

## Three-dimensional impedance tensor correction in the presence of out of quadrant phases and non-inductive distortions

Heydari Sipi, A.<sup>1</sup>  | Habibian Dehkordi, B.<sup>1</sup> 

1. Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: [heydari.sipi@ut.ac.ir](mailto:heydari.sipi@ut.ac.ir)

(Received: 8 Nov 2022, Revised: 25 March 2023, Accepted: 26 Sep 2023, Published online: 15 Nov 2023)

### Summary

The non-inductive effects of structures with dimensions smaller than the measurement scale and at shallow depths prevent the correct observation of the regional electrical conductivity model and therefore make the modeling and interpretation of magnetotelluric data difficult and in some cases unreliable. The solutions that have been presented to estimate the intensity of these distortions and recover regional information have been mostly focused on two-dimensional modeling. Several studies have shown the adverse effects of galvanic distortions on 3D magnetotelluric inversion results. Removing or correcting these distortions in practice is, however, rarely done before 3D inversion due to the extreme under-determination of the problem of recovering non-distorted or regional information in 3D environments need to apply more constraints. In this research, the complexity of magnetotelluric data in the Sablan geothermal area, in the northwest of Iran, was studied. By fitting the 3D/2D/3D model in the region, shear and twist parameters have been evaluated for a part of the period interval in which the data show 2D behavior, according to skew angle values. In the next step, the same distortion parameters were applied to the three-dimensional part of the data and the components of the impedance tensor for the 3D structure were recovered. For this purpose, the phase tensor (Caldwell et al, 2004), the rotational invariants of the magnetotelluric tensor (Weaver et al, 2000) and the approach presented by Ledo et al (1998) have been used. In order to correct the distortion, in addition to the estimated values for the twist and shear angles and the period interval selected for matching the two-dimensional model, it should also be taken into account that in the two-dimensional model, the values of the distortion parameters, i.e. the torsion and shear angles, remain constant with changing period. With this criterion, despite the values of the skew angle showing a two-dimensional behavior, the average distortion parameters for a number of stations could not be selected due to high fluctuations. It seems notable to emphasize that the skew parameter is the only necessary and not sufficient condition to confirm the two-dimensional situation. The magnitude and phase of all the components of the recovered impedance tensor are different from before, indicating the importance of the distortion correction procedure before the 3D modeling and inversion. In addition, in more than half of the examines magnetotelluric sites, impedance tensor phase components are not located in the corresponding trigonometric quadrants that are constrained to be placed in them in normal 2D or even 3D earth conditions. There are numerous examples of observing and studying these effects in magnetotelluric data. This behavior is attributed to factors such as anisotropy, three-dimensional complexities, two-dimensional structures with large resistivity contrast and severe distortion (Egbert, 1990; Pina and Dentith, 2018; Wannamaker, 2005; Jones et al, 1998). The results have shown that these abnormal values are related to the rotation angle and distortion level. Some of these stations show very large distortion angles.

**Keywords:** Magnetotellurics, Phase Tensor, Impedance Tensor, Distortion, Out of Quadrant Phase.

Cite this article: Heydari Sipi, A., & Habibian Dehkordi, B. (2023). Three-dimensional impedance tensor correction in the presence of out of quadrant phases and non-inductive distortions. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(3), 593-608. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350788.1007468>

E-mail: (1) [bhabibian@ut.ac.ir](mailto:bhabibian@ut.ac.ir)



Publisher: University of Tehran Press.  
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350788.1007468>

Print ISSN: 2538-371X  
Online ISSN: 2538-3906

# تصحیح تانسور امیدانس سه‌بعدی در حضور مقادیر فاز غیرمعمول و اعوجاج‌های غیرالقایی

امیر حیدری سی پی<sup>۱</sup> | بنفشه حبیبیان دهکردی<sup>۱</sup>

۱. گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [heydari.sipi@ut.ac.ir](mailto:heydari.sipi@ut.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۲/۱/۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۷/۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۸/۲۴)

## چکیده

آثار غیرالقایی ساختارهایی با ابعاد کوچک‌تر از مقیاس مشاهده و در اعماق کم، مانع مشاهده صحیح مدل رسانایی الکتریکی منطقه‌ای می‌شوند و مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک را غیرقابل اعتماد می‌کنند. گرچه مطالعات متعدد، آثار نامطلوب اعوجاج‌های گالوانی را بر نتایج وارون‌سازی سه‌بعدی مگنتوتلوریک نشان داده‌اند، تصحیح این اعوجاج‌ها در عمل به‌ندرت قبل از وارون‌سازی سه‌بعدی انجام می‌گیرد. زیرا مسئله بازیافت اطلاعات منطقه‌ای در حالت سه‌بعدی شدیداً فرومعین است و حل مجموعه معادلات حاکم برای امیدانس غیر معوج به اعمال قیود بیشتری نیاز دارد. در این تحقیق، پیچیدگی داده‌های مگنتوتلوریک در منطقه زمین‌گرمایی سبلان مورد مطالعه قرار گرفت. این منطقه شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی جوان مربوط به دوران سنوزوئیک و فعالیت زمین‌ساختی آن متأثر از رژیم تراکمی ناشی از برخورد صفحات است. ابتدا مدلی برای منطقه تطبیق داده شد که در پریودهای میانی، دوبعدی و در پریودهای کوتاه و بلند، سه‌بعدی است. با برآورد اعوجاج و حذف آن برای بازه پریودی با رفتار دوبعدی، مؤلفه‌های تانسور امیدانس برای ساختار سه‌بعدی بازیابی شده‌اند. از آنجایی که مقادیر بازیابی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده متفاوت هستند، وارون‌سازی هر کدام از دو مجموعه نتایج متفاوتی دارد. علاوه بر این تعداد قابل توجهی از مؤلفه‌های فاز امیدانس در ربع‌های مثلثاتی که در شرایط معمولی زمین دوبعدی یا حتی سه‌بعدی مقید به قرارگیری در آنها هستند، واقع نمی‌شوند. وابستگی این مقادیر غیرمعمول به زاویه چرخش، ویژگی‌های جهتی استنباط شده از تانسور فاز و سطح اعوجاج گالوانی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که ناهمگنی‌های سه‌بعدی کمترین اثر را دارند و این پدیده عمدتاً حاصل ترکیبی از ناهمسانگردی و اعوجاج است.

واژه‌های کلیدی: مگنتوتلوریک، تانسور امیدانس، تانسور فاز، اعوجاج گالوانی، فازهای غیرمعمول.

## ۱. مقدمه

در روش مگنتوتلوریک وجود ناهمگنی‌های محلی یا کوچک‌مقیاس نزدیک به سطح، مانعی در مسیر مدل‌سازی دقیق داده‌های منطقه‌ای محسوب می‌شود. آثار اعوجاج القایی این توده‌ها به سرعت با افزایش پریود ناپدید می‌شود؛ ولی اثر گالوانی که حاصل توزیع میدان الکتریکی است و به دلیل تجمع بار بر مرزهای مقاومت ویژه ایجاد شده است، تا پریودهای بلند ادامه می‌یابد. این اثر را می‌توان در قالب یک ماتریس اعوجاج حقیقی ۲ در ۲ و مستقل از فرکانس بیان کرد. مؤلفه‌های ماتریس اعوجاج به هندسه و موقعیت توده معوج کننده؛ همچنین تباین رسانایی بین توده و محیط اطراف وابسته

هستند (ژیراسک، ۱۹۹۰). در مواردی که ساختار منطقه‌ای یک یا دوبعدی باشد، روش‌های تجزیه متعددی وجود دارند که اطلاعات مربوط به ساختار منطقه‌ای را به شکل جزئی بازیافت می‌کنند (بار، ۱۹۸۸؛ گروم و بیلی، ۱۹۸۹؛ بیبی و همکاران، ۲۰۰۵). ولی اگر ساختار منطقه‌ای سه‌بعدی باشد، اعوجاج گالوانی هم مقاومت ویژه ظاهری و هم فاز را با وابستگی به فرکانس تحت تأثیر قرار می‌دهد. گرچه راهکارهای معدودی برای حذف اثر از مدل‌های سه‌بعدی ارائه شده‌اند (اوتادا و مونکین، ۲۰۰۰؛ تانگ و همکاران، ۲۰۱۸)، بازیافت اطلاعات از ساختار منطقه‌ای در حالت سه‌بعدی

استناد: حیدری سی پی، امیر و حبیبیان دهکردی، بنفشه (۱۴۰۲). تصحیح تانسور امیدانس سه‌بعدی در حضور مقادیر فاز غیرمعمول و اعوجاج‌های غیرالقایی. مجله فیزیک زمین و

فضا، ۴۹(۳)، ۵۹۳-۶۰۸. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350788.1007468>

رایانامه: [bhabbian@ut.ac.ir](mailto:bhabbian@ut.ac.ir) (۱)



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

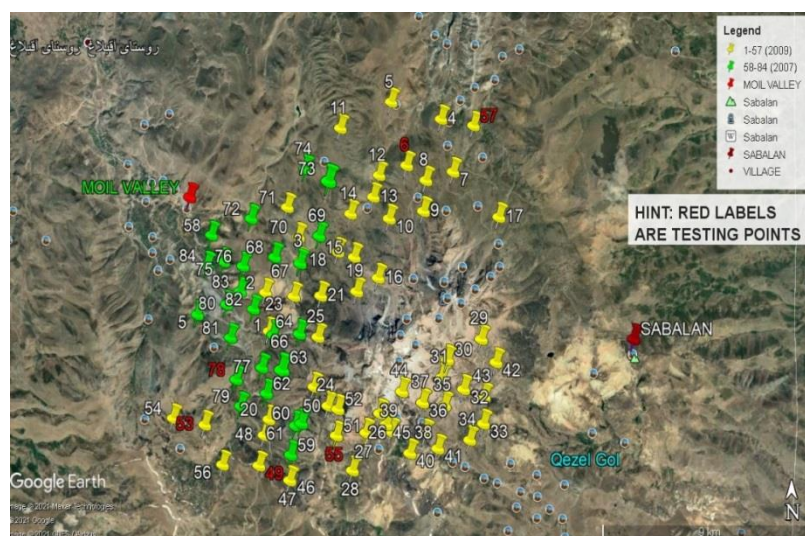
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350788.1007468>

همکاران، ۲۰۱۷؛ ایچی‌هارا و موگی، ۲۰۰۹؛ لیدل و همکاران، ۲۰۱۶؛ لیلی و ویور، ۲۰۱۰؛ سلوی و همکاران، ۲۰۱۲؛ پینا و دنتیت، ۲۰۱۸؛ هایزه و پوز، ۲۰۰۳) در این تحقیق، از ترکیبی از روش‌های تانسور فاز (کالدول و همکاران، ۲۰۰۴) و الگوریتم ارائه‌شده توسط لدو و همکاران (۱۹۹۸) برای تصحیح اعوجاج‌های اثرگذار بر داده‌های مگنتوتلوریک مربوط به منطقه زمین‌گرمایی سبلان استفاده شده است. همچنین فازهایی با مقادیر غیر معمول که حداقل در نیمی از ایستگاه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شوند، از نظر مواردی همچون وابستگی به زاویه چرخش و باقی ماندن بعد از تصحیح اعوجاج، بررسی و تحلیل شده‌اند.

اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک در طی سه مرحله در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ توسط سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) (گزارش‌های سانا، ۱۹۹۸ و ۲۰۱۰) در منطقه زمین‌گرمایی سبلان انجام شده است و در هر مرحله بهبودهایی از لحاظ بازه فرکانسی اندازه‌گیری‌ها و تعداد ایستگاه‌ها صورت گرفته است. در این تحقیق ایستگاه‌های برداشت‌شده در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ در بازه فرکانسی ۰/۰۰۳ تا ۳۰۰ هرترز که ناحیه‌ای به وسعت تقریبی ۱۵۰ کیلومتر مربع (شامل دره موئیل) را پوشش داده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که موقعیت آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.

همچنان با چالش‌های زیادی همراه است و در نتیجه احتمال خطا در تفسیر بالا می‌رود.

در شرایط نرمال یا غیر پیچیده، مقادیر فاز مؤلفه‌های XY و YX تانسور امیدانس، بسته به وابستگی زمانی مفروض برای میدان‌های الکترومغناطیسی ( $e^{\pm i\omega t}$ )، به ترتیب در ربع‌های مثلثاتی اول و سوم یا دوم و چهارم قرار می‌گیرند. مقادیر فاز بی‌هنجار که در ربع‌های مثلثاتی مربوطه واقع نمی‌شوند را با عوامل مختلفی می‌توان توضیح داد که شامل ناهمسانگردی، پیچیدگی‌های سه‌بعدی، ساختارهای دوبعدی با تباین مقاومت ویژه بزرگ و اعوجاج شدید می‌شوند (اگبرت، ۱۹۹۰؛ پینا و دنتیت، ۲۰۱۸). براسه و ایدام (۲۰۰۸)، مقادیر غیر معمول فاز مؤلفه YX را با برهم‌نهی دو بی‌هنجاری رسانایی با جهت‌های استرایک متفاوت در عمق‌های متفاوت توضیح دادند. پدرسن و انگلز (۲۰۰۵) ترکیب شدن فاز مدهای TE و TM در عمق نفوذهایی که به بیش از یک توده رسانا حساس هستند را یکی از دلایل وقوع فاز خارج از بازه معمول برمی‌شمرند. مواردی وجود دارند که در آنها میدان‌الکتریکی محلی نسبت به شارش جریان منطقه‌ای معکوس می‌شود (وانامیکر، ۲۰۰۵). این اثر فاز بی‌هنجار معمولاً به‌عنوان نتیجه وجود ساختار سه‌بعدی تفسیر می‌شود (جونز و همکاران، ۱۹۹۳). نمونه‌های متعددی از مشاهده و مطالعه این اثر در داده‌های مگنتوتلوریک وجود دارد (بولوگنا و



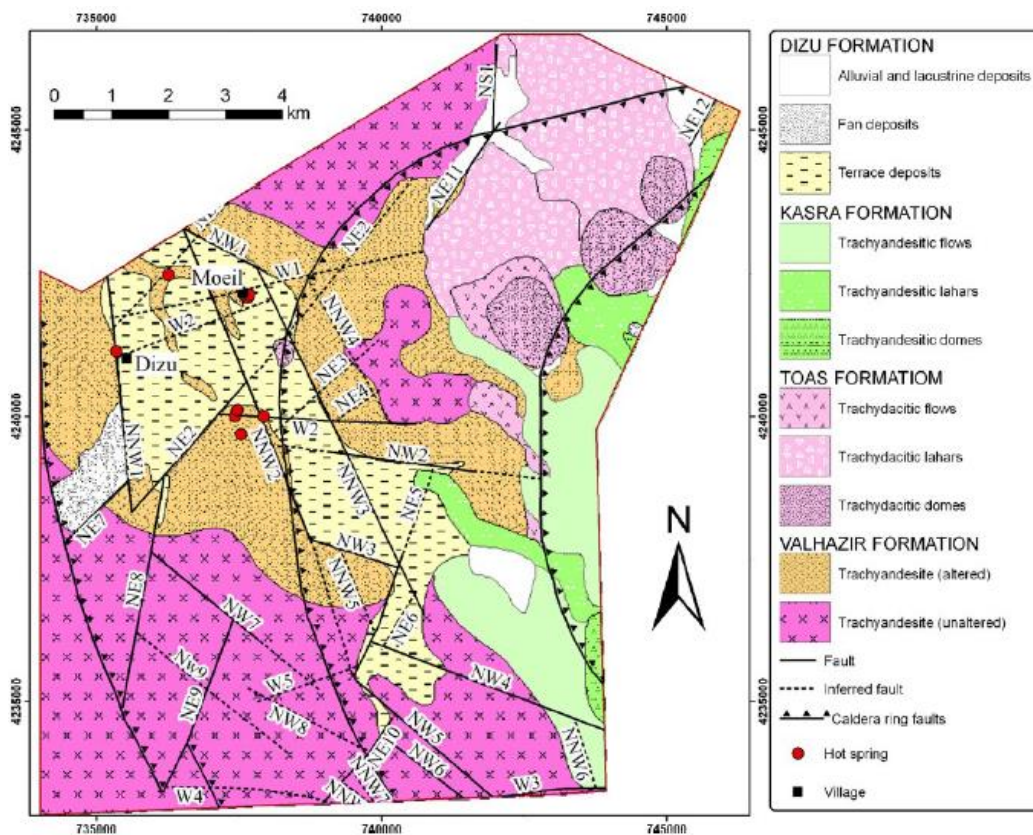
شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های مگنتوتلوریک برداشت‌شده در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹. ایستگاه‌های مشخصه‌ای که در مورد مقادیر فاز آنها بحث شده است، با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

۲. منطقه مورد مطالعه (زمین‌شناسی منطقه زمین‌گرمایی سبلان)

منطقه مورد مطالعه در شمال و شمال غرب ایران و در قسمت شمال غرب کوه سبلان، در فاصله ۱۶ کیلومتری از جنوب مشکین شهر و در دره موئیل قرار دارد که بخشی از دامنه‌های شمال غربی سبلان از منظر تکتونیکی می‌باشد و جزئی از فلات مرتفع آذربایجان است. سبلان به عنوان عضوی جوان از مجموعه آتشفشانی دوران سنوزوئیک است که متعلق به کمان ماگمایی البرز می‌باشد (علوی، ۲۰۰۷). چشمه‌های آب گرم و دودخان‌های بسیار زیادی در قسمت شیب شمالی کوه سبلان و در محل برخورد گسل‌ها و شکستگی‌های قرار دارند که همراه با خروج دود و بخار است.

فعالیت زمین‌ساختی منطقه تحت تأثیر حرکات صفحه‌های زمین‌ساختی در محل برخورد صفحات کاسپین، اوراسیا و

عربی قرار گرفته است. تنوع سنگ‌شناسی رخنمون‌ها در منطقه مورد بررسی مربوط به تشکیل واحدهای سنگی در فازهای گوناگون آتش فشانی است. در نقشه‌های زمین‌شناسی سبلان به ویژه در ناحیه مورد بررسی در دره موئیل، رخنمون‌های سنگی قابل توجهی نشان داده نشده است و عمدتاً رسوبات آبرفتی مشاهده می‌شود. فعالیت اصلی که کوه سبلان را به وجود آورده، در پلیوسن شروع شده و تا بعد از آخرین یخبندان ادامه داشته است که هضم و آمیخته شدن دو ماگما و تبلور بخشی از مهم‌ترین آنها است. تکامل ماگمایی سبلان در طی زمان طولانی صورت گرفته است (دیدون و ژرمن، ۱۹۷۶). بر اساس واحدهای سنگی-زمانی موجود، چهار واحد اصلی سنگ‌چین‌ها تقسیم‌بندی (بوگی و همکاران، ۲۰۰۰) و تحت عنوان سازندهایی با نام‌های محلی معرفی شده‌اند. وضعیت زمین‌شناسی این سازندها در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی (نوراللهی و همکاران، ۲۰۰۸).

را نشان می دهد. به این ترتیب  $(\alpha - \beta)$  جهت استرایک ساختار و زاویه  $\beta$  اطلاعات مربوط به بعدیت داده ها (رفتار دو یا سه بعدی تانسور امپدانس) را فراهم می کنند. مقادیر صفر برای  $\beta$  بیانگر حالت دوبعدی و مقادیر بزرگ تر از صفر بیانگر انحراف از حالت دوبعدی هستند که با در نظر گرفتن خطا به طور معمول به جای صفر مقدار آستانه ای برابر با  $\pm 5^\circ$  انتخاب می شود (بیبی و همکاران، ۲۰۰۵؛ کالدول و همکاران، ۲۰۰۴).

#### ۴. اعوجاج ساختار منطقه ای و فازهای بی هنجار

چنان که اشاره شد وقتی ساختار منطقه ای سه بعدی است، مسئله به لحاظ معادلاتی که اثرات اعوجاج گالوانی را بر روی تانسور امپدانس توصیف می کنند، شدیداً فرومیعن و بنابراین بازیابی تانسور امپدانس منطقه ای نسبت به حالت های یک و دوبعدی مشکل تر است. طبق راهکار ارائه شده توسط لدو و همکاران (۱۹۹۸) حتی در این شرایط هم موقعیت های بسیاری وجود دارند که با در نظر گرفتن یک مدل ترکیبی 3D/2D/3D که معرف دوبعدی بودن داده ها در برخی از پرئودهای میانی، در حضور ناهمگنی های محلی سه بعدی نزدیک به سطح و یک ساختار منطقه ای سه بعدی برای عمق های بزرگ تر است، قابل توصیف است. در این شرایط می توان پارامترهای اعوجاج را در پرئودهای خاصی که داده ها رفتار دوبعدی دارند، تخمین زد و سپس آنها را برای تصحیح داده ها در پرئودهایی که رفتار سه بعدی غالب است، اعمال کرد. در این روش بعد از محاسبه جهت استرایک و زوایای پیچش و برش - به عنوان بخش های قابل تعیین ماتریس اعوجاج - برای پرئودهای کوتاه، تعداد مجهولات کاهش می یابد و مؤلفه های تانسور امپدانس منطقه ای قابل بازیافت می شوند. ما این رهیافت را با تفاوت هایی در روش های تخمین استرایک، تشخیص محدوده دوبعدی و برآورد پارامترهای اعوجاج به کار می بریم.

با استفاده از تانسور فاز می توان بعدیت منطقه ای و برای ساختارهای دوبعدی، جهت استرایک را بدون نیاز به اعمال فرض اولیه و تأثیرپذیری از اعوجاج غیرالقایی

#### ۳. توابع پاسخ مگنتوتلوریک

در روش مگنتوتلوریک تغییرات زمانی میدان های الکتریکی و مغناطیسی با هدف شناسایی مدل مقاومت ویژه الکتریکی زیر سطحی، به طور همزمان روی سطح زمین ثبت می شوند. مؤلفه های افقی میدان های الکتریکی ( $E$ ) و مغناطیسی ( $H$ ) از طریق تانسور مختلط امپدانس ( $Z$ ) به یکدیگر مربوط می شوند:

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

مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری ( $\rho$ ) و فاز امپدانس ( $\varphi$ ) هم به صورت زیر از اندازه و فاز مؤلفه های تانسور امپدانس قابل تعریف هستند:

$$\rho_{ij} = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_{ij}|^2, \quad \varphi_{ij} = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im} Z_{ij}}{\text{Re} Z_{ij}} \right) \quad (2)$$

که  $\mu_0$  نفوذپذیری فضای آزاد و  $\omega$  فرکانس زاویه ای است. ضمناً قطبش های TE و TM به ترتیب مربوط به شارش جریان در امتداد استرایک و عمود بر آن می شوند. تانسور فاز با در برداشتن اطلاعات فازی تانسور امپدانس، یکی از مهم ترین ابزارها برای تحلیل داده های مگنتوتلوریک است با این ویژگی اساسی که تحت تأثیر اثرات غیرالقایی واقع نمی شود. تانسور فاز ( $\Phi$ ) از نسبت بخش های موهومی ( $Y$ ) و حقیقی تانسور امپدانس ( $X$ ) به دست می آید (کالدول و همکاران، ۲۰۰۴):

$$\Phi = \frac{Y}{X}, \quad \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det(X)} \begin{bmatrix} X_{22}Y_{11} - X_{12}Y_{21} & X_{22}Y_{12} - X_{12}Y_{22} \\ X_{11}Y_{21} - X_{21}Y_{11} & X_{11}Y_{22} - X_{21}Y_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که  $\det(X)$  دترمینان  $X$  است. پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  از مؤلفه های تانسور فاز محاسبه می شوند:

$$\beta = \frac{1}{2} \left| \text{Arctan} \frac{\Phi_{12} - \Phi_{21}}{\Phi_{11} + \Phi_{22}} \right|, \quad \alpha = \frac{1}{2} \left| \text{Arctan} \frac{\Phi_{12} + \Phi_{21}}{\Phi_{11} - \Phi_{22}} \right| \quad (4)$$

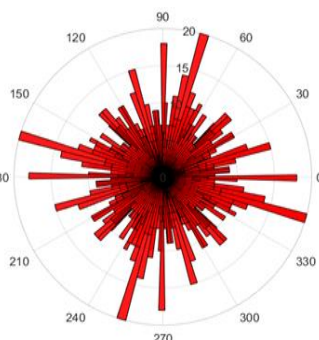
که  $\alpha$  معرف وابستگی جهتی تانسور فاز یعنی وابستگی آن به سیستم مختصات است و بنابراین ناوردای مختصاتی یا پارامتر بدون تغییر تحت چرخش محسوب نمی شود؛ در حالی که  $\beta$  میزان عدم تقارن ژئوالکتریکی ساختار منطقه ای

اسکیو تانسور فاز ( $\beta$ ) به عنوان معیار شرایط دوبعدی، بازه پریودی را جست‌وجو می‌کنیم که در آن با بهترین تقریب بیشتر ایستگاه‌ها رفتار دوبعدی داشته باشند. بر این اساس بازه ۰/۰۰۳۱۳ تا ۹/۳۵ ثانیه انتخاب و چند نمونه از تغییرات این زاویه با پریود در شکل ۴ نمایش داده شده است که درستی بازه انتخاب‌شده را تأیید می‌کند.

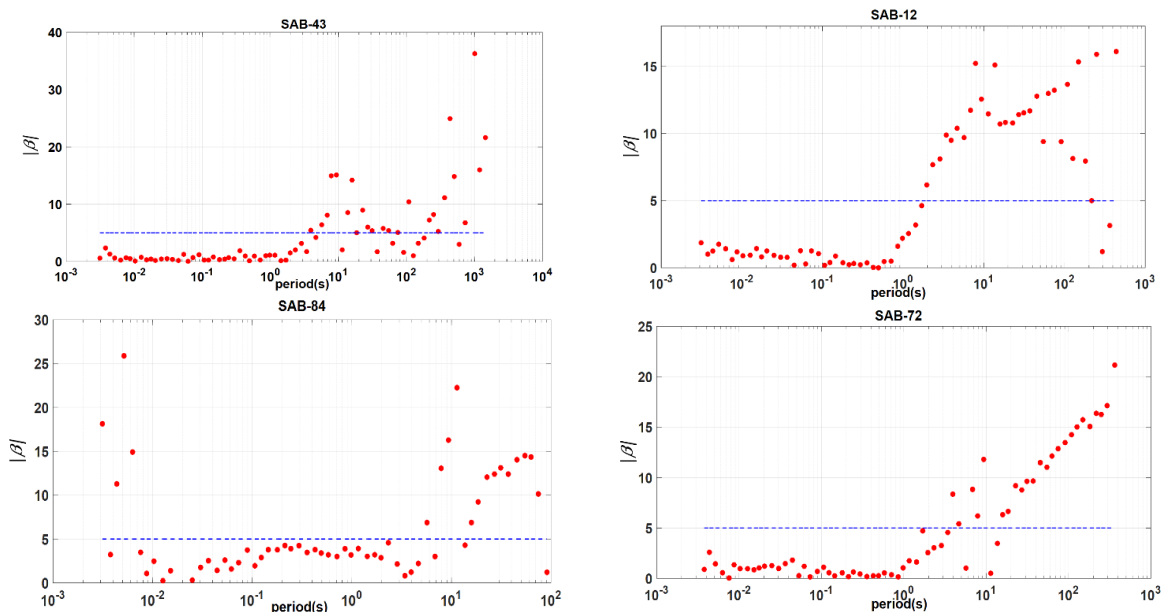
این اولین گام برای تطبیق مدل سه‌بعدی/دوبعدی/سه‌بعدی است. برای برآورد سطح اعوجاج و حذف اثر آن از داده‌های سه‌بعدی، زوایای پیچش و برش به عنوان پارامترهای قابل تعیین تانسور اعوجاج تخمین زده شدند. این کار با استفاده از کد WALDIM (مارتی و همکاران، ۲۰۰۹) انجام شد که مبنای آن ناوردهای چرخشی تانسور مگنتوتلوریک هستند (ویور و همکاران، ۲۰۰۰). شکل ۵ نمودار تغییرات زوایای اعوجاج با پریود را برای چند ایستگاه منتخب نشان می‌دهد.

احتمالی تعیین کرد. ماتریس اعوجاج را می‌توان به صورت حاصل ضرب پارامترهایی دانست که بخش‌های قابل تعیین شامل زوایای پیچش و برش و غیرقابل تعیین شامل میزان جابه‌جایی ثابت در منحنی‌های مقاومت‌ویژه ظاهری را دربرمی‌گیرد.

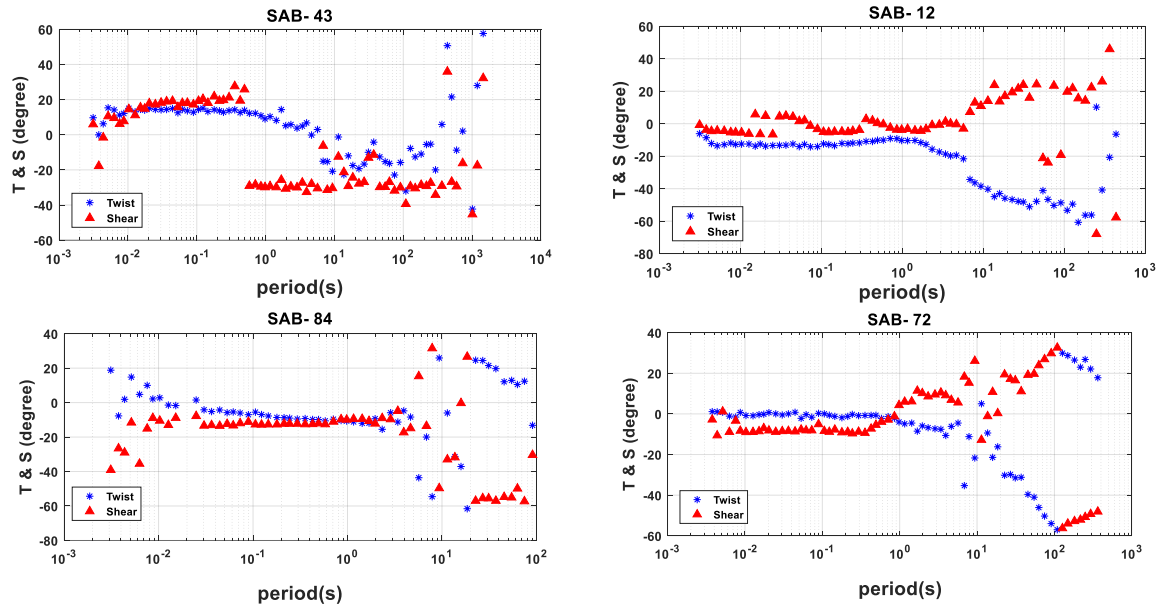
توزیع آماری جهت‌های استرایک تخمین زده‌شده (مقادیر  $(\alpha - \beta)$ ) برای همه ایستگاه‌ها و پریودهای مورد مطالعه و با احتساب ابهام ذاتی نود درجه‌ای موجود در داده‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. علی‌رغم پراکندگی موجود در جهت‌های تخمین زده‌شده که از عوامل مختلفی همچون وجود ناهمگنی‌های سه‌بعدی ناشی می‌شود، استرایک غالب شمالی-جنوبی قابل تشخیص است. به این ترتیب روند ساختار ژئوالکتریکی منطقه منطبق بر مختصات اندازه‌گیری لحاظ و چرخشی اعمال نشد. با در نظر گرفتن محدوده (۵ و -۵) درجه برای زاویه



شکل ۳. نمودار آماری توزیع جهت‌های استرایک حاصل از روش تانسور فاز.



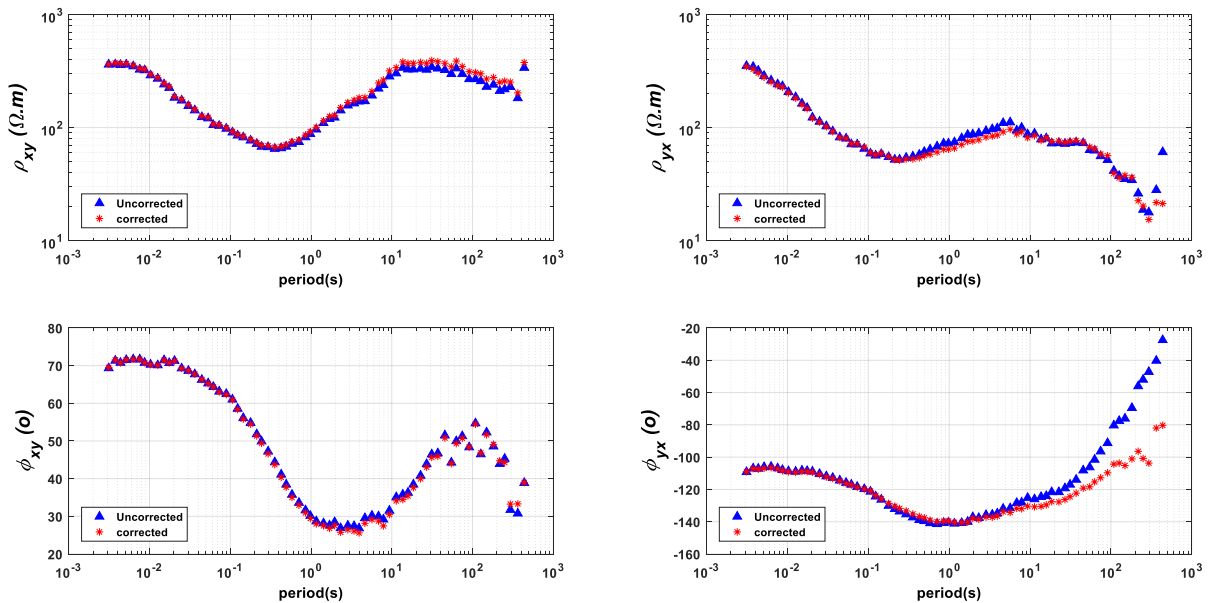
شکل ۴. منحنی تغییرات  $\beta$  برحسب پریود برای ایستگاه‌های ۱۲، ۴۳، ۷۲ و ۸۴.



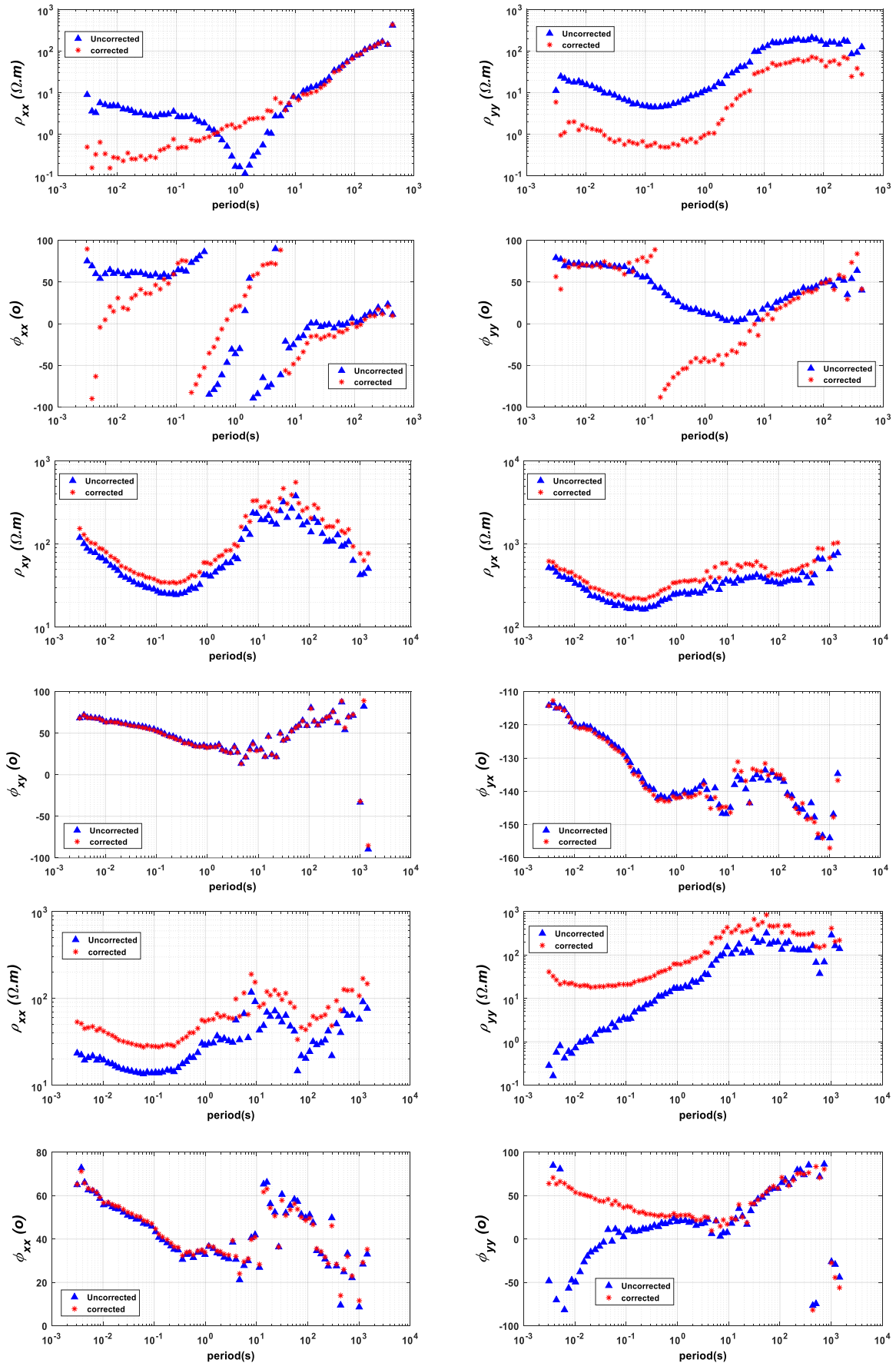
شکل ۵. نمودار زوایای پیچش و برش برای ایستگاه‌های ۱۲، ۴۳، ۷۲ و ۸۴.

میانگین را برای تعدادی از ایستگاه‌ها به دلیل نوسانات زیاد نمی‌توان انتخاب کرد. یادآوری این نکته در اینجا لازم به نظر می‌رسد که پارامتر اسکيو تنها شرط لازم و نه کافی برای تأیید وضعیت دوبعدی است. برای سایر ایستگاه‌ها با تخمین مقادیر میانگین زوایای اعوجاج و با استفاده از روابط ارائه شده توسط لدو و همکاران (۱۹۹۸)، مؤلفه‌های تانسور امیدانس بازیابی شدند (شکل‌های ۶ تا ۹).

برای تصحیح اعوجاج، علاوه بر مقادیر تخمین زده شده برای زوایای پیچش و برش و بازه پریودی انتخاب شده برای تطبیق مدل دوبعدی، این نکته را هم باید مد نظر قرار داد که در حالت دوبعدی، مقادیر پارامترهای اعوجاج یا همان زوایای پیچش و برش با تغییر پریود ثابت باقی می‌مانند. با این معیار، علی‌رغم این که مقادیر زاویه اسکيو رفتار دوبعدی را نشان داده‌است، پارامترهای اعوجاج

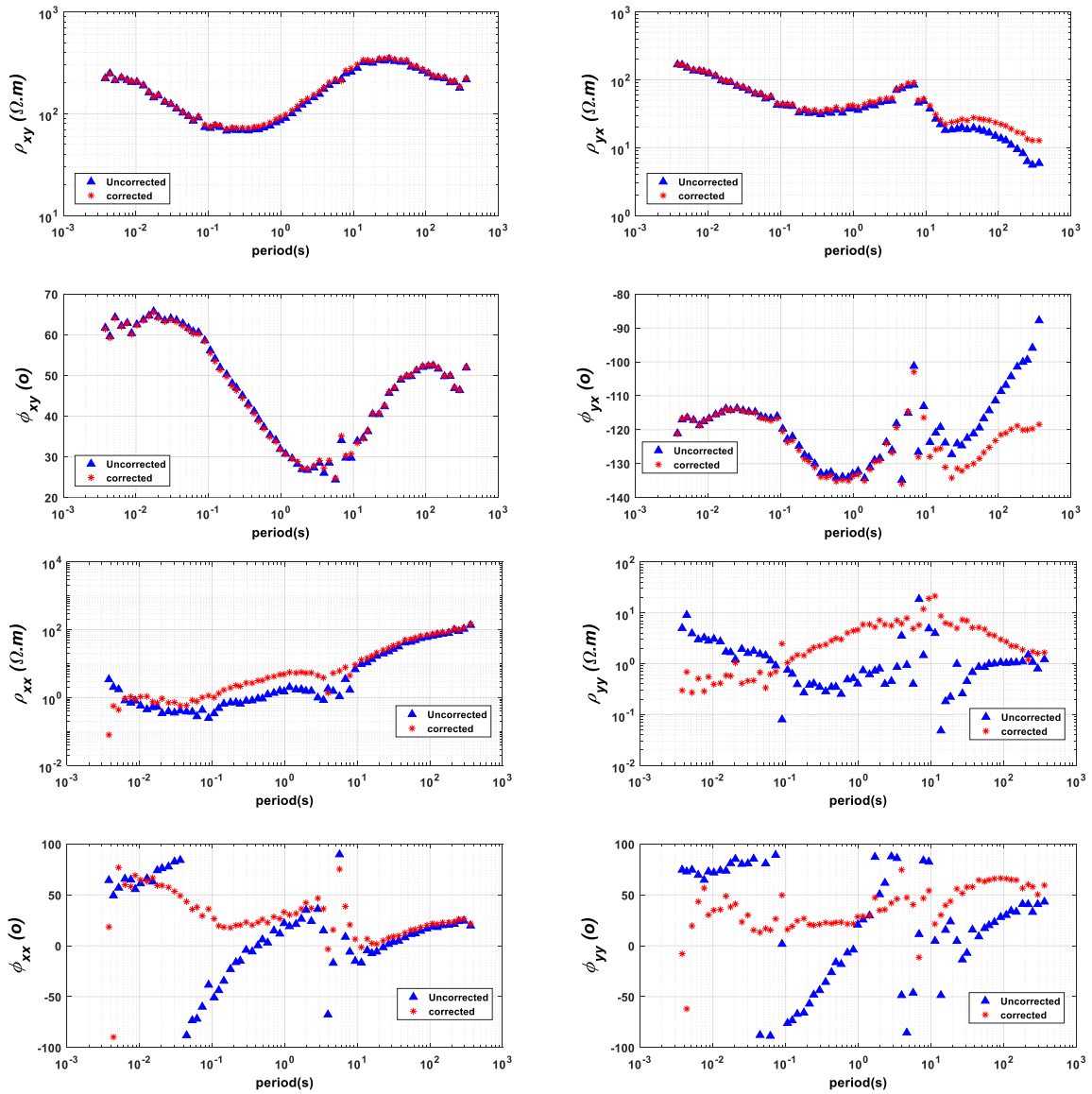


شکل ۶. بازیابی مؤلفه‌های تانسور امیدانس بعد از حذف اعوجاج و مقایسه آنها با مقادیر اندازه‌گیری شده ایستگاه ۱۲.

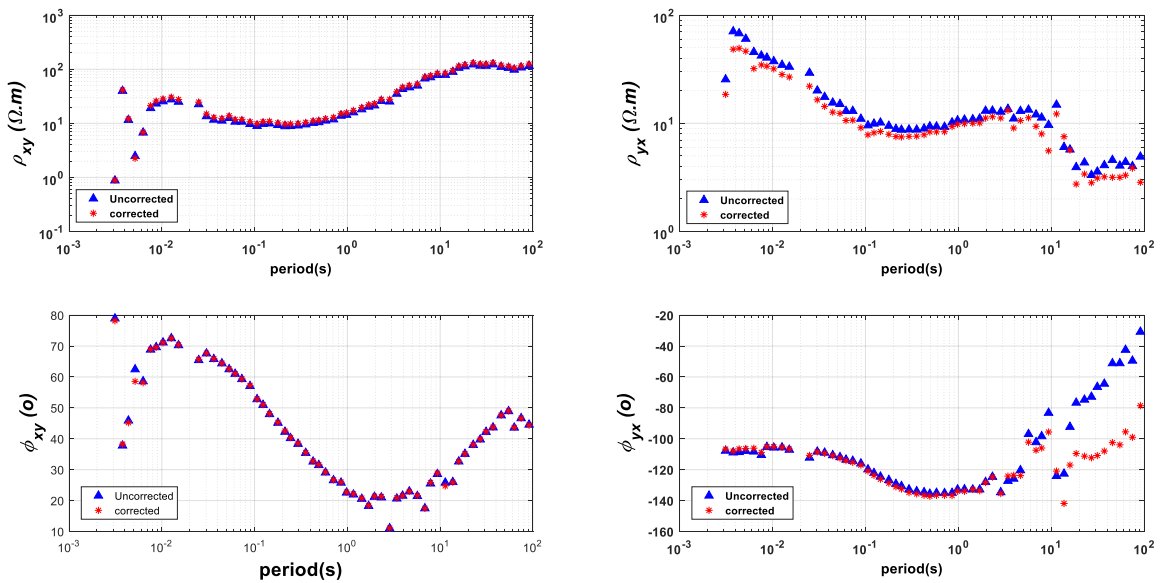


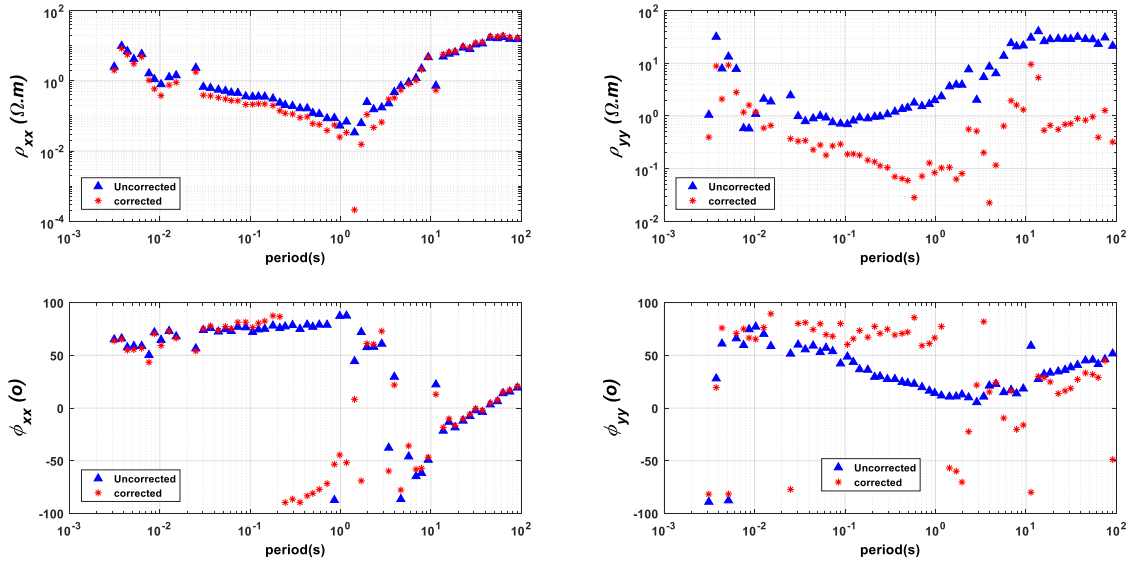
شکل ۷. بازیابی مؤلفه‌های تانسور امپدانس بعد از حذف اعوجاج و مقایسه آنها با مقادیر اندازه‌گیری شده ایستگاه ۴۳.





شکل ۸. بازیابی مؤلفه‌های تانسور امیدانس بعد از حذف اعوجاج و مقایسه آنها با مقادیر اندازه‌گیری شده ایستگاه ۷۲.

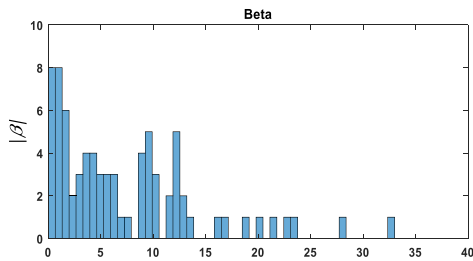




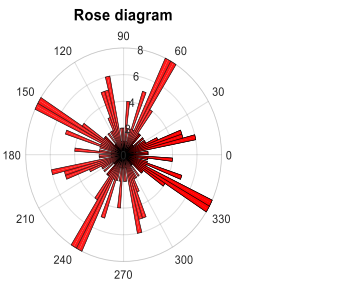
شکل ۹. بازیابی مؤلفه‌های تانسور امپدانس بعد از حذف اعوجاج و مقایسه آنها با مقادیر اندازه‌گیری شده ایستگاه ۸۴

از ۹/۳۵ ثانیه، سه‌بعدی رفتار می‌کنند. در مقابل ایستگاه‌های ۴۹، ۵۳ و ۵۷ نماینده ایستگاه‌هایی هستند که مقادیر بی‌هنجار فاز برای آنها به‌طور پراکنده در پریودهای متفاوت مشاهده می‌شوند. برای ایستگاه‌های انتخاب‌شده، فاز مد TM را به شکل تابعی از زاویه چرخش رسم (شکل‌های ۱۰-ج تا ۱۵-ج) و آن را همراه با بعدیت داده‌ها و جهت‌های غالب حاصل از تانسور فاز (شکل‌های ۱۰-الف تا ۱۵-الف) بررسی می‌کنیم.

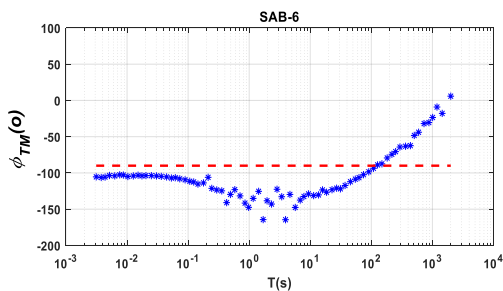
چنان‌که گفته شد، حداقل در نیمی از ایستگاه‌های مورد مطالعه، مقادیر فاز غیرمعمول یا بی‌هنجار مشاهده می‌شوند. در شکل ۱۰-د تا ۱۵-د منحنی تغییرات فاز مد TM بر حسب پریود برای چند ایستگاه مشخصه نشان داده شده است. در ایستگاه‌های ۶، ۵۵ و ۷۸ همه‌ی مقادیر بی‌هنجار فاز در پریودهای بلند اتفاق می‌افتند. ضمناً می‌بینیم که بر اساس زاویه اسکویو تانسور فاز (شکل‌های ۱۰-ب تا ۱۵-ب)، بسیاری از داده‌ها در پریودهای بلندتر



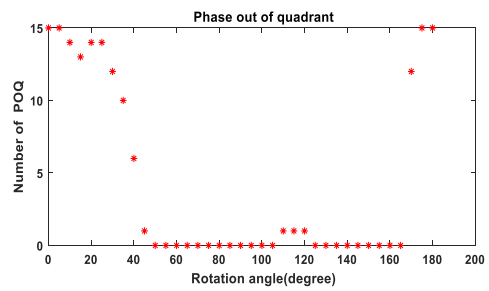
(ب)



(الف)

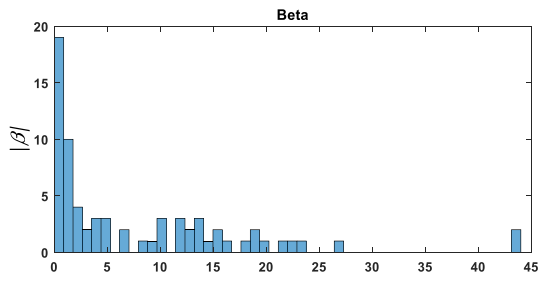


(د)

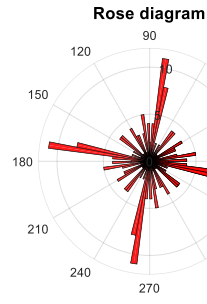


(ج)

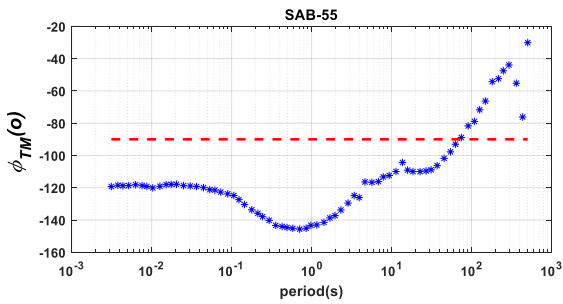
شکل ۱۰. الف) نمودار آماری استرایک، ب) هیستوگرام توزیع مقادیر زاویه اسکویو، ج) تعداد نقاط داده با فاز بی‌هنجار و د) فاز مد TM بر حسب پریود؛ برای ایستگاه ۶.



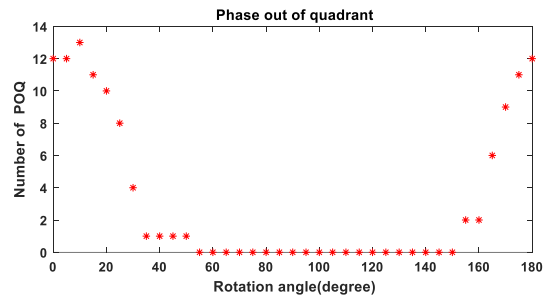
(ب)



(الف)

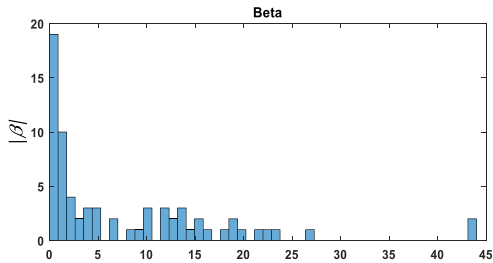


(د)

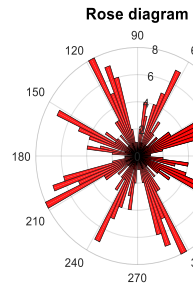


(ج)

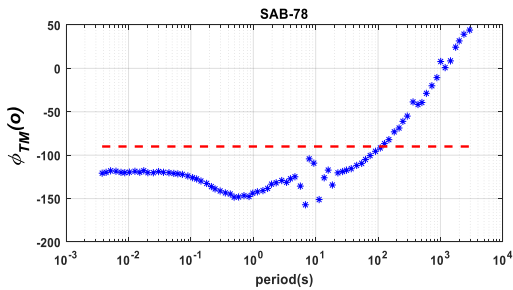
شکل ۱۱. الف) نمودار آماری استرایک، ب) هیستوگرام توزیع مقادیر زاویه اسکيو، ج) تعداد نقاط داده با فاز بی‌هنجار و د) فاز مد TM بر حسب پریود؛ برای ایستگاه ۵۵.



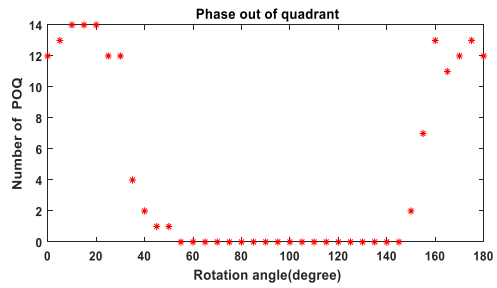
(ب)



(الف)

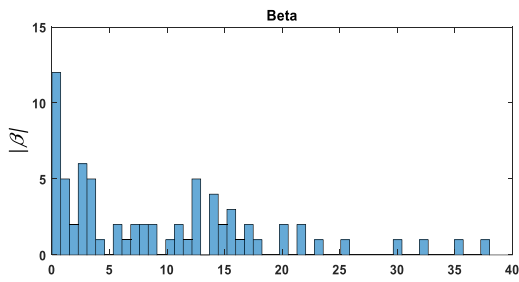


(د)

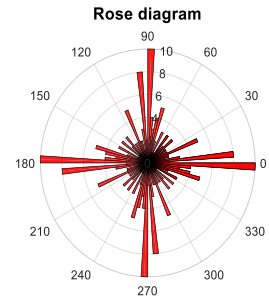


(ج)

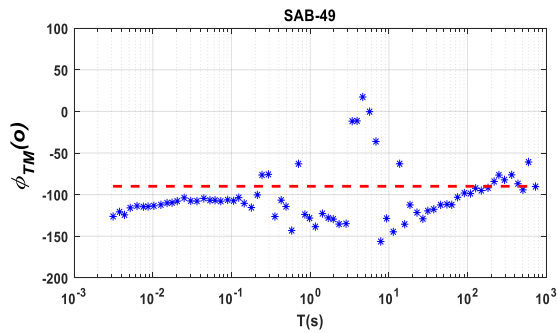
شکل ۱۲. الف) نمودار آماری استرایک، ب) هیستوگرام توزیع مقادیر زاویه اسکيو، ج) تعداد نقاط داده با فاز بی‌هنجار و د) فاز مد TM بر حسب پریود؛ برای ایستگاه ۷۸.



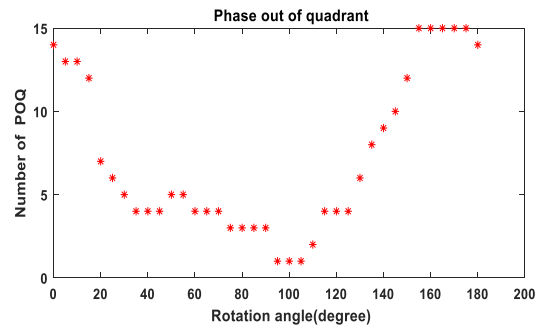
(ب)



(الف)

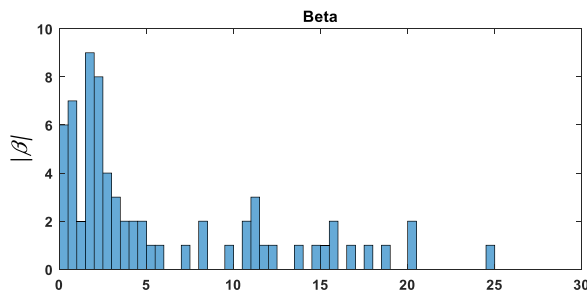


(د)

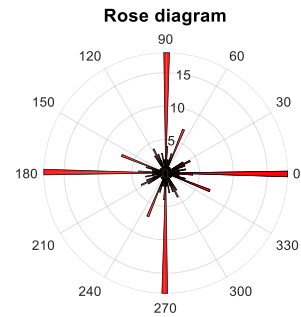


(ج)

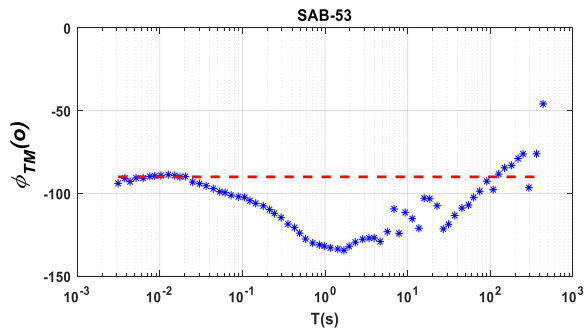
شکل ۱۳. الف) نمودار آماری استرایک، ب) هیستوگرام توزیع مقادیر زاویه اسکيو، ج) تعداد نقاط داده با فاز بی‌هنجار و د) فاز مد  $TM$  بر حسب پریود؛ برای ایستگاه ۴۹.



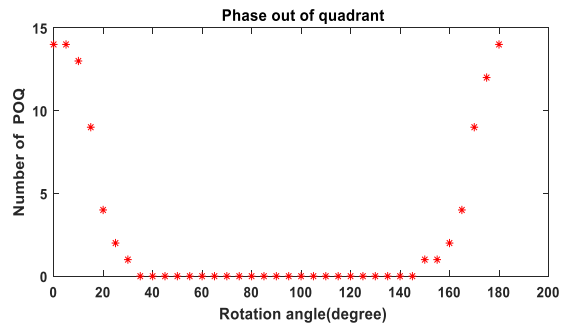
(ب)



(الف)

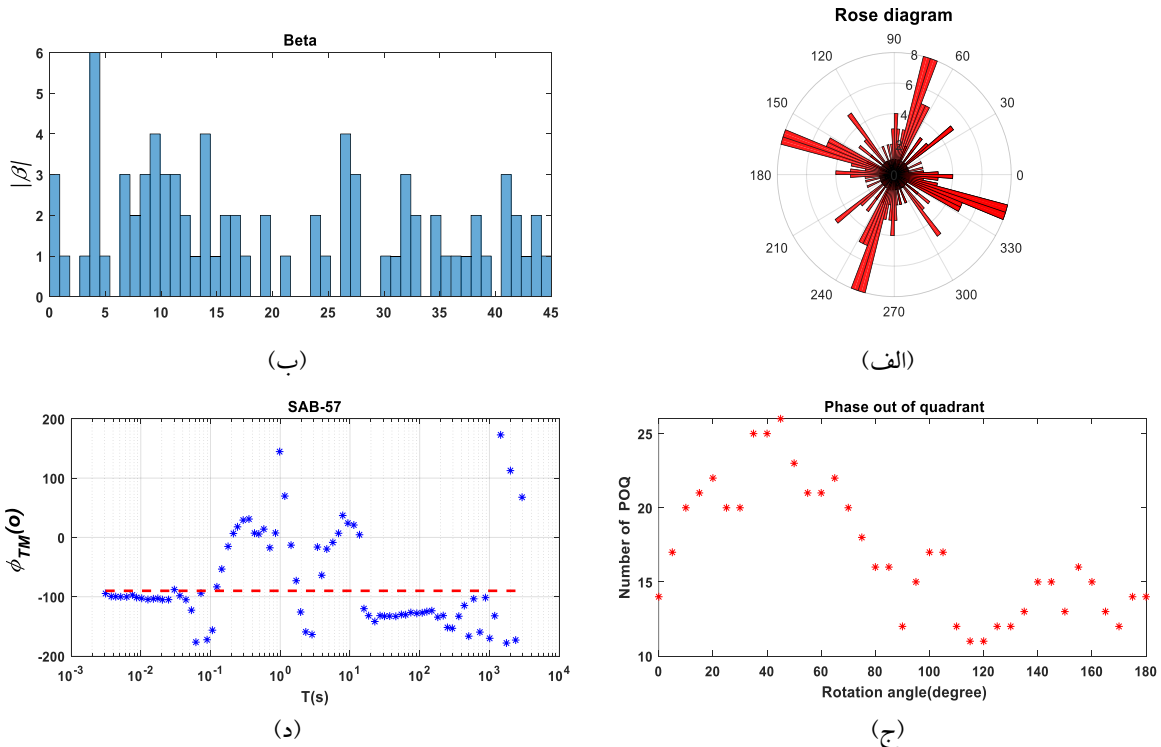


(د)



(ج)

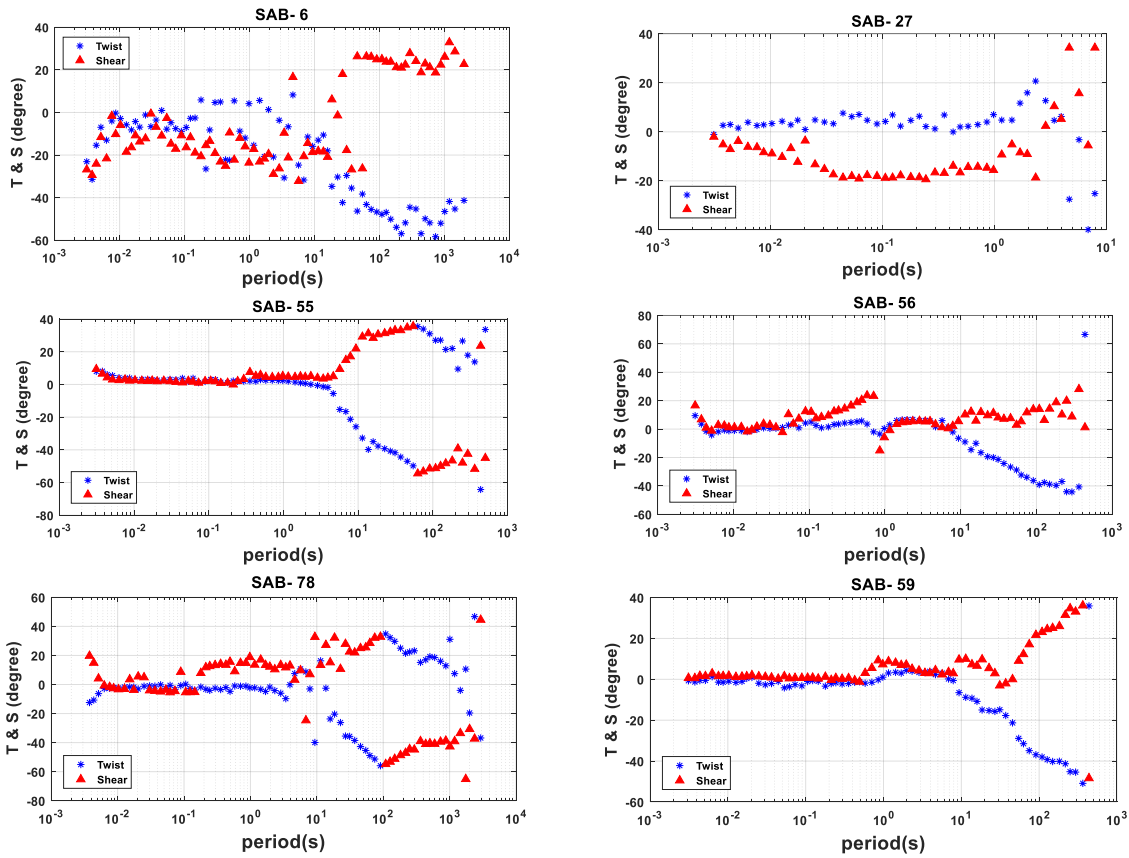
شکل ۱۴. الف) نمودار آماری استرایک، ب) هیستوگرام توزیع مقادیر زاویه اسکيو، ج) تعداد نقاط داده با فاز بی‌هنجار و د) فاز مد  $TM$  بر حسب پریود؛ برای ایستگاه ۵۳.



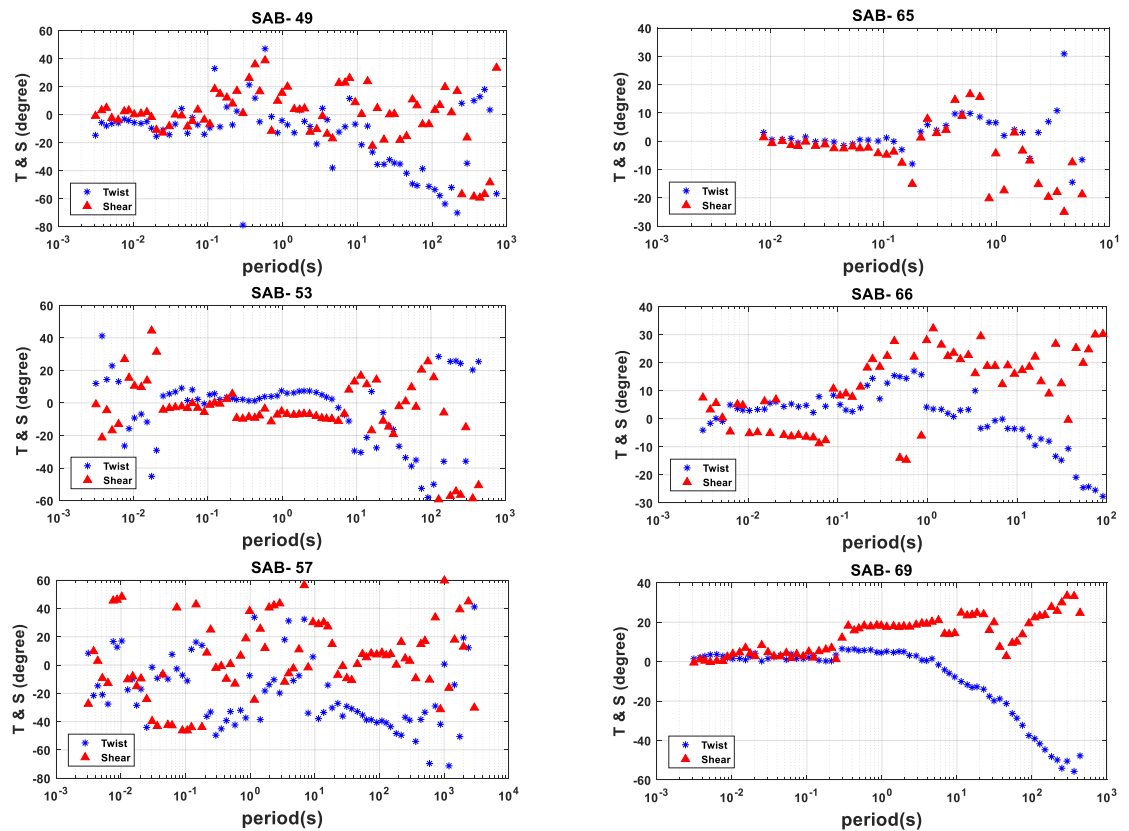
شکل ۱۵. الف) نمودار آماری استرایک، ب) هیستوگرام توزیع مقادیر زاویه اسکویو، ج) تعداد نقاط داده با فاز بی‌هنجار و د) فاز مد TM بر حسب پریود؛ برای ایستگاه ۵۷.

فازها همچنان وجود دارند. چنان‌که مشاهده می‌شود، مقادیر فاز خارج از روند در ابتدا و انتهای محور مربوط به زاویه چرخش بیشترین تعداد را دارند. از لحاظ سطح اعوجاج ارزیابی‌شده هم بین این دو گروه از ایستگاه‌ها (با و بدون فازهای بی‌هنجار) تفاوت وجود دارد (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). در هر دو گروه اعوجاج با افزایش پریود شدید می‌شود؛ ولی در ایستگاه‌هایی با فاز غیرمعمول، زوایای پیچش و برش در پریودهای بلند مقادیر بزرگ‌تری پیدا می‌کنند و در تعداد کمی از نقاط داده، حتی حالت حدی (۴۵ درجه) برای زاویه برش هم پشت سر گذاشته می‌شود که می‌تواند نشانه‌ای بر اثر کانالیزه‌شدن جریان تلقی شود (مک‌نیس و جونز، ۲۰۰۱). با توجه به این‌که تانسور فاز مستقل از آثار گالوانی است، وابستگی جهتی که تانسور فاز بر آن دلالت می‌کند هم متأثر از اعوجاج نیست. با در نظر گرفتن این نکته و احتساب موارد فوق، به نظر می‌رسد بهترین توضیح برای این اثر، ترکیبی از ناهمسانگردی احتمالی و اعوجاج باشد.

زاویه چرخش صفر معرف دستگاه مختصات مورد استفاده و مربوط به حالتی است که محور X منطبق بر راستای شمال-جنوب مغناطیسی است. نتایج بررسی نحوه تغییر تعداد زوایای POQ بر حسب زاویه چرخش نشان می‌دهد که وقوع مقادیر بی‌هنجار وابسته به مختصاتی است که داده‌ها در آن مشاهده می‌شوند. در بازه قابل توجهی از زوایای چرخش، فاز بی‌هنجار برای هیچ‌کدام از مد‌ها مشاهده نمی‌شود. در حالی‌که اگر این اثر ناشی از شرایط سه‌بعدی (بدون وجود استرایک منطقه‌ای غالب) باشد، انتظار می‌رود هیچ وابستگی جهتی از خود نشان ندهد. وجود فازهایی که در بازه معمول واقع نمی‌شوند، می‌تواند ناشی از عدم انطباق سیستم مورد استفاده بر مختصات استرایک منطقه‌ای باشد. این یک ویژگی مشاهده‌شده در مدل‌های دوبعدی همسانگرد در مختصاتی است که بر سیستم استرایک منطبق نباشد (پینا و دنتیت، ۲۰۱۸). ولی این توضیح هم با توجه به نحوه تغییراتی که در اینجا نسبت به زاویه چرخش رخ می‌دهد، برای داده‌های سبلان قابل اعمال نیست؛ چراکه در سیستم استرایک هم این



شکل ۱۶. مقایسه مقادیر زوایای پیچش و برش برای ایستگاههای ۲۷، ۵۶ و ۵۹ (بدون مقادیر غیرمعمول فاز) و ۶، ۵۵ و ۷۸ (دارای مقادیر غیرمعمول فاز).



شکل ۱۷. مقایسه مقادیر زوایای برش و پیچش برای ایستگاههای ۶۵، ۶۶ و ۶۹ (بدون مقادیر غیرمعمول فاز) و ۴۹، ۵۳ و ۵۷ (دارای مقادیر غیرمعمول فاز).

## ۵. نتیجه‌گیری

نیستند. یکی دیگر از پیچیدگی‌هایی که در داده‌های مگنتوتلوریک مشاهده می‌شود، مقادیر غیرمعمول فاز است که رابطه آنها با مختصات اندازه‌گیری و پارامترهای اعوجاج مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل این مقادیر همراه با ویژگی‌های جهتی تانسور فاز، مقادیر زوایای پیش و برش و پارامتر اسکيو، نشان می‌دهد که این مقادیر، وابسته به زاویه چرخش و بنابراین کمتر مرتبط با اثرات سه‌بعدی هستند. ضمناً افزایش مقدار زوایای پیش و برش با پیرو، در ایستگاه‌هایی که فاز غیرمعمول دارند، شدیدتر است و گاهی از مقادیر حدی هم عبور می‌کند. بررسی‌های انجام‌شده بر این نتیجه دلالت می‌کنند که مقادیر غیرمعمول فاز با احتمال بیشتر با درجه‌ای از ناهمسانگردی و نیز اعوجاج غیرالقایی و با احتمال کمتر با اثرات سه‌بعدی داده‌ها در این منطقه مرتبط هستند.

## مراجع

- Bahr, K. (1988). Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. *J. Geophys.*, 62, 119–127.
- Bibby, H.M., Caldwell, T.G., & Brown, C. (2005). Determinable and non-determinable parameters of galvanic distortion in magnetotellurics. *Geophys. J. Int.*, 163, 915–930.
- Bogie, I., Cartwright, A.J., Khosrawi, K., Talebi, B., & Sahabi, F. (2000). The MeshkinShahr geothermal project, Iran. *Proceedings, World Geothermal Congress*, 997–1002.
- Bologna, M.S., Egbert, G.D., Padilha, A.L., P'adua, M.B., & Vitorello, I. (2017). 3-D inversion of complex magnetotelluric data from an Archean-Proterozoic terrain in northeastern São Francisco Craton, Brazil. *Geophys. J. Int.*, 210, 1545–1559.
- Brasse, H., & Eydarn, D. (2008). Electrical conductivity beneath the Bolivian Orocline and its relation to subduction processes at the South American continental margin. *Journal of Geophysical Research*, 113, B07109.
- Caldwell, T.G., Bibby, H. M., & Brown, C. (2004). The magnetotelluric phase tensor. *Geophys. J. Int.*, 158(2), 457–469.
- Egbert, G.D. (1990). Comments on 'Concerning dispersion relations for the magnetotelluric tensor' eds Yee, E. & Paulson, K.V. *Geophys. J. Int.*, 102, 1–8.
- Groom, R. W., & Bailey, R. C. (1989). Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three dimensional galvanic distortion. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 94, 1913–1925.
- Heise, W. & Pous, J. (2003). Anomalous phases exceeding 90° in magnetotellurics: anisotropic model studies and a field example. *Geophys. J. Int.*, 155(1), 308–318.
- Ichihara, H., & Mogi, T. (2009). A realistic 3-D resistivity model explaining anomalous large magnetotelluric phase: the L-shaped conductor model. *Geophys. J. Int.*, 179, 14–17.
- Iran Renewable Energies Organization (SUNA) Islamic Republic of Iran: MT Survey at NW Sabalan Geothermal Project, NW Iran, March 2010.
- Jiracek, G.R. (1990). Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction. *Surveys in Geophysics*, 11, 163–203.
- Jones, A.G., Groom, R.W., & Kurtz, R.D. (1993). Decomposition of the BC87 dataset. *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, 1127–1150.
- KML, (1998). Sabalan geothermal project, Stage 1, Surface exploration, final exploration report. Kingston Morrison Limited Co. Report 2505-RPT-GE-003- for the Renewable Energy Organization of Iran (SUNA), Tehran, Iran, 83 pp.
- Ledo, J., Queralt, P., & Pous, J. (1998). Effects of galvanic distortion on magnetotelluric data

- over a three-dimensional regional structure. *Geophys. J. Int.*, 132, 295-301.
- Liddell, M., Unsworth, M., & Peck, J. (2016). Magnetotelluric imaging of anisotropic crust near Fort McMurray, Alberta: implications for engineered geothermal system development. *Geophys. J. Int.*, 205, 1365-1381.
- Lilley, F.E.M., & Weaver, J.T. (2010). Phases greater than 90° in MT data: Analysis using dimensionality tools. *Journal of Applied Geophysics*, 70, 9-16.
- 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. *Comput. Geosci.*, 35(12), 2295-2303.
- McNeice, G. W., & Jones, A. G., (2001). Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data, *Geophysics*, 66 (1). *Society of Exploration Geophysicists*, 66(1), 158-173.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H., & Tanaka, T., (2008). GIS integration model for geothermal exploration and well siting. *Journal of Geothermics*. 37, 107-131.
- Pedersen, L.B., & Engels, M. (2005). Routine 2D inversion of magnetotelluric data using the determinant of the impedance tensor. *Geophysics*, 70 (2), G33-G41.
- Pina, P. & Dentith, M. (2018). Magnetotelluric data from the Southeastern Capricorn Orogen, Western Australia: an example of widespread out-of-quadrant phase responses associated with strong 3-D resistivity contrasts. *Geophys. J. Int.*, 212, 1022-1032.
- Selway, K., Thiel, S. & Key, K. (2012). A simple 2-D explanation for negative phases in TE magnetotelluric data. *Geophys. J. Int.*, 188(3), 945-958.
- Tang, W., Li, Y., Oldenburg, D.W., & Liu, J. (2018). Removal of galvanic distortion effects in 3D magnetotellurics data by an equivalent source technique. *Geophysics*, 38 (2), E95-E110.
- Utada, H., & Munekane, H. (2000). On galvanic distortion of regional three-dimensional magnetotelluric impedances. *Geophys. J. Int.*, 140, 385-398.
- Weaver, J.T., Agarwal, A.K., & Lilley, F.E. (2000). Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants. *Geophys. J. Int.*, 141, 321-336.
- Wannamaker, P.E. (2005). Anisotropy versus heterogeneity in continental solid earth electromagnetic studies: fundamental response characteristics and implications for physicochemical state. *Surveys in Geophysics*, 26, 733-765.