

## تخمین بهینه جهت‌گیری و پاسخ‌های مگنتوتلوریک ساختار منطقه‌ای در نواحی پیچیده زمین‌شناسی (مطالعه موردی: گنبد نمکی نصرآباد)

مهرداد ساجدی<sup>۱</sup> و منصوره منتهایی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷)

### چکیده

گنبدهای نمکی با محیط اطراف خود که عموماً رسوبی است، تقابل هدایت ویژه الکتریکی بالایی دارند و از این نظر اهداف اکتشافی جالب توجهی برای روش‌های مبتنی بر القای الکترومغناطیس (EM) مثل روش مگنتوتلوریک (MT) هستند. اما عوامل مؤثر در فرآیند گنبدزایی نمکی (نیروهای تکتونیکی، خیزش نمک به‌علت شناوری آن، رسوبگذاری، ...) و تعامل آنها با یکدیگر باعث می‌شوند تا چینش زمین‌شناسی در چنین محیط‌هایی پیچیده باشد. اعوجاج میدان‌های EM در این محیط‌های پیچیده باعث می‌شود تا توابع پاسخ مگنتوتلوریک برداشت شده بر فراز آنها مخدوش شوند و بنابراین شاهد رویداد عوارض مصنوعی و آنومالی‌های کاذب در نتایج مدل‌سازی حاصل از آنها باشیم که دست‌یابی به یک تفسیر صحیح از ساختارهای زیرسطحی را غیرممکن می‌سازند. در این پژوهش از تعمیم مک‌نیت-جونز بر روش تجزیه تانسور امیدانس گروم-بیلی (GB) استفاده شده تا از تحلیل یک مجموعه حجیم از داده‌های مگنتوتلوریک (مربوط به ۲۸۴ ایستگاه باند پهن) برداشت شده بر فراز گنبد نمکی نصرآباد (گنبد شماره ۴ از مجموعه گنبدهای نمکی شوراب) در غرب ایران مرکزی به تصویری منسجم و همخوان از ساختار کلی هدایت‌ویژه الکتریکی منطقه‌ای و توابع پاسخ آن دست یافت. این الگوریتم به‌دلیل نوع کمیت‌های آن که مبتنی بر فیزیک مسئله اعوجاج هستند، سطح اعوجاجی مخدوش‌کننده داده‌ها را با دقت ارزیابی کرده و تا حدی اثر آنها را از اندازه‌گیری‌ها حذف می‌کند. همچنین وابستگی تابع هدف تعریف شده در آن به خطای داده‌ها، امکان سنجش دقیق پارامترهای بازیابی شده و تعیین یکتای این پارامترها را فراهم می‌آورد. پارامترهای مدل GB در مورد داده‌های بررسی شده در این پژوهش ابتدا به‌صورت نامقید در بازه‌های پربودی متفاوت و سپس به‌صورت مقید در کل محدوده پربودی اندازه‌گیری‌ها برازش داده شدند تا ارزیابی دقیقی از اعوجاج آلوده کننده داده‌ها به‌دست آید. با برآورد اثرات اعوجاجی و حذف آنها از اندازه‌گیری‌ها نشان داده شد که مؤلفه‌های امیدانسی بازیابی شده به مقادیر مطلوب برای پژوهش‌های دوبعدی نزدیک شده‌اند.

**کلمه‌های کلیدی:** ساختار مقاومت‌ویژه الکتریکی، مگنتوتلوریک، گنبد نمکی، شوراب، ایران مرکزی

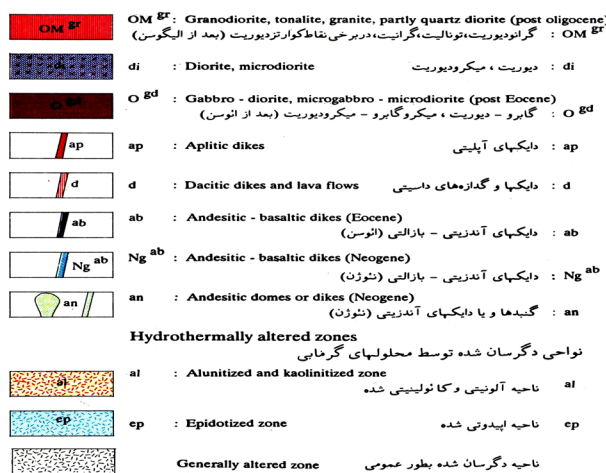
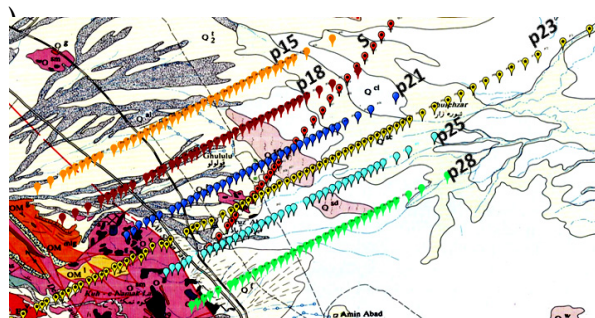
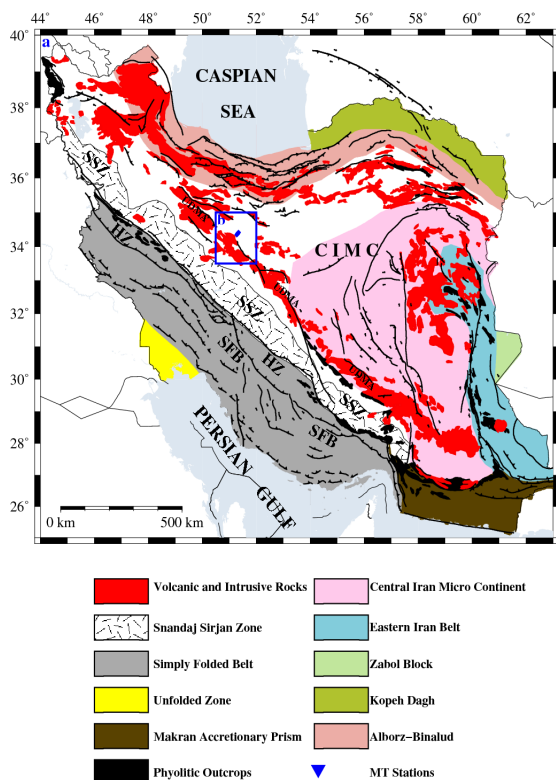
## ۱ مقدمه

اگرچه روش‌های متعددی به منظور شناسایی آثار مخرب اعوجاجی از روی امپدانس‌های اندازه‌گیری شده ( $Z_{obs}$ ) وجود دارند اما در میان آنها روش Groom-Baily (GB) فراگیرترین روش محسوب شده و بینش فیزیکی مضاعفی نسبت به مسئله اعوجاج گالوانی ایجاد می‌کند (چیو و جونز، ۲۰۱۲). اولین مزیت این روش آن است که برخلاف سایر روش‌ها (مثل ناورداهای چرخشی Bahr (سیمپسون و بار، ۲۰۰۵) و WAL (ویور و همکاران، ۲۰۰۰) که صرفاً مبنای ریاضی دارند و شناختی از طبیعت مسئله اعوجاج ارائه نمی‌دهند، روش GB مبتنی بر فیزیک مسئله اعوجاج است. در واقع آثار اعوجاج گالوانی در این روش به دو دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول آثاری هستند که صرفاً دامنه میدان الکتریکی را تغییر می‌دهند و در طی فرآیند تجزیه GB غیرقابل تعیین هستند. اما دسته دوم آثار اعوجاجی هم دامنه و هم فاز میدان الکتریکی را تغییر می‌دهند. این دسته از آثار با اعمال روش GB روی داده‌ها شناسائی شده و از آنها حذف می‌شوند (چیو و جونز، ۲۰۱۲). دومین تفاوت عمده روش GB با دیگر روش‌های تحلیل اعوجاج آن است که با استفاده از یک الگوریتم وارون‌سازی (مبتنی بر کمینه‌سازی مجموع مربعات عدم برازش‌ها) مدل اعوجاجی حاوی هفت پارامتر را بر امپدانس‌های اندازه‌گیری شده برازش می‌دهد. این در حالی است که سایر روش‌ها صرفاً سطح آثار اعوجاجی مخدوش‌کننده اندازه‌گیری‌ها را با بازآرایی هشت عدد موجود در تانسور امپدانس اندازه‌گیری برآورد کرده و قادر به حذف این آثار از روی پاسخ‌های القایی ساختار منطقه نیستند (مکنیس و جونز ۲۰۰۱). سومین مزیت روش GB انجام فرآیند تحلیل داده‌ها در یک چارچوب آماری قرص و محکم است که باعث می‌شود پارامترهای این مدل با خطای مشخص از روی انحراف معیار امپدانس‌های اندازه‌گیری شده تعیین شوند. نهایتاً چهارمین تفاوت اصلی

روش تجزیه GB یکتا بودن پارامترهای حاصل از این روش تجزیه است. در واقع تابع هدفی که در طی اعمال این روش کمینه می‌شود به خطای اندازه‌گیری‌ها وابسته است در نتیجه دقت محاسبات نسبت به سایر روش‌های تحلیل بعدیت و اعوجاج افزایش یافته و پارامترهای مدل اعوجاج GB به‌طور یکتا تعیین می‌شوند (اشپرت و همکاران، ۲۰۱۴؛ ادنونجی و همکاران، ۲۰۱۵؛ محلاتی و منتهایی ۲۰۱۹).

در کلیه روش‌های تحلیل اعوجاج و بعدیت داده‌های MT روند ساختار منطقه پارامتر مجهولی است که حاوی اطلاعات راجع به راستای جریان الکتریکی القا شده در ساختار دوبعدی منطقه است. تعیین این پارامتر با روش‌های مختلف نشان داده است که این پارامتر در پیوندهای مختلف یک مجموعه داده عموماً ناپایدار است چراکه این جهت نسبت به چگونگی شارش جریان‌های تلوریک بسیار حساس است. رویکرد آماری که در تعیین پارامترهای مدل تجزیه GB وجود دارد این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان روند ساختار بازبایی شده در این مدل و خطای آن را با دقت ارزیابی کرد (چیو و جونز، ۲۰۱۲).

مجموعه داده MT بررسی شده در این پژوهش به ۲۸۴ ایستگاه باند پهن MT مربوط است که در امتداد هفت پروفیل در غرب ایران مرکزی در منطقه نصر آباد کاشان و بر فراز تراشکاف‌های نمکی شوراب توزیع شده‌اند. داده‌ها توسط دستگاه V5-MTU ساخت شرکت Phoenix-Geophysics که امکان ثبت مؤلفه‌های میدان الکترومغناطیس در محدوده پربودی (۵/۰۰۰ sec) - (۰/۰۰۰۱) را دارند، انجام شده است. تعداد پنج کانال در این دستگاه به‌طور هم‌زمان سری‌های زمانی مربوط به سه مؤلفه میدان مغناطیسی و دو مؤلفه افقی میدان الکتریکی را ثبت کرده‌اند. آنتن GPS همراه با این دستگاه، اطلاعات مربوط به مختصات جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه‌ها را فراهم



شکل ۱. الف). مد قعنت منطقه نصرآباد در غرب آن مرکز، ب. ۱۹۹۱، نقشه بهینه ها، مهم نکته نک-۱، سه ر. ا. ان (ب) نقشه زمین شناسی منطقه نصرآباد

نواحی تراشکاف نمکی) دست یابی به یک مدل ژئوالکتریکی موثق از زیر سطح زمین مستلزم آن است که روند ساختار منطقه با دقت تعیین شده، آثار اعوجاجی از روی اندازه گیری ها حذف و پاسخ های MT ساختار منطقه با دقت تعیین شوند. بدین منظور در این پژوهش رویکرد تجزیه گروم-بیلی (گروم و بیلی، ۱۹۸۹) که توسط مک نیث و جونز (۲۰۰۱) در قالب کد strike تدوین شده برای تحلیل و مدل سازی کلیه امپدانس ها در همه ایستگاه های اندازه گیری استفاده شده است.

## ۲ زمین شناسی منطقه نصرآباد کاشان

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش در حوزه ایران مرکزی واقع شده است. کوه های البرز در شمال و خرد صفحه

می آورد و به علاوه همزمان سازی این اندازه گیری ها با برداشت های ایستگاه مرجع دور را ممکن می سازد. مدل دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی منطقه در مطالعات قبلی با استفاده از زیرمجموعه ای از این داده ها استخراج شده است (مرادی و همکاران، ۲۰۱۹؛ منتهایی و همکاران، ۲۰۲۴). اما از آنجا که عوامل محیطی درگیر در طی فرآیند گنبدزایی در یک منطقه باعث می شوند تا چپش ساختاری پیچیده ای در آن منطقه شکل گیرد (روبینات و همکاران، ۲۰۱۰)، ضروری است تا از بررسی کلیه داده های اندازه گیری شده اعتبار رویکرد دوبعدی اتخاذ شده در این مدل سازی ها اعتبار سنجی و ضرورت انجام مدل سازی سه بعدی در سرتاسر منطقه مطالعه بررسی شود. بدیهی است که در یک ساختار منطقه ای پیچیده (مثل

پوشیده شده است که بیشتر از گل سنگ، مارن و ماسه سنگ تشکیل شده است (اشتوکلین و ستوده نیا، ۱۹۷۷).

### ۳ روش کار

#### ۱-۳ تئوری مسئله اعوجاج پاسخ‌های MT

نظریه فیزیکی مربوط به مسئله اعوجاج میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ناشی از بارهای الکتریکی موجود بر فصل مشترک محیط‌های مختلف از تقریب شبه ایستای معادلات ماکسول (که با صرف نظر کردن از پارامتر گذردهی الکتریکی همراه است) در یک محیط غیرمغناطیسی (با نفوذپذیری مغناطیسی خلأ) شروع می‌شود. با فرض عدم وجود هرگونه مولد صریح میدان‌های EM در زیر سطح زمین و گسترش نمایی این میدان‌ها در زمان به صورت  $\exp(i\omega t)$ ، معادله حاکم بر گسترش میدان الکتریکی به صورت زیر در می‌آید:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) + i\omega\mu_0\sigma_0\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -i\omega\mu_0\delta(\sigma(\mathbf{r}))\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

که در این رابطه  $\delta(\sigma(\mathbf{r})) = \sigma(\mathbf{r}) - \sigma_0$  و  $\sigma_0$  هدایت ویژه الکتریکی محیط میزبانی است که توده اعوجاج‌گر در آن قرار گرفته است. چیو و اسمیت (۱۹۹۴) با انتگرال‌گیری از طرفین رابطه فوق، استفاده از قانون آمپر در استخراج میدان مغناطیسی و سپس استفاده از تقریب بورن غیرخطی محلی شده در حل انتگرال‌های دو مرحله قبل، روابط زیر را بین مؤلفه‌های افقی میدان‌های EM منطقه‌ای  $(\mathbf{E}_h^0(\mathbf{r}), \mathbf{B}_h^0(\mathbf{r}))$  و میدان‌های اندازه‌گیری شده  $(\mathbf{B}_h(\mathbf{r}), \mathbf{E}_h(\mathbf{r}))$  استخراج کردند:

$$\mathbf{E}_h(\mathbf{r}) = \mathbf{C}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}_h^0(\mathbf{r}) \quad (2)$$

$$\mathbf{B}_h(\mathbf{r}) = \mathbf{B}_h^0(\mathbf{r}) + \mathbf{D}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}_h^0(\mathbf{r}) \quad (3)$$

در این روابط  $\mathbf{C}$  و  $\mathbf{D}$  تانسورهای مرتبه دوم و به ترتیب معرف آثار اعوجاج الکتریکی و مغناطیسی ناشی از بارهای الکتریکی موجود بر مرزها هستند. در نتیجه ارتباط بین تانسور امپدانس پادقطری مربوط به یک ساختار

ایران مرکزی در شرق این حوزه را محصور کرده‌اند. رشته کوه البرز یک کمربند کوهزایی مرکب متشکل از رسوبات نئوژن حاوی نمک است که در طول سنوزوئیک دچار کوتاه شدگی و بالا آمدن شده است (علوی ۱۹۹۶). بیابانهای ایران مرکزی (CI) یکی از مهمترین مناطق زمین ساختی ایران به دلیل پتانسیل حوضه قم و دیابیرهای نمکی در آن است که ساختارهای کاملی از مخازن نفت و ذخایر گاز طبیعی را فراهم می‌کند. در دوره سوم ایران مرکزی، نمک در بسیاری از نقاط به سطح زمین رسیده است. حجیمترین رخنمونهای نمک را میتوان در حوضه کویر بزرگ و در زیرحوضه‌های پیرامونی آن (حوضه قم، گرمسار و دامغان) یافت. دوره سوم، که به طور نامتجانس بر روی طبقات مزوزوئیک چین خورده قرار دارد، با رسوبات دریایی، اتوسن، همراه با سنگ‌های آتشفشانی شروع می‌شود (جکسون و همکاران، ۱۹۹۰).

منطقه نصرآباد بخش‌هایی از کمان ماگمایی ارومیه-دختر (UDMA) و استان‌های زمین‌شناسی CI را در بخش‌های جنوب غربی و شمال شرقی خود در بر می‌گیرد. بنابراین تا حدودی ویژگی‌های هر دو استان فلات ایران را حفظ می‌کند. در شکل ۱ (الف) موقعیت منطقه نصرآباد، بر روی نقشه پهنه‌های تکتونو رسوبی ایران نشان داده شده است. حوضه قم بخش غربی استان CI در ضلع شمال شرقی UDMA را اشغال می‌کند و با سازند قرمز پایین (LRF)، سازند قم (QF) و سازند قرمز بالایی (URF) مشخص می‌شود. شکل ۱ (ب) نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ از منطقه مطالعه است.

قدیمی ترین واحدهای سنگی در این منطقه متعلق به توالی‌های آتشفشانی دوران اتوسن است که توسط LRF پوشانده شده و بدنه‌های ضخیم سنگ نمک مرتبط با LRF بیشتر از شیل سیلتی و مارن گچی تشکیل شده است. LRF توسط QF با توالی‌هایی از مارن، سنگ آهک، ماسه سنگ، شیل و گچ پوشیده شده است و QF توسط URF

ماتریس چرخش (twist) گویند، (ب) ماتریس S (رابطه ۷) که باعث تغییر شکل بردارهای میدان الکتریکی می شود و به آن ماتریس برش (shear) گویند (ج) ماتریس A که باعث کشیدگی ناهمگون بردارهای میدان الکتریکی در دو راستای متعامد می شود و بدین علت به آن ماتریس ناهمسانگردی (anisotropy) گویند و (د) پارامتر اسکالر g که ضریب بهره هر ایستگاه بوده و باعث می شود کل منحنی سونداژ مقاومت ویژه ظاهری ایستگاه به بالا یا پایین جابجا شود (عامل جابجایی ایستا):

$$\bar{C} = g\bar{T}\bar{S}\bar{A} \quad (۶)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{\sqrt{1+t^2}} \begin{pmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{pmatrix} \quad (۷)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{\sqrt{1+e^2}} \begin{pmatrix} 1 & e \\ e & 1 \end{pmatrix} \quad (۸)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{\sqrt{1+s^2}} \begin{pmatrix} 1+s & 0 \\ 0 & 1-s \end{pmatrix} \quad (۹)$$

ابتکار نخست گروم و بیلی آن بود که با مفروض گرفتن یک ساختار منطقه ای دوبعدی نشان دادند که ضرایب g و s (مؤلفه اصلی سازنده ماتریس ناهمسان گردی A) در مؤلفه های امپدانس ساختار منطقه ای (یک ماتریسی پادقطری) ادغام شده و از آن غیرقابل تفکیک هستند ( $\bar{Z}'_{2D} = g\bar{A}\bar{Z}_{2D}$ ). با حذف این دو کمیت، تعداد مجهول های مسئله تجزیه اعوجاج گالوانی به هفت پارامتر رابطه زیر تقلیل می یابد:

$$\bar{Z}'_{obs} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1-te & e-t \\ e+t & 1+te \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & Z'_{xy} \\ -Z'_{yx} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (۱۰)$$

زوایای پیچش و برش (t, e)، پارامترهای اعوجاج گالوانی و امپدانس های منطقه ای ( $Z'_{xy}, Z'_{yx}$ ) و نیز روند ساختار منطقه ای (زاویه  $\theta$ ) پارامترهای القایی در مدل تجزیه GB هستند. از طرف دیگر این هفت پارامتر در دستگاه معادلات زیر صدق می کنند:

$$\alpha_0 = t\sigma + e\delta \quad (۱۱)$$

$$\alpha_1 = (\delta - e\sigma)\cos 2\theta - (t\delta + e\sigma)\sin 2\theta$$

$$\alpha_2 = -\sigma + e\delta$$

منطقه ای همسانگرد 1D یا  $2D(Z_2)$  و تانسور امپدانس اندازه گیری شده ( $Z_{obs}$ ) عبارت است از:

$$Z_{obs} = C \cdot Z_2 \cdot (I + D \cdot Z_2) \quad (۴)$$

در این رابطه I ماتریس همانی مرتبه دوم است و علاوه بر این فرض بر آن است که دستگاه مختصات ساختار منطقه ای 2D و دستگاه مختصات اندازه گیری برهم منطبق هستند. با فرض آنکه طول موج میدان های مولد القاگر و نیز طول مقیاس القا درون محیط میزبان به مراتب بزرگتر از ابعاد توده معوج کننده باشند، درون این توده القای الکترومغناطیسی رخ نداده و صرفاً آثار گالوانی ناشی از آن حائز اهمیت خواهند بود. در این صورت مؤلفه های تانسورهای C, D در رابطه (۴) مقادیری حقیقی و مستقل از فرکانس هستند.

روش های تحلیل آثار اعوجاج گالوانی عموماً بر این مبنا هستند که فرکانس نوسانات میدان های EM به حد کافی پایین بوده طوریکه در رابطه (۴) از جمله  $D \cdot Z_2$  در برابر ماتریس همانی I می توان صرف نظر و آثار مغناطیسی ناشی از بارهای الکتریکی را صفر در نظر گرفت. در این صورت در دستگاه مختصات اندازه گیری دلخواهی که نسبت به دستگاه مختصات ساختار منطقه به اندازه  $\theta$  چرخیده است، داریم:

$$Z_{obs} = R(\theta) \cdot C \cdot Z_2 \cdot R^T(\theta) \quad (۵)$$

### ۲-۳ روش تجزیه گروم-بیلی (GB)

در تحلیل اعوجاج به روش GB تانسور اعوجاج C از نظر ریاضی برحسب اجزاء سازنده ای مرکب از ماتریس های اسپین پائولی (مبنای بسط هر تانسور مرتبه دو دلخواه) تجزیه می شود (رابطه ۶). ماتریس های پائولی در این اجزاء سازنده به نحوی ترکیب یافته اند که هر یک از آنها از نظر فیزیکی مفهوم خاصی داشته باشد. این اجزاء سازنده عبارتند از (الف) ماتریس T (رابطه ۶) که موجب چرخش بردارهای میدان الکتریکی می شود و بدین علت به آن

می‌آورند. بدین ترتیب اگر با در نظر گرفتن کف خطای  $2^\circ$  برای مقادیر فاز (معادل با 7% خطای مقاومت ویژه ظاهری) در طی اعمال این روش، خطای عدم برازش کمتر از دو باشد، ساختار منطقه‌ای را می‌توان دوبعدی در نظر گرفت. متقابلاً اگر به‌ازاء همه مقادیر پیش‌فرض برای زاویه روند ساختار منطقه‌ای، مقادیر عدم برازش حاصل بیشتر از دو باشند، با القای الکترومغناطیس یک ساختار ژئوالکتریکی سه‌بعدی مواجه هستیم و برای نمایش ساختارهای زیرسطحی از یک رویکرد سه‌بعدی برای مدل‌سازی داده‌ها باید استفاده کرد.

### ۳-۳ اعمال روش تجزیه GB بر داده‌های MT نصرآباد

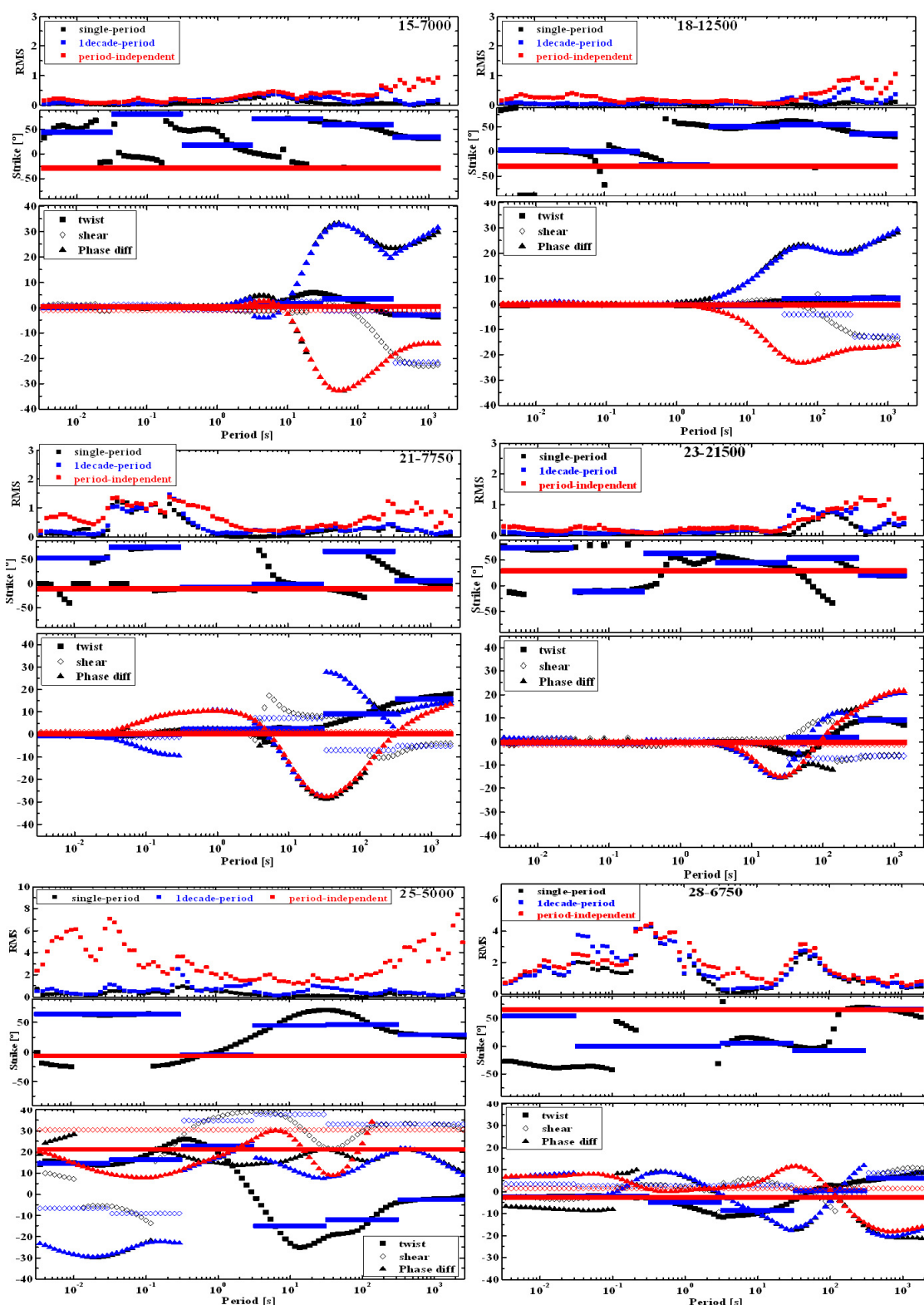
در مورد مجموعه‌ای از داده‌های امپدانس که توسط S ایستگاه حاوی N فرکانس اندازه‌گیری برداشت شده‌اند، پارامترهای اعوجاجی بازیابی شده از تجزیه GB در هر ایستگاه به‌علت ماهیت گالوانی که دارند، مستقل از فرکانس هستند. این در حالی است که زاویه روند بازیابی شده با این روش علاوه بر آنکه مستقل از فرکانس است به موقعیت ایستگاه اندازه‌گیری نیز وابسته نیست چراکه همه نقاط موجود در این مجموعه داده را ناشی از یک ساختار منطقه‌ای دوبعدی واحد فرض کرده‌ایم (مکنیس و جونز، ۲۰۰۱). به‌منظور دستیابی به تخمین‌های معتبری از پارامترهای مدل GB که پاسخ ساختار منطقه و اعوجاج گالوانی آلوده کننده آنها را به‌طور موثق تعیین کند، پارامترهای این مدل در چند گام پی‌درپی بر اندازه‌گیری‌ها برازش می‌یابند. در گام نخست پارامترهای مدل GB برای هر پی‌ریود و در هر ایستگاه اندازه‌گیری به‌طور منفرد محاسبه می‌شود که آن را تحلیل نامقید GB گویند (unconstrained GB analysis). سپس این مدل برای اندازه‌گیری‌های یک باند فرکانسی تعیین می‌شود. در نهایت نیز از برازش داده‌های ثبت شده در کل محدوده

$\alpha_3 = -(t\delta + e\sigma)\cos 2\theta - (\delta + et\sigma)\sin 2\theta$   
چهار کمیت سمت چپ این معادلات از مؤلفه‌های امپدانس اندازه‌گیری ( $\alpha_0 = Z_{xx} + Z_{yy}$ ,  $\alpha_1 = Z_{xy} + Z_{yx}$ ,  $\alpha_2 = Z_{yx} - Z_{xy}$ ) محاسبه شده و کمیت‌های سمت راست معادلات:  $t$ ,  $e$ ,  $\theta$ ، و نیز  $\delta = Z'_{xy} - Z'_{yx}$ ,  $\sigma = Z'_{xy} + Z'_{yx}$  مجهولات مسئله یا در واقع پارامترهای مدل تجزیه امپدانس GB هستند که از حل هم‌زمان این دستگاه معادلات از روش برازش کمترین مربعات وزن‌یافته محاسبه می‌شوند. کمیت‌های  $\sigma$  و  $\delta$  مرکب از توابع پاسخ امپدانس ساختار منطقه‌ای پس از حذف آثار اعوجاج گالوانی از روی آنها هستند. تابعک درجه دوم عدم برازش GB در هر ایستگاه  $z$  و هر پی‌ریود  $k$  برای امپدانس‌های تغییر یافته  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  عبارت است از:

$$e_{jk}^2 = \sum_{i=0}^3 \left[ \frac{(Re\alpha_{ijk}^{obs} - Re\alpha_{ijk}^{model})}{\sigma_{\alpha_{ijk}}} \right]^2 + \sum_{i=0}^3 \left[ \frac{(Im\alpha_{ijk}^{obs} - Im\alpha_{ijk}^{model})}{\sigma_{\alpha_{ijk}}} \right]^2 \quad (12)$$

به‌منظور کاهش اثر سوگیری ناشی از وابستگی مکانی و فرکانسی خطاهای اندازه‌گیری، تابعک هزینه فرآیند کمینه‌سازی توسط واریانس داده‌ها بهنجار می‌شود. به‌علاوه با استفاده از یک روش خودگردان‌سازی (Bootstrapping) خطای پارامترهای بازیابی شده از تجزیه GB از روی خطای امپدانس‌های اندازه‌گیری محاسبه می‌شوند. اتخاذ این ترفندهای عددی باعث شده تا روش GB در مقایسه با سایر روش‌هایی که صرفاً مبتنی بر چرخش داده‌ها در جهت روند ساختار منطقه هستند (مثل روش‌های WAL, Bahr) در حضور نوفه‌های EM محیطی عملکرد بهتری برای تحلیل آثار اعوجاج گالوانی داده‌ها داشته باشد (چیو و جونز، ۲۰۱۲).

مقادیر عدم‌برازش RMS حاصل از روش تجزیه GB معیاری برای ارزیابی اعتبار فرض اصلی مستتر در این روش مبنی بر دوبعدی بودن ساختار منطقه‌ای فراهم



شکل ۲. نتایج تحلیل GB نامقید که بر هر پریود (single-period) هر دهه پریودی (decade-period)، کل محدوده پریودی (period-independent) اندازه گیری ها اعمال شده اند برای چند ایستگاه نمونه نشان داده شده است. نتایج این تحلیل ها در قالب عدم برآزش (RMS)، جهت روند ساختار بازیابی شده (strike) و مقادیر زوایای برش و پیشش حاصل از هر مرحله اعمال روش GB، ارائه شده اند.

را با دقت بالا (تا  $1^\circ$  خطا در داده‌های فاز و معادل با آن  $3.5\%$  خطا در داده‌های مقاومت ویژه ظاهری) بازیابی کرده است. همچنین پارامترهای اعوجاج گالوانی بازیابی شده در این تحلیل‌ها عموماً مقادیر پایین کمتر از  $10^\circ$  دارند و نشان می‌دهند که پاسخ‌های MT ساختار منطقه‌ای به‌طور ضعیفی توسط توده‌های کوچک مقیاس نزدیک‌سطحی متأثر شده‌اند.

تجارب عملی در مورد داده‌های صحرائی مختلف نشان داده‌اند که در حضور نوفه‌های EM محیطی و نیز آثار اعوجاجی غیرالقایی آلوده کننده اندازه‌گیری‌ها و از بین پارامترهای مدل تجزیه GB، جهت روند ساختار منطقه‌ای با تفکیک‌پذیری پایینی استخراج می‌شود. این موضوع یک مشکل اساسی در تفسیر دوبعدی داده‌های MT محسوب می‌شود چراکه دقت این تفسیرها قویاً به تصویرسازی اندازه‌گیری‌ها در یک سیستم مختصات صحیح از ساختار هدایت‌ویژه الکتریکی منطقه (با محورهای اصلی که موازی و عمود بر جهت روند ساختار هستند) وابسته است. رویکرد آماری که در تعیین پارامترهای مدل تجزیه GB وجود دارد این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان روند ساختاری بازیابی شده در این مدل و خطای آن را با دقت ارزیابی کرد (چیو و جونز، ۲۰۱۲). در ادامه چهار روش متداول که عدم برازش). در ادامه چهار روش متداول که عدم برازش مدل GB را ارزیابی کرده و روند ساختار منطقه‌ای را تخمین می‌زنند، ارائه می‌شود.

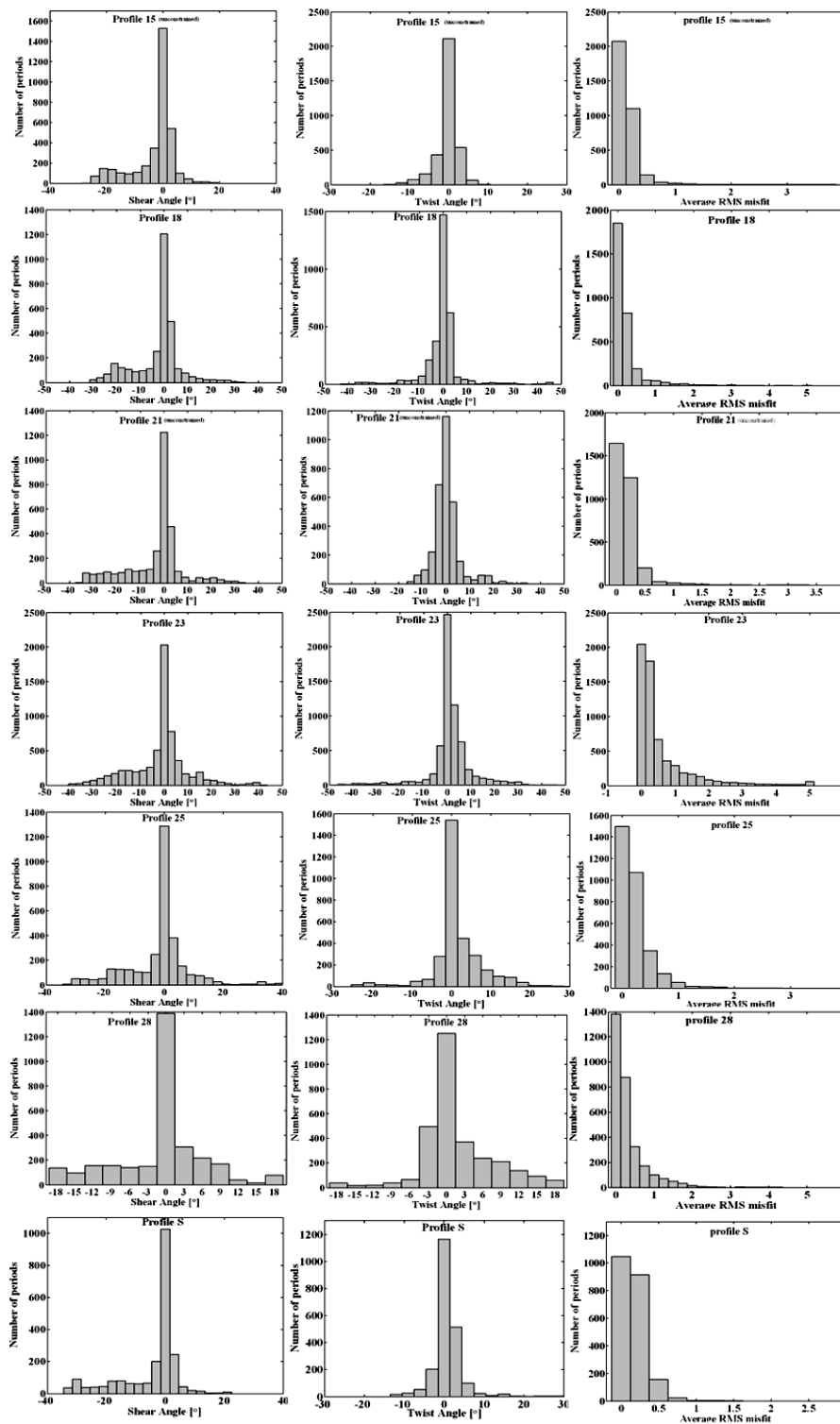
روش اول همان روش متعارف استفاده شده در برنامه STRIKE (مکنیس و جونز ۲۰۰۱) است که در آن روند ساختار منطقه از کمینه‌سازی مجموع عدم برازش‌های محاسبه شده از رابطه (۱۲) برای همه نقاط داده موجود در

$$E_1 = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N e_{jk}^2 \quad (13)$$

یک محدوده فرکانسی از چند ایستگاه حاصل می‌شود:

فرکانسی اندازه‌گیری‌ها، مقادیر مستقل از فرکانس برای پارامترهای اعوجاج و روند ساختار منطقه تعیین می‌شوند (frequency- or period-independent analysis). نتیجه حاصل از اعمال روش تجزیه GB در هر پریود، در هر دهه لگاریتمی و در کل محدوده پریودی برای چند ایستگاه نمونه از مجموعه داده MT نصرآباد در شکل (2) نشان داده شده است. مقدار عدم برازش حاصل از تجزیه GB در اغلب ایستگاه‌ها کمتر از دو است. اگرچه در معدودی از ایستگاه‌ها مثل 25-5000 خصوصاً وقتی که مدل GB بر کل محدوده پریودی اندازه‌گیری‌ها برازش داده شود، مقدار خطای rms بالا است. به عبارت دیگر مدل اعوجاج گالوانی 3D/2D مستتر در روش GB برای توصیف دقیق این اندازه‌گیری‌ها مناسب نیست. تا پریودهای بلند بین 1-10 sec قطبش‌های TE و TM امپدانس‌های بازیابی شده با روش GB در سرتاسر منطقه خصوصاً در شمال‌شرق پروفیل‌ها اختلاف فاز کوچکی دارند و معرف حضور یک ساختار منطقه‌ای یک‌بعدی هستند.

در این مقاله مجموعه حجیمی از داده‌های امپدانس MT مربوط به ۲۸۴ ایستگاه باند پهن واقع در امتداد هفت پروفیل که میدان‌های الکترومغناطیسی را به‌طور متوسط در ۸۵ فرکانس اندازه‌گیری می‌کنند، بررسی شده است. به‌منظور خلاصه‌سازی مؤثر نتایج حاصل از اعمال روش GB بر این مجموعه حجیم از داده‌ها، شناسایی واضح الگوهایی که در این نتایج وجود دارد و تعیین خط سیر آنها در شکل ۳ از نمایش هیستوگرام این نتایج برای همه ایستگاه‌های واقع در امتداد هر پروفیل استفاده شده است. این شکل نشان می‌دهد که مدل اعوجاج گالوانی 3D/2D بر اکثر نقاط داده‌ای برازش مطلوبی داشته و خطای RMS در اغلب ایستگاه‌ها و فرکانس‌ها کمتر از یک است. مقادیر پایین خطای عدم برازش نشان می‌دهد که روش تجزیه GB، پاسخ‌های امپدانس ساختار منطقه‌ای دوبعدی



شکل ۳. هیستوگرامهای مربوط به پارامترهای اعوجاج و مقادیر عدم برازش حاصل از مدل سازی gb نامقید برای هفت پروفیل منطقه نصرآباد کاشان.

همه ایستگاه‌های واقع بر یک پروفیل از میانه این مقادیر خطا استفاده شود (ادتونجی و همکاران، ۲۰۱۵):

$$E_3(\theta_r) = \text{median} \left[ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |e_{jk}| \right] \quad (15)$$

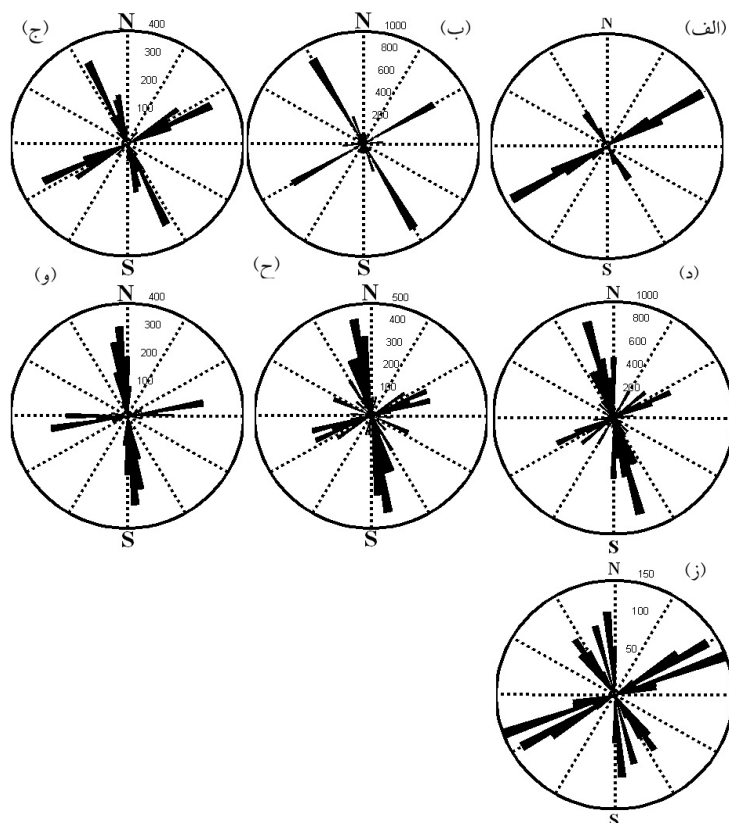
این مجموعه کامل از مقادیر عدم‌برازش که به ازاء همه مقادیر محتمل برای روند ساختار منطقه حاصل می‌شود، فرآیند تعیین جهت روند ساختار منطقه را تقویت می‌کند. بر این اساس مقدار بهینه روند ساختار منطقه، زاویه‌ای است که به ازاء آن میانگین عدم‌برازش‌های محاسبه شده طبق روابط (۱۳) تا (۱۵) کمینه است. در ادامه زوایای روند بازیابی شده با روش GB برای داده‌های MT نصرآباد با استفاده از این روش‌های ارزیابی، تحلیل و بررسی می‌شوند.

ابتدا از کمینه‌سازی خطای  $E_1$  (رابطه ۱۳) در هر ایستگاه ( $M=1$ ) برای وقتی که  $N$  برابر با همه فرکانس‌های اندازه‌گیری است، مقادیر روند مستقل از فرکانس برای هفت پروفیل منطقه نصرآباد محاسبه شده و نتایج در شکل (۴) ارائه شده‌اند. با لحاظ کردن ابهام  $90^\circ$  که در تعیین مقادیر زاویه روند ساختار وجود دارد، این نتایج معرف ثبات آزمون‌های استرایکی در یک منطقه چند صد کیلومتر مربعی هستند. تحلیل مفصل‌تر این موضوع با برازش مدل تجزیه GB بر داده‌های هر فرکانس در هر ایستگاه اندازه‌گیری (روش تجزیه GB نامقید) انجام شده و نتایج برای سه محدوده پریودی متفاوت در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. براساس این نتایج در پریودهای کوتاه‌تر از 10 sec که مقادیر کوچک اختلاف فاز قطبش‌های اصلی امپدانس در اغلب ایستگاه‌ها (شکل ۲) معرف حضور یک ساختار منطقه‌ای یک‌بعدی است، مقادیر مدل GB را ارزیابی کرده و روند ساختار منطقه‌ای را تخمین می‌زنند، ارائه می‌شود. زاویه روند بازیابی شده بسیار پراکنده‌اند. اما در پریودهای بلندتر مقدار این زاویه بین

(در این رابطه  $k$  شماره ایستگاه و  $k$  شماره فرکانس است). در روش دوم مقدار زاویه روند ساختار منطقه ( $\theta_r$ ) در مدل GB تثبیت شده و سایر پارامترهای مدل بر امپدانس‌های اندازه‌گیری برازش داده می‌شوند. این فرآیند به ازاء زوایای مختلف ( $\theta_r$ ) در بازه  $[0^\circ, 90^\circ]$  تکرار شده و مقادیر عدم‌برازش حاصل ( $e_j^2(\theta_r)$ ) برای هر زاویه  $\theta_r$  درصد می‌شوند. در این شیوه ارزیابی از بررسی چگونگی توزیع مقادیر خطای rms ایستگاه‌ها در امتداد هر پروفیل، می‌توان سهم هر ایستگاه در محدودیت اعمال شده بر زاویه روند ساختار منطقه را سنجید و به‌عنوان مثال ایستگاه‌هایی که در آنها مقادیر عدم‌برازش به‌ازاء اغلب زوایای روند تثبیت شده در طی مدل‌سازی GB کمتر از یک است را واقع بر یک ساختار محلی یک‌بعدی در نظر گرفت یا ایستگاه‌هایی که در آنها این مقادیر عدم‌برازش بیشتر از دو هستند را متأثر از پاسخ‌های القایی یک ساختار منطقه‌ای 3D فرض کرد و آنها را از ادامه فرآیند تعیین جهت روند ساختار منطقه حذف نمود (اشمولت، ۲۰۱۱). در روش سوم برای تحلیل زوایای روند بازیابی شده با روش GB به جای بررسی نرم دوم مقادیر خطا، مقادیر قدر مطلق آنها به‌ازاء یک زاویه روند معین، سنجیده می‌شوند:

$$E_2(\theta_r) = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |e_{jk}| \quad (14)$$

در مقایسه با معیار قبلی (رابطه ۱۳) این نرم  $L_1$  نسبت به حضور ایستگاه‌های منحصر به فردی که به شدت متأثر از نوفه‌های زمین‌شناسی هستند و عدم‌برازش‌های بسیار بزرگی دارند، حساسیت کمتری دارد (ادتونجی و همکاران ۲۰۱۵). رویکرد مضاعفی که در روش بعدی به‌منظور تعیین نقاط داده‌ای دور افتاده استفاده می‌شود آن است که با تثبیت زاویه روند ساختار منطقه در یک مقدار مشخص به‌جای میانگین مقادیر قدر مطلق محاسبه شده در



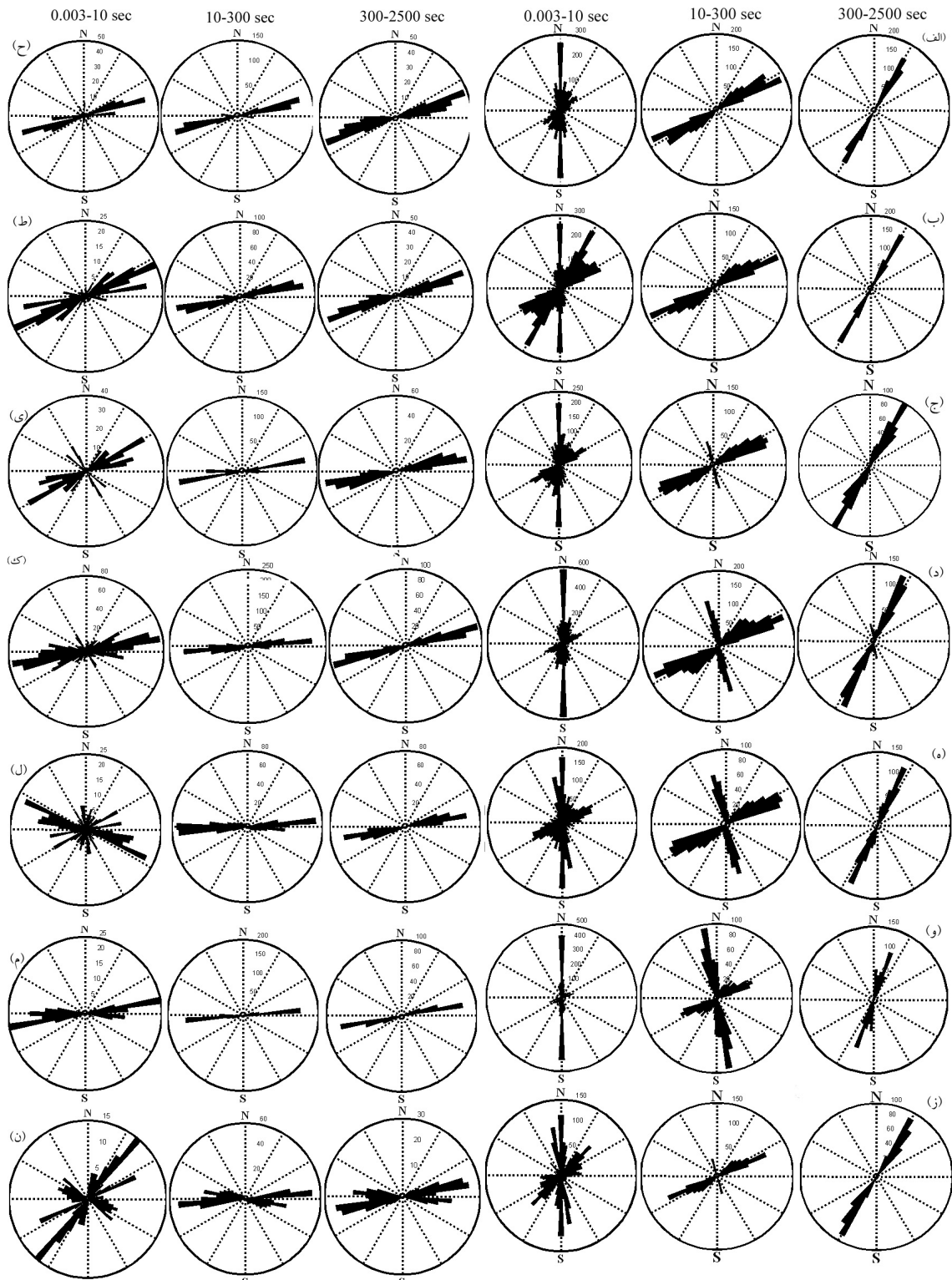
شکل ۴. نمودارهای گل سرخی (الف-ز) مقادیر مستقل از فرکانس روند ساختار منطقه که از مدل تجزیه GB نامقید در امتداد هفت پروفیل به ترتیب p15, p18, p21, p23, p25, p28, s حاصل شده اند.

هر ایستگاه در هر فرکانس از خروجی برنامه STRIKE استخراج شده است.

در شکل ۶ نقاط مشکلی، آبی و قرمز توزیع این مقادیر عدم برازش با بزرگی های به ترتیب کمتر از یک، بین یک و دو و بزرگتر از دو را به ازاء همه مقادیر محتمل برای روند ساختار منطقه ارائه می دهند و نمادهای ستاره ای بنفش، قرمز و سبزرنگ معرف مقادیر میانگین خطا به ازاء یک زاویه روند معین هستند وقتی که از عدم برازش محاسبه شده در همه ایستگاه های واقع بر یک پروفیل طبق روابط به ترتیب (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) میانگین گیری شود. نتایج ارائه شده در شکل (۶) حکایت از آن دارند که به علت پایین بودن سطوح نوفه های زمین شناسی در داده های MT نصرآباد، نتایج حاصل از روش های

آزیموت های  $N70^{\circ}E$  تا  $N30^{\circ}E$  (یا محدوده متعامد بر آن بین آزیموت های  $N30^{\circ}W$  تا  $N60^{\circ}W$ ) متغیر است.

در گام بعد برای تعیین مستدل و پایدار روند ساختار منطقه، مدلسازی های GB متعدد به صورت مستقل از فرکانس برای هر ایستگاه انجام شد. در هر مدل مقدار پارامتر  $\theta_r$  بین  $0^{\circ}$  تا  $90^{\circ}$  مقید شده و مقدار عدم برازش حاصل از این مدلسازی ها برای هر ایستگاه منحصر به فرد  $(e_r^2(\theta_r))$  استخراج شده است. بدین ترتیب با تقسیم بازه تغییرات زاویه  $\theta_r$  به فواصل پنج درجه، تعداد ۱۹ مدل سازی GB برای هر ایستگاه بطور منحصر به فرد انجام شد (نتایج شکل ۶ حاصل  $284 \times 19$  تعداد مدلسازی GB است). مقدار کف خطای داده های امیدانس در این مدل سازی ها ۳.۵٪ بوده است و مقادیر عدم برازش برای



شکل ۵. نمودارهای گل‌سرخ (الف-ز) زوایای روند بازایی شده از روش GB نامقید را در دهه‌های مختلف پریودی برای پروفیل‌های به ترتیب p15, p18, p21, p23, p25, p28, s نمایش می‌دهند. نمودارهای گل‌سرخ (ح-ن) امتداد روند بردارهای القای حقیقی مربوط به پروفیل‌های به ترتیب p15, p18, p21, p23, p25, p28, s

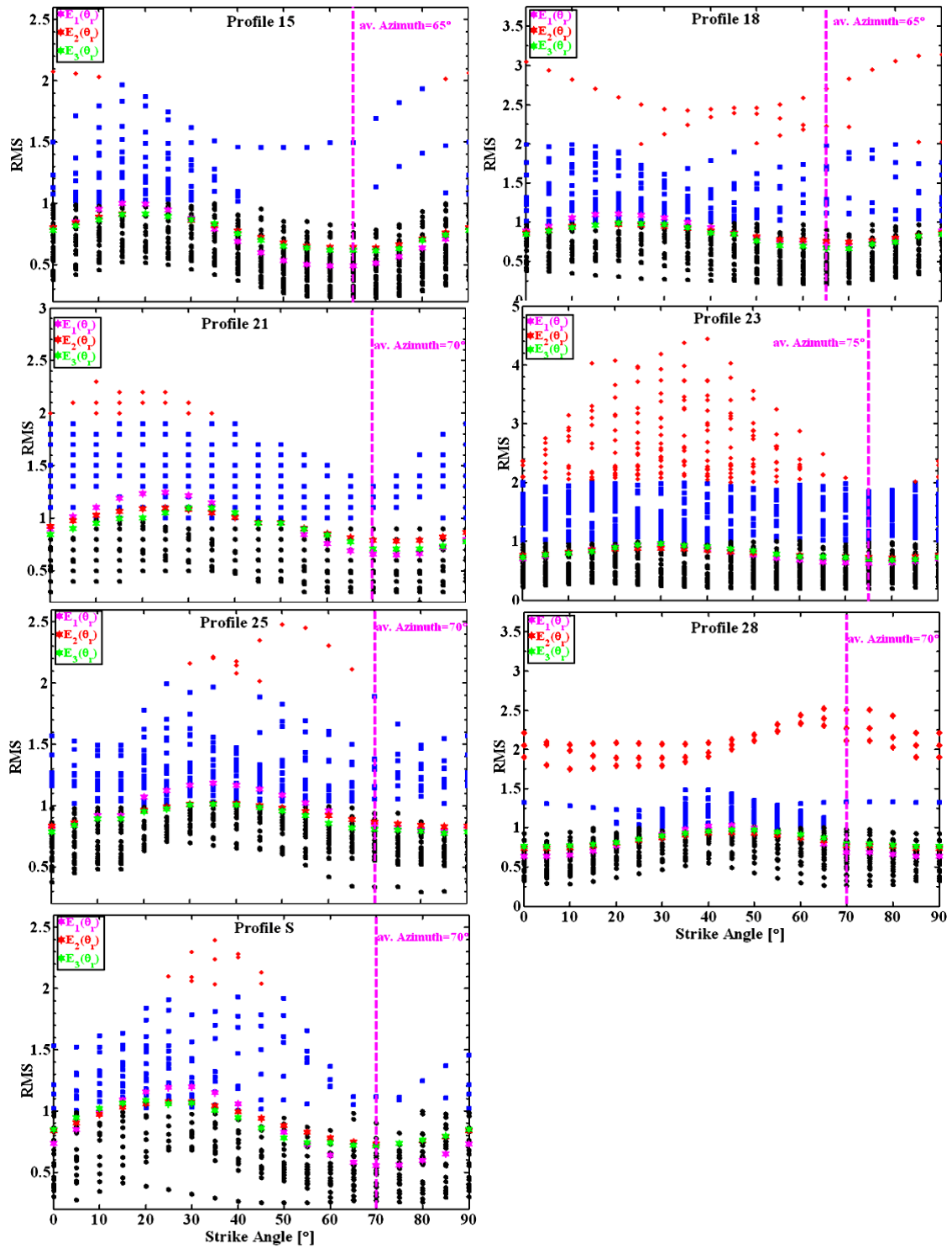
داده شده اند. این نحوه نمایش مقادیر عدم برازش کمک می کند تا مناطقی تعیین شوند که به پارامترهای مدل اعوجاج GB حساس بوده و با مقادیر تنظیم شده آنها در این مدل سازی ها سازگار نیستند. نتایج شکل (۷) نشان می دهند که غیر از پریرودهای بلند معدودی از ایستگاه های واقع در نزدیکی دیپرهای نمکی ۴ و ۵ (شکل ۱) کلیه داده های اندازه گیری با پارامترهای پیش فرض در این مدل سازی های GB برازش مطلوبی دارند. به عبارت دیگر امپدانس های بازیابی شده در این مدل سازی ها با دقت بالا معرف پاسخ های القای الکترومغناطیسی در ساختار هدایت ویژه الکتریکی دوبعدی منطقه است.

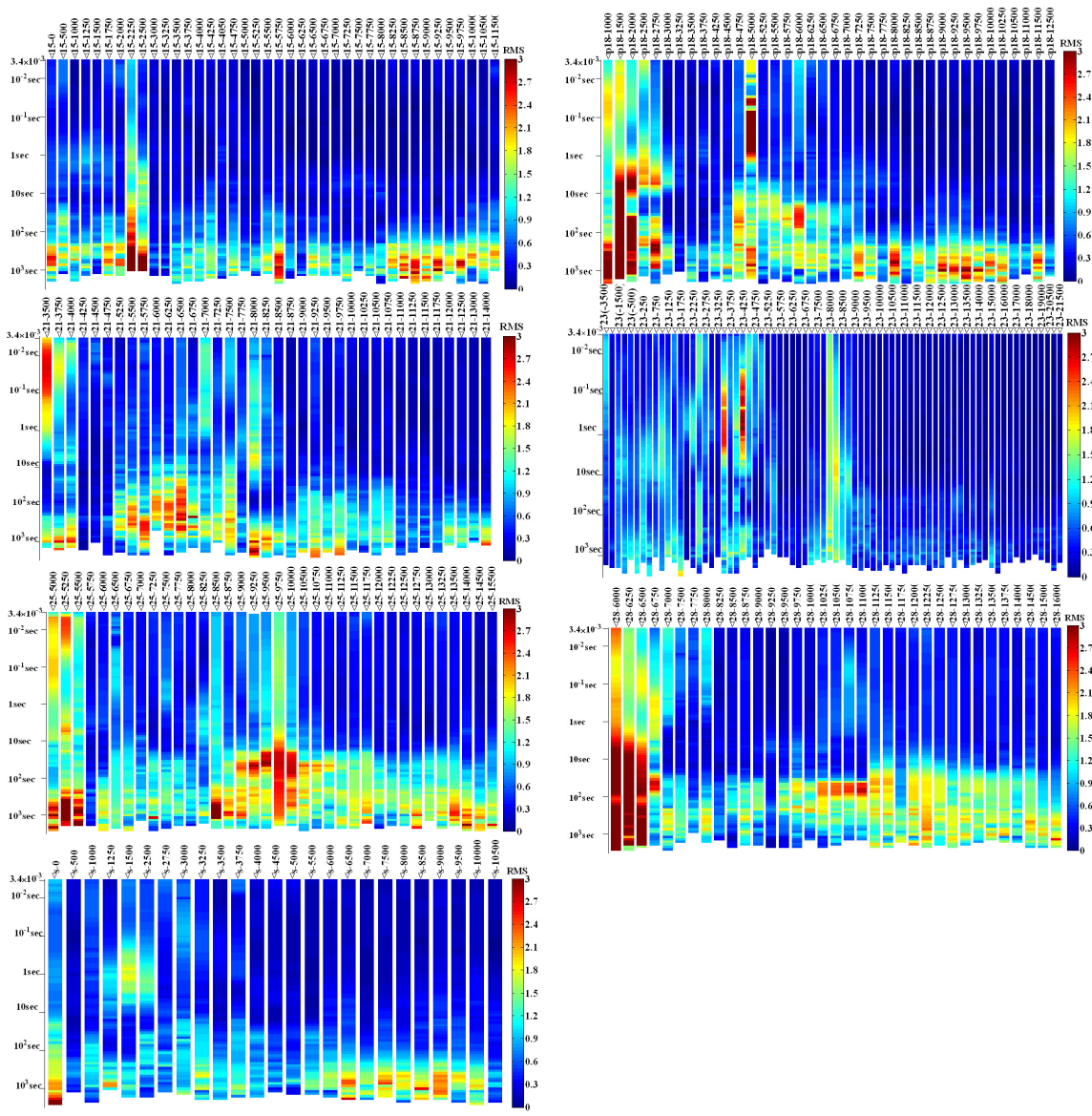
شکل (۸) سونداژهای مقاومت ویژه ظاهری مربوط به پاسخ امپدانس ساختار منطقه که از مدل سازی GB اخیر حاصل شده است را با مقادیر حاصل از امپدانس های اندازه گیری شده در سیستم مختصات ژئومغناطیسی منطقه مقایسه کرده است. همانطور که مشاهده می شود با حذف آثار اعوجاجی از روی اندازه گیری ها، مقادیر قطر اصلی مقاومت ویژه ظاهری (که در القای الکترومغناطیسی یک ساختار دوبعدی صفر هستند) تا چند دهه لگاریتمی کاهش یافته و به صفر نزدیک شده اند.

شکل (۹) نتیجه وارون سازی دوبعدی حاصل از دو نوع داده ورودی را نشان می دهد (الف) اندازه گیری های MT اولیه که آلوده به اثرات اعوجاجی هستند و (ب) همان اندازه گیری های MT اولیه که اثرات اعوجاجی با روش GB از آنها حذف شده است. مقایسه این دو شکل نشان می دهد که اگرچه از وارون سازی داده ها پس از حذف آثار اعوجاج گالوانی، ساختارهای زیرسطح زمین مثل گنبد نمکی نصرآباد (توده مقاوم الکتریکی DI) و رولایه رسانای واقع بر آن (رسلنای CI) به خوبی بازیابی شده اند اما وارون سازی اندازه گیری های اولیه آلوده به اثرات اعوجاجی تصویر غلطی از زیرسطح زمین ارائه کرده و نتوانسته این ساختارها را بازیابی کند.

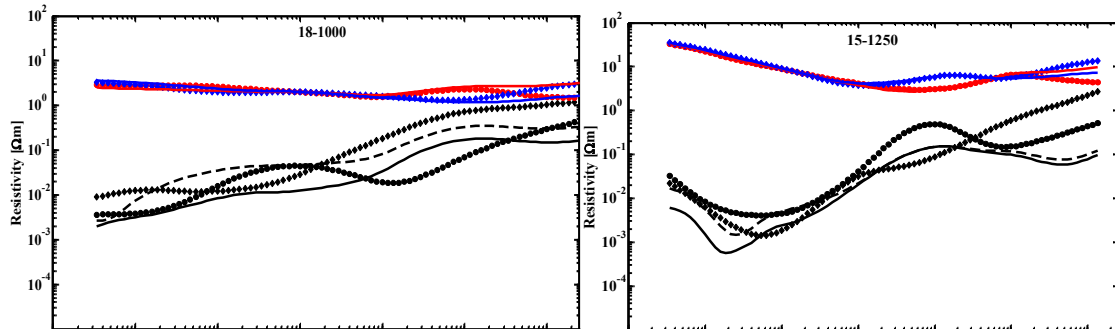
میانگین گیری متفاوت تقریباً یکسان هستند و کمینه مقدار میانگین عدم برازش ها وقتی رخ می دهد که زاویه روند ساختار منطقه بین  $65^{\circ}$ - $75^{\circ}$  باشد. بنابراین جهت روند ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه را با توجه به این نمودارها به طور کلی در راستای  $70^{\circ} \pm 5^{\circ}$  می توان در نظر گرفت. توجه به این نکته ضروری است که نتایج حاصل از روش GB مشابه با سایر روش های تعیین روند ساختار منطقه که صرفاً مبتنی بر داده های امپدانس MT هستند، ذاتاً حاوی  $90^{\circ}$  ابهام است و برای رفع آن باید از داده های مکمل (اطلاعات زمین شناسی و یا داده های تابع تبدیل ژئومغناطیس (بردار القا)) استفاده کرد. شکل های (۵-ح-ن) نمودارهای گل سرخی هستند که اثر انباشته مربوط به جهت گیری همه بردارهای القای حقیقی ثبت شده در ایستگاه های مختلف هر پروفیل را برای سه محدوده پریرودی متفاوت نشان می دهند. با توجه به آنکه بردارهای القا برفراز یک ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه ای دوبعدی به صورت عمود بر امتداد روند این ساختار قرار می گیرند (چیو و جونز ۲۰۱۲)، از ترکیب نتایج حاصل از بردارهای القا و مدل سازی های GB جهت روند ساختار هدایت ویژه الکتریکی در این منطقه را  $N20^{\circ}W(\pm 5^{\circ})$  می توان در نظر گرفت و در تحلیل های بعدی از آن استفاده کرد.

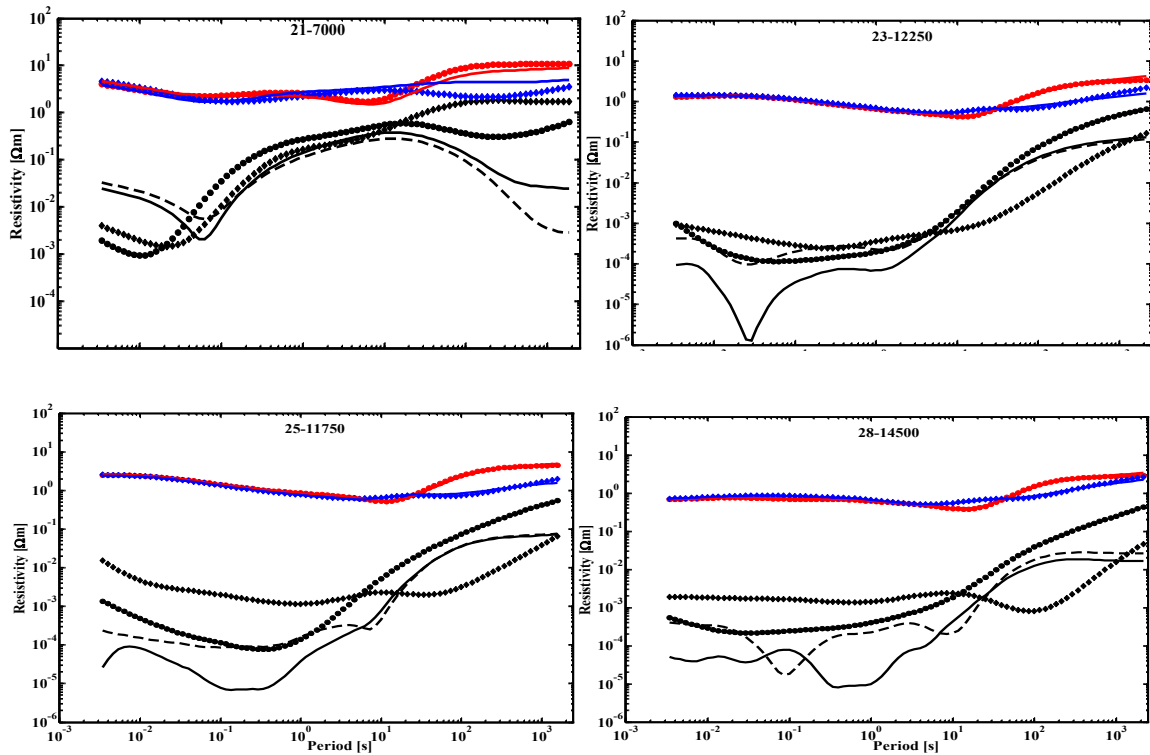
در گام آخر با توجه به آنکه سه پارامتر از مدل GB: روند ساختار و زوایای اعوجاجی برش و پیچش برفراز یک ساختار منطقه ای دوبعدی ثابت و مستقل از فرکانس هستند، این پارامترها برابر با مقادیر حاصل از تحلیل های قبل به ترتیب برابر با  $(0^{\circ}, 0^{\circ}, -20^{\circ})$  قرار گرفته و در طی مدل سازی های جدید تثبیت شدند. به منظور ارزیابی اینکه تخمین های فوق از پارامترهای اعوجاج تا چه اندازه با داده های MT منطقه نصرآباد سازگار هستند، مقادیر عدم برازش حاصل از این مدل سازی های GB در پریرودهای متفاوت ایستگاه های اندازه گیری واقع در امتداد پروفیل های مختلف منطقه نصرآباد در شکل ۷ نمایش





شکل ۷. شکل های (الف) تا (و) مقادیر عدم برازش حاصل از مدل تجزیه GB (امتداد روند ساختار منطقه در  $20^\circ$  - و زوایای اعوجاج در  $0^\circ$  مقید شده اند) برای کل محدوده پربردی ایستگاه های مختلف واقع بر پروفیل های به ترتیب: p15, p18, p21, p23, p25, p28 در منطقه نصرآباد.



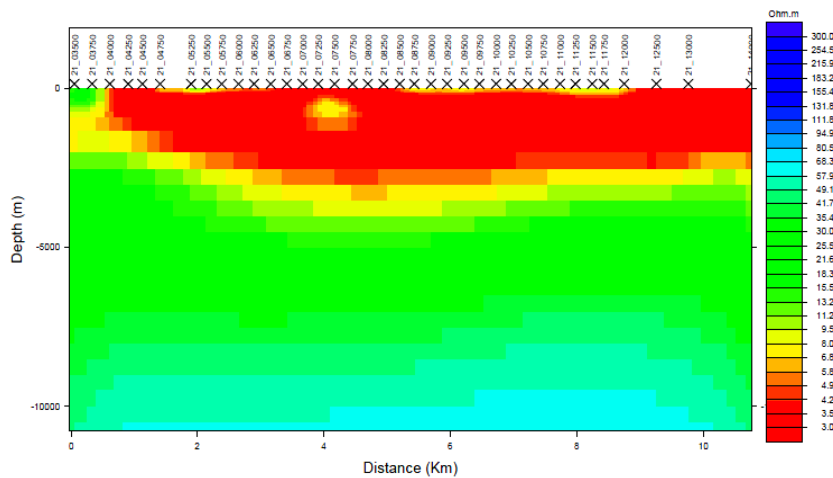


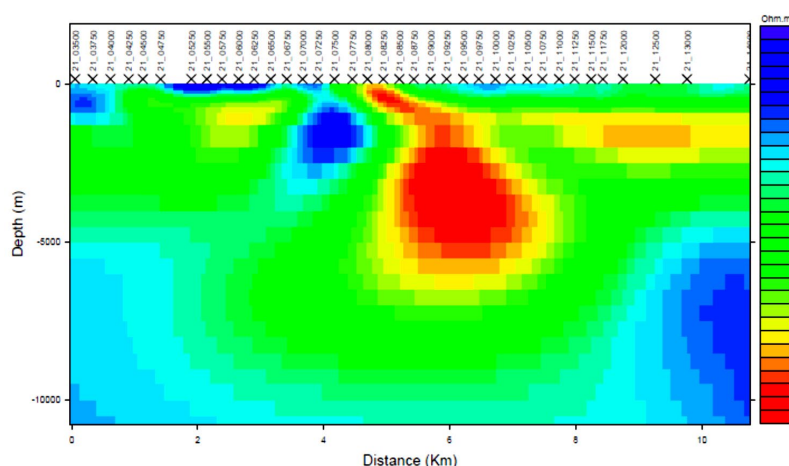
شکل ۸. مقادیر قطر اصلی و فرعی مقاومت ویژه ظاهری برای چند ایستگاه نمونه قبل و پس از حذف آثار اعوجاج گالوانی با اعمال روش GB.

#### ۴ نتیجه گیری

کوچک مقیاس محلی واقع بر یک ساختار منطقه‌ای بزرگ مقیاس دوبعدی، ابزار اصلی استفاده شده در این بررسی‌ها بوده است. در گام نخست مدل‌سازی‌های نامقید GB برای هر پیروید، هر دهه پیرویدی و در نهایت کل بازه پیرویدی اندازه‌گیری‌ها انجام شدند تا از تحلیل آماری نتایج این مدل‌سازی‌ها، صحت فرضیه دوبعدی بودن

در این پژوهش سطح اثرات اعوجاجی مخدوش کننده مجموعه امپدانس‌های اندازه‌گیری شده بر فراز گنبد نمکی نصرآباد در غرب ایران مرکزی ارزیابی و از اندازه‌گیری‌ها حذف شدند تا پاسخ امپدانسی ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه‌ای بازیابی شود. مدل تجزیه گرم-بیلی (GB) حاوی برهم‌نهمی از بی‌هنجاری‌های رسانای





شکل ۹. نتایج حاصل از وارون سازی اندازه گیری های MT در امتداد پروفیل p21 (الف) قبل از حذف آثار اعوجاج گالوانی و (ب) پس از حذف آثار اعوجاج گالوانی.

- Alavi, M. (1996). Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. *Journal of geodynamics*, 21(1), 1-33.
- Chave, A. D., & Smith, J. T. (1994). On electric and magnetic galvanic distortion tensor decompositions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B3), 4669-4682.
- Chave, A. D., & Jones, A. G. (Eds.). (2012). *The magnetotelluric method: Theory and practice*. Cambridge University Press.
- Jackson, M. P. A., Cornelius, R. R., Craig, C. H., Gansser, A., Stöcklin, J., & Talbot, C. J. (1990). Salt diapirs of the Great Kavir, central Iran.
- Groom, R. W., & Bailey, R. C. (1989). Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B2), 1913-1925.
- Mahallati, A., & Montahaei, M. (2019). Application of MT forward modeling responses for time-lapse monitoring of the subsurface electrical resistivity changes. *Journal of the Earth and Space Physics*, 46(4), 1-12.
- McNeice, G. W., & Jones, A. G. (2001). Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. *Geophysics*, 66(1), 158-173.
- Montahaei, M., Zare, E., Crustal Scale Structure of the Nasr-Abad Buried Salt Diaper from a profile MT dataset. *Journal of Applied Geophysics*, under-review.

ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه و سطح اثرات اعوجاجی مخدوش کننده اندازه گیری ها ارزیابی شوند. نتایج این تحلیل ها برای همه هفت پروفیل نشان دادند که توابع پاسخ ثبت شده در سرتاسر منطقه نصرآباد، مؤید حضور یک ساختار هدایت ویژه الکتریکی بزرگ مقیاس دوبعدی هستند. همچنین این نتیجه گیری توسط پایداری مکانی آزمون روند تخمین زده شده برای ساختار منطقه در امتداد همه پروفیل های اندازه گیری تأیید شد. در ادامه با انجام مدل سازی GB مقید، پارامترهای اعوجاج تعیین و از اندازه گیری ها حذف شدند. مقایسه مقادیر بزرگی همه مؤلفه های امیدانسی بازبازی شده از مدل سازی GB مقید با اندازه گیری های اولیه، تفاوت آنها و بنابراین لزوم حذف اثرات اعوجاجی قبل از انجام مدل سازی ها را نشان می دهد. خصوصاً مؤلفه های قطر اصلی امیدانس ها کاهش شدیدی یافته و به صفر (مقدار مورد انتظار بر فراز یک ساختار منطقه ای دوبعدی) نزدیک شده اند.

## مراجع

- Adetunji, A. Q., Ferguson, I. J., & Jones, A. G. (2015). Imaging the mantle lithosphere of the Precambrian Grenville Province: large-scale electrical resistivity structures. *Geophysical Journal International*, 201(2), 1040-1061.

- Moradi, M., Oskooi, B., Pushkarev, P., Smirnov, M., & Esmacili Oghaz, H. (2019). Cooperative inversion of magnetotelluric and seismic data on Shurab diapirs in Central Iran. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-14.
- Rubinat, M., Ledo, J., Roca, E., Rosell, O., & Queralt, P. (2010). Magnetotelluric characterization of a salt diapir: a case study on Bicorn-Quesa Diapir (Prebetic Zone, SE Spain). *Journal of the Geological Society*, 167(1), 145-153.
- Schmoldt, J. P. (2011). *Multidimensional isotropic and anisotropic investigation of the Tajo Basin subsurface-A novel anisotropic inversion approach for subsurface cases with oblique geoelectric strike directions* (Doctoral dissertation).
- Simpson, F., & Bahr, K. (2005). *Practical magnetotellurics*. Cambridge University Press.
- Spratt, J. E., Skulski, T., Craven, J. A., Jones, A. G., Snyder, D. B., & Kiyan, D. (2014). Magnetotelluric investigations of the lithosphere beneath the central Rae craton, mainland Nunavut, Canada. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 2415-2439.
- Stocklin, J., & Setudehnia, A. (1991). Stratigraphic lexicon of Iran. Geological survey of Iran. *Tehran, Republic*, 18, 376.
- Weaver, J. T., Agarwal, A. K., & Lilley, F. E. M. (2000). Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants. *Geophysical Journal International*, 141(2), 321-336.

## Geoelectric directionality and regional MT responses in complex geological areas: application to the Nasr-Abad salt dome

Mehrdad Sajedi <sup>1</sup> and Mansoure Montahaei <sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>*M.Sc. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

<sup>2</sup>*Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

(Received: 17 October 2024, Accepted: 06 January 2025)

### Summary

Salt extrusions (diapir, dome and glaciers) have a high electrical resistivity contrast with their surrounding sediments and consequently are good exploration targets for electromagnetic (EM) methods. However, diffusive EM fields, employed in magnetotelluric (MT) exploration technique, have restrictions in resolution and sensitivity and cannot model the earth at the full scale. Furthermore, galvanic distortion effects caused by shallow and small scale lateral inhomogeneities contaminate measured EM fields and cause unreliable imaging of subsurface electrical resistivity.

In this study, we investigate dimensionality, directionality and distortion analysis of a large dataset from 284 broad band MT stations recorded along seven profiles in Nasr Abad region, west central Iran. The region is composed of five salt diapirs, developing close to the Abshirin Shurab fault zone which is a dextral strike slip fault with a NNW-SSE strike direction in the west Central Iran.

We applied unconstrained and constrained Groom-Baily (GB) decomposition analysis, as developed by McNise and Jones (2001) for different period bandwidths of each site to obtain the pattern of strikes and distortion effects across the area. We also tested the hypothesis of particular regional strike by performing the GB decomposition for fixed strike angles from 0° to 90° in 5° intervals. The availability of the full suite of strike and distortion results enhances the process of distortion removal from measurements.

The results indicate a moderate to low level of distortions in the studied area with distortion parameters distributed in a [-10°, 10°] range. There are little phase differences (<5°) between orthogonal directions at periods smaller than 10 sec, representing that the data are deemed one-dimensional i.e., free from geoelectric strike angle. Larger phase differences indicate that an accurate interpretation of conductivity structure requires 2-D modeling. Directionality analysis reveals a general trend of 70°±5° (with an inherent 90° ambiguity). We further applied real induction vectors (perpendicular to the geoelectric strike direction of a regional 2-D structure) to unravel the 90° strike ambiguity recovered by the GB method. Cumulative orientation of real induction arrows whose lengths>0.1 shows a preferred direction almost perpendicular to the N20°W azimuth. We sought for the decomposition parameters (regional strike, twist and shear angles) which were site- and frequency- independent according to the GB model. Fixing the regional strike to -20° we found stable estimate of the shear and twist angles. In the final step, regional strike, shear and twist angles were fixed at -20°, 0° and 0° respectively for all stations to derive the regional impedances. The magnitudes of all impedance tensor components recovered from the last constrained GB decomposition were compared with their corresponding original values. The results have shown that high values of diagonal impedances reduce significantly, making them suitable for further 2D modeling and interpretation.

**Key Words:** Electrical resistivity structure, magnetotelluric, salt dome, Shurab, central Iran

---

\*Corresponding Author:

mmontaha@ut.ac.ir