۲۸	۹/۳۴۵۸	۸	3D	-
۲۰۸	۶	۱۰۸/۶۹۵۷	۵۹۵/۲۳۸۱	۱۱	3D	-
	۱	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۸۷	۷	1D	-
	۲	۰/۰۱۰۳	۰/۰۸۹۳	۱۳	1D	-
	۳	۰/۱۰۶۴	۰/۹۸۰۴	۹	3D	-
۲۱۰	۱	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۸۷	۶	3D/1D2D	-
	۲	۰/۰۱۰۳	۰/۰۸۹۳	۱۳	3D/1D2D	-
	۳	۰/۱۰۶۴	۰/۹۸۰۴	۱۴	3D	-
	۴	۱/۱۶۲۸	۹/۳۴۵۸	۷	3D	-
	۶	۱۰۸/۶۹۵۷	۵۰۵/۰۵۰۵	۴	3D	-





شکل ۴: مقاطع افقی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی معکوس سه بُعدی داده های مگنتوتلوریک منطقه شمال سیلان، در عمق های مختلف. مناطق مشخص شده با حروف لاتین G، H، I، J، K و L مشخص کننده آنومالی های رسانا مرتبط با منبع گرمایی مورد مطالعه بوده که در بخش تفسیر نتایج بررسی می شوند. منطقه داغ تعیین شده در این مطالعه توسط یک بیضی با خط چین قرمز و در مطالعات قبلی [۵] توسط یک بیضی با خط ممتد سیاه روی مقطع مربوط به عمق ۲۰۰۰ متری مشخص شده است. (نقاط روی مقاطع مشخص کننده موقعیت ایستگاه های اندازه گیری هستند همچنین نام برخی ایستگاه های شاخص نیز در مقطع مربوط به عمق ۱۰۰۰ متری آمده است).



شکل ۵: مقایسه شبه مقاطع داده‌های مشاهده‌ای مقاومت‌ویژه برای مؤلفه‌های اصلی امپدانس با شبه مقاطع پاسخ‌های متناظر از مدل معکوس سه‌بُعدی شکل ۴. در این مقاطع تمامی ۱۵ ایستگاه روی یک پروفیل شرقی-غربی دلخواه تصویر شده‌اند.

#### ۴- تفسیر نتایج

با توجه به شکل ۴ آنومالی‌های رسانایی در مقاطع مختلف این شکل دیده می‌شود که به صورت مناطق مختلف با حروف لاتین مشخص شده‌اند. با در نظر گرفتن نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۱)، مناطق آنومالی مذکور را می‌توان به صورت ذیل تفسیر کرد.

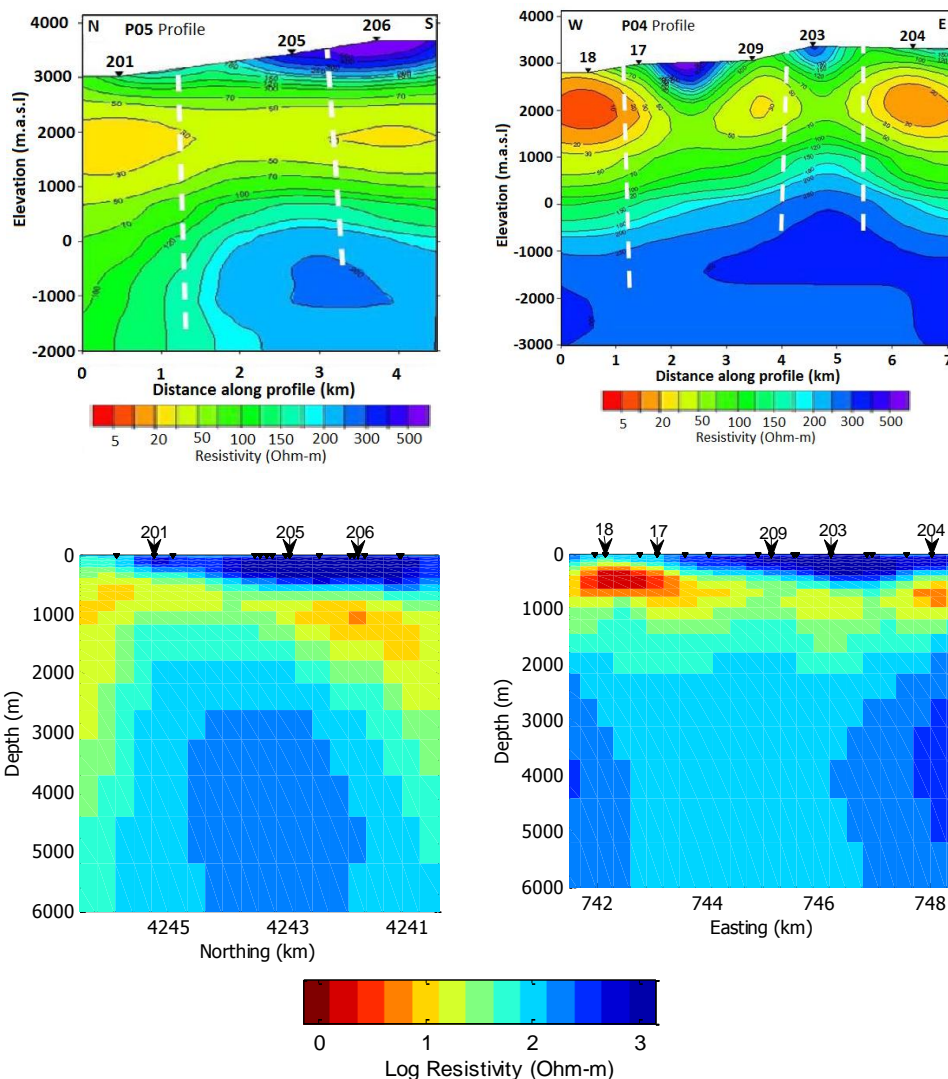
با بررسی کلی مقاطع افقی مقاومت‌ویژه در شکل (۴) و همچنین با توجه به مقاطع قائم حاصل از مدل سه‌بُعدی (شکل ۶) چنین استنباط می‌شود که بالا آمدگی منطقه مقاوم (با مقاومت‌ویژه حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ اهم-متر) در زیر ایستگاه-های ۲۰۳ و ۲۰۵ در عمق حدود ۲۰۰۰ متری که دو ناحیه رسانا را از هم جدا می‌کند، امکان است. یک منبع زمین-گرمایی باشد. دیگر مناطق آنومالی رسانا را می‌توان به واسطه عبور سیالات گرم در طول گسل‌های مرتبط با این منبع

گرمایی تفسیر کرد. این منطقه توسط یک بیضی با خط چین قرمز روی مقطع افقی مربوط به عمق ۲۰۰۰ متری در شکل ۴ مشخص شده است. همچنین منطقه داغ تعیین شده توسط مطالعات شرکت EDC [۵] با یک ناحیه بزرگتر در همین مقطع توسط یک بیضی با خط ممتد سیاه نشان داده شده است. مساحت منطقه داغ تعیین شده در این مطالعه حدود ۶ کیلومتر مربع است که نسبت به ناحیه داغ تعیین شده قبلی حدود ۵۰ درصد کوچک‌تر شده است. در واقع این منطقه جدید یک ناحیه داغ‌تر است. متأسفانه نقشه گسل‌های این منطقه به اندازه نقشه گسل‌های منطقه غرب و جنوب غرب سبلان کامل نیست. اما برخی از گسل‌ها در مقاطع مدل‌های دو بُعدی (شکل ۶) مشخص شده‌اند. مناطق G و H در مقطع افقی مقاومت‌ویژه مربوط به عمق ۳۰۰ متری، ممکن است مناطق دگرسانی کم عمقی باشند که به واسطه عبور سیالات



شده در مقطع شرقی-غربی حاصل از مدل سازی دو بُعدی در شکل ۶ حد فاصل ایستگاه های ۲۰۳ و ۲۰۴ و همچنین ۲۰۳ (کالدر) که از نزدیک منبع احتمالی تعیین شده عبور کرده است، برخورد می کند (شکل های ۲ و ۳). منطقه K در مقطع افقی مقاومت ویژه مربوط به عمق ۱۰۰۰ متری و منطقه L که در واقع ادامه منطقه K است و در مقطع ۱۵۰۰ متری ظاهر شده است، به احتمال قوی مناطق دگرسانی عمیق و ضخیمی هستند که به واسطه گسل های نشان داده

شده در مقطع شرقی-غربی حاصل از مدل سازی دو بُعدی در شکل ۶ حد فاصل ایستگاه های ۲۰۳ و ۲۰۴ و همچنین ۲۰۳ (کالدر) که از نزدیک منبع احتمالی تعیین شده عبور کرده است، برخورد می کند (شکل های ۲ و ۳). منطقه K در مقطع افقی مقاومت ویژه مربوط به عمق ۱۰۰۰ متری و منطقه L که در واقع ادامه منطقه K است و در مقطع ۱۵۰۰ متری ظاهر شده است، به احتمال قوی مناطق دگرسانی عمیق و ضخیمی هستند که به واسطه گسل های نشان داده



شکل ۶: مقایسه مقاطع قائم حاصل از مدل سازی معکوس سه بُعدی داده های مگنتوتلوریک منطقه شمال سیلان با مدل های معکوس دو بُعدی توسط EDC [۵]، در امتداد دو پروفیل نشان داده شده در شکل (۲). مقاطع ردیف فوقانی نشان دهنده مدل های دو بُعدی و مقاطع تحتانی حاصل از مدل سه بُعدی هستند. همچنین موقعیت ایستگاه های اندازه گیری مگنتوتلوریک برای مقایسه بهتر آورده شده است. برخی گسل ها نیز با خطوط سفید بریده ضخیم روی مدل های دو بُعدی نشان داده شده است.

## منابع

## ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه داده‌های مگنتوتلوریک منطقه شمال سبلان بررسی شده‌اند. در این بررسی‌ها ابتدا با استفاده از روش‌های تحلیل ابعادی چولگی حساس به فاز و نامتغیرهای چرخشی نشان داده شده است که ساختارهای منطقه در دوره‌های تناوب بلند که متناظر با عمق مورد بررسی منابع زمین‌گرمایی هستند، ماهیت سه‌بُعدی دارند. برای همین ضرورت مدل‌سازی سه‌بُعدی نشان داده شده است. در ادامه با معکوس‌سازی سه-بُعدی داده‌ها مگنتوتلوریک منطقه، مدل سه‌بُعدی مقاومت ویژه برای میدان مورد بررسی به دست آمده است.

نتایج مدل‌سازی سه‌بُعدی یک منطقه داغ در شرق محدوده مورد مطالعه، زیر ایستگاه‌های ۲۰۳، ۲۰۵ و ۲۰۶ در عمق حدود ۲۰۰۰ متری نشان می‌دهند. این منطقه با مساحتی در حدود ۶ کیلومتر مربع به‌طور تقریبی نصف منطقه داغ مشخص شده توسط نتایج مدل‌سازی دو‌بُعدی است. در واقع نتایج مدل‌سازی سه‌بُعدی به‌طور بهتری موقعیت قرارگیری منبع زمین‌گرمایی را نشان داده‌اند. همچنین مناطق دگرسانی مرتبط با منبع زمین‌گرمایی با توجه به گسل‌های منطقه به‌طور بهتری در مدل سه‌بُعدی توجیه شده‌اند.

## ۶- تشکر و قدردانی

با توجه به این که داده‌های مگنتوتلوریک این مطالعه توسط بخش زمین‌گرمایی سازمان انرژی‌های نو در اختیار مؤلفین قرار داده شده است، از همکاری مدیریت این بخش و کارکنان مربوطه قدردانی می‌شود.

- [1] Kingston Morrison (1999) "Sabalan Geothermal Project Stage 2-Preparation for Drilling", Report submitted to SUNA, 17p.
- [2] SKM (Sinclair Knight Merz) (2005) "Resource review of the Northwest Sabalan Geothermal Project" Report submitted to SUNA, 61 p.
- [3] Bromley, C., Khosrawi, K., Talebi, B. (2000) "Geophysical exploration of Sabalan geothermal prospects in Iran" World Geothermal Congress, Japan.
- [4] EDC (Energy Development Corporation) (2008) "2007 MT Survey of NW Sabalan Geothermal Project NW Iran" Report submitted to SUNA, 19 p.
- [5] EDC (Energy Development Corporation) (2010) "2009 MT Survey of NW Sabalan Geothermal Project NW Iran" Report submitted to SUNA, 13 p.
- [6] Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N., Lee, S. K., Porkhial, S. (2013a) "3-D inversion of MT data from the Sabalan geothermal field, Ardabil, Iran" *Journal of Applied Geophysics*, 93, 12-24.
- [7] Bahr, K. (1991) "Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types" *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 66, 24-38.
- [8] Marti, A., Queralt, P., Ledo, J. (2009) "WALDIM: A code for the dimensionality analysis of Magnetotelluric data using the rotational invariants of the Magnetotelluric tensor" *Computer and Geosciences*, 35, 2295-2303.
- [9] Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., Uyeshima, M. (2005) "Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method" *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 150 (1 - 3), 3 - 14.

<sup>1</sup> Sinclair Knight Merz

<sup>2</sup> TEM: Time Domain Electromagnetic

<sup>3</sup> DC: Direct Current

<sup>4</sup> EDC: Energy Development Corporation

<sup>5</sup> Hotter zone