

## تجزیه و تحلیل توابع پاسخ مربوط به مجموعه‌ای حجیم از داده‌های مگنتوتلوریک در محدوده تراشکاف (دیپر) نمکی نصرآباد، ایران مرکزی

منصوره منتهایی<sup>۱\*</sup>، مهرداد ساجدی<sup>۲</sup>، الهام زارع<sup>۲</sup> و حکیم اسماعیلی اوغاز<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> ناظر طرح‌های ذخیره‌سازی هیدروکربوری، شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴)

### چکیده

تجزیه و تحلیل حجم زیاد داده‌ها همواره یکی از چالش‌های مهم پژوهش‌های ژئوفیزیکی است؛ زیرا از یک سو زمان‌بر است و دستیابی به نتایج همخوان از همه نقطه داده‌های متأثر از نوفه‌های متفاوت دشوار است و از سوی دیگر، نتایج آن بینش ژرف و ارزشمندی راجع به ساختارهای زیر سطح زمین فراهم و مدل‌سازی دقیق این ساختارها را امکان‌پذیر می‌سازد. در این پژوهش از راهکار نظام‌مندی برای تحلیل داده‌های مگنتوتلوریک (MT) برداشت‌شده بر فراز ساختار نصرآباد (از مجموعه دیپرهای نمکی شوراب) در شمال غرب کاشان استفاده شده است. این مجموعه داده حاوی توابع پاسخ ژئومغناطیسی و امپدانس MT برداشت‌شده در امتداد هفت پروفیل است. دویست و هشتاد و چهار ایستگاه MT باندپهن توزیع‌شده در امتداد این پروفیل‌ها، داده‌ها را در ۸۹ دوره تناوب متعلق به بازه زمانی ۲۶۰۰-۰/۰۰۳ ثانیه اندازه گرفته‌اند.

هدف این تحلیل‌ها، شناسایی اعوجاج گالوانی ناشی از توده‌های رسانای کوچک مقیاس محلی است. این اعوجاج، پاسخ‌های القایی ساختار منطقه‌ای را مخدوش می‌سازد و باعث می‌شود نتایج مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها با واقعیت مغایرت داشته باشند. در این مطالعه تجزیه نظام‌مندی از این آثار مخرب موجود در مجموعه حجیم داده‌های MT نصرآباد صورت گرفته و بعدیت و سوگیری غالب ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه‌ای تعیین شده است. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که ساختار هدایت‌ویژه الکتریکی منطقه‌ای در شمال شرق این پروفیل‌ها پیچیدگی کمتری نسبت به جنوب غرب آنها دارد اما به‌طور کلی می‌توان آن را ساختاری دوبعدی با روندی در راستای  $N30^{\circ}W$  در نظر گرفت.

**کلمه‌های کلیدی:** تحلیل بعدیت، تانسور فاز، دیپر نمکی، مگنتوتلوریک، نصرآباد

## ۱ مقدمه

داده‌های مگنتوتلوریک (MT) حاوی امیدانس الکتریکی (Z) محاسبه شده از نسبت مؤلفه‌های متعامد میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و بردارهای القای (یا تپیر [tipper]): ( $W_x$ ,  $W_y$ ) محاسبه شده از نسبت مؤلفه‌های قائم به افقی میدان مغناطیسی هستند که برای دوره‌های تناوبی مختلف نوسانات این میدان‌ها (T) محاسبه می‌شوند (ژانگ و همکاران، ۱۹۸۷):

$$\begin{bmatrix} E_x(T) \\ E_y(T) \\ H_z(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \\ W_x & W_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x(T) \\ H_y(T) \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه (۱) متغیرهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  مختصات ژئومغناطیسی در دستگاه دکارتی هستند. قبل از مدل‌سازی و تفسیر این داده‌ها ضروری است بعدیت ساختار منطقه و نیز میزان وجود آثار اعوجاجی مخدوش‌کننده پاسخ این ساختار ارزیابی شوند تا رویکرد مناسب برای مدل‌سازی داده‌ها تعیین شود (چیو و جونز، ۲۰۱۲). روش‌های متنوعی برای این منظور ارائه شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به تحلیل داده‌ها بر مبنای ناوردهای چرخشی اشاره کرد. این ناوردها مجموعه‌ای از پارامترها هستند که از مؤلفه‌های مختلف تانسور امیدانس محاسبه می‌شوند و به جهت محورهای اندازه‌گیری وابسته نیستند. عمده ناوردهای چرخشی معرفی شده برای تحلیل بعدیت داده‌ها مثل ناوردای سوئیفت ( $\kappa$ ) و ناوردای حساس به فاز بار (Bahr) ( $\eta$ ) تنها برای یک گونه خاص از بعدیت ساختار منطقه کارایی دارند (سیمپسون و بار، ۲۰۰۵). یکی از پیشرفت‌های اصلی با استفاده از این ابزار، ناوردهای چرخشی WAL (ویور و همکاران، ۲۰۰۰) است که بعدیت ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه از صفر شدن آنها طبقه‌بندی می‌شود. ویژگی این روش طبقه‌بندی آن است که درباره بعدیت ساختار هدایت ویژه الکتریکی زیرسطحی هیچ فرض اولیه‌ای ندارد و در شرایطی که هم ساختار منطقه و هم ناهمگنی‌های محلی سه‌بعدی هستند، کاربرد دارد. برای

آنکه مدل‌های ایدئال بعدیت پیش‌فرض این روش با امیدانس‌های اندازه‌گیری شده حاوی خطا و نوفه محیطی منطبق شود، این روش بسط داده شد تا خطای ناوردهای WAL برحسب چگونگی انتشار خطای امیدانس‌های اندازه‌گیری شده محاسبه و مقادیر آستانه بهینه برای این ناوردها تعیین شود (مارتی و همکاران، ۲۰۰۹).

بعدیت و روند ساختار منطقه را ناوردهای چرخشی تانسور فاز (محاسبه شده از بخش‌های حقیقی و موهومی تانسور امیدانس) نیز ارزیابی می‌کنند. این پارامترها هیچ‌گونه فرض اولیه‌ای درباره ساختار منطقه ندارند و عاری از اثرهای اعوجاجی هستند (کالدول و همکاران، ۲۰۰۴).

در این مقاله برای مجموعه‌ای حجیم از داده‌های MT باندپهن که بر فراز دیاپر نصرآباد ثبت شده‌اند، روش‌های تحلیلی مذکور به کار گرفته می‌شوند. این مجموعه داده حاوی ۲۸۴ ایستگاه توزیع شده در امتداد هفت پروفیل است که هر یک داده‌های امیدانس و تپیر را در ۸۹ دوره تناوب متعلق به بازه زمانی ۲۶۰۰-۰/۰۳ ثانیه اندازه گرفته‌اند.

داده‌های MT همواره در معرض آثار اعوجاج گالوانی ناشی از ساختارهای رسانای کوچک مقیاس محلی هستند که پاسخ ساختار منطقه‌ای را مخدوش می‌سازند. چالش مهم در مواجهه با مجموعه‌ای حجیم از داده‌های MT که در معرض آثار اعوجاج گالوانی ناشی از ساختارهای رسانای کوچک مقیاس و متعدد هستند آن است که چگونه می‌توان با وجود این آثار اعوجاجی متفاوت، به تصویر منسجمی از ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه‌ای دست یافت به گونه‌ای که این یافته با داده‌های همه پروفیل‌ها همخوان باشد. بدیهی است پاسخ به این سؤال مستلزم اعمال روش‌های تحلیلی بر داده‌های همه پروفیل‌ها و سپس مقایسه و ارزیابی نتایج همه آنها است. تکمیل نشدن این مرحله باعث می‌شود مدل حاصل در مراحل بعد، تصویری از ساختار منطقه در یک راستای غلط باشد و نتوان تفسیر دقیقی از داده‌ها ارائه داد (چیو و جونز، ۲۰۱۲). در

نصرت، ایندس، قم- زفره و دهشیر مهم‌ترین آنها هستند. این گسل‌ها مؤلفه غالبی از لغزش به سوی راست دارند و از الگوی پلکانی تبعیت می‌کنند که موجب شده است بین قطعه‌های گسلی مختلف آنها نواحی گسل‌گامه‌ای مهارکننده شامل چین‌ها و رورانگی‌ها ایجاد شوند. در این منطقه برخی تاقدیس‌ها و رورانگی‌ها مثل تاقدیس البرز و گسل البرز به موازات گسل‌های امتدادلغز (گسل قم) امتداد یافته‌اند و جزءبندی تغییر شکل‌ها در این ناحیه را خاطر نشان می‌کنند (بابااحمدی و همکاران، ۲۰۱۰).

تاقدیس‌های البرز و سراج، دو میدان نفتی در غرب حوزه ایران مرکزی هستند. نفت و گاز این نواحی در زیر لایه‌های سنگ‌آهکی- شیلی مربوط به دوران الیگوسن (سازند قم) واقع است. این سازند از نظر سن، معادل با بخش پربار سازند آسماری مشهور در جنوب ایران است. این ساختارها در نتیجه چین‌خوردگی و گسلش همراه با آن ایجاد شده‌اند. این چین‌خوردگی هم‌زمان با شکل‌گیری سازند قم تا اواخر پلیوسن رخ داده است (جعفری، ۱۹۶۳). یکی از بزرگ‌ترین گسل‌های نرمال (یا امتدادلغز همراه با کشیدگی) در ناحیه قم- ساوه، گسل خورآباد است که بین تاقدیس‌های البرز و سراج، خطی از برون‌زدهای آن به سمت جنوب گسترش یافته است. مطالعات چینه‌شناسی نشان داده‌اند که این گسل عامل کنترل‌کننده گسترش نمک - که با حجم بسیار زیاد در سازند سرخ پایینی رسوب کرده است- به درون سازند سرخ بالایی است. بخشی از گسل خورآباد که به سمت جنوب شرقی حوزه ایران مرکزی روند NW-SE تا N-S پیدا کرده است، گسل آب‌شیرین خوانده می‌شود. دیپرهای نمکی شوراب در نئوژن و در آخرین مرحله تحولات ساختاری در حوزه ایران مرکزی که زمین‌ساخت ترافشارشی (transpressional) حاکم بوده است، در مجاورت ناحیه گسلیده آب‌شیرین- خورآباد شکل گرفته‌اند و در حال حاضر فعالیت ندارند (مورلی و همکاران، ۲۰۰۹).

بررسی‌های قبلی انجام‌شده برای مجموعه داده MT نصرآباد (بیک‌پور و همکاران، ۲۰۱۶؛ اسکویی و همکاران، ۲۰۱۹ و مرادی و همکاران، ۲۰۱۹) این نکته لحاظ نشده است. در این مقاله به منظور دستیابی به تصویری کلی و منسجم از ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه نصرآباد، داده‌های MT در راستای هفت پروفیل تحلیل و نتایج آنها با هم مقایسه شده است.

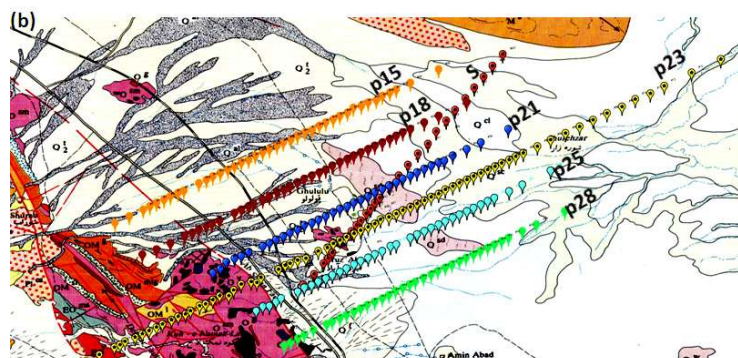
## ۲ زمین‌شناسی منطقه

مجموعه داده‌های MT بررسی شده در این پژوهش، روی دیپار نمکی مدفون نصرآباد برداشت شده‌اند. این ساختار یکی از پنج دیپار نمکی در مجموعه دیپرهای شوراب در حوزه ایران مرکزی است (روستا و همکاران، ۲۰۱۹). گفنتی است دیپرهای شماره ۱، ۲، ۳ و ۵ برونزد دارند و دیپار شماره ۴ که نزدیک نصرآباد است، فاقد برونزد است. حوزه ایران مرکزی به همراه ناحیه برخورد قاره‌ای زاگرس، کمربند سندانج- سیرجان، رشته کوه البرز، کپه‌داغ، مکران و سیستان و بلوچستان هفت بلوک زمین‌ساختی مجزا ناشی از برخورد صفحات عربی و اوراسیا هستند که فلات ایران را شکل می‌دهند. این حوزه در شمال به کوه‌های البرز و در شرق به خردصفحه ایران مرکزی محدود می‌شود. به موازات حواشی این بلوک‌های زمین‌ساختی، سامانه‌های گسلی امتدادلغز و رورانه به‌خوبی توسعه یافته‌اند. حوزه ایران مرکزی از دو بخش اصلی تشکیل شده است: شعبه‌ای با روند NW-SE که شامل منطقه قم- ساوه است و شعبه دیگر با روند NE-SW که زیر آن دشت کویر قرار گرفته است (مورلی و همکاران، ۲۰۰۹). منطقه نصرآباد کاشان در غرب حوزه ایران مرکزی واقع است. ساختارهای اصلی در این ناحیه از روند اصلی چین‌خوردگی زاگرس تبعیت کرده و در راستای NW-SE امتداد یافته‌اند. گسل‌های کواترنری متعددی با سازوکار امتدادلغز یا رورانه در غرب حوزه ایران مرکزی توسعه یافته‌اند. گسل‌های آوج، کوشک

### ۳ توابع پاسخ امیدانس

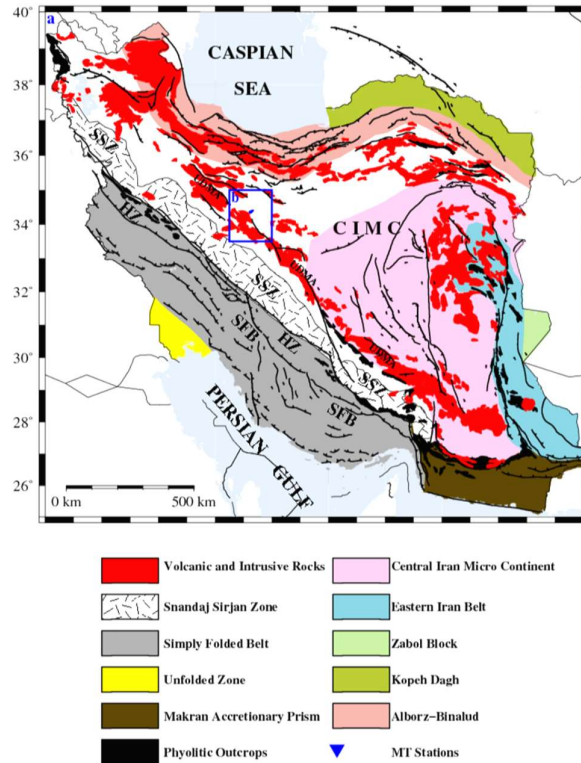
داده‌های نصرآباد حاوی ۲۸۴ ایستگاه باندپهن MT (محدوده دوره تناوبی ۳۴۱۴-۱۰<sup>-۴</sup> ثانیه) در امتداد هفت پروفیل است (شکل ۱). این پروفیل‌ها در امتداد SW-NE از چهار ناحیه رسوب‌شناختی-زمین‌ساختی رسوبات مخروط‌افکنه‌ای قدیمی، سازند نمکی سرخ پایینی، رسوبات مخروط‌افکنه‌ای جوان و رس‌های شیستی (در انتهای شمال شرقی پروفیل‌ها) عبور می‌کنند. شکل‌های ۲ و ۳ سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی و فاز امیدانسی را

برای چند ایستگاه نمونه نشان می‌دهند. این داده‌های امیدانسی در دستگاه مختصات ژئومغناطیسی (شمال || x و شرق || y) نمایش داده شده‌اند. بررسی اولیه این نمودارها نتایج زیر را در پی دارد:  
الف) توابع تبدیلی نمایش داده شده در این شکل‌ها تغییرات بسیار همواری با دوره تناوب دارند. در اغلب ایستگاه‌ها دو مؤلفه قطر اصلی تانسور امیدانس در سرتاسر دوره تناوبی بین یک تا سه دهه لگاریتمی کوچک‌تر از مؤلفه‌های قطر فرعی تانسور امیدانس هستند؛



#### سنگ‌های نفوذی و نیمه عمق Intrusive and subvolcanic rocks

	Ox <sup>sp</sup> : Osmolite, tonalite, granite, partly quartz diorite (post oligocene)	گروه‌های سنگ‌های نفوذی و نیمه عمق (بعد از الگوسن)
	di: Diorite, microdiorite	دیوریت و میکرودیوریت
	O <sup>sp</sup> : Labrador - diorite, microgabro - microdiorite (post Eocene)	گابرو - دیوریت، میکروگابرو - میکرودیوریت (بعد از ائوسن)
	ap: Aplitic dikes	دایکهای آپلیتی
	d: Dacitic dikes and lava flows	دایکها و گدازه‌های داسیتی
	ab: Andesitic - basaltic dikes (Eocene)	دایکهای آندزیتی - بازالتی (ائوسن)
	Ng <sup>sp</sup> : Andesitic - basaltic dikes (Neogene)	دایکهای آندزیتی - بازالتی (نئوژن)
	an: Andesitic dome or dikes (Neogene)	گدازه‌ها و دایکهای آندزیتی (نئوژن)
<b>Hydrothermally altered zones</b> نواحی دگرمان شده توسط محلولهای گرمایی		
	al: Aluminized and kaolinized zone	ناحیه آلومینی و کائولین شده
	ep: Epithermal zone	ناحیه اپیترمال شده
	Generally altered zone	ناحیه دگرمان شده بطور عمومی



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی به همراه موقعیت ایستگاه‌های MT. در شکل (الف)، مستطیل آبی‌رنگ در نقشه زمین‌شناسی ایران موقعیت منطقه مطالعه را نشان می‌دهد که در شکل (ب) بزرگ‌نمایی شده است.

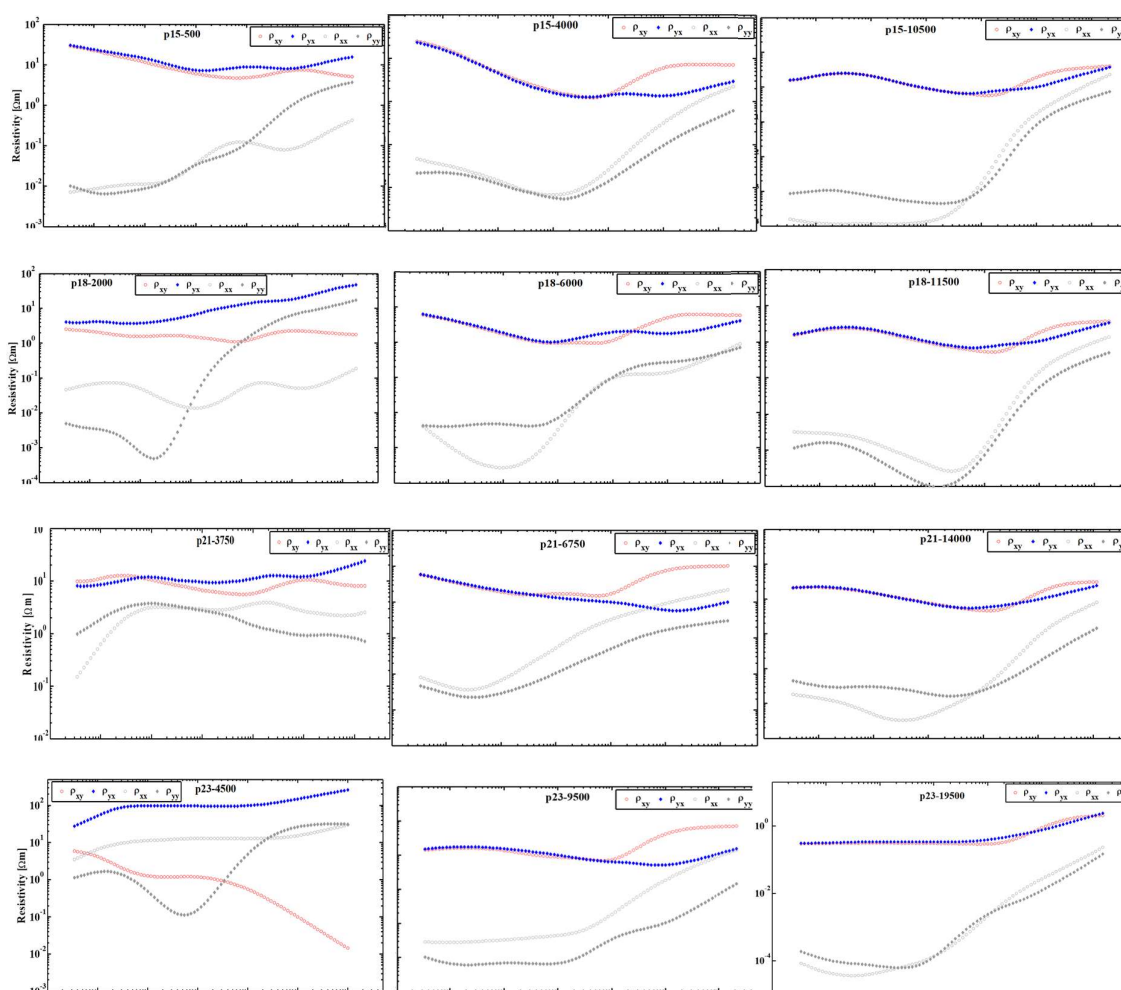
و به دوره تناوب‌های بلندتر منتقل می‌شود (شکل ۲). این یافته‌ها نشان می‌دهند که با حرکت از جنوب غرب به شمال شرق این پروفیل‌ها، ضخامت رولایه رسانای سطحی افزایش می‌یابد و در قسمت جنوب غرب این پروفیل‌ها ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه‌ای پیچیدگی بیشتری دارد. این واقعیت را معیارهای تحلیل بعدیت (در بخش بعد)، به‌ویژه پارامتر  $\mu$  (رابطه ۵) که هم‌فاز بودن همه مؤلفه‌های تانسور امیدانس را می‌سنجد نیز تأیید کرده است (شکل ۶). اگر ساختار منطقه یک‌بعدی باشد، همه مؤلفه‌های تانسور امیدانس هم‌فاز هستند و مقدار  $\mu$  صفر است (سیمپسون و بار، ۲۰۰۵). شکل ۶ نشان می‌دهد مقادیر این پارامتر در ایستگاه‌های واقع در شمال شرق پروفیل کمتر از مقادیر آن در ایستگاه‌های جنوب غربی است و در قسمت شمال شرق پروفیل‌ها مقادیر کم این پارامتر ( $< 0.1$ ) تا دوره

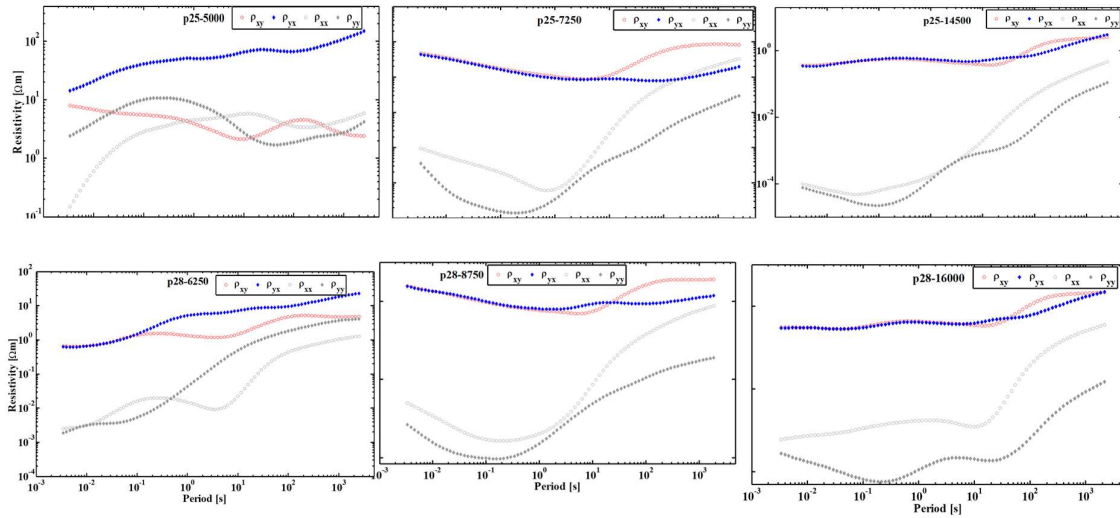
(ب) منحنی‌های سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی در اکثر ایستگاه‌ها مقادیر کمی بین  $1-0.1 \Omega m$  را نشان می‌دهند (شکل ۲). در دوره تناوب‌های کوتاه کمتر از یک ثانیه که به عمق نفوذهای کم میدان‌های EM مربوط است، با مقادیر زیاد فاز امیدانس‌ها مواجهیم (شکل ۳)؛ بنابراین چنین به‌نظر می‌رسد در سرتاسر منطقه یک رولایه رسانا وجود دارد؛

(ج) با حرکت در امتداد پروفیل‌ها مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی از  $423 \Omega m$  (مثل ایستگاه p23-4500 در شکل ۲) در جنوب غربی پروفیل‌ها به مقدار  $0.2 \Omega m$  در شمال شرقی آنها می‌رسد (مثل ایستگاه p23-19500 در شکل ۲)؛ (د) با حرکت از جنوب غرب به شمال شرق در امتداد پروفیل‌ها، جدایش سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به قطبش‌های TM و TE ( $\rho_{yx}$  و  $\rho_{xy}$ ) کاهش می‌یابد

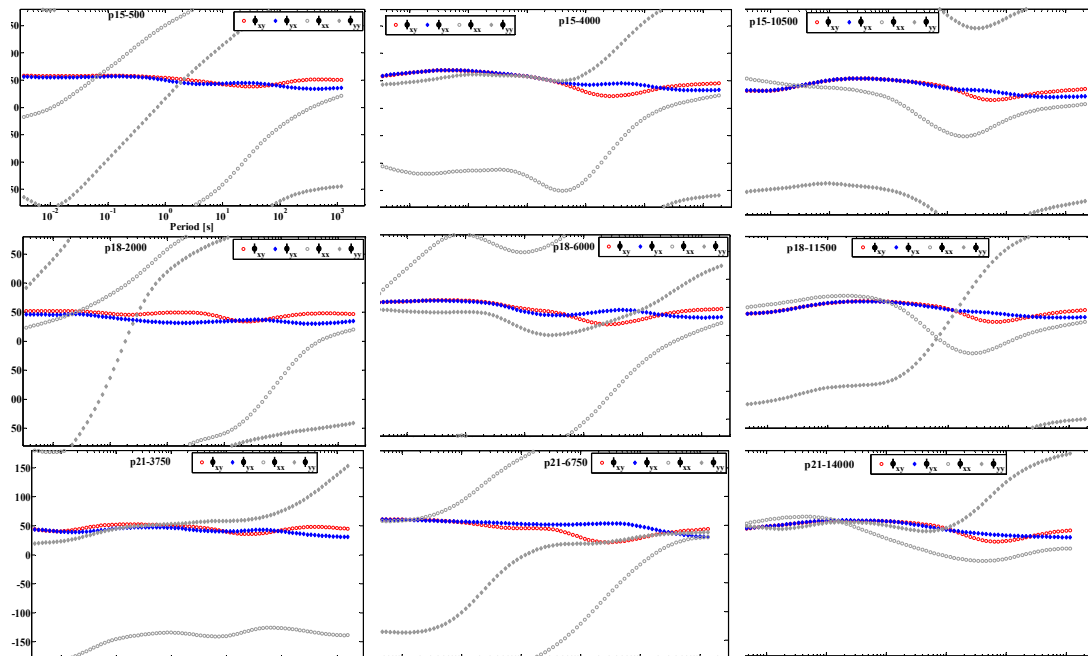
سونداژ  $\rho_{xy}$  (یا  $\rho_{TE}$ ) دارند، اما در شرق این گسل (ایستگاه‌های p21-، p23-9500، p25-7250، p28-8750 و p15-4000، p18-6000، 6750) این ترتیب برعکس شده است؛ منحنی‌های سونداژ  $\rho_{xy}$  غلبه دارند و به‌ویژه در دوره تناوب‌های بلند مقادیر بیشتری نسبت به  $\rho_{yx}$  نمایش می‌دهند (شکل ۲).

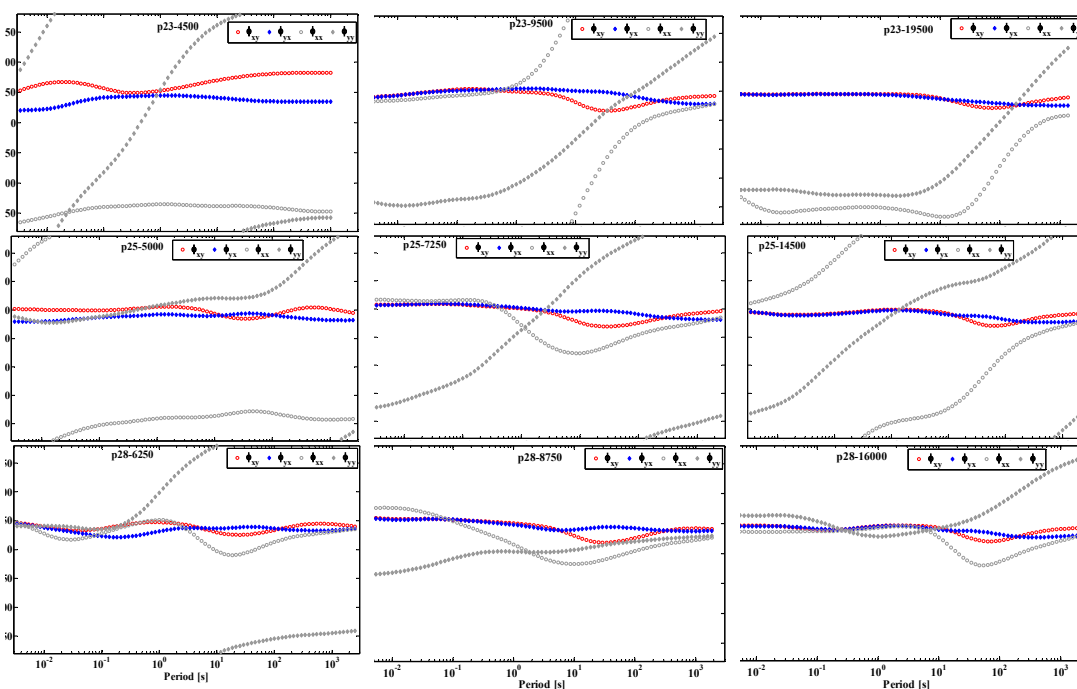
تناوب‌های بیش از ۱۰ ثانیه نیز وجود دارند؛ (ه) مهم‌ترین عارضه زمین‌ساختی که اثر آن بر منحنی‌های سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی همه پروفیل‌ها نمود یافته است، گسل آب-شیرین است. در ایستگاه‌های واقع در غرب این گسل (ایستگاه‌های p25-6000، p28-6250، p15-500، p18-2000، p21-3750، p23-4500) سونداژ  $\rho_{yx}$  (یا  $\rho_{TM}$ ) مقادیر بیشتری نسبت به منحنی‌های



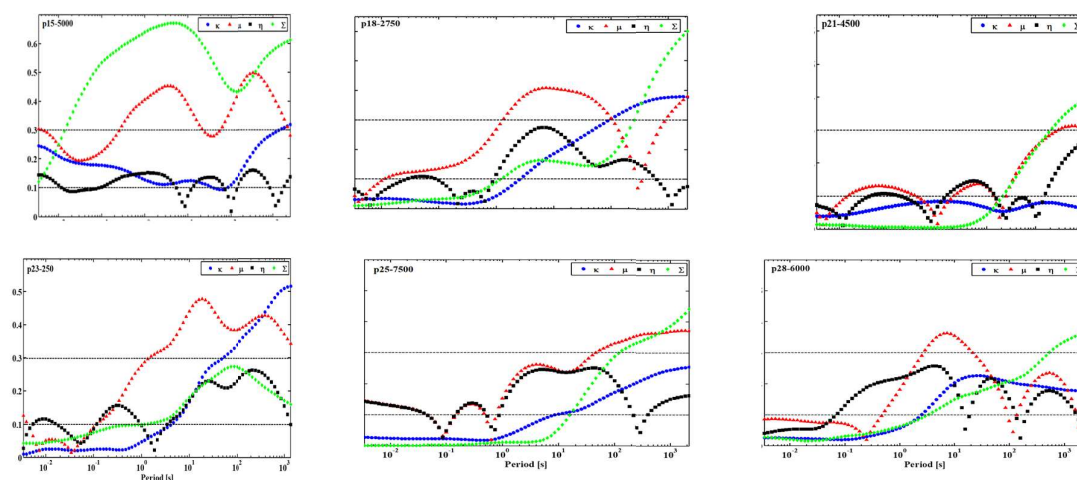


شکل ۲. منحنی‌های سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری مربوط به ایستگاه‌های p15-500، p15-4000 و p15-10500 واقع بر پروفیل ۱۵، ایستگاه‌های p18-16000، p18-6000 و p18-11500 واقع بر پروفیل ۱۸، ایستگاه‌های p21-3750، p21-6750 و p21-14000 واقع بر پروفیل ۲۱، ایستگاه‌های p23-9500 و p23-19500 واقع بر پروفیل ۲۳، ایستگاه‌های p25-5000، p25-7250 و p25-14500 واقع بر پروفیل ۲۵ و ایستگاه‌های p28-6250، p28-8750 و p28-16000 واقع بر پروفیل ۲۸. محور افقی دوره تناوب نوسانات میدان‌های EM و محور قائم مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد. مقیاس هر دو محور لگاریتمی است. MT واقع بر پروفیل‌های مختلف p15، p18، p21، p23، p25، p28 در منطقه نصرآباد کاشان. شماره ایستگاه‌ها در عنوان هر شکل آمده است. در همه این شکل‌ها محور افق لگاریتمی و دوره تناوب میدان‌های EM را نشان می‌دهد. محور قائم نیز لگاریتمی است و مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری را نشان می‌دهد.



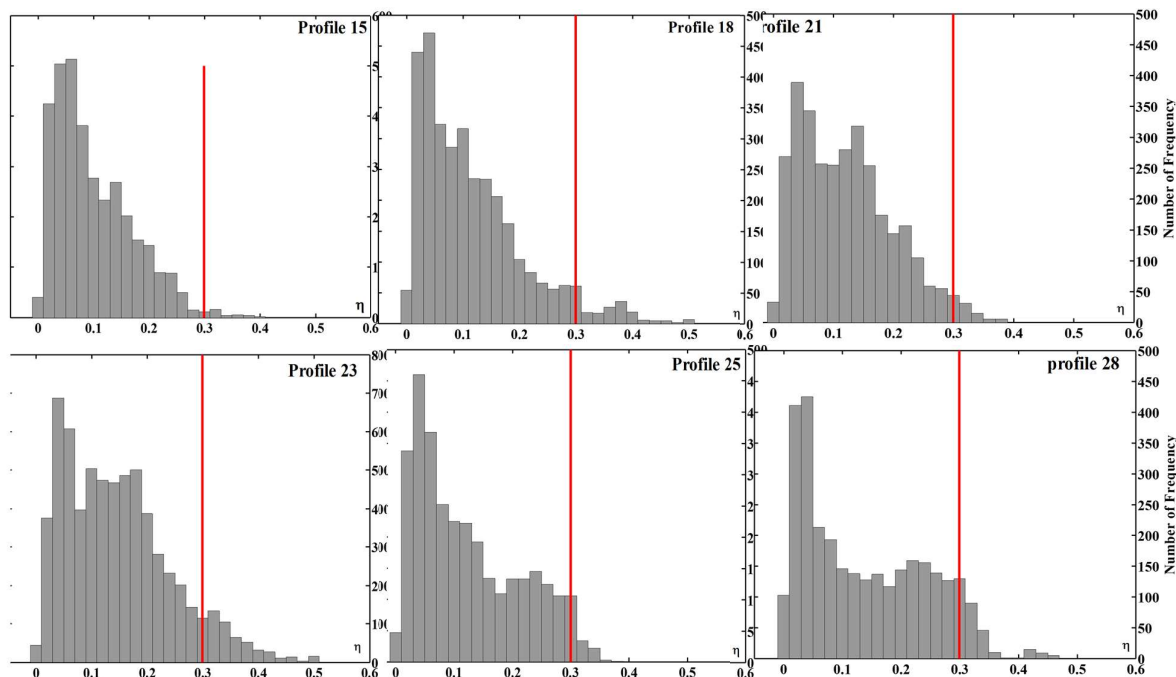


شکل ۳. منحنی‌های سونداژ فازمربوط به ایستگاه‌های p15-4000, p15-10500 و p15-10500 واقع بر پروفیل ۱۵، ایستگاه‌های p18-2000, p18-6000 و p18- ایستگاه‌های p21-3750, p21-6750 و p21-14000 واقع بر پروفیل ۲۱، ایستگاه‌های p23-4500, p23-9500 و p23-19500 واقع بر پروفیل ۲۳، ایستگاه‌های p25-5000, p25-7250 و p25-14500 واقع بر پروفیل ۲۵ و ایستگاه‌های p28-6250, p28-8750 و p28-16000 واقع بر پروفیل ۲۸. محور افقی دوره تناوب نوسانات میدان‌های EM را نشان می‌دهد و مقیاس آن لگاریتمی است. محور قائم فاز امپدانس را نشان می‌دهد و مقیاس آن خطی است.



شکل ۴. ناوردهای چرخشی بار در چند ایستگاه منتخب از مجموعه داده MT نصرآباد کاشان





شکل ۵. تحلیل آماری مقادیر اسکيو حساس به فاز بار ( $\eta$ ) که برای داده‌های امپدانس برداشت‌شده در امتداد پروفیل‌های مختلف منطقه نصرآباد کاشان محاسبه شده‌اند.

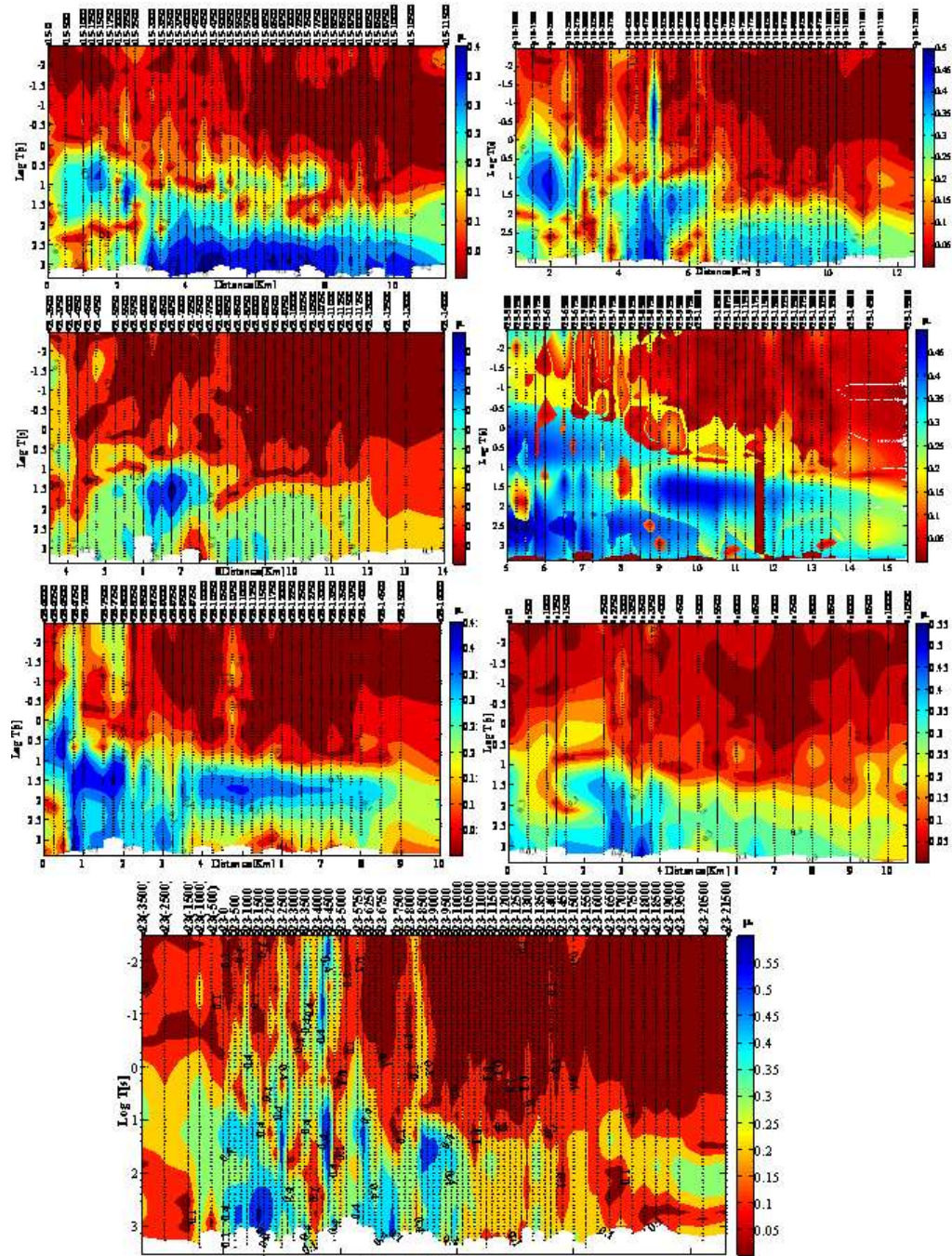
زیرسطحی استفاده می‌شوند. این پارامترها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول پارامترهایی مبتنی بر یک مدل پیش‌فرض اولیه برای ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه‌ای هستند و میزان انطباق امپدانس‌های اندازه‌گیری-شده را با پاسخ‌های MT این مدل پیش‌فرض می‌سنجند [ناوردهای چرخشی بار (بار و سیمپسون، ۲۰۰۵)] و دسته دوم ناوردهای چرخشی‌ای هستند که در استخراج آنها هیچ‌گونه فرض اولیه‌ای درباره ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه‌ای وجود نداشته است [ناوردهای چرخشی WAL (ویور و همکاران، ۲۰۰۰)]. این ناوردها به‌گونه‌ای تعریف شده‌اند که در نمودار دایره‌ای مور (Mohr)، معرفی‌شده در لیلی (۱۹۷۶)، نمایش واضحی داشته باشند.

#### ۴ تحلیل بعدیت داده‌ها

برداشت داده‌ها در امتداد پروفیل‌ها به این واقعیت اشاره دارد که بررسی‌های اولیه، ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه‌ای را دوبعدی ارزیابی کرده‌اند. در ادامه، اعتبار این فرض درباره محدوده دیپر نمکی نصرآباد با به‌کارگیری سه روش طبقه‌بندی بار (سیمپسون و بار، ۲۰۰۵)، تانسور فاز (کالدول و همکاران، ۲۰۰۴) و طبقه‌بندی WAL (ویور و همکاران، ۲۰۰۰) در مورد داده‌های MT برداشت‌شده در این محدوده بررسی می‌شود.

##### ۴-۱ ناوردهای چرخشی تانسور امپدانس

ناوردهای چرخشی تانسور امپدانس معمولاً به‌عنوان شاخص‌هایی از بعدیت ساختار هدایت ویژه الکتریکی



شکل ۶. شبه‌مقطع مقادیر اسکپو  $\mu$  محاسبه‌شده از داده‌های اِمپدَنسی برداشت‌شده در امتداد هفت پروفیل در منطقه نصرآباد کاشان

## ۴-۱-۱ تحلیل داده‌های MT با استفاده از ناوردهای

## چرخشی بار

سیمپسون و بار (۲۰۰۵) مجموعه‌ای از ناوردهای چرخشی را به منظور طبقه‌بندی بعدیت ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه و آثار اعوجاجی متأثرکننده پاسخ این ساختار معرفی کرده‌اند. این طبقه‌بندی با کمی‌سازی پارامترهای اسکيو سوئیفت ( $\kappa$ )، لارسن ( $\Sigma$ ) و معیارهای حساس به فاز ( $\mu, \eta$ ) انجام می‌شود:

$$\kappa = \frac{|S_1|}{|D_2|} \quad (۲)$$

$$\Sigma = \frac{D_1^2 + S_2^2}{D_2^2} \quad (۳)$$

$$\eta = \frac{\sqrt{|D_1 S_2| - |S_1 D_2|}}{|D_2|} \quad (۴)$$

$$\mu = \frac{\sqrt{|D_1 S_2| + |S_1 D_2|}}{|D_2|} \quad (۵)$$

این روابط از مؤلفه‌های تانسور امیدانس به شرح زیر ساخته می‌شوند:  $[C_1, C_2] = \text{Im}(C_2 C_1^*) = \text{Re} C_1 \text{Im} C_2 - \text{Re} C_2 \text{Im} C_1$

$$S_1 = Z_{xx} + Z_{yy}, S_2 = Z_{xy} + Z_{yx}, D_1 = Z_{xx} - Z_{yy}, D_2 = Z_{xy} - Z_{yx}, \quad (۶)$$

که  $C_1$  و  $C_2$  معرف دو عدد مختلط دلخواه  $Z_{ij}$  ( $i, j = x, y$ ) معرف مؤلفه‌ای از تانسور امیدانس است. پارامترهای معرفی شده در روابط (۲) تا (۶) از نسبت مؤلفه‌های تانسور امیدانس محاسبه شده‌اند و فاقد بعد هستند. این پارامترها با چرخش محورهای دستگاه مختصاتی در صفحه افق تغییر نمی‌کنند (سیمپسون و بار، ۲۰۰۵) و به همین علت ناوردهای چرخشی خوانده می‌شوند. هنگامی که ساختار منطقه‌ای تنها یک‌بعدی یا دوبعدی باشد، تانسور امیدانس پادقطری است و مؤلفه‌های قطر اصلی آن صفر است. مؤلفه‌های قطر فرعی تانسور امیدانس برای ساختار منطقه‌ای یک‌بعدی، برابر و مختلف‌العلامه و برای ساختار منطقه‌ای دوبعدی کاملاً متفاوت

هستند. در ساختار منطقه‌ای سه‌بعدی، همه چهار مؤلفه تانسور امیدانس متفاوت هستند. با این مقدمه،  $k$  که از نسبت بزرگی‌های مجموع مؤلفه‌های قطر اصلی به تفاضل مؤلفه‌های قطر فرعی تانسور امیدانس محاسبه می‌شود (رابطه ۲)، عدم تقارن تانسور امیدانس اندازه‌گیری شده را می‌سنجد و در ساختارهای منطقه‌ای یک‌بعدی و دوبعدی، مقدار چشمداشتی آن صفر است. پارامتر  $\Sigma$  (رابطه ۳) نیز از بزرگی مؤلفه‌های تانسور امیدانس محاسبه می‌شود و اگر ساختار منطقه‌ای یک‌بعدی باشد، مقدار آن صفر است. عملگر براکت معرفی شده طبق رابطه (۶) اختلاف فاز بین دو عدد مختلط  $C_1$  و  $C_2$  را می‌سنجد. با این تعریف اگر ساختار منطقه یک‌بعدی باشد و هر چهار مؤلفه تانسور امیدانس هم‌فاز باشند، پارامتر  $\mu$  (رابطه ۵) صفر است و در صورت دوبعدی بودن ساختار منطقه، مؤلفه‌های ستونی تانسور امیدانس هم‌فازند و پارامتر  $\eta$  (رابطه ۴) صفر است.

طبقه‌بندی ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه نصرآباد با محاسبه این پارامترها با استفاده از داده‌های MT این منطقه انجام شده است. شکل ۴ شاخص‌های تحلیل بعدیت (پارامترهای اسکيو) محاسبه شده برای چند ایستگاه از این مجموعه داده را نشان می‌دهد. اسکيوهای  $\kappa$  و  $\Sigma$  به علت وابسته بودن به بزرگی مؤلفه‌های قطر اصلی و فرعی تانسور امیدانس، هم‌زمان از آثار اعوجاج گالوانی و بی‌هنجاری‌های القایی بزرگ مقیاس متأثرند، اما اسکيو حساس به فاز  $\eta$  و نیز شاخص یک‌بعدی بودن ساختار ( $\mu$ ) به اختلاف فاز مؤلفه‌های تانسور امیدانس وابسته‌اند و به همین علت عاری از آثار اعوجاجی هستند. مقادیر آستانه‌ای که به پارامترهای  $\mu$  و  $\eta$  نسبت داده می‌شود، به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۰/۳ است. مقادیر کمتر از ۰/۱ پارامتر  $\mu$  نشان‌دهنده وجود ساختار القاگر یک‌بعدی است و مقادیر کمتر از ۰/۳ پارامتر  $\eta$  شرط لازم (و نه کافی) برای

شده‌اند. با استفاده از این ناورداها بدون هیچ‌گونه فرض اولیه‌ای درباره ساختار منطقه و تنها از صفر شدن ناورداها می‌توان بعدیت ساختار منطقه‌ای و آثار اعوجاجی مخدوش‌کننده پاسخ این ساختارها را طبقه‌بندی کرد.  $I_1$  و  $I_2$  ناورداهای بنیادین و غیرصفری هستند که از آنها برای بهنجارسازی بزرگی سایر ناورداها به مقدار یک استفاده می‌شود. به همین علت بعد  $I_1$  و  $I_2$  همانند بعد امیدانس است، اما سایر ناورداها بی‌بعد هستند. اگر غیر از  $I_1$  و  $I_2$  سایر ناورداهای  $I_3$  تا  $I_7$  محاسبه‌شده از روی اندازه‌گیری‌ها کوچک و نزدیک به صفر باشند، ساختار منطقه‌ای یک‌بعدی است و توابع پاسخ MT آن را می‌توان از روی ناورداهای  $I_1$  و  $I_2$  محاسبه کرد. در صورتی که غیر از  $I_1$  و  $I_2$  مقادیر  $I_3$  و  $I_4$  نیز درخور توجه باشند، ساختار منطقه‌ای دوبعدی است. مقادیر غیرصفر ناورداهای  $I_5$  و  $I_6$  معرف وجود ساختار منطقه‌ای دوبعدی به همراه سطوح مختلف اثرهای اعوجاج گالوانی است. در نهایت، اگر  $I_7$  محاسبه‌شده از روی اندازه‌گیری‌ها صفر نباشد، ساختار منطقه‌ای سه‌بعدی است. Q نیز ناورداي چرخشی امیدانسی است که برخلاف ناورداهای  $I_1$  تا  $I_7$  مستقل نیست و برحسب سایر ناورداها محاسبه می‌شود. اگر مقدار محاسبه‌شده این پارامتر بسیار کوچک و نزدیک به صفر باشد، مقدار  $I_7$  نامعین می‌شود و از آن در تحلیل بعدیت داده‌ها نمی‌توان استفاده کرد (ویور و همکاران، ۲۰۰۰ و مارتی و همکاران، ۲۰۰۹).

مارتی و همکاران (۲۰۰۹) برنامه WALDIM را بر مبنای ناورداهای یادشده تدوین کردند. ویژگی برجسته این برنامه لحاظ کردن خطای امیدانس‌های اندازه‌گیری‌شده در تخمین ناورداهای چرخشی، خطای آنها و در نهایت، تحلیل بعدیت داده‌ها است. این تحلیل‌ها با در نظر گرفتن مقادیر آستانه‌ای متفاوت برای ناورداها انجام شد. در مورد داده‌های نصرآباد،

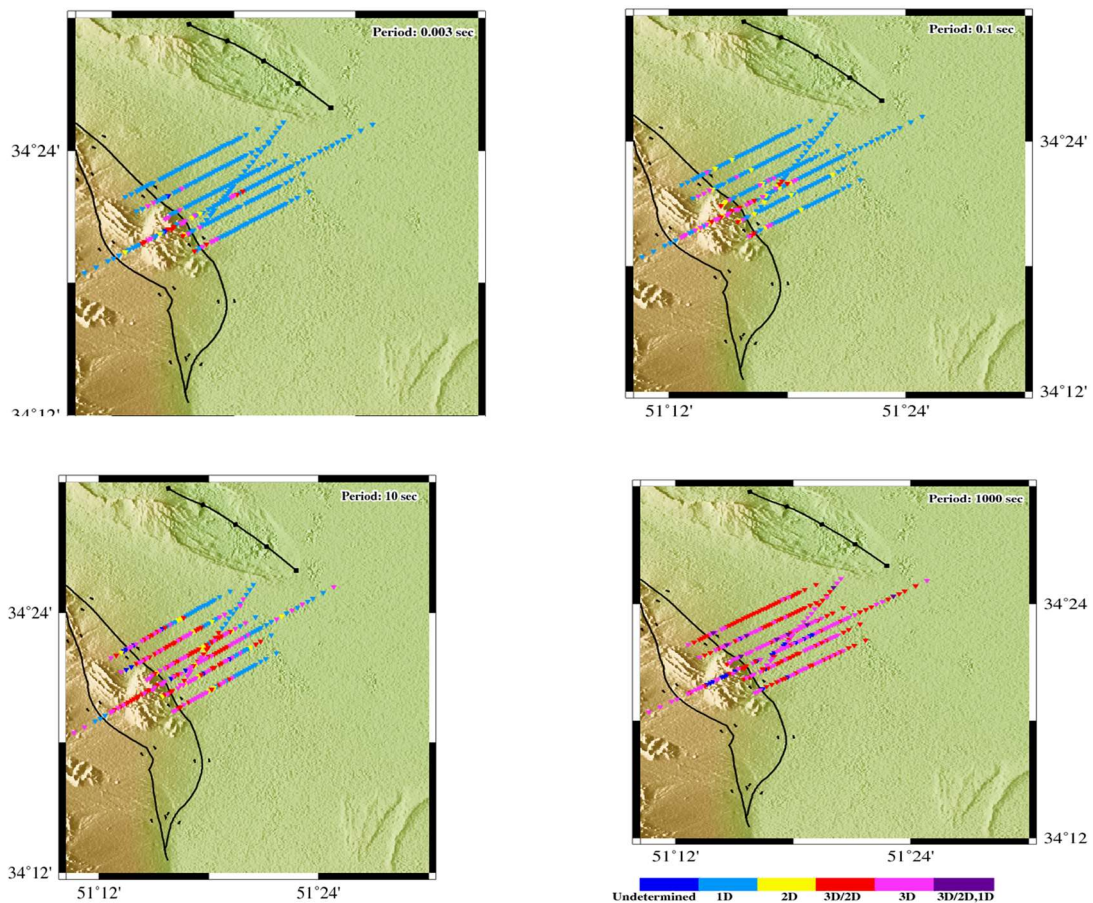
ساختار منطقه‌ای دوبعدی است (سیمپسون و بار، ۲۰۰۵). ناورداهای نمایش‌داده‌شده در شکل ۴ روند افزایشی این پارامترها را با افزایش دوره تناوب نشان می‌دهند. شبه‌مقاطع مقادیر اسکيو  $\mu$  (رابطه ۵) و توزیع آماری مقادیر اسکيو حساس به فاز  $\eta$  (رابطه ۴) که برای کل مجموعه داده‌های MT ثبت‌شده محاسبه شده است، به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند. در اغلب دوره تناوب‌ها مقادیر اسکيو  $\mu$  بیشتر از حد آستانه‌ای آن (شکل ۶) است، درحالی که تحلیل آماری مقادیر اسکيو  $\eta$  برای پروفیل‌های S، P28، P25، P23، P21، P18 و P15 نشان می‌دهد این پارامتر به ترتیب در ۹۰٪، ۹۲٪، ۹۵٪، ۹۸٪، ۹۷٪/۵٪ و ۹۵٪ و ۹۸٪ از نقاط داده کمتر از حد آستانه‌ای آن (شکل ۵) است. این واقعیت نشان می‌دهد ساختار منطقه‌ای بیش از آنکه یک‌بعدی یا سه‌بعدی باشد، دوبعدی است. همچنین افزایش مقادیر این ناورداها در دوره تناوب‌های بلند را بیشتر از آنکه بتوان ناشی از اثرهای القایی سه‌بعدی در نظر گرفت، به‌طور عمده به اثرهای اعوجاج گالوانی می‌توان نسبت داد.

## ۲-۱-۴ تحلیل داده‌های MT با استفاده از ناورداهای چرخشی WAL

همان‌گونه که بردار با اندازه و جهت مشخص می‌شود، تانسور مرتبه دوم را نیز می‌توان به صورت کلی با مجموعه‌ای از ناورداهای چرخشی سرشت‌نمایی کرد. چون هر تابعی از این ناورداها، مجدداً یک ناورداي چرخشی می‌سازد، روش‌های متنوعی برای تعریف ناورداهای چرخشی وجود دارد. کامل‌ترین مجموعه از ناورداهای چرخشی تانسور امیدانس را ویور و همکاران (۲۰۰۰) ارائه داده‌اند. این مجموعه حاوی هفت پارامتر مستقل ( $I_1$  تا  $I_7$ ) و یک پارامتر وابسته (Q) است که از بخش‌های حقیقی و موهومی مؤلفه‌های امیدانس محاسبه

( $<10s$ ) تأیید می‌کند. این در حالی است که با افزایش دوره تناوب، پیچیدگی ساختار منطقه بیشتر می‌شود؛ یعنی ساختار منطقه یا به صورت برهم‌نهمی از ساختارهای محلی و منطقه‌ای به ترتیب سه‌بعدی و دوبعدی (سه‌بعدی/دوبعدی) است یا به طور کلی سه‌بعدی است.

پایدارترین پاسخها به ازاء مقادیر آستانه‌ای  $0.1$  و  $0.15$  به ترتیب برای ناوردهای  $I_1$  تا  $I_7$  و ناوردای  $Q$  حاصل شدند. در شکل ۷ نتایج اعمال این روش برای محدوده‌های مختلف دوره تناوب نشان داده شده است. این نتایج وجود ساختار منطقه‌ای یک‌بعدی یا دوبعدی را در دوره تناوب‌های کوتاه



شکل ۷. نتایج تحلیل بعدیت داده‌ها با استفاده از ناوردهای WAL در دوره تناوب‌های مختلف.

الکتریکی منطقه به کار گرفته می‌شود. در این روش اطلاعات فازی موجود در تانسور امپدانس از روی بخش‌های حقیقی (X) و موهومی (Y) تانسور امپدانس ساخته می‌شود:

## ۲-۴ ناوردهای مختصاتی تانسور فاز

در گام بعد، رویکرد تانسور فاز (کالدول و همکاران، ۲۰۰۴) برای تحلیل بعدیت و جهت‌نمایی ساختار هدایت ویژه

P15, P18, P21, P23, P25, P28 نشان می‌دهد به ترتیب ۸۷٪، ۹۳٪، ۸۷٪، ۸۶٪، ۷۶٪، ۷۹٪ و ۷۲٪ این داده‌ها کمتر از مقدار آستانه ۳° هستند. علاوه بر این هماهنگی با نتایج سایر پارامترهای اسکيو، پیچیدگی ساختار هدایت ویژه الکتریکی در بخش جنوب غربی پروفیل بیشتر از بخش شمال شرقی آن است.

### ۵ روند ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه‌ای

تحلیل‌های انجام‌شده در بخش قبل، بعدیت ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه‌ای را برهم‌نهی از ساختار بزرگ‌مقیاس دوبعدی و ناهمگنی‌های محلی سه‌بعدی پیشنهاد دادند. در ادامه، رویکرد تانسور فاز به کار گرفته می‌شود تا روند این ساختار منطقه‌ای تخمین زده شود. با در نظر گرفتن روابط (۷) تا (۹) روند ساختار منطقه از روی جهت‌گیری محورهای اصلی تانسور فاز طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود (بوکر، ۲۰۱۴):

$$\theta_{\text{ellipse}} = \alpha - \frac{\Psi}{2}, \alpha = \frac{1}{2} \text{tg}^{-1} \left( \frac{\Phi_{12} + \Phi_{21}}{\Phi_{11} - \Phi_{22}} \right) \quad (10)$$

شکل ۹ نتایج تحلیل روند ساختار منطقه با استفاده از این روش را برای هفت پروفیل از داده‌های MT در منطقه نصرآباد کاشان نشان می‌دهد. براساس این نتایج، زوایای روند تخمین‌زده‌شده برای هفت پروفیل مختلف این منطقه کاملاً سازگار و هماهنگ هستند. این شکل‌ها، زوایای روند تخمین‌زده‌شده را برای سه محدوده دوره تناوب‌های کمتر از یک ثانیه، دوره تناوب‌های بین ۱ تا ۲۰۰ ثانیه و دوره تناوب‌های بلند بین ۲۰۰ تا ۲۵۶۰ ثانیه نشان می‌دهند. در این سه محدوده، زوایای روند تخمین‌زده‌شده کاملاً متفاوت هستند. از آنجا که محدوده نمونه‌برداری میدان‌های EM (شعاع کره القا) بسیار کوچک است، در کوتاه‌ترین دوره تناوب‌ها (کوچک‌تر از یک ثانیه) این میدان‌ها به‌طور عمده متأثر از

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X} + \mathbf{IY}, \Phi = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ویژگی برجسته این تانسور آن است که مؤلفه‌های آن عاری از آثار اعوجاج گالوانی (بیشتر ناشی از ساختارهای رسانای محلی تفکیک‌ناپذیر) هستند. این تابع پاسخ را مشابه با هر تانسور حقیقی و دوبعدی دیگر می‌توان برحسب سه ناوردای مختصاتی  $(\Psi, \Phi_{\min}, \Phi_{\max})$  و یک جهت  $(\theta_{\text{ellipse}})$  سرشت‌نمایی کرد (کالدول و همکاران، ۲۰۰۴ و بوکر، ۲۰۱۴):

$$\Phi = \mathbf{R}^{-1}(\theta_{\text{ellipse}}) \begin{bmatrix} \Phi_a & 0 \\ 0 & \Phi_b \end{bmatrix} \mathbf{R}(\Psi) \mathbf{R}(\theta_{\text{ellipse}}) \quad (8)$$

در این رابطه  $\Phi_a$  و  $\Phi_b$  مقادیر اصلی تانسور فاز و  $\mathbf{R}$  ماتریس چرخش هستند.  $\Psi (=2\beta)$  معیاری از عدم تقارن تانسور فاز (اسکیو تانسور فاز یا زاویه اسکيو  $\beta$ ) است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

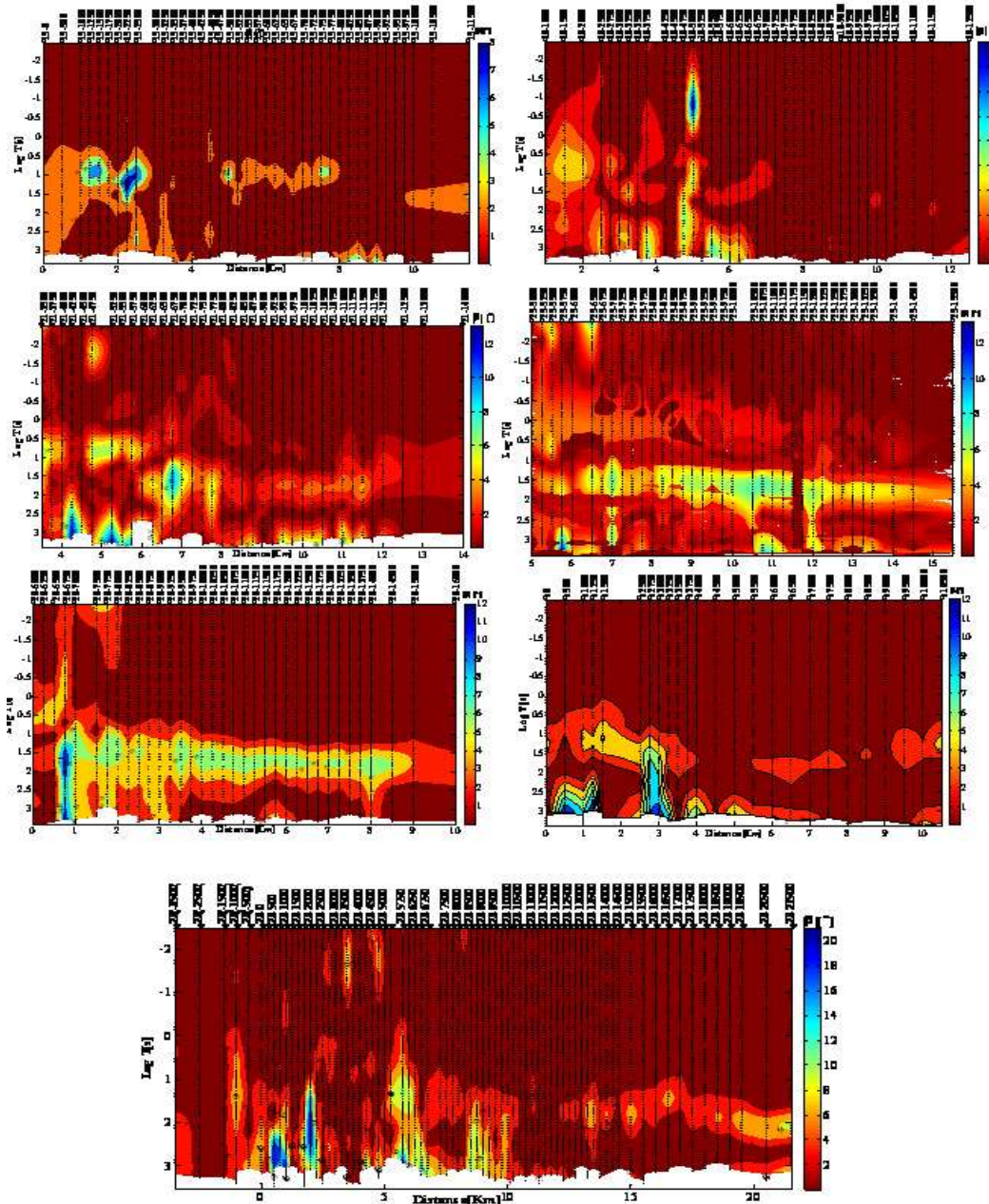
$$\Psi = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\Phi_{12} - \Phi_{21}}{\Phi_{11} + \Phi_{22}} \right) \quad (9)$$

بر فراز ساختار یک‌بعدی، تانسور فاز مضرب حقیقی از ماتریس همانی است. مقدار این مضرب برابر با تانژانت فاز امپدانس ساختار یک‌بعدی است. بر فراز ساختار دوبعدی، مقدار عدم تقارن تانسور فاز صفر است ( $\Psi=0$ ) و مقادیر اصلی  $(\Phi_a, \Phi_b)$  برابر با تانژانت فاز قطبش‌های متعامد TE و TM داده‌های امپدانس هستند. بر فراز ساختار سه‌بعدی، تانسور فاز نامتقارن و اسکيو تانسور فاز غیر صفر است (بوکر، ۲۰۱۴).

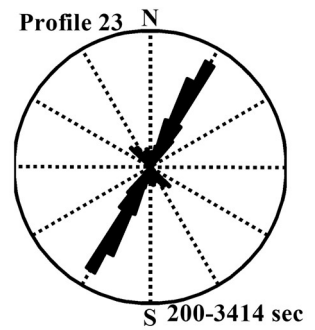
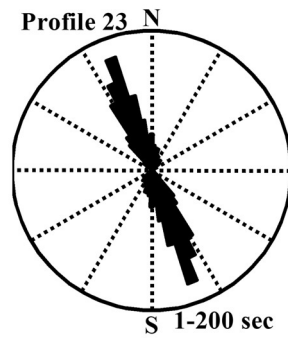
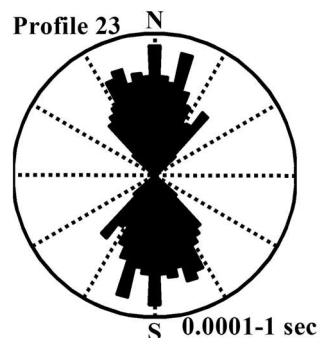
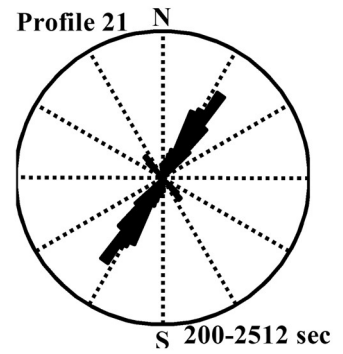
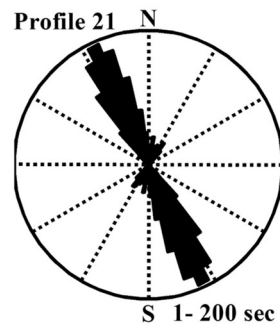
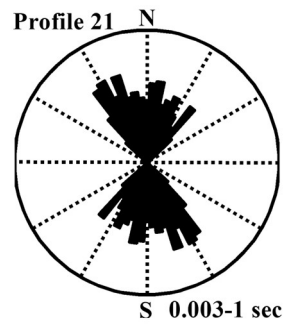
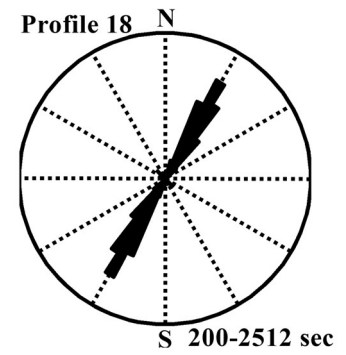
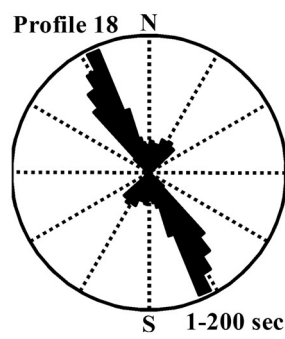
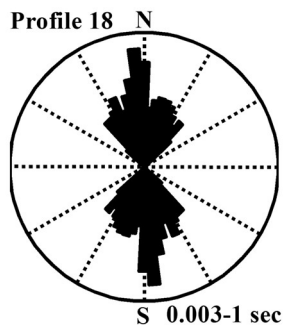
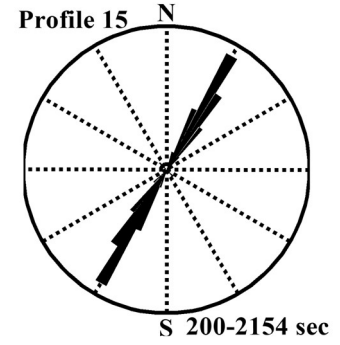
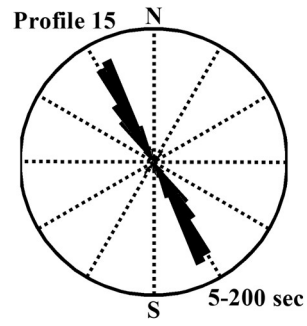
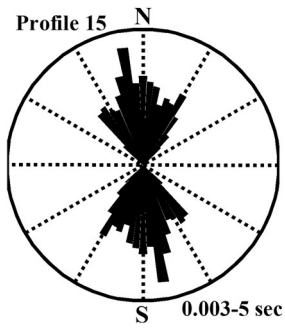
شکل ۸ نتایج تحلیل بعدیت با استفاده از روش تانسور فاز را برای داده‌های هفت پروفیل منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقدار آستانه زاویه اسکيو  $\beta$  برابر ۳° است، به‌گونه‌ای که مقادیر کوچک‌تر و بزرگ‌تر این حد آستانه دلیل بر وجود القای الکترومغناطیسی حائز اهمیت است که با یک ساختار منطقه‌ای به ترتیب دوبعدی یا سه‌بعدی ایجاد شده است. تحلیل آمار اسکيو  $\beta$  محاسبه‌شده برای پروفیل‌های S،

دوره تناوب، این زوایای روند تخمین زده شده نظم و ترتیب یافته و ابتدا در محدوده دوره تناوبی میانی بین ۱ تا ۲۰۰ ثانیه در راستای NW-SE و سپس در بلندترین دوره تناوبها

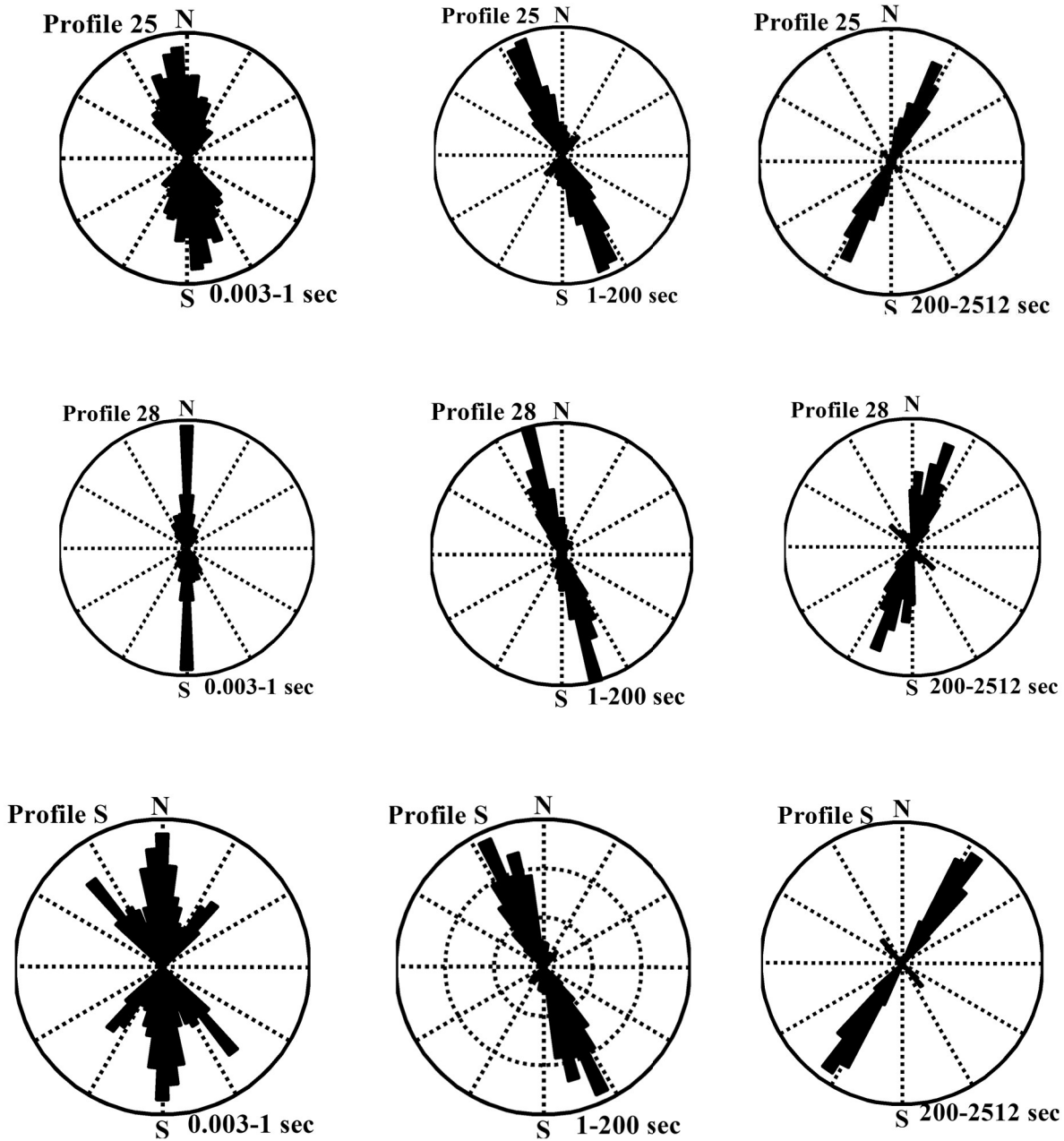
ساختارهای کوچک مقیاس محلی هستند؛ بنابراین در این محدوده دوره تناوبی زوایای روند تخمین زده شده نامنظم و متفرق هستند و از الگوی مشخصی پیروی نمی کنند. با افزایش



شکل ۸. شبه‌مقطع مقادیر اسکینو تانسور فاز محاسبه شده از داده‌های اِمپدانس برداشت شده در امتداد هفت پروفیل در منطقه نصرآباد کاشان.







شکل ۹. نمودار گل سرخی زوایای روند تخمین زده شده برای ساختار منطقه با اعمال روش تانسور فاز بر داده‌های امپدانسی هفت پروفیل مختلف در منطقه نصرآباد کاشان.

زاویه روند محاسبه شده با روش تانسور فاز حاوی یک ابهام  $90^\circ$  است؛ زیرا مشخص نیست در رابطه (۹) کدام یک از

(بزرگ تر از  $200^\circ$  ثانیه) در راستای NE-SW جهت گیری کرده‌اند.

آن برای تعیین جهت روند ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه می توان استفاده کرد. شکل ۱۰ بردارهای القای حقیقی مربوط به مجموعه داده MT نصرآباد را در دو دوره تناوب ۵۴ ثانیه و ۱۳۵۹ ثانیه نشان می دهد. این توابع پاسخ در دوره تناوب های کمتر از ۱۰ ثانیه بسیار کوچک هستند (کمتر از مقدار خطای داده ها) و جهت گیری در هم ریخته ای دارند. در دوره تناوب های میانی بیشتر از ۱۰ ثانیه این بردارها در سرتاسر پروفیل ابتدا رفتار دوگانه ای نشان می دهند و سپس در بلندترین دوره تناوب ها راستای همگی NE-SW است و در راستای عمود بر جهت چین خوردگی زاگرس سوگیری کرده اند که مهم ترین عامل ژئودینامیکی کنترل کننده ساختارهای زمین شناسی در این منطقه محسوب می شود. رفتار دوگانه بردارهای القای دوره تناوب های میانی را به عمق نفوذ مختلف میدان های EM در قسمت های مختلف این پروفیل ها می توان نسبت داد. قسمت شمال شرق این پروفیل ها بیشتر بر رسوبات عهد حاضر (رسانای الکتریکی) واقع است. در این قسمت، میدان های EM در دوره تناوب های میانی اغلب با رولایه رسانا غربال شده اند و عمق نفوذ کمتری دارند؛ بنابراین از ساختارهای سطحی تر (گسل های آب شیرین و ده نار) متأثرند. در قسمت جنوب غرب پروفیل ها که بر فراز دیاپرهای نمکی شماره ۴ و ۵ نصرآباد گسترده شده است، میدان های EM عمق نفوذ بیشتری دارند و از کمربند کوهزایی زاگرس (ZFTB) متأثرند.

فازهای  $\Phi_a$  یا  $\Phi_b$  به قطبش های TE یا TM مربوط هستند. در عمل، این ابهام با استفاده از داده های میدان مغناطیسی قائم و اطلاعات زمین شناسی منطقه برطرف می شود (کالدول و همکاران، ۲۰۰۴).

## ۶ توابع پاسخ ژئومغناطیسی

در مواجهه با یک همبری جانبی هدایت ویژه الکتریکی، میدان مغناطیسی القاشده در زمین از وضعیت اولیه آن که در صفحه افق واقع است، منحرف شده و مؤلفه قائمی پیدا می کند که به شکل زیر به مؤلفه های افقی وابسته است (چیو و جونز، ۲۰۱۲):

$$H_z(T) = W_x(T) H_x(T) + W_y(T) H_y(T) \quad (11)$$

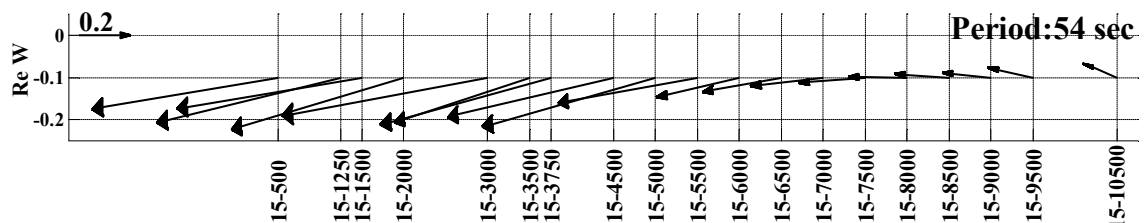
تابع پاسخ ژئومغناطیسی  $W(W_x, W_y)$  تابعی مختلط است و بخش های حقیقی و موهومی آن عبارت اند از:

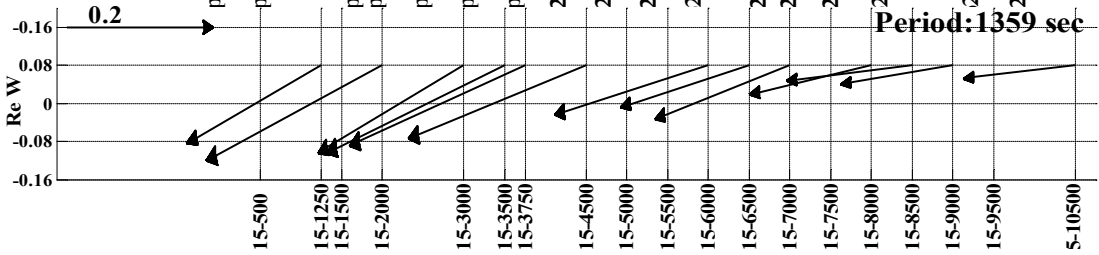
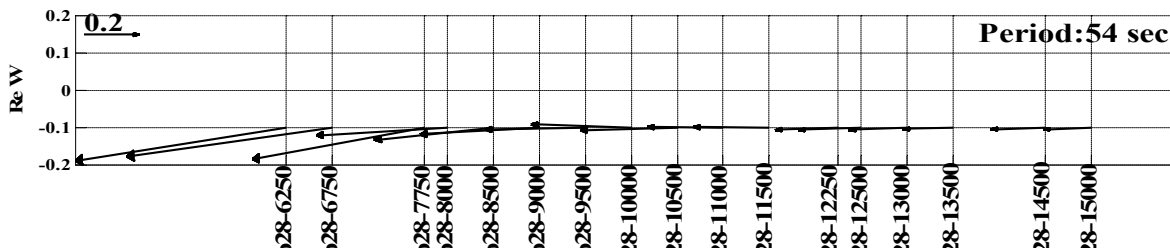
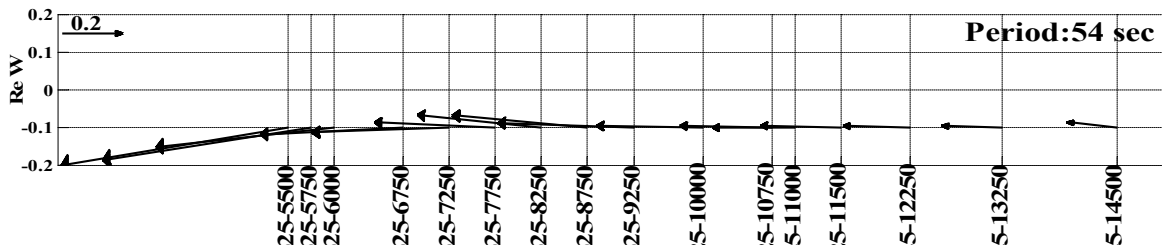
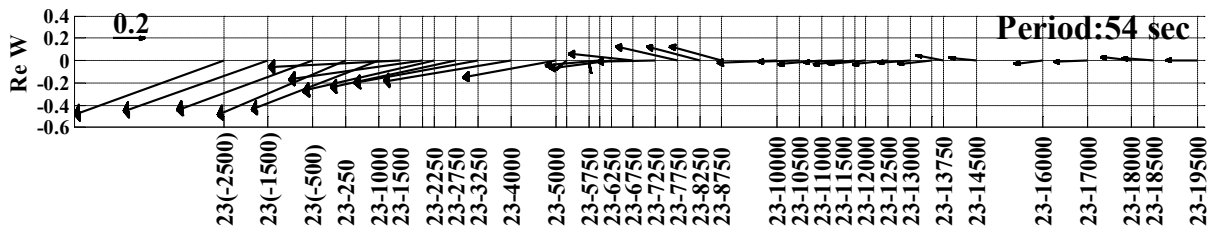
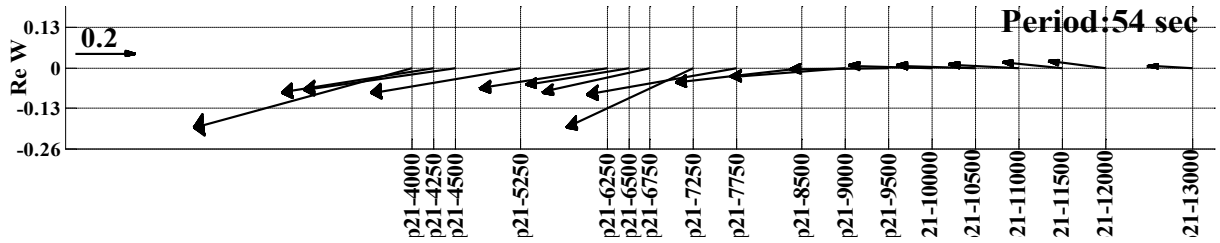
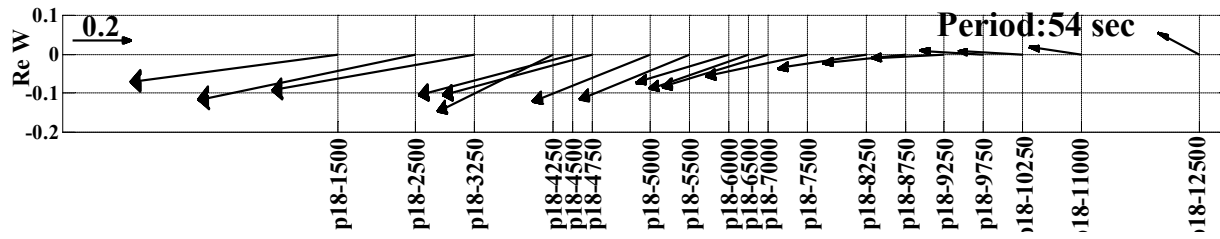
$$\vec{P}(T) = Re[W_x(T)]\hat{i} + Re[W_y(T)]\hat{j} \quad (12)$$

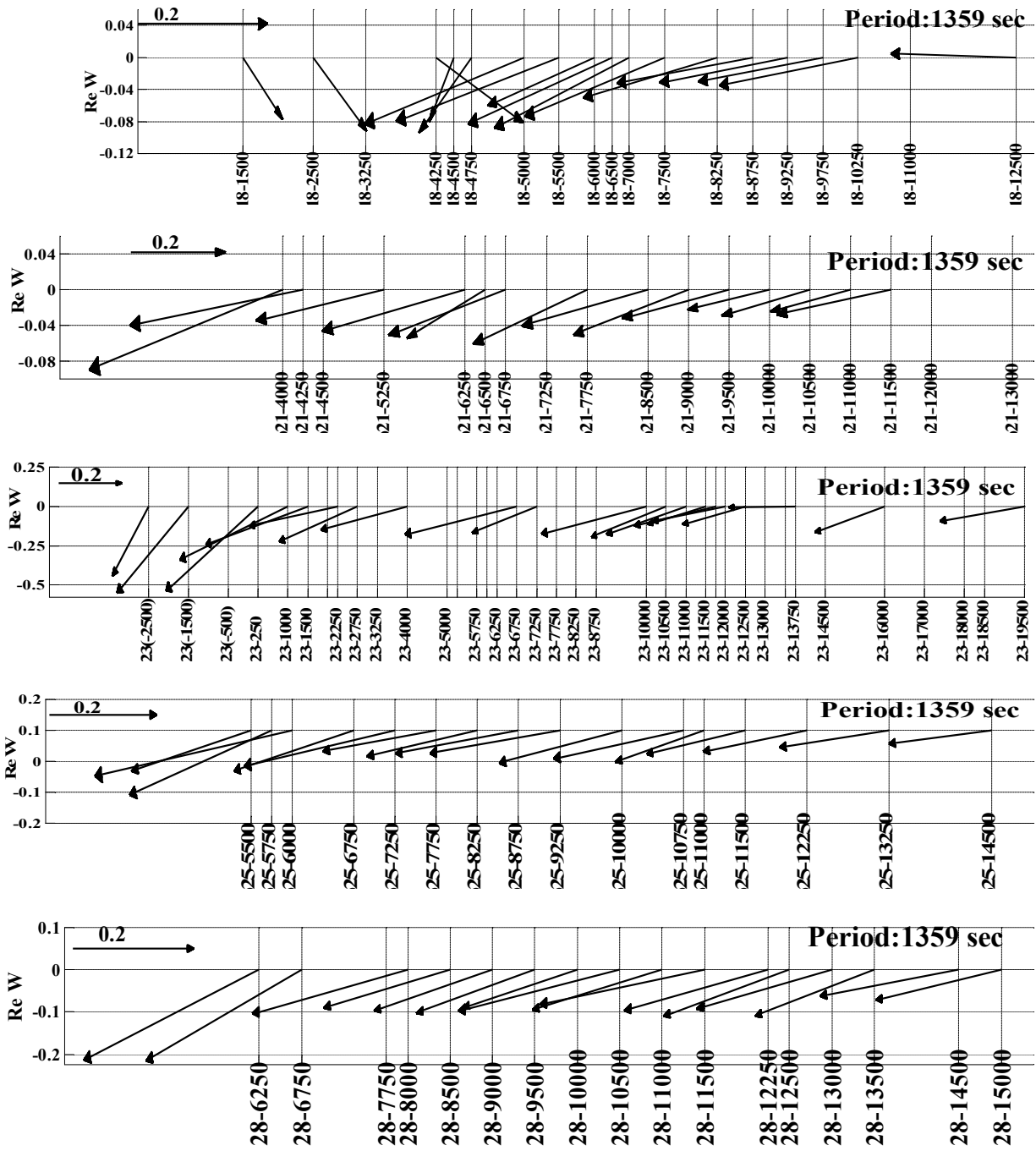
$$\vec{Q}(T) = Im[W_x(T)]\hat{i} + Im[W_y(T)]\hat{j} \quad (13)$$

که  $\hat{i}$  و  $\hat{j}$  بردارهای یکه دستگاه مختصات دکارتی هستند. به علت سهولت در نتیجه گیری، معمولاً بردارهای القای حقیقی تحلیل و نمایش داده می شوند.

جریان های تلوریک مربوط به قطبش TE میدان های EM به موازات روند ساختارهای هدایت ویژه الکتریکی شارش می یابند؛ بنابراین مؤلفه های قائم میدان مغناطیسی القایی آنها عمود بر روند ساختار منطقه جهت گیری می کند و از اطلاعات







شکل ۱۰. بردارهای القای حقیقی اندازه‌گیری شده در دو دوره تناوب (الف) ۵۴ ثانیه (ب) ۱۳۵۹ ثانیه در ایستگاه‌های مختلف منطقه نصرآباد کاشان.

## ۷ نتیجه‌گیری

تحلیل تمام و کمال مجموعه‌ای حجیم از داده‌های MT به منظور دست‌یابی به تصویری منسجم از ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه، چالش برانگیز است. در این پژوهش به عنوان اولین گام در تحلیل و تفسیر مجموعه‌ای حجیم از داده‌های MT برداشت‌شده در منطقه نصرآباد کاشان، مطالعه کاملی از بعدیت و سوگیری ساختار منطقه‌ای هدایت ویژه الکتریکی انجام شده است. این مجموعه داده مرکب از مقادیر امیدانس و تیپر وابسته فرکانسی است که در ۲۸۴ ایستگاه واقع در امتداد هفت پروفیل با راستای NE-SW ثبت شده‌اند. با به کارگیری روش‌های مختلف تحلیل بعدیت برای داده‌های امیدانس پروفیل‌های مختلف، نتایجی همخوان به دست آمد. در رویکرد کلان‌مقیاس، ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه در قسمت شمال شرق این پروفیل‌ها پیچیدگی کمتری نسبت به جنوب غرب دارد. تحلیل داده‌های امیدانس با استفاده از ناوردهای چرخشی WAL با لحاظ کردن مقادیر خطای داده‌ها در محاسبه آنها و نیز در نظر گرفتن مقادیر آستانه‌ای متفاوت برای ناوردها انجام گرفت. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد در قسمت شمال شرق پروفیل‌ها تا دوره تناوب ۱۰ ثانیه شاهد وجود ساختار منطقه‌ای یک‌بعدی هستیم و حوزه رسوبی این منطقه در نتایج تحلیل بعدیت به صورت ساختار یک‌بعدی نمود یافته است. در دوره تناوب‌های بیشتر، ساختار منطقه پیچیدگی بیشتری دارد و می‌توان آن را به صورت برهم‌نهی از ساختارهای دوبعدی/سه‌بعدی در نظر گرفت. کاربرد روش تانسور فاز برای تعیین راستای روند ساختار منطقه و نیز بررسی بردارهای القا، الگوی همواری از روند ساختار در سرتاسر منطقه نشان می‌دهد که می‌توان آن را به واحدهای زمین‌شناسی منطقه نسبت داد. آنچه در مجموع از اعمال روش‌های مختلف بر داده‌های پروفیل‌های متفاوت حاصل

شده است نشان می‌دهد ساختار هدایت ویژه الکتریکی در محدوده نصرآباد کاشان در مقیاس کلان و منطقه‌ای دوبعدی است، اما پاسخ‌های MT آن با اثرهای غیرالقایی ناشی از توده‌های رسانای کوچک‌مقیاس پراکنده در پوسته بالایی اعوجاج یافته‌اند؛ بنابراین در گام‌های بعدی تفسیر این مجموعه داده، استفاده از رویکرد دوبعدی برای مدل‌سازی‌ها کافی به نظر می‌رسد، ولی به منظور ارتقاء مدل‌های قبلی و دست‌یابی به مدل‌های دقیق‌تر از ساختار منطقه، ضروری است این آثار اعوجاجی از داده‌ها حذف شوند.

## منابع

- Babaahmadi, A., Safaei, H., Yassaghi, A., Vafa, H., Naeimi, A., Madanipour, S., and Ahmadi, M., 2010, A study of Quaternary structures in the Qom region, West Central Iran: *Journal of Geodynamics*, **50**(5), 355-367.
- Baikpour, S., Motiei, H., and Najafzadeh, K., 2016, Geological and geophysical study of salt diapirs for hazardous waste disposal: *International Journal of Environmental Science and Technology*, **13**, 1951-1972.
- Booker, J. R., 2014, The magnetotelluric phase tensor: a critical review: *Surveys in Geophysics*, **35**, 7-40.
- Caldwell, T. G., Bibby, H. M., and Brown, C., 2004, The magnetotelluric phase tensor: *Geophysical Journal International*, **158**(2), 457-469.
- Chave, A. D., and Jones, A. G., (eds.), 2012, *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*: Cambridge University Press.
- Jaafari, A., 1963, History and development of the Alborz and Sarajeh fields of Central Iran: 6th World Petroleum Congress.
- Lilley, F. E. M., 1976, Diagrams for magnetotelluric data: *Geophysics*, **41**(4), 766-770.
- Martí, A., Queralt, P., and Ledo, J., 2009, WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor: *Computers & Geosciences*, **35**(12), 2295-2303.
- Moradi, M., Oskooi, B., Pushkarev, P., Smirnov, M.,

- and Esmacili Oghaz, H., 2019, Cooperative inversion of magnetotelluric and seismic data on Shurab diapirs in Central Iran: *Environmental Earth Sciences*, **78**, 1-14.
- Morley, C. K., Kongwung, B., Julapour, A. A., et al., 2009, Structural development of a major late Cenozoic basin and transpressional belt in Central Iran: The Central Basin in the Qom-Saveh area: *Geosphere*, **5**(4), 325-362.
- Oskooi, B., Moradi, M., and Smirnov, M., 2019, Integrated interpretation of seismic and magnetotelluric data on Shurab diapirs in Qom basin, Central Iran: *Acta Geophysica*, **67**, 1071-1090.
- Roosta, H., 2019, Surface deformation over the buried Nasr Abad salt diapir, Central Iran using interferometric synthetic aperture radar data: *International Journal of Remote Sensing*, **40**(22), 8322-8341.
- Simpson, F., and Bahr, K., 2005, *Practical Magnetotellurics*: Cambridge University Press.
- Weaver, J. T., Agarwal, A. K., and Lilley, F. E. M., 2000, Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants: *Geophysical Journal International*, **141**(2), 321-336.
- Zhang, P., Roberts, R. G., and Pedersen, L. B., 1987, Magnetotelluric strike rules: *Geophysics*, **52**(3), 267-278

## Decomposition analysis of a large magnetotelluric dataset from the Nasr-Abad salt diapir, Central Iran

Monsoure Montahaei<sup>1\*</sup>, Mehrdad Sajedi<sup>2</sup>, Elham Zare<sup>2</sup> and Hakim Esmaili Oghaz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Supervisor of hydrocarbour storage projects, Iranian Gas and Engineering development company, Iran

(Received: 23 June 2023, Accepted: 26 September 2023)

### Summary

We investigated an MT dataset composed of 284 broadband ( $10^{-4}$ -3414 sec) MT stations along seven profiles to unravel the electrical properties of sub-surface structures in the Nasr-Abad region, west Central Iran. The region is composed of five Tertiary salt diapirs developed along the Abshirin-Shurab strike-slip fault zone. The MT profiles are extended perpendicular to the general trend of the Zagros orogenic belt (in an SW-NE direction) which is one of the main structural elements controlling regional deformation in the Iranian plateau.

The analysis of impedance data shows that a more complex conductivity structure is expected beneath the SW of the profile. a shallow conductive layer appears throughout the study region which extends to the deeper part beneath the NE of the profile. Furthermore, The Abshirin-Shurab fault significantly influences the apparent resistivity at the SW end of most profiles.

In the next step, we characterize the structural dimensionality of MT data by commonly used Bahr rotational invariants ( $\kappa$ ,  $\mu$ ,  $\eta$ ,  $\Sigma$ ) and the phase tensor skew angle ( $\beta$ ). The phase-sensitive skew ( $\eta$ ), the regional 1-D indicator ( $\mu$ ), and  $\beta$  skew angle depend on the phase information inherent in the impedance tensor. Therefore, they are affected primarily by large-scale induction anomalies and are immune to low-frequency galvanic distortions. The thresholds assigned for  $\mu$ ,  $\eta$ , and  $\beta$  are 0.1, 0.3, and  $3^\circ$ , respectively. The skew values calculated from the Nasr-Abad MT data set suggest that the regional conductivity structure is 2D rather than 3D or 1D as the calculated  $\eta$  remains below 0.3 and  $\mu$  above 0.1. The appropriate category of data is therefore, responses from a regional 2D structure contaminated by galvanic distortion effects.

We applied the phase tensor analysis for regional strike determination. It does not require any assumption about regional conductivity structure, and its results are not susceptible to galvanic distortion. The method determines the electrical strike from the axis direction of phase tensor ellipses. The analysis reveals a scatter pattern of strikes at short periods (<1 sec) due to the small sampling area of EM fields at these periods. As the period increases an strike azimuth, preferentially aligned N30°W is obtained for the regional geoelectric structure.

**Keywords:** Magnetotelluric, dimensionality analysis, phase tensor, salt diapir, Nasr-Abad

---

\*Corresponding author:

mmontaha@ut.ac.ir