



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دكترى اكتشاف مواد معدني

ارائه الگوی اکتشافی ترکیبی بر مبنای رسانندگی الكتريكي مختلط دادههاي الكترومغناطيسي و ژئوشیمیایی – کانیسازی طلای پهنه برشی کردستان

نگارنده: فريدون شريفي



فرم شماره ۱۲: صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D )

بدینوسیله گواهی می شود اقای فریدون شریفی دانشجوی دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن به شماره دانشجویی ۹۳۱۶۴۱۵ ورودی مهرماه سال ۱۳۹۲ در تاریخ ۱۳۹۸/۲/۱۰ از رساله خود با عنوان : ارائه الگوی اکتشافی ترکیبی بر مینای رساندگی الکتریکی مختلط دادههای الکترومغناطیسی و ژنوشیمیایی- کالیسازی طلای بهته برشی کردستان دفاع و با اخذ نمره س**م 4 باشیا.** به درجه دسکاس**ک**یست ناتل گردید.

ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ – ۱۷ 🗌	الف) درجه عالى: تمره ۲۰-۱۹ 🗹
د) غير قابل قبول و نياز به دفاع مجدد دارد	ج) درجه خوب: نمره۱۶/۹۹–۱۵ 🗌
	ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد

امضلا	مرتبه علمى	نام و نام خانوادگی	هیئت داوران	رديف
155	دانشيار	دكتر عليرضا عرباميري	استاد راهتما	١
en F	دانشبار	دكتر ابوالقاسم كامكارروحاني	استاد راهنعا	۲
	استاديار	دكتر مسعود علييور أصل	استاد مشاور	٣
S cu	استاديار 🤇	دكتر يانا بورنر	استاد مشاور	
	استاد	دکتر علی مرادزاده	استاد مدعو خارجى	۴
· A Anna	دانثيار	دكثر سيد رضا قوامىريابى	استاد مدعو داخلى	۵
$\psi \in$	دانتَّبيار	دکثر حمید أقاجانی	استاد مدعو داخلي	۶
P D			سرپرست ( تماینده )	٧
1 - F-	دانشيار -	دكثر مهرداد سليمانى منفرد	تحصبلات تكميلى	
$\gamma \sim$			دانشكده	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأبيد مراتب فوق مقرر فرمائيد اقدامات لازم بعمل آيد.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران: دکتر محمد عطاؤ تاريخ و امضاء: Not up go

این اثر کوچک را در کال امتنان تقدیم می نایم به:

روح والای حضرت شیخ محد عثان سراج الدین نقشبندی (قدس اسه اسراره)

آن مرشدی که انسانیت رابرایم تدریس کرد، آنجاکه فرمود:

از جور مکر و آزو ہوی ہوشارماش

باذكر وحرز رابطه دل راحجاب كن

دائم به قتل نفس بکوشیدو دم مزن . مصوروار کوشہ دل راخصاب کن

سمر وقدرداني

مطلق ستايش سزاوار واجبالوجود است كه مفيض وجود عالم ممكن و مصاديق آن را بدون چشمداشت به هستي ميآورد و همه تسبيح گوي او هستند. همچنین افضل صلوات و اکمل تسلیمات بر خلاصه کائنات و جوهر فرد صفات حمیده، حضرت رسول مصطفی (ص)، باد. بی تردید این پژوهش بدون کمکها و راهنمائیهای بسیاری از سروران و دوستان گرانقدر، به نتیجه مطلوب نمیرسید. از این رو بر خود لازم میدانم تا از پدر و مادر و خواهر عزیزم و سایر اعضای خانوادمام بهخاطر حمایتهای بیدریغ مادی و معنوی آنها نهایت تشکر و سپاس را به عمل آورم. همچنین از اساتید راهنمای فرزانه و ارجمندم جناب آقای دکتر علیرضا عربامیری و جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی که همواره با راهنماییهای علمی ارزشمند، فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی و صحرایی و حمایتهای همهجانبه و بیدریغ، بسیار فراتر از نقش استاد راهنما، حامي و پشتيبان بنده بودهاند؛ بينهايت سپاسگزارم. از اساتيد محترم مشاور جناب آقاي دكتر مسعود عليپور اصل بهدليل مشاوره-های ارزشمند در زمینه تجزیه و تحلیل دادههای ژئوشیمی، سرکار خانم دکتر یانا بورنر (Jana Börner) به خاطر راهنمایی در زمینه اندازهگیری، پردازش و تولید کدهای متلب برای مدلسازی وارون دادههای SIP آزمایشگاهی، تأمین هزینه تهیه مقاطع صیقلی برای انجام آنالیز MLA و برگزاری دوره أشنایی با روش SIP برای اینجانب، تشکر و قدردانی مینمایم. از جناب أقای دکتر رالف بورنر (Ralph-Uwe Börner) بهخاطر راهنماییهای علمی بیدریغ و ارزشمندشان در زمینه مدلسازی دادههای HEM و اجازه استفاده از کد متلب ایشان برای مدلسازی وارون با استفاده از روش VFSA، جناب آقای مارتین سونتاگ (Martin Sonntag) به خاطر همکاری در انجام آزمایش های SIP و حمایتهای همهجانبه و دوستانه ایشان، جناب آقای دکتر ماتهیاس شونغت (Mathias Scheunert) به خاطر راهنماییهای ارزشمندشان در خصوص مدلسازی داده-های HEM، جناب آقای پرفسور اسپیتزر رئیس مؤسسه ژئوفیزیک و ژئواینفورماتیک و سرپرست گروه الکترومغناطیس دانشگاه صنعتی فرایبرگ آلمان به خاطر میزبانی بنده به مدت یکسال در گروه خود، فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی مرتبط با روش SIP، حمایت مالی برای شرکت در کنفرانس EMTF و حمایت در سایر زمینههای مورد نیاز، کمال تشکر و سپاس را دارم.

از جناب آقایان پرفسور برنهارد شولتز (Bernhard Schulz) و پرفسور جنز گوتزمر (Jens Gutzme) به واسطه عدم دریافت هزینه انجام آزمایش-های کانیشناسی MLA و سرکار خانم سبینه گیلبغیشت (Sabine Gilbricht) به خاطر راهنماییهای بیدریغ ایشان در انجام آزمایش و تفسیر دادههای MLA تشکر و سپاس فراوان دارم.

از جناب آقای دکتر آلکساندر گریبنکو (Alexander Gribenko) عضو هیأت علمی گروه CEMI در دانشگاه یوتا به دلیل راهنماییهای ایشان در خصوص مدلسازی GEMTIP بیضوی؛ جناب آقایان دکتر برنارد سیمون (Bernhard Siemon) و پرفسور اسبن آوکن (Esben Auken) به واسطه راهنماییهای ایشان درخصوص مدلسازی یکبعدی دادههای HEM و پروفسور پیتر فیلسموزر (Peter Filsmoser) بهخاطر راهنمایی در مورد تجزیه و تحلیل مؤلفههای اصلی مقاوم دادههای ژئوشیمی بسیار سپاسگزارم.

از داوران محترم رساله جناب آقای دکتر علی مرادزاده، جناب آقای دکتر سید رضا قوامی ریابی و جناب آقای دکتر حمید آقاجانی که با نقطه نظرات ارزشمندشان در هر چه پر بارتر شدن این رساله، اینجانب را راهنمائی فرمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از مدیریت و پرسنل محترم شرکت توسعه معادن طلای کردستان به ویژه جناب آقایان مهندس فواد میثمی و مهندس بهروز قادری که نهایت همکاری را در راستای برداشتهای ژئوفیزیک و نمونهبرداری از مغزههای حفاری و فراهم نمودن امکان دسترسی به دادههای ژئوشیمی منطقه کرویان برای اینجانب، به عمل آوردند و نیز جناب آقای مهندس مهدی مرادی معاون محترم امور معادن و اکتشافات معدنی سازمان صنعت، معدن و تجارت استان کردستان به خاطر راهنمائیها و کمکهای ارزشمندشان در انجام این رساله در منطقه مورد مطالعه؛ نهایت تشکر و سپاس را دارم.

از جناب آقای مهندس مهدی زارعی کارشناس محترم آزمایشگاههای ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود و سایر پرسنل محترم برداشت ژئوفیزیک از جمله جناب آقایان مهندس محمد عباسیان، مهندس سعید نجفی، مهندس هیرش محمودپور، مهندس رسول انوری، آقای صباغ و اهالی محترم روستای کرویان بهخاطر کمکهای ارزشمندشان در راستای انجام برداشتهای ژئوفیزیک نهایت تشکر و سپاس را دارم.

از جناب آقای دکتر لقمان نمکی، سرکار خانم مهندس زهرا سلطانی، سرکار خانم مهندس محدثه عبداللهی و آقای مهندس حسین فردوسی به خاطر راهنمائی در مورد مدلسازی دادههای مغناطیسی، جناب آقای مهندس محیالدین محمدپور به خاطر راهنمائی در مورد مدلسازی داده-های مغناطیسی و مدلسازی در محیط GIS، سرکار خانم فانوس محمدی بهخاطر راهنمائی در مورد مدلسازی پتانسیل مطلوب در محیط GIS و در اختیار گذاشتن اطلاعات در مورد منطقه مورد مطالعه، سرکار خانم دکتر گلاله اصغری به خاطر در اختیار گذاشتن نمونههایی از مغزههای حفاری کانسار میر گه نقشینه و سایر کمکهای ارزشمندشان در مورد منطقه مورد مطالعه کمال تشکر و سیاس را دارم.

بار دیگر از استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر عرب آمیری و نیز دوستان بزر گوارم جناب آقایان مهندس احسان ارغوانی، مهندس رحمتالله ظاهری، مهندس هیرش محمودپور و آقای مارتین سونتاک به خاطر کمکهای مالی ایشان نهایت تشکر و سپاس را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب **فریدون شریفی** دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **ارائه الگوی اکتشافی ترکیبی بر مبنای رسانندگی** 

الكتريكي مختلط دادههاي الكترومغناطيسي و ژئوشيميايي- كانيسازي طلاي پهنه برشي كردستان تحت

راهنمائي آقایان دکتر علیرضا عربامیري و دکتر ابوالقاسم کامکارروحاني متعهد مي شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
  - در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدر ک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
  - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایح اصلی پایان نامه تأثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
  - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است
     اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

#### تاریخ: ۱۳۹۸/۰۲/۱۰

امضای دانشجو: فریدون شریفی

### مالکیت نتایج و حق نشر

 کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . اکتشاف منابع معدنی یکی از موضوعات اصلی مورد توجه در حوزه علوم زمین است و ابزارهای مختلفی برای این منظور توسعه یافته و به خدمت گرفته میشوند.

در این رساله تمرکز اصلی بر ارزیابی قابلیت استفاده از داده های قطبش القایی طیفی (SIP)<sup>۱</sup> آزمایشگاهی و امکان استخراج پارامترهای مرتبط با قطبش القایی (IP)<sup>۲</sup> از داده های الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس برای اکتشاف منابع قطبش پذیر می باشد. همچنین به منظور ارزیابی نتایج مدل سازی این داده ها؛ تجزیه و تحلیل داده های زمین شناسی، ژئوشیمی، کانی شناسی و برداشت و مدل سازی داده های ژئوفیزیک زمینی مقاومت ویژه و IP نیز مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت با تلفیق لای این داده های ژئوفیزیک زمینی مقاومت ویژه و IP نیز مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت با تلفیق این داده های ژئوفیزیک زمینی مقاومت ویژه و IP نیز مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت با تلفیق لایه های داده های ژئوفیزیک زمینی مقاومت ویژه و IP نیز مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت با تلفیق ارائه شده است؛ که در این منطقه، کانیزائی طلا همراه با کانی های پیریت و کوارتز اتفاق افتاده است. کانی های پیریت و کوارتز اتفاق افتاده است. کانی های پیریت شامل دو نسل متفاوت پیریت ریزدانه و درشت بلور می باشد؛ که انواع ریزدانه مرتبط با کانی زائی طلا می باشند؛ اما انواع درشت بلور عقیم و فاقد کانی زائی است. این موضوع شرایط مطلوبی را کانی زائی ها می باشند؛ که انواع ریزدانه مرتبط را با کانی زائی است. این موضوع شرایط مطلوبی را کانی زائی ها می باشند؛ که انواع درشت بلور عقیم و فاقد کانی زائی است. این موضوع شرایط مطلوبی را برای مطالعات IP بویژه روش IP فراهم نموده است.

در مرحله اول از انجام این رساله، امکان مدلسازی دادههای مقاومتویژه/ رسانندگی مختلط مربوط به نمونههای برداشتشده از مغزههای حفاری کانسار طلای کرویان با استفاده از مدلهای واهلش<sup>7</sup> مختلف مورد بررسی قرار گرفته است؛ که شواهد آزمایشگاهی و نتایج مدلسازی دادههای SIP و مطالعات کانیشناسی با روش تعیین درجه آزادی کانیها (MLA)<sup>4</sup> نشان داد که دو نسل کانی پیریت موجود در نمونهها با تشکیل دو پیک مجزا بر روی طیف مقاومتویژه/ رسانندگی مختلط به خوبی از همدیگر قابل تفکیک هستند.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Spectral Induced Polarization

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Induced polarization

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Relaxation models

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Mineral liberation analysis

در ادامه، مدلسازی پارامترهای SIP بههمراه دادههای الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس انجام شده است؛ که نتایج مدلسازی با استفاده از مدل پیشرو نشان داد که در صورت وجود اثرات IP در دادههای الکترومغناطیس حوزه فرکانس، شدت مؤلفه حقیقی پاسخ الکترومغناطیسی در فرکانسهای پائین کاهش می یابد و چنانچه این اثر به اندازه کافی قوی باشد، موجب ایجاد مقدار منفی در فرکانسهای پائین می گردد. برای بازیابی پارامترهای IP از دادههای الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس، الگوریتم ترکیبی بر مبنای روشهای شبیهسازی تبرید خیلی سریع<sup>۱</sup> و روش مارکوارت-لونبرگ<sup>۲</sup> (VFSA-ML) توسعه داده شد و برای بازیابی پارامترهای مدل از طریق مدلسازی یکبعدی دادههای مصنوعی و دادههای الکترومغناطیس هوابرد برداشتشده بر روی منطقه کرویان با موفقیت اجرا گردید.

در مرحله بعد، دادههای ژئوشیمی بدست آمده از محیط سنگی با استفاده از روش تجزیه و تحلیل مؤلفههای اصلی مقاوم<sup>۳</sup> بر روی دادههای ژئوشیمی بسته و تبدیلیافته با استفاده از روش تبدیل لگاریتم ریشهای<sup>†</sup> مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت؛ که در حالت دوم هر دو نوع کانیزائی طلا در منطقه همراه با پیریت و کوارتز با موفقیت شناسائی شد.

با توجه به ویژگیها و شواهد اکتشافی مختلف در منطقه مورد مطالعه شامل نقشههای زمینشناسی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیائی و شواهد کانیشناسی، نقشه پتانسیل مطلوب در منطقه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در محیط GIS مدلسازی شد؛ که در آن آنومالی اصلی در منطقه کرویان انطباق مناسبی با محل کانیزائی دارد.

**کلمات کلیدی:** قطبش القایی طیفی، الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس، مدل سازی وارون، تجزیه و تحزیه و تحزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی مقاوم، تبدیل لگاریتم ریشه ای، تحلیل سلسله مراتبی فازی.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Very Fast Simulated Annealing

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Marquardt-Levenberg

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Robust principal component analysis

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Logratio

ليت مقالات متخرج ازرساله

مقالات ژورنالی

1- Fereydoun Sharifi, Ali Reza Arab-Amiri, Abolghasem Kamkar-Ruhani, Ralph-Uwe Börner, (2019). 1-D HEM Data Modeling Using Marquardt-Levenberg Including the backtracking-Armijo Line Search Strategy, *International Journal of Mining and Geo-Engineering (revised)*.

2- Sharifi, F., Arab-Amiri, A. R., Kamkar-Rouhani, A., & Alipour-Asll, M. (2019). Combining a robust PCA of logratio transformed data and geostatistical sequential Gaussian simulation approach for geochemical characterization of orogenic gold deposits: A case study from the Alut area, Northwest of Iran. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, geochem2018-080 (*Accepted*).

3- Fereydoun Sharifi, Ali Reza Arab-Amiri, Abolghasem Kamkar-Ruhani, Ralph-Uwe Börner, (2019). Development of A Novel Approach for Recovering SIP effects from 1-D inversion of HEM data: case study from the Alut area, northwest of Iran, *Journal of Applied Geophysics (under review)*.

4- Fereydoun Sharifi, Ali Reza Arab-Amiri, Abolghasem Kamkar-Ruhani, Ralph-Uwe Börner, (2019). Recovering of the Induced Polarization Effect from 1-D Inversion of the HEM Data (Accepted Abstract), *Near Surface Geophysics*, (*under review*).

5- Sharifi, F., Arab Amiri, A. R., & Kamkar-Rouhani, A. (2019). Using a combination of genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm for GEMTIP modeling of spectral-induced polarization data. Journal of Mining and Environment, 10(2), 493-505 (*Accepted*).

مقالات كنفرانسي

6- Fereydoun Sharifi, Ali Reza Arab-Amiri, Abolghasem Kamkar-Ruhani, Ralph-Uwe Börner, (2018). Recovering IP effects from 1-D inversion of HEM data: Case study from the Kervian gold deposit (Iran), In: *AEM2018/7<sup>th</sup> international workshop on airborne electromagnetics, Kolding, Denmark.* 

7- Sharifi, F., Arab-Amiri, A.R., Kamkar-Rouhani, A., Alipour-Asll, M., Börner, J., Sonntag, M., Spitzer, K., (2018). Complex conductivity of a shear zone type gold deposit case study from the Kervian gold deposit (Iran), In: 27<sup>th</sup> Schmucker-Weidelt Kolloquium für Elektromagnetische Tiefenforschung.

فهرمت مطالب

١	۱ – فصل اول
۲	۱–۱– مقدمه
۵	۱–۲– روش الكترومغناطيس هوابرد
٧	۱–۳- روش SIP
٨	۱–۴– مدلسازی دادههای ژئوشیمیایی
٩	۱–۵– هدف تحقیق
٩	۱-۶- روش انجام تحقیق
١١	۱-۲- کانسارهای طلای تیپ پهنههای برشی
١٢	۱–۸– منطقه مورد مطالعه
١٧	۱–۹– ضرورت انجام تحقيق
١٧	۱-۱۰- ساختار تحقیق
١٩	۲- فصل دوم
۲.	۱–۲– مقدمه
۲.	۲-۲- مبانی روش الکترومغناطیس هوابرد
78	۲-۳- مبانی روش SIP
۶.	۲-۴- تلفیق روش الکترومغناطیس هوابرد با روش SIP
۶۷	۲–۵– مدلسازی وارون دادههای الکترومغناطیس هوابرد
۷۸	۲–۶– مدلسازی دادههای مصنوعی
٨٧	۳- فصل سوم
٨٨	۳–۱– مقدمه
٨٨	۳-۲- پردازش دادههای ژئوشیمیایی
٨٩	۳-۳- روش تجزیه و تحلیل مؤلفههای اصلی
٩٢	۳-۴- دادههای ترکیبی
٩٣	۳–۵– پیادەسازی روش آنالیز مؤلفەھای اصلی مقاوم برای دادەھای بستە
۹۵	۳–۶– مدلسازی پتانسیل معدنی
۱۰۳	۴– فصل چهارم
1.4	۴–۱– مطالعات آزمایشگاهی
١٢٣	۴-۲- نتایج مدلسازی دادههای الکترومغناطیس در منطقه مورد مطالعه
١٣١	۴–۳– نتایج مطالعات ژئوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه
	ر

14.	۴-۴- تلفیق لایههای اطلاعات اکتشافی در محیط GIS
149	۵- فصل پنجم
10.	۵-۱- نتیجه گیری
187	۲-۵- پیشنهادات
104	فهرست منابع

فهرست شک

114	شکل ۴-۱۰: برازش مدل تجزیه دبای به دادههای SIP
110	شکل ۴-۱۱: برازش مدل تجزیه دبای به دادههای SIP
١١٧	شكل ۴-۱۲: تصوير MLA از نمونه (MLA-S103(P2_1 از نمونه (KBC13-R47-S103(P2_1
۱۱۸	شکل ۴-۱۳: تصویر MLA از نمونه (P1)KBB21-S30-B9
17.	شکل ۴-۱۴: فراوانی کانیهای نمونههای (KBC13-R47-S103(P2_1) (سمت چپ)
171	شکل ۴-۱۵: نمودار فراوانی تجمعی توزیع اندازه دانههای کانی پیریت
171	شکل ۴-۱۶: نمودار فراوانی تجمعی توزیع اندازه دانههای کانی پیریت
177	شکل ۴-۱۷: نمودار آنالیز فرکتال اندازه دانههای کانی پیریت
177	شکل ۴-۱۸: نمودار آنالیز فرکتال اندازه دانههای کانی پیریت
١٢٣	شکل ۴-۱۹: موقعیت خطوط پرواز برداشت الکترومغناطیس هوابرد در منطقه کرویان
174	شکل ۴-۲۰: مدل سهبعدی خودپذیری در منطقه مورد مطالعه
120	شکل ۴-۲۱: نقشه میانگین تراوائی مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه
178	شکل ۴-۲۲: نقشه تراوائی مغناطیسی بازیابیشده با استفاده از الگوریتم VFSA-ML
۱۲۸	شکل ۴-۲۳: نقشه دوبعدی (شکل بالا) و سهبعدی (شکل پائین)
129	شکل ۴-۲۴: نقشه بارپذیری بازیابیشده با استفاده از الگوریتم VFSA-ML برای لایه دوم
۱۳۰	شکل ۴-۲۵: نقشه ثابت زمانی بازیابیشده با استفاده از الگوریتم VFSA-ML برای لایه دوم
وم ۱۳۰	شکل ۴-۲۶: نقشه وابسته فرکانسی بازیابیشده با استفاده از الگوریتم VFSA-ML برای لایه د
۱۳۲	شکل ۴-۲۷: نتیجه آزمایش مقادیر خارج از ردیف چندمتغیره دادههای ژئوشیمی
۱۳۳	شکل ۴-۲۸: نمایش دوبعدی بارهای فاکتوری PC1 و PC2 (سمت چپ) و نمودار صخرهای
184	شکل ۴-۲۹: نمایش سهبعدی بارهای فاکتوری PC1، PC2 و PC5
188	شکل ۴-۳۰: نقشه مؤلفه اصلی PC5 بر اساس نتایج
138	شکل ۴-۳۱: نقشه مؤلفه اصلی PC2 ،PC1 و PC5
۱۳۷	شکل ۴-۳۲: نمایش دوبعدی بارهای فاکتوری PC1 و PC2
۱۳۸	شکل ۴-۳۳: نمایش سهبعدی بارهای فاکتوری PC1، PC3 و PC3
١٣٩	شکل ۴-۳۴: نقشه مؤلفه اصلی PC1 دادههای ژئوشیمی تبدیلیافته
١٣٩	شکل ۴-۳۵: نقشه مؤلفه اصلی PC4 دادههای ژئوشیمی تبدیلیافته
14.	شکل ۴-۳۶: نقشه مؤلفههای اصلی PC1، PC2 و PC3 دادههای ژئوشیمی
147	شکل ۴-۳۷: نقشه زمینشناسی فازی وزندار
147	شکل ۴-۳۸: نقشه فازی وزندار فاصله از گسل در منطقه کرویان
144	شکل ۴-۳۹: نقشه فازی وزندار PC4 بدستآمده از تجزیه و تحلیل مؤلفههای اصلی مقاوم
147	شکل ۴-۴۰: نقشه فازی وزندار PC1، PC1 و PC3 بدستآمده
144	شکل ۴-۴۱: نقشه فازی وزندار پارامتر بارپذیری در منطقه کرویان

- شکل ۴-۴۲: نقشه فازی وزندار پارامتر مقاومتویژه در منطقه کرویان
- شكل ۴-۴۳: نقشه پتانسیل مطلوب تهیه شده با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی ۱۴۵
- شکل ۴-۴۴: مقاطع مقاومتویژه (شکل بالا) و بارپذیری (شکل پائین) پروفیل KTA
- شکل ۴-۴۵: مقاطع مقاومتویژه (شکل بالا) و بارپذیری (شکل پائین) پروفیل KTB
- شکل ۴-۴۶: مقاطع مقاومتویژه (شکل بالا) و بارپذیری (شکل پائین) پروفیل KTC

# فهرست جدول ا

74	ندول ۲-۱: پارامترهای مورد استفاده در مدل زمین چهار لایه برای شبیهسازی	Ş
۳۵	ندول ۲-۲: پارامترهای مدل کل- کل برای مدل مصنوعی با بارپذیری متغیر	Ş
۳۸	ىدول ۲-۳: مقادير مختلف ثابت زمانى براى منابع مختلف كانىسازى	Ņ
41	ندول ۲-۴: مقادیر وابسته فرکانسی برای رخنمونهای سنگی در جنوب چین	÷
40	ندول ۲-۵: پارامترهای مدل GEMTIP	÷
49	ندول ۲-۶: پارامترهای مربوط به مدل مصنوعی GEMTIP بیضوی دو جزئی	Ņ
49	ندول ۲-۲: پارامترهای مربوط به مدل مصنوعی GEMTIP کروی و بیضوی سهجزئی	Ņ
۶.	ندول ۲-۸: پارامترهای بازیابیشده مدل مصنوعی GEMTIP بیضوی سهجزئی	Ņ
۶١	یدول ۲-۹: پارامترهای مربوط به مدل همگن مورد استفاده برای بررسی نقش	ę
۶١	بدول ۲-۱۰: پارامترهای قطبش القایی مدل همگن	Ņ
٨٠	بدول ۲-۱۱: دادههای الکترومغناطیس هوابرد شبیهسازی شده در حوزه فرکانس	Ņ
۸۱	بدول ۲-۱۲: نتایج مدلسازی دادههای الکترومغناطیسی حاوی اثرات قطبش القایی	÷
٨٣	بدول ۲-۱۳: دادههای الکترومغناطیس هوابرد شبیهسازی شده در حوزه فرکانس	ę
٨۶	یدول ۲-۱۴: پارامترهای بازیابیشده برای Model B	÷
98	بدول ۳-۱: مقادیر ترجیحات برای مقایسه های زوجی	Ş
11.	ندول ۴-۱: نتایج مدلسازی کل-کل و کل-کل تعمیمیافته نمونههای کانسار کرویان	÷
118	ىدول ۴-۲: نتايج مدلسازى GEMTIP كروى سەجزئى	÷
١١٩	ىدول ۴-۳: جدول فراوانى كانىھاى نمونەھاى (P2_1)KBC13-R47-S103	÷
۱۳۱	ندول ۴-۴: پارامترهای آماری عناصر ژئوشیمی مربوط به ۲۱۸ نمونه	Ş
۱۳۵	بدول ۴-۵: نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفههای اصلی مقاوم بر روی دادههای ژئوشیمی بسته	÷
۱۳۷	بدول ۴-۶: نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفههای اصلی مقاوم بر روی دادههای ژئوشیمی	÷
141	مدول ۴-۲: اهمیت نسبی هر یک از معیارهای اکتشافی برای تعیین نقشه پتانسیل مطلوب	Ş
141	یدول ۴-۸: اهمیت واحدهای لیتولوژی از نظر پتانسیل کانیزائی طلا	Ş

فهرست علائم

نام متغير	متغير	نام متغير	متغير
استعمارگر	imp	مقدار حقيقي	real
پارامتر منظمسازی	${\mathcal R}$	مقدار موهومی	imag
ماتريس ژاكوبين	J	مقاومتويژه ظاهري مختلط	$ ho_a(\omega)$
تابع هزينه	$\varphi$	مؤلفههاى حقيقى مقاومتويژه مختلط	$ ho_{\scriptscriptstyle real}(\omega)$
بردار پارامترهای مدل	т	مؤلفههاى موهومى مقاومتويژه مختلط	$ ho_{_{imag}}(\omega)$
بردار دادەھا	d	زاويه فاز	$\phi$
مستعمره	col	مؤلفههاى موهومى اختلاف پتانسيل	$V_{imag}$
فاصله ماهالانوبيس	MD	مؤلفههاى حقيقى اختلاف پتانسيل	$V_{real}$
تبدیل لگاریتم ریشهای افزایشی	alr	مقاومتویژه ظاهری در فرکانس صفر	$ ho_{_{dc}}$
تبدیل لگاریتم ریشهای مرکزی	clr	بارپذیری	т
تبديل لگاريتم ريشهاي ايزومتريک	ilr	ثابت زمانی	τ
حداقل دترمينان ماتريس	MCD	وابسته فركانسى	С
تابع شايستگى	${\mathcal F}$	پارامتر بيضوى	е
مؤلفه موهومى رسانندگى مختلط	$\sigma^{\prime\prime}$	عملگر پیچشی (کرل)	$\nabla  imes$
مؤلفه حقيقي رسانندكي مختلط	$\sigma'$	عملگر گرادیان	abla.
رسانندگی الکتریکی در فرکانس صفر	$\sigma_{\scriptscriptstyle dc}$	فرکانس زاویهای	ω
گذردهی ویژه خلاء	$lpha_{_0}$	تابع بسل نوع اول درجه صفر	$J_0$
گذردهي ويژه لايه	α	تابع بسل نوع اول مرتبه اول	$J_{1}$
ضريب گذردهي سطحي لايه	β	ضريب انعكاسي	$R_{TE}$

## ۱- فصل اول

كليات

امروزه روش های الکترومغناطیس کاربرد روزافزونی در اکتشاف معادن، مطالعات زمین شناسی، زیست-محیطی، آب های زیرزمینی و ... پیدا کردهاند. لذا ارائه یک تفسیر قابل اعتماد از داده های الکترومغناطیس، مستلزم توجه به ماهیت اهداف اکتشافی است.

مطالعات آزمایشگاهی (Pelton et al., 1978) و صحرایی ( Pelton et al., 1978; Goold et al., 2007; ) و صحرایی ( Emond et al., 2006; Goold et al., 2007; ) و صحرایی ( Goold, 2008; Zhdanov, 2008) نشان داده است که هدایت الکتریکی نمونه ها و تشکیلات زمین شناسی حاوی اثرات قطبش القایی (IP) ، معمولاً یک پارامتر وابسته به فرکانس است که به صورت مختلط بیان می گردد.

همچنین تغییر علامت دادههای الکترومغناطیسی حوزه زمان (TEM)<sup>۲</sup> در اثر حضور مواد قطبش-پذیر، توسط محققان مختلفی گزارش شده است ( Gubatyenko and Tikshayev, 1979; Weidelt, ) (1982; Seidel and Tezkan, 2017).

لذا دادههای الکترومغناطیسی مشاهدهای در عملیات ژئوفیزیکی معمولاً حاوی اطلاعات مربوط به دو اثر القای الکترومغناطیسی<sup>۳</sup> در زمین و قطبش القایی مرتبط با واهلش<sup>۴</sup> بارهای الکتریکی پلاریزهشده در اجزاء سنگ میباشند. بنابراین ارائه یک تفسیر درست و مدل قابل اعتماد از دادههای الکترومغناطیسی، مستلزم توجه همزمان به این دو فاکتور مهم در فرآیند مدل سازی میباشد. اثر القای الکترومغناطیسی با حل معادله میدان الکترومغناطیسی با استفاده از مدلهای ژئوالکتریکی رسانندگی، قابل شبیه سازی است و اثر IP مرتبط با مقاومتویژه مختلط سنگها است؛ که با استفاده از تئوری روش قطبش القایی طیفی مورد بررسی و مدل سازی قرار می گیرد ( ; 2006, 2005) روض و الکتری ایس موضوع

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Sign Reversal

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Time-domain electromagnetic

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Electromagnetic induction (EMI)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Relaxation

بهره میبرد؛ که از مشهورترین این مدلها میتوان به مدل کل-کل ( Cole and Cole, 1941; Pelton) کیروی و بیضوی (Nordsiek and Weller, 2008)، تجزیه دبای (et al., 1978)، تجزیه دبای (Rabighian and Corbett, 1988) استفاده از مدل (Zhdanov, 2008) اشاره نمود. نبیقیان و کوربت (Nabighian and Corbett, 1988) استفاده از مدل

واهلش كل-كل را براي اعمال اثرات IP در معادله الكترومغناطيس پيشنهاد نمودهاند.

اموند و همکاران (Emond et al. 2006) با استفاده از مدل واهلش کل-کل اثرات IP را در معادله الکترومغناطیس وارد نمودند و با استفاده از روش معادلات انتگرالی<sup>۳</sup> مدلسازی پیشرو سهبعدی اثرات SIP و القای الکترومغناطیسی مربوط به دادههای الکترومغناطیسی حوزه فرکانس (FDEM) برداشت-شده بر روی یک کانسار مس پورفیری مصنوعی ساده را به صورت همزمان انجام دادند.

گولد (Goold, 2008) با انجام مدلسازی پیشرو و وارون دادههای الکترومغناطیس هوابرد در حوزه فرکانس، با استفاده از روشهای LQL<sup>4</sup> و گرادیان مزدوج منظم نظمیافته<sup>6</sup>، پارامترهای مدل کل-کل را بازیابی نمود. شریفی و همکاران (Sharifi et al., 2018) با تلفیق روشهای الگوریتم شبیهسازی تبرید خیلی سریع (VFSA)<sup>2</sup> و مارکوارت- لونبرگ<sup>۷</sup> پارامترهای مدل کل-کل را از مدلسازی یک-بعدی دادههای الکترومغناطیس هوابرد بازیابی نمودند.

همچنین تلاشهای متعددی برای بازیابی پارامترهای مدل کل-کل از دادههای الکترومغناطیس در حوزه زمان صورت گرفته است ( ;Flores and Peralta-Ortega, 2009; Kratzer and Macnae, 2012; کرفته است ( ;Marchant et al., 2014; Oldenburg et al., 2015; Kang and Oldenburg, 2016; Kang et al., 2017).

با وجود این که مدلسازی یک بعدی سونداژهای الکترومغناطیسی یکی از روشهای مرسوم در تفسیر دادههای الکترومغناطیس هوابرد به حساب میآید ( Huang and Fraser, 1996; Huang and Fraser, )

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Cole-Cole

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Deby decomposition

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Intgral Equation

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Localized Quasi Linear

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Rewighted Conjugate Gradient

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup><sub>7</sub> Very Fast Simulated Anealing

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Marquardt-Levenberg

2003; Farquharson et al., 2003; Yin and Hodges, 2007; Siemon et al., 2009a; 2009b; Arab-Amiri et al., 2011; Siemon, 2012)؛ اما هنوز اعمال اثرات IP در مدلسازی نادیده گرفته می شوند. شریفی و همکاران (Sharifi et al., 2018) با اعمال پارامترهای مدل کل-کل در معادله یک-بعدي الكترومغناطيسي و انجام شبيهسازي رياضي، كاهش دامنه مؤلف حقيقي (همفاز)' پاسخ الکترومغناطیسی را در فرکانسهای پائین گزارش نمودند؛ بهگونـهای کـه در صـورت قـوی بـودن اثـر قطبش القایی پاسخ مربوطه در فرکانس های پائین دارای مقدار منفی خواهد شد. علاوه بر این، مطالعات قبلی نشان داده است که نفوذپذیری مغناطیسی و ارتفاع پرواز هم ممکن است اثر مشابهی را ایجاد نمایند (Beard and Nyquist, 1998). بنابراین خواص فیزیکی رسانندگی/ مقاومت ویژه الكتريكي، تراوايي مغناطيسي ، گذردهي دي الكتريك ، قطبش القايي و ارتفاع يرواز از جمله یارامترهای مهمی هستند که لحاظ نمودن اثر آنها در مدلسازی دادههای الکترومغناطیسی، منجر به تفسیر درست تر و قابل اعتمادتری خواهد شد. علاوه بر این بدیهی است که بازیابی هر یک از این یارامترها اطلاعات ارزشمندی را در مورد سایر ویژگیهای فیزیکی واحدها و ساختارهای سنگی و زمینشناسی فراهم می کند. لذا در این رساله حل کامل معادله یک بعدی الکترومغناطیسی با نگرش ویژه بر بازیابی پارامترهای قطبش القایی از دادههای الکترومغناطیس هوابرد انجام گرفته؛ که برای این منظور از دادههای الکترومغناطیس هوابرد برداشتشده در منطقه کرویان واقع در استان کردستان، به عنوان منطقه مورد مطالعه، استفاده شده است.

روشهای ژئوشیمیایی نیز از جمله روشهای پرکاربرد در اکتشاف معادن هستند؛ که معمولاً بر مبنای تجزیه و تحلیل آماری دادهها در فضای هندسی اقلیدسی تفسیر میشوند. با توجه به این که روشهای تجزیه شیمیائی معمولاً یک مقدار نسبی از غلظت عناصر را ارائه مینمایند؛ دادههای اندازه گیریشده یک سیستم بسته را تشکیل میدهند؛ که بررسی آنها را در فضای هندسی مذکور غیرممکن میسازد (Aitchison, 1986; Egozcue et al., 2003; Filzmoser, 2009)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> In-phase

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Magnetic permeability

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Dielectric Permittivity

را در فضای هندسی موسوم به اتچیسون<sup>۱</sup> (Aitchison, 1986; Igozcue et) بررسی نمود و یا این که با استفاده از تبدیلهای لگاریتم ریشهای دادهها را به هندسه اقلیدسی انتقال داد ( Aitchison, 1986; Egozcue et). (al., 2003; Filzmoser, 2009; Pawlowsky-Glahn et al., 2015; Gazley et al., 2015). فیلسموزر (Filzmoser, 2009) برای استخراج ساختار چند متغیره از دادههای ترکیبی حاوی مقادیر

خارج از ردیف، روش آنالیز مؤلفههای اصلی مقاوم<sup>۲</sup> را بر روی دادههای تبدیلیافته با استفاده از روش -های تبدیل لگاریتم ریشهای پیادهسازی کرد؛ که این روش برای آشکارسازی آنومالیهای ژئوشیمی در منطقه مورد مطالعه در این رساله مورد استفاده قرار گرفته است.

1-1-روش الكترومغناطيس هوابرد

مبنای این روشها، انتشار میدانهای الکترومغناطیسی موج مداوم یا گذرا در بالای سطح زمین و درون آن است. در این روشها فرستنده، گیرنده و توده هادی مدفون در یک تقابل سهجانبه با میدان الکترومغناطیسی قرار دارند و جریانهای الکتریکی در داخل توده هادی به همراه القای الکترومغناطیس، به طور همزمان به وجود می آیند (شکل ۱-۱). فرستنده الکترومغناطیسی<sup>۳</sup> با ایجاد میدان مغناطیسی نوسانی هارمونیک<sup>۴</sup> با فرکانس ثابت، آن را به سمت سیم پیچ گیرنده<sup>6</sup> و داخل زمین میدان مغناطیسی نوسانی هارمونیک<sup>۴</sup> با فرکانس ثابت، آن را به سمت سیم پیچ گیرنده<sup>6</sup> و داخل زمین میدان ولیه در بالای سطح زمین و یا داخل زمین وجود نخواهد داشت؛ فقط مقداری از دامنه میدانی که در داخل زمین منتشر می شود، نسبت به میدان اولیه در سطح زمین کاسته می شود. ولی هنگامی-که در داخل زمین منتشر می شود، نسبت به میدان اولیه در سطح زمین کاسته می شود. ولی هنگامی-که در داخل زمین منتشر می شود، نسبت به میدان اولیه در سطح زمین کاسته می شود. ولی هنگامی-که در داخل زمین منتشر می شود نی وجود داشته باشد، نوسانات میدان حاصل از مؤلف مغناطیسی میدان EM اولیه سبب القای جریان متناوب (جریان گردابی)<sup>۶</sup> در داخل توده هادی خواهد شد. این

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Aitchison Geometry

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Robust PCA

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Transmitter coil

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Harmonic oscillating magnetic field

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Reciever coil

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Eddy current

بود. ویژگیهای این میدان ثانویه، اطلاعاتی در مورد ماده رسانای مدفون فراهم میسازد ( Dentith ) and Mudge, 2014؛ کلاگری، ۱۳۷۱).



شكل ۱-۱: نمايش شماتيك روش الكترومغناطيس هوابرد حوزه فركانس (Siemon et al., 2011).

بنابراین اثر متقابل منبع مغناطیسی در فضای آزاد (h<sup>air</sup>) و میدان مغناطیسی ثانویه (h<sup>earth</sup>) که به ترتیب حاصل انتشار میدان به وسیله فرستنده و القای ثانویه به وسیله جریان گردابی است، در گیرنده ثبت می شود (Scheunert, 2015). هر چند اثر میدان اولیه به صورت فیزیکی، هنگام برداشت، تصحیح می شود؛ اما علاوه بر آن میدان مغناطیسی ثانویه باقیمانده به مؤلف میدان مغناطیسی فضای آزاد Scheunert, 1) و بر حسب واحد بخش در میلیون (ppm) بیان می گردد (

به دلیل فرآیند القایی (Scheunert, 2015) و نیز اثر IP (Scheunert, 2015) در سنگهایی که حاوی اثرات قطبش القایی هستند، داده مشاهدهای یک مقدار مختلط است؛ که در دو بخش حقیقی و موهومی (رابطه (۱-۱)) نشان داده میشود (Scheunert, 2015):
$$d^{obs} = R + jQ$$

در این رابطه مولفههای حقیقی و موهومی به صورت رابطه (۲-۱) بدست میآیند ( Scheunert, ) 2015):

$$R = 10^{6} \cdot real((h_{z} - h_{z}^{air})/h_{z}^{air}) = 10^{6} \cdot real(h_{z}^{earth}/h_{z}^{air})$$
(7-1)  

$$Q = 10^{6} \cdot imag((h_{z} - h_{z}^{air})/h_{z}^{air}) = 10^{6} \cdot imag(h_{z}^{earth}/h_{z}^{air})$$
  

$$\sum h_{z} \cdot h_{z}$$

### ۲−۱–روش SIP

در این روش برای دامنه وسیعی از فرکانس (۲۰/۱ تا <sup>۲</sup> ۱۰ هرتز)، دامنه و فاز (یا مؤلفه حقیقی و موهومی) مقاومتویژه مختلط (شکل ۲-۱) بهعنوان تابعی از فرکانس اندازه گیری میشوند. اندازه گیری این دو پارامتر امکان بررسی وابستگی فرکانسی را با استفاده از مدل مناسب واهلش فراهم نموده و با استفاده از آن میتوان به اطلاعات با ارزش فیزیکی در مورد سنگها و آنومالیهای زیرسطحی دست یافت (Kemna, 2000). در حضور اثر IP، پتانسیل اندازه گیریشده در حوزه فرکانس یک مقدار مختلط است. بنابراین مقاومتویژه ظاهری یک عدد مختلط به صورت رابطه (۲۰۰۱) است.

$$\rho_a(\omega) = \rho_{real}(\omega) + j\rho_{imag}(\omega) \tag{(Y-1)}$$

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Relative secondary field

که در این رابطه ( $\omega$ ) مقاومتویژه ظاهری مختلط، استه موسوم و مقومت به ترتیب مؤلفه های حقیقی و موهومی مقاومتویژه مختلط هستند. موهومی مقاومتویژه مختلط هستند. زاویه فاز بهصورت رابطه (۱-۴) بیان میشود. (۴-۱) (۴-۱) (۴-۱) (۲-۹) (۱-۳) (۲-۹) و در فرکانس پایین به مراح مجانب میشود؛ که در این رابطه مقاومتویژه به (۲-۱) موهومی و حقیقی اختلاف پتانسیل مختلط هستند. در این رابطه میشود به مقاومتویژه به ترتیب مؤلفه های موهومی و حقیقی اختلاف پتانسیل مختلط هستند. در این رابطه معان به مراح به ترتیب مؤلفه های موهومی و حقیقی اختلاف پتانسیل مختلط هستند. در این رابطه معان به مواد به میشود؛ که در فرکانس های بالا دامنه مقاومتویژه به (۲-۱) مواد به مواد به مواد استفاده و مار بار به بار پذیری در آن مراح مقاومتویژه ظاهری زمین در فرکانس صفر یا کمترین فرکانس مورد استفاده و مار بار پذیری



شكل ۱-۲: دامنه و فاز مقاومتویژه مختلط (Loke, 2001).

۱–۴– مدلسازی دادههای ژئوشیمیایی

دادههای ژئوشیمیایی بر مبنای روشهای تجزیه شیمیایی معمولاً یک مقدار نسبی از غلظت عناصر را ارائه مینمایند. بدین معنی که مجموع کل عناصر اندازه گیریشده برابر ۱۰۰ (غلظت عناصر بر حسب درصد) یا <sup>۹</sup>۰۲ (غلظت عناصر بر حسب ppm) میباشد. در این شرایط دادههای اندازه گیریشده یک سیستم بسته را تشکیل میدهند؛ که استفاده از روشها و محاسبات مرسوم آماری و ریاضی در فضای هندسی اقلیدسی برای تفسیر این دادهها، منجر به تولید نتایج اشتباه و گمراه کننده خواهد گردید (Aitchison, 1986; Egozcue et al., 2003; Filzmoser, 2009)). برای رفع این مشکل یا باید دادهها را در فضای هندسی اتچیسون (Aitchison, 1986) و با استفاده از عملگرها و توابع توسعه دادهشده در این فضا بررسی نمود و یا این که با استفاده از تبدیلات لگاریتم ریشهای شامل تبدیل لگاریتمی افزایشی (alr)<sup>1</sup>، تبدیل لگاریتمی ریشهای مرکزی (clr)<sup>۲</sup> و تبدیل لگاریتم ریشهای ایزومتریک (<sup>r</sup>)<sup>(I)</sup> دادهها را به فضای اقلیدسی انتقال داد ( clr)<sup>۲</sup> و تبدیل لگاریتم ریشهای ایزومتریک (<sup>r</sup>)<sup>1</sup>) دادهها را به فضای اقلیدسی انتقال داد ( clr) کاریتم ریشهای ایزومتریک (clr)<sup>۲</sup> رایتم ریشهای ایزومتریک (<sup>r</sup>) دادهها را به فضای اقلیدسی انتقال داد ( clr) که با استفاده از تبدیل لگاریتم ریشهای ایزومتریک (clr)

۱–۵– هدف تحقيق

هدف از انجام این رساله، بررسی امکان بازیابی پارامترهای قطبش القایی با استفاده از مدلسازی یک-بعدی دادههای الکترومغناطیس هوابرد و تلفیق نقشههای ژئوفیزیکی بدست آمده با نقشههای زمین-شناسی و ژئوشیمی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی میباشد.

۱-۶- روش انجام تحقيق

در این رساله برای مدلسازی یک بعدی داده های الکترومغناطیس هوابرد و بازیابی پارامترهای مدل شامل مقاومت ویژه الکتریکی، تراوایی مغناطیسی، گذردهی دی الکتریک، SIP، ارتفاع پرواز و ضخامت لایه ها، از تلفیق دو روش الگوریتم شبیه سازی تبرید خیلی سریع و مارکوارت – لونبرگ استفاده شده است. مدل سازی پیشرو برای تعیین مؤلف ه های حقیقی و موهومی (ناهمفاز)<sup>۴</sup> داده های الکترومغناطیسی نیز با گسسته سازی رابطه انتگرال ماندری<sup>6</sup> با استفاده از روش فیلتر خطی

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Additive log-ratio

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Centered log-ratio

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Isometric log-ratio

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Quadrature

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Mundry's Integral

گوپتاسارما- سینگ (Guptasarma and Singh 1997) انجام شده است. همه فرآیند مدلسازی در محیط نرمافزار MATLAB کدنویسی شده است. همچنین برای تعیین مدل تراوایی مغناطیسی، از دادههای مغناطیس هوابرد منطقه مورد مطالعه کمک گرفته شده است. برای این منظور، با استفاده از نرمافزار UBC Mag3D، ابتدا مدل خودپذیریپذیری مغناطیسی منطقه بدست آمده و سپس به تراوایی مغناطیسی تبدیل شده است. نقشههای نهایی نیز در محیط نرمافزار Oasis Montaj ترسیم

برای فراهمنمودن اطلاعات لازم در مورد ویژگیهای طیفی مقاومتویژه/رسانندگی مختلط، بر روی تعداد ۳۳ نمونه برداشتشده از مغزههای حفاری کانسار طلای کرویان، مطالعات آزمایشگاهی SIP با استفاده از دستگاه FUCHS III در مؤسسه ژئوفیزیک و ژئواینفورماتیک دانشگاه صنعتی فرایبرگ<sup>۲</sup> آلمان انجام شد. برای مدلسازی و تفسیر دادهها، کدنویسیهای مربوطه با همکاری گروه SIP و الکترومغناطیس مؤسسه مذکور در محیط نرمافزار MATLAB انجام شد.

برای اعتبارسنجی نتایج مطالعات SIP، تعداد ۱۰ تست کانی شناسی با استفاده از روش MLA در آزمایشگاه کانی شناسی دانشگاه مذکور و آماده سازی نمونه ها در مؤسسه هلمهولتز فرایبرگ<sup>۳</sup> (HIF) انجام شد. تفسیر داده های کانی شناسی با استفاده از نرمافزار ها Data view و کدنویسی در محیط نرم-افزار MATLAB انجام شد.

همچنین دادههای لیتوژئوشیمی سطحی برداشتشده در این منطقه با روش چندمتغیره<sup>۴</sup> آنالیز مؤلفه-های اصلی در فضای هندسی اقلیدسی و اتچیسون، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. پردازش و تفسیرهای مربوطه به ترتیب در محیط نرمافزار Mnintab و کدنویسی در محیط نرمافزار R انجام پذیرفت. نقشههای ژئوشیمیائی با استفاده از نرمافزار Oasis Montaj ترسیم شدهاند. با توجه به این که لایههای اطلاعاتی مختلفی شامل زمینشناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمیایی در منطقه

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Magnetic susceptibility

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> TU Bergakademie Freiberg

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Helmholtz Institute Freiberg for Resource Technology

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Mutivariate

مورد مطالعه فراهم گردید؛ با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) اقدام به تلفیق اطلاعات و تهیه نقشه پتانسیل مطلوب در محیط GIS شد. بدینوسیله آنومالی اصلی منطقه کرویان با موفقیت آشکارسازی شدند.

همچنین، دادههای ژئوفیزیک زمینی مقاومتویژه و IP در محدوده کانسار طلای کرویان و با استفاده از تجهیزات ژئوفیزیکی دانشگاه صنعتی شاهرود برداشت و با استفاده از نرمافزار RES2DINV مدل-سازی و تفسیر شدند. نتایج مدلسازی این دادهها نیز نتیجه مدلسازی پتانسیل مطلوب را تأیید نمود.

### ۱-۷- کانسارهای طلای تیپ پهنههای برشی

پهنههای برشی، پهنههایی باریک با تغییر شکل شدید هستند؛ که اغلب در هنگام دگرگونی ناحیهای تشکیل میشوند. این ذخایر در کمربندهای دگرگونی، دربردارنده سنگهای ولکانیکی از سن آرکئن میانی تا ترشیری است؛ که زیرمجموعه ذخایر طلای کوهزایی محسوب میشوند. جابجایی در آنها اغلب موازی و در ابعاد بزرگ (اغلب صفحهای) است که در مقیاس محلی امتداد آن تغییر میکند و عموماً دارای نسبت طول (L) به عرض (W) بزرگتر از پنج است (5 < لیم). کانیزایی بهصورت رگههای کوارتز، در امتداد شاخههای فرعی ناشی از شکافهای اصلی پوسته زمین با صدها کیلومتر طول و چندین کیلومتر عمق دیده میشود و در انواع مختلفی از ساختمانهای برشی رخ میدهند. این ساختمانها عبارت از گسلهای امتداد لغز، مایل لغز و معکوس لغز هستند. زونهای برشی پرشیب معکوس، میتوانند از ساختمانهای با اهمیت کنترل کننده کانسار باشند (قوامی ایم و دارابی گلستان، ۱۳۹۳).

در این تیپ کانسارها در اثر فرآیندهای دگرگونی و گرادیان زمین گرمایی زیاد، دگر گونی ناحیهای ایجاد شده و سیالات زیادی را از بخشهای عمیق آزاد می کند. این سیالات به همراه سیالات داخل سنگها موجب شستهشدن و انحلال کانههای فلزی از واحدهای آتشفشانی- رسوبی و حمل آنها می-شود. سیالات کانهدار در مسیر عبور از پهنههای برشی، در موقعیت مناسب با تغییر شرایط

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Fuzzy analytic hierarchy process

فیزیکوشیمیایی سیال و دگرسانی سنگ دیواره، کانهزایی صورت میگیرد. سریسیتیشدن، کربناتی-شدن و پیریتیشدن فرآیندهای اصلی دگرسانی در این تیپ کانسارها هستند. کانیشناسی ماده معدنی، بسیار ساده است و در نوع شکلپذیر (عمق کم) شامل پیریت و کالکوپیریت و در عمق بیشتر شامل پیریت، آرسنوپیریت و کالکوپیریت است. به طور کلی، در بیشتر نهشتههای برشی پاراژنز کانی-شناسی از عمق به سطح شامل، (۱) پیروتیت + آرسنوپیریت ± طلا (۲) پیریت + آرسنوپیریت ± طلا و (۳) پیریت ± طلا است (قوامیریابی و دارابی گلستان، ۱۳۹۳). این نهشتههای طلادار در برخی موارد در داخل رگهها و در سایر موارد در دیوارههای سنگی سولفیدیشده به صورت غالب دیده میشوند. رگههای طلادار معمولاً غنیشدگی متغیری از عناصر

Te ،Se ،Sb ،Bi ،B ،As ،Ag و W نشان میدهند و غلظت Pb ،Cu و Zn معمولاً در حد مقدار زمینه است (Eilu and Groves, 2001).

#### ۸-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان کردستان و در فاصله ۴۰ کیلومتری از جنوب غربی شهر سقز (بین طولهای شرقی ۴۶ تا ۱۰، ۴۶ درجه و عرضهای شمالی ۳۶ تا ۰۷، ۳۶ درجه) قرار گرفته است (شکل ۱-۳).

این منطقه از نظر تقسیم بندی ساختاری، در بخش شمال غربی پهنه سنندج - سیرجان و در زیر پهنه با دگرشکلی پیچیده واقع شده است. منطقه مذکور از نظر رخدادهای زمین ساختی - ماگمائی، دستخوش رویدادهای حاصل از باز و بسته شدن اقیانوس نئو تیس (فاز کششی و تراکمی) شده؛ که از اواخر پالئوزوئیک تا دوران سوم ادامه داشته است؛ به گونه ای که تأثیر آن موجب دگر گونی ناحیه ای، فرورانش، ماگماتیسم کالک آلکالن (کلسیمی – قلیائی) و برخورد صفحه عربی و ایران در اوایل تر شیری شده است. پیامد این امر، به صورت ایجاد په نه های برشی (شکل پذیر و شکننده) همراه با بالاآمدگی ناحیه ای نمود یافته و محل مناسبی برای تشکیل کانسارهای تیپ کوهزائی فراهم آورده (the Mohajjel et al., 2003) و کانسارهای طلای متعددی از جمله کانسار طلای کرویان، قبغلوجه و قلقله در این منطقه کشف شده است.



شکل ۱-۳: موقعیت جادههای دسترسی به منطقه مورد مطالعه

توالی چینه ای منطقه ای با امتداد شمال شرقی – جنوب غربی (شکل ۱-۴) شامل مجموعه ای از سنگ -های رسوبی و آتشفشانی دگر گون شده می باشند؛ که تحت تأثیر پهنه های برشی با امتداد شمال شرقی – جنوب غربی با شیبی متوسط به سمت شمال غربی تغییر شکل یافته اند و شامل فیلیت ها و آهک های بلورین، دولومیت های آهن دار، کوار تزیت و مجموعه آتشفشانی فلسیک و بازیک دگر گون شده می -باشند؛ که زمان تشکیل آنها به مزوزوئیک، بویژه کرتاسه نسبت داده شده است ( , Heidari et al. با شند؛ که زمان تشکیل آنها به مزوزوئیک، بویژه کرتاسه نسبت داده شده است ( , 2006). کرین شیست تشکیل آنها به مزوزوئیک، بویژه کرتاسه نسبت داده شده است ( , با افتاد د گر گون گرین شیست تشکیل آنها به مزوزوئیک، بویژه کرتاسه نسبت داده شده است ( , با افتاد د گر گونی مورین شیست تشکیل آنها به مزوزوئیک، مویژه کرتاسه نسبت داده شده است ( , با افتاد د گر گونی گرین شیست تشکیل شده اند. برونزد واحدهای سنگی در منطقه مورد مطالعه شامل توالی رسوبی -گرین شیست مزوزوئیک شامل متاولکانیک های مافیک و عمدتاً اسیدی، سریسیت شیست، کلریت شیست، فیلیت و فیلونیت (در زون های برشی)، میان لایه های آهکی و دولومیتی و کوار تزیت می باشد. امنه ای مروزوئیک شامل متاولکانیک های مافیک و عمدتاً اسیدی، سریسیت شیست، کلریت مایک و اسیدی دگر گون شده می باشند ( اعزامی میلونیتی و اولترامیلونیتی و سنگ های مافیک و اسیدی دگر گون شده می باشند ( اعزام میلونیتی و اولترامیلونیتی و سنگ های دامانی کو اسیدی د گر گون شده می باشند ( اعزام اول واند امیلونیتی و میلونیتی و میلونیتی به شدت تغییر شکلیافته سیلیسیشده و رگچههای سولفیدی در زونهای آلتراسیون رخ داده است ( Heidari ) et al., 2006; Aliyari et al., 2007). انواع مختلف آلتراسیون در این منطقه شامل آلتراسیونهای سیلیسی، سولفیدی، سریسیتی، کلریتی و کربناتی میباشند؛ که در میان آنها آلتراسیونهای سیلیسی، سولفیدی و کربناتی در ارتباط مستقیم با کانیسازی میباشند ( Aliyari et al., 2006; Aliyari et al., 2007). (al., 2007).



شکل ۱-۴: نقشه زمینشناسی کانسارهای کرویان، قبغلوجه و قلقله (Mohajjel and Eshraghi, 2008).

کانیهای فلزی در زون کانیزائی شامل پیریت، پیروتیت، طلای خالص، آرسنوپیریت و مقدار جزئی کالکوپیریت و گالن میباشند؛ که با کانیهای غیرفلزی کوارتز، فلدسپارها، میکا و کربناتها همراهند. در میان این کانیها همان گونه که در شکل ۱-۵ و شکل ۱-۶ نشان داده شده است، پیریت و کوارتز، Heidari et al., 2006; Aliyari et al., 2007, Aliyari et ) دانیهای اصلی دربرگیرنده طلا میباشند ( al., 2009, دو نوع کانی پیریت عقیم و بارور در منطقه وجود دارند. کانیهای پیریت عقیم عمدتاً درشت بلور بوده و ارتباطی به کانیزائی ندارند؛ اما کانیهای بارور ریز بلور هستند ( ,Aliyari et al., 2007, Aliyari et al., 2006; Aliyari et al., 2007). (2009).

همچنین نتایج مطالعات صحرایی و میکروسکوپی در مورد توالی پاراژنز کانیزائی کانسار طلای تیپ کوهزائی خراپه، در نزدیکی منطقه مورد مطالعه، نشان میدهد که سه مرحله فعالیت هیدروترمال اصلی در آن اتفاق افتاده است؛ که این مراحل شامل ۱) تشکیل رگچهها و سیلیسیشدن سنگ دیواره ۲) شکست هیدرولیکی و برشی شدن و همچنین فرآیند پرشدگی شکستگیها و ۳) برشیشدن کاتاکلاستیکی و فرآیند بُرشیشدن همچنین نتایج مطالعات صحرایی و میکروسکوپی در مورد توالی پاراژنز کانیزائی کانسار طلای تیپ کوهزائی خراپه، در نزدیکی منطقه مورد مطالعه، نشان میدهد که سه مرحله فعالیت هیدروترمال اصلی در آن اتفاق افتاده است؛ که این مراحل شامل ۱) تشکیل رگچه-ها و سیلیسیشدن سنگ دیواره ۲) شکست هیدرولیکی و برشی شدن و همچنین فرآیند پرشدگی شکستگیها و ۳) برشیشدن کاتاکلاستیکی و فرآیند بُرشیشدن میباشند.



شکل ۱-۵: تصاویر همراهی طلا با کانی پیریت (A) و کوارتز (B) در کانسار طلای قلقله (Aliyari et al., 2009).



شکل ۱-۶: تصویر طلای آزادشده از اکسیداسیون کانی پیریت و نتیجه مطالعه میکروسکوپ الکترونی (SEM) در کانسار طلای کرویان (Heidari et al., 2006).

درمرحله اول حجم زیادی کوارتز در گسلهای با راستای شمالغربی – جنوب شرقی رسوب یافته است. رگههای تشکیل شده در این مرحله با شیستوزیته فیلیتها موازی هستند. مشخصه اصلی رگههای تشکیل شده در این مرحله همراهی کانیهای درشت بلور کوارتز – پیریت – سریسیت – گرافیت است. عیار طلای تشکیل شده در این مرحله کمتر از ۲۰۰ppb است؛ که غیر اقتصادی می باشد. در مرحله دوم سنگ مرمرهای سیلیسی شده و رگههای کوارتز تشکیل شده در مرحله اول، برشی شده و مسیرهای جدیدی برای عبور سیالات حاوی ماده معدنی و در نتیجه تشکیل شبکههای پیچیده برشی – رگچه ای فراهم شده است. در مرحله دوم کوارتز، پیریت، مارکاسیت، مگنتیت، روتیل، پیروتیت، کالکوپیریت، بورنیت، گالن، اسفالریت، الکتروم، طلا و مقادیر جزئی از نقره خالص در شکستگیها شکل گرفته است. کانیزائی اقتصادی طلا در این مرحله عمدتاً با کانیهای سولفیدی مرتبط است. علاوه بر این، طلا با کانیهای بلورین کوارتز در بافت پرکننده فضای خالی همراه است. Niroomand et al., است ( مرحله و برشی شدن اتفاق افتاده است ( , Miroomand et al.

### ۹-۹- ضرورت انجام تحقيق

دادههای الکترومغناطیسی مشاهدهای در عملیات ژئوفیزیکی معمولاً حاوی اطلاعات مربوط به اثرات القای الکترومغناطیسی در زمین و IP مرتبط با واهلش بارهای الکتریکی پلاریزهشده در ترکیبات سنگ است. وجود اثر IP در دادههای الکترومغناطیس باعث کاهش دامنه مؤلفه حقیقی دادههای الکترومغناطیسی در فرکانسهای پائین میشود و در صورتی که این اثر قوی باشد، باعث تغییر علامت آن دادهها میشود (2018, Sharifi et al. 2018). بنابراین اعمال پارامترهای مربوط به IP در مدل سازی دادههای الکترومغناطیسی، موجب بهبود برازش مدل پیش بینی شده به دادههای مشاهدهای شده و مایر پارامترهای موجود در مدل با دقت بیشتری بازیابی خواهند شد. همچنین عدم توجه به اثرات IP سایر پارامترهای موجود در مدل با دقت بیشتری بازیابی خواهند شد. همچنین عدم توجه به اثرات IP. باعث خطا در مدل سازی و ایجاد آثار کاذب در پارامترهای مدل می گردد (2018, 2018). باعث خطا در مدل سازی و ایجاد آثار کاذب در پارامترهای مدل می گردد (2018, 2018). بایا خطا در مدل سازی و ایجاد آثار کاذب در پارامترهای مدل می گردد (2018, 2018). بازیابی پارامترهای IP. اطلاعات زمین شناسی بیشتری را برای تفسیر بهترنتایچ، فراهم می میاید. موجب بازیابی پارامترهای IP. اطلاعات زمین شناسی می شامل نقشه زمین شناسی و نقشههای ژئوشیمی، موجب کاهش عدم قطعیت و افزایش اعتمادپذیری مدل اکتشافی می شود؛ که برای دستیابی به این مهم تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از تلفیق لایههای اطلاعاتی در محیط IGS

۱-۱۰- ساختار تحقيق

این رساله در ۵ فصل تدوین شده است. در فصل اول کلیات موضوع شامل مقدمه و مرور تحقیقات قبلی، روشهای الکترومغناطیس هوابرد و قطبش القایی طیفی بررسی شده است. در فصل دوم تئوری روشهای ژئوفیزیکی الکترومغناطیس هوابرد، قطبش القایی طیفی، تلفیق این دو روش و روشهای مدلسازی آنها بررسی شده است. فصل سوم به تئوری روشهای ژئوشیمی و تهیه نقشه پتانسیل معدنی اختصاص یافته است. در فصل چهارم نتایج مدلسازیهای ژئوفیزیکی، ژئوشیمیائی، مطالعات کانی شناسی و تلفیق لایه های اطلاعاتی در منطقه کرویان ارائه شده است. نهایتاً در فصل پنجم نتیجه-گیری و پیشنهادات مطرح شده است.
۲- فصل دوم

# تلفیق روشهای الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس و قطبش القایی طیفی

دادههای الکترومغناطیسی مشاهدهای در عملیات ژئوفیزیکی معمولاً حاوی اطلاعات مربوط به دو اثر القای الکترومغناطیسی در زمین و IP مرتبط با واهلش بارهای الکتریکی پلاریزهشده در اجزاء سنگ است. وجود اثر IP در دادههای الکترومغناطیسی باعث وابستگی فرکانسی هدایت الکتریکی/ مقاومت-ویژه میشود؛ که این ویژگی یکی از عوامل کاهش دامنه مؤلفه حقیقی دادههای الکترومغناطیسی در فرکانسهای پائین میباشد و در صورتیکه این اثر قوی باشد، موجب تغییر علامت دادههای مربوط ه میگردد. بنابراین ارائه یک تفسیر درست و مدل قابل اعتماد از دادههای الکترومغناطیسی، مستلزم توجه همزمان به این دو فاکتور مهم در فرآیند مدلسازی است.

اثر القای الکترومغناطیسی با حل معادله میدان الکترومغناطیسی با استفاده از مدل های ژئوالکتریکی رسانندگی مبتنی بر حل معادلات ماکسول<sup>(</sup>، قابل شبیهسازی است و اثر IP مرتبط با مقاومتویژه مختلط سنگها میباشد؛ که با استفاده از تئوری روش SIP مورد بررسی و مدلسازی قرار می گیرد.

۲-۲-مبانی روش الکترومغناطیس هوابرد

روشهای الکترومغناطیس بسیار متنوع و کارا بوده و اجرای آنها سریع و نسبتاً کـمهزینـه است. ایـن روش یکی از روشهای پرکاربرد در اکتشاف منابع زیرزمینی بوده که بیشترین تنوع در سیسـتمهـای برداشت را به خـود اختصـاص دادهانـد (Reynolds, 1997). یکـی از سیسـتمهـای متـداول برداشـت الکترومغناطیس حوزه فرکانس، سیستم DIGHEM میباشد، که غالباً از دو آرایه سیمپیچهـای هـم-صفحه افقی (HCP)<sup>۲</sup> و سیمپیچهای هم محور قائم (VCA)<sup>۳</sup> برای برداشت دادههای الکترومغناطیسی بهره میبرد. در این سیستم، آرایههای هم صفحه افقی از فرکانسهای اسمی ۷/۲، ۹/۰ و ۵۶ کیلوهرتز و آرایههای هم محور قائم از فرکانس اسمی ۱۰۰۰ و ۵۵۰۰ هرتز بهره میبرند (شکل ۲-۱).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Maxwell's equations

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Horizental coplanar coil

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Vertical Coaxial



شکل ۲-۱: نمایی از تجهیزات درون سیستم DIGHEM (عربامیری و همکاران، ۱۳۸۹). تفسیر دادههای الکترومغناطیسی بر مبنای حل معادلات ماکسول انجام میپذیرد که در ادامه مـورد بررسی قرار گرفته است.

# ٢-٢-١- معادلات الكترومغناطيس

توصيف انتشار امواج الكترومغناطيس با استفاده از تئورى الكترومغناطيس انجام مى پذيرد؛ كه اين تئورى بر پايه معادلات ماكسول مى باشد. مجموعه معادلات ماكسول در حوزه فركانس به صورت زير است (Reitz et al, 1993):

 $abla imes \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D} = (\sigma + j\omega\varepsilon)\vec{E}$  قانون آمپر (۱-۲)

$$abla imes \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$$
 قانون فاراده (۲-۲)

$$abla$$
. (۳-۲)  $\nabla .\vec{B} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ if \ \mu = cte$  )  $(\nabla .\vec{H} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ if \ \mu = cte$  )  $\vec{D} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ if \ \mu = cte$  )  $\vec{D} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ if \ \mu = cte$  )  $\vec{D} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ if \ \mu = cte$  )  $\vec{D} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ if \ \mu = cte$  )  $\vec{D} = 0 \ \& \ \nabla .\vec{E} = 0 \ \& \ \ \nabla .\vec{E} = 0 \ \& \$ 

# ۲-۲-۲ حل یک بعدی معادلات ماکسول

Wait, 1982; Mundry, 1984; Siemon et al., 2009a; ) براساس تحقیقات قبلی صورت گرفته (Siemon et al., 2009b; Siemon, 2012) میدان مغناطیسی ثانویه نسبی برای آرایههای همصفحه

افقی (Z) و هم محور قائم (X) از طریق روابط (۲-۴) بدست می آید:

$$Z = r^{3} \int_{0}^{\infty} R_{TE}(f,\lambda,\rho,\mu,\varepsilon) \frac{\lambda^{3} e^{-2h\alpha_{0}}}{\alpha_{0}} J_{0}(\lambda r) d\lambda$$

$$X = r^{2} \int_{0}^{\infty} R_{TE}(f,\lambda,\rho,\mu,\varepsilon) \lambda e^{-2\lambda h} \frac{J_{1}(\lambda r) - \lambda J_{0}(\lambda r)}{2} d\lambda$$

$$\alpha_{0}^{2} = (\lambda^{2} - \omega^{2} \mu_{0} \varepsilon_{0} + j \omega \mu_{0} / \rho_{0})$$
(f-7)

Wait, 1982; ) ضریب انعکاس برای یک زمین n لایه از طریق رابطه بازگشتی (۲-۵) محاسبه می شود (

:(Mundry, 1984; Siemon et al., 2009a; Siemon et al., 2009b; Siemon, 2012

$$R_{TE} = \frac{\beta_1 - \alpha_0 \cdot \mu_n / \mu_0}{\beta_1 + \alpha_0 \cdot \mu_n / \mu_0}, \qquad (\Delta-\tau)$$

$$\beta_n = \alpha_n \frac{(\beta_{n+1} + \alpha_n \cdot \tanh(\alpha_n \cdot t_n))}{(\alpha_n + \beta_{n+1} \cdot \tanh(\alpha_n \cdot t_n))},$$
(9-7)

$$lpha_n^2 = (rac{j\omega\mu_n}{
ho_n} + \lambda^2 - \omega^2 arepsilon_n \mu_n),$$
  
 $\lambda_n^2 = (rac{j\omega\mu_n}{
ho_n} + \lambda^2 - \omega^2 arepsilon_n \mu_n),$   
 $\lambda_n^2 = (rac{j\omega\mu_n}{
ho_n} + \lambda^2 - \omega^2 arepsilon_n \mu_n),$   
 $\lambda_n^2 = (rac{j\omega\mu_n}{
ho_n} + \lambda^2 - \omega^2 arepsilon_n \mu_n),$ 

برای تعیین پارامترهای مدل باید رابطه انتگرالی (۲-۴) حل شود. از آنجا که این رابطه با استفاده از

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Surface admittance

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Characteristic admittance

روشهای تحلیلی قابل حل نیست، میتوان از روشهای عددی تبدیل هنکل سریع<sup>۱</sup> (FHT) برای این منظور بهره برد که در اینجا از فیلتر خطی معرفی شده توسط گوپتاسارما- سینگ استفاده شده است (Guptasarma and Singh 1997). براساس این روش، رابطه انتگرالی به صورت رابطه (۲-۲) گسسته-سازی می شود:

$$Z = h_r^{2} \sum_{i=1}^{n} K(\lambda_i) W_i$$

$$K(\lambda) = R_{TE} \frac{\lambda^3 \exp(-2h \cdot \alpha_0)}{\alpha_0}$$

$$X \approx -\frac{Z}{4}$$

$$\lambda_i = (\frac{h}{r}) * 10^{((i-1)s+a)}$$

$$\lambda_i = (i - \frac{h}{r}) + 10^{((i-1)s+a)}$$
by some set in the set of the set of

$$d = G(m) \tag{A-T}$$

که **d** نشاندهنده دادههای مشاهدهای است و میتواند بـه صـورت بـردار 
$$oldsymbol{d}=\left[d_1,\ d_2,\ ...,\ d_d
ight]^T$$
 بيـان  
شود. G مدل غيرخطی پيشرو و **m** پارامترهای مدل است که بهصورت بردار  $oldsymbol{m}=\left[m_1,\ m_2,\ ...,\ m_p
ight]^T$ نشان داده میشود.

به منظور بررسی تأثیر تغییرات مقاومت ویژه بر پاسخ دریافتی به وسیله گیرنده الکترومغناطیس هوابرد، مدل چهار لایه ای (شکل ۲-۲) در نظر گرفته شده و داده های الکترومغناطیس، با استفاده از آرایه DIGHEM، در ارتفاع ۳۰ متری و در بازه فرکانسی ۹۰۰ هر تز تا ۵۶ کیلوهر تز، بر روی این مدل در چهار حالت مختلف مطابق اطلاعات جدول ۲-۱ شبیه سازی گردیده است. نتایج شبیه سازی داده های الکترومفناطیس هوابرد در شکل ۲-۳ و شکل ۲-۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل ها،

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Fast Hanke Transform

کاهش مقاومتویژه لایه آنومال و افزایش مقاومتویژه لایه فوقانی باعث کاهش شدت اختلاف فاز می-شود.



Siemon et شکل ۲-۲: برداشت دادههای الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس بر روی مدل زمین چهار لایه (بعد از al., 2011).

جدول ۲-۱: پارامترهای مورد استفاده در مدل زمین چهار لایه برای شبیهسازی دادههای الکترومغناطیس هوابرد

Model parameters	$\rho_1(\Omega m)$	$\rho_2(\Omega m)$	ρ <sub>3</sub> (Ωm)	$\rho_4(\Omega m)$	t <sub>1</sub> (m)	t <sub>2</sub> (m)	t <sub>3</sub> (m)
Scenario 1	50	100	10-100	1000	20	30	10
Scenario 2	50	100	1-10	1000	20	30	10
Scenario 3	500	100	10-100	1000	20	30	10
Scenario 4	500	100	1-10	1000	20	30	10



شکل ۲-۳: مؤلفههای حقیقی (بالا)، موهومی (وسط) و اختلاف فاز (پائین) مربوط به سناریو ۱ (سمت چپ) و سناریو ۲ (سمت راست) از جدول ۲-۱. مقاومتویژه لایه سوم در سناریوی ۱ از ۱۰ تا ۱۰۰ اهممتر و در سناریوی ۲ از ۱ تا ۱۰ اهممتر تغییر مینماید



(سمت راست) از جدول ۲-۱

SIP مبانی روش

در این روش با بهره گیری از جریان هارمونیک متناوب با فرکانسهای متفاوت (بازه فرکانسی ۰/۰۱ تـا

$$\vec{D}(\omega) = \hat{\varepsilon}^* \vec{E}(\omega)$$

$$ec{J}_{con}(\omega) = \, \hat{\sigma}^* ec{E}(\omega)$$
با جای گذاری روابط (۲-۹)، رابطه (۲-۱۰) بدست میآید:

$$\vec{J}_{tot}(\omega) = \hat{\sigma}^* \vec{E}(\omega) + j\omega \hat{\varepsilon}^* \vec{E}(\omega) = (\hat{\sigma}^* + j\omega \hat{\varepsilon}^*) \vec{E}(\omega)$$
 (۱۰-۲)  
با توجه به این که هدایت الکتریکی و گذردهی الکتریکی مقادیر مختلط هستند؛ با بازنویسی رابط ه  
(۱۰-۲) براساس ۵ می توان نوشت:

$$\vec{J}_{tot}(\omega) = [(\hat{\sigma}' + j\hat{\sigma}'') + j\omega(\hat{\epsilon}' - j\hat{\epsilon}'')] E(\omega)$$
 (۱۱-۲)  
در حالتی کلی، میتوان گذردهی الکتریکی را بهصورت رابطه (۲-۱۲) با هدایت الکتریکی ادغام نمود  
(Nabighian and Corbett, 1988; Börner, 2016):

$$\vec{J}_{tot}(\omega) = \left[ \left( \hat{\sigma}' + \omega \hat{\varepsilon}'' \right) + j \left( \hat{\sigma}'' + \omega \hat{\varepsilon}' \right) \right] E(\omega)$$
(11-7)

$$J_{tot}(\omega) = \sigma^* E = (\sigma' + j\sigma'')E$$
که در آن  $\sigma' e$  یاکتریکی مختلط هستند.  
در نهایت دامنه و اختلاف فاز بدست آمده از اندازه گیری SIP به صورت رابطـه (۲-۱۳) قابـل محاسـبه

خواهد بود (شکل ۲-۵).

$$\sigma^*(\omega) = |\sigma^*| \, e^{j\varphi} \tag{17-7}$$

$$|\sigma^*| = \sqrt{(\sigma')^2 + (\sigma'')^2}$$

$$tan(\varphi) = \frac{\sigma''}{\sigma'}$$



۲-۳-۲ تصحیح دادههای قطبش القایی طیفی

برای بدست آوردن دادههای SIP با کیفیت، باید به مسائل متعددی توجه نمود. برای کاهش خطای دادههای SIP باید آمادهسازی نمونهها، اندازه نگهدارنده نمونه'، دمای آزمایشگاه و سلول اندازه گیری SIP، اشباع نمونه از محلول، مدت زمان اشباع نمونه، کالیبراسیون دستگاه اندازه گیری و ... با دقت بالا مورد توجه قرار گیرد (Kemna et al., 2012).

از آنجا که دادههای SIP معمولاً در حوزه فرکانس اندازه گیری می شوند، در فرکانس های بالاتر از یک کیلوهر تز با اثر جفت شدگی الکترومغناطیسی همراه هستند. جفت شدگی الکترومغناطیسی مانع اصلی در تفسیر داده های مقاومت ویژه مختلط و قطبش القایی است (Routh and Oldenburg, 2001). این اثر با افزایش فرکانس جریان متناوب و نیز در محیط های با رسانایی بالا و فواصل جدایش الکترودی

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Sample holder

بزرگ ظاهر شده و پاسخ قطبش القایی زمین به آن آغشته شده و تفسیر داده ها را مشکل و گاهی غیر ممکن می سازد (Commer, et al., 2011). برای کاهش اثر جفت شدگی الکترومغناطیسی، روش-های متعددی توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است. بر این اساس در مرحله اندازه گیری با استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی- دوقطبی و استفاده از تجهیزات مناسب و استفاده از کابل های مناسب می توان تا حد امکان کیفیت داده های برداشت شده را بهبود بخشید (2012). در مرحله پس از برداشت نیز با توجه به کاربرد روش GIF، روش های محاسباتی متعددی توسط محققان معرفی شده است؛ که از جمله می توان به برازش مدل کل-کل به طیف جفت شدگی الکترومغناطیس (Pelton et al., 1978)، مدل سازی همزمان اثرات جفت شدگی الکترومغناطیسی و اثرات SIP (آرات SIP)، مدل سازی همزمان اثرات جفت شدگی الکترومغناطیسی و

همچنین انجام تصحیحات هندسی و دما بر روی دادههای SIP ضروری است. برای این منظور به ترتیب از روابط (۲-۱۴) و (۲-۱۵) میتوان استفاده نمود.

$$R(\omega) = \frac{A}{L} * 
ho(\omega)$$
 (۱۴-۲)  
که در آن  $R$  مقاومتویژه مختلط،  $A$  سطح مقطع نمونه،  $L$  طول نمونه و  $ho$  مقاومتویژه مختلط اندازه-  
گیری شده میباشند.

$$ho_{\omega}(T_2) = 
ho_{\omega}(T_1) \cdot \frac{T_1 + 21.5}{T_2 + 21.5}$$
 (۱۵-۲)  
که در آن T نشان دهنده دما میباشد.

## IP -۲-۳-۲ مکانیسم ایجاد

قطبش القایی به دلیل جابجایی و تجمع یون ها و الکترون ها در اثر وجود یک میدان الکتریکی خارجی ایجاد می شود؛ که اثر آن در دو حوزه زمان و فرکانس قابل مشاهده است. مطالعات بنیادی زیادی بر روی قطبش ایجاد شده بر روی محیط های متخلخل و سوسپانسیون های کلوئیدی انجام پذیرفته است و پنج مکانیسم اصلی در فرکانسهای کمتر از یک مگاهرتز به صورت زیر معرفی شده است ( Kemna ) et al., 2012):

۱) قطبش ماکسول- واگنر

قطبش ماکسول – واگنر نوعی قطبش بین سطوح مرزی (فصل مشترکها)<sup>۲</sup> است؛ که بهخاطر انقطاع جریانهای جابجایی<sup>۳</sup> در ترکیبات ناهمگن چندجزئی دارای ناپیوستگی ضرایب دیالکتریکی و رسانایی الکتریکی، در محل تماس این اجزا بوجود میآید. این مکانیسم بهوسیله پیچ و خمهای اجزای مختلف، درصد حجمی، رسانایی و ضریب دیالکتریکی اجزای مختلف کنترل میشود (Kemna et al., 2012). **۲) قطبش لایه استرن<sup>۴</sup>** 

بخش داخلی لایه مضاعف بار الکتریکی<sup>6</sup> که در مرز بین کانیها و آب شکل می گیرد (شکل ۲-۶) (Kemna et al., 2012).

۳) قطبش لایه پخششده ُ

مرتبط با بخش خارجی لایه مضاعف بار الکتریکی میباشد (شکل ۲-۶). این نوع قطبش از منظر منشأ الکتروشیمیایی خیلی شبیه به قطبش غشایی است (Kemna et al., 2012).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Maxwell- Wagner polarization

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> interfacial

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Displacement currents

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Stern layer

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Electrical double layer (EDL)

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Diffuse layer



شکل ۲-۶: نمایش لایه الکتریکی دوگانه و فرآیندهای الکتروشیمیایی قطبش لایه استرن و لایه پخش شده (Börner, 2016).

۴) قطبش غشایی<sup>۱</sup>

بسیاری از کانیهای تشکیلدهنده سنگها دارای بار الکتریکی منفی در سطوح خارجی خود هستند؛ که در تماس با سیال موجود در حفرات، یونهای مثبت به سمت این سطوح جذب می شوند (شکل ۲-۲). ضخامت یونهای مثبت به حدود ۱۰۰ میکرومتر می رسد. اگر این ضخامت به اندازه قطر دهانه روزنه ارتباطی حفرات باشد، حرکت یونهای داخل سیال که در اثر تحمیل ولتاژ خارجی ایجاد شده است، مسدود می گردد. در نتیجه یونهای مثبت و منفی در دو طرف این مانع تجمع می یابند و با قطع جریان خارجی به مکانهای اولیه خود باز می گردند و در بازه زمانی محدودی ولتاژ کاهشی گذرا تولید می کنند. این اثر به عنوان قطبش غشایی شناخته می شود و در حضور کانیهای رسی برجسته تر است (Kearey et al., 2002).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Membran plarization



شكل ۲-۲: نمايش فرآيند الكتروشيميايي قطبش غشايي (Dentith and Mudge, 2014).

۵) قطبش الكترودي (فلزي) ۱

هنگامی که کانیهای فلزی در سنگ حضور دارند، یک مسیر هدایت الکتریکی برای عبور جریان فراهم می گردد. زمانی که یک کانی فلزی یک حفره از سنگ را مسدود نماید، در اثر تزریق جریان خارجی بارهای مثبت و منفی در طرفین کانی فلزی تجمع مییابند (شکل ۲-۸). زمانی که ولتاژ خارجی برداشته شود، یونها بهتدریج به موقعیت اولیه خود بر می گردند و بدین ترتیب ولتاژ کاهشی ناپایا را تولید می کنند. تمام کانیهایی که رسانایی خوبی دارند (سولفیدها و گرافیت)، در ایجاد این اثر می-تواند شرکت نمایند. شمام کانیهایی که رسانایی خوبی دارند (سولفیدها و گرافیت)، در ایجاد این اثر می-توانند شرکت نمایند. شدت قطبش الکترودی به شدت ولتاژ اولیه و شدت کانیسازی بستگی دارد. در کانیسازی افشان این اثر برجسته تر است. با افزایش تخلخل مسیرهای بیشتری برای انتقال یونها فراهم شده و شدت قطبشالقایی الکترودی کاهش مییابد (2002).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Electrod polarization (overvoltage)



شكل ۲-۸: نمايش فرآيند الكتروشيميايي قطبش الكترودي (Dentith and Mudge, 2014).

در پیجویی ذخایر معدنی، قطبش القایی الکترودی مورد توجه است و قطبش غشایی از این اثر قابل تشخیص نیست. بنابراین قطبش غشایی در این حالت نوفه زمین شناسی محسوب شده و شدت آن ممکن است حتی به اندازه قطبش الکترودی سنگی حاوی ۲٪ کانی فلزی باشد ( ,Kearey et al.). 2002.

۲-۳-۳ مدلهای واهلش

برای بیان کمی و مدلسازی دادههای SIP از مدلهای ریاضی موسوم به مـدلهـای واهلـش اسـتفاده می شود. در ادامه تعدادی از این مدلها مورد بررسی قرار گرفته است.

الف) مدل كل- كل

این مدل اولین بار در سال ۱۹۴۱ توسط کل و کل برای برازش به طیف دیالکتریک مختلط مورد استفاده قرار گرفت و در سال ۱۹۷۸ توسط پلتون و همکاران (Pelton et al., 1978)، با برازش به دادههای طیفی مقاومتویژه الکتریکی مختلط برای تفکیک نوع مواد معدنی به کار گرفته شد. مدل کل – کل را میتوان با یک مدار الکتریکی متشکل از مقاومت ها و خازن ها معادل فرض کرد (شکل ۲-۹). براساس این مدل مقاومتویژه و رسانندگی سنگ متخلخل بهترتیب با روابط (۲-۱۶) و (۲-۱۷-۲) بیان می گردد (Ghorbani et al., 2007).



Direction of current flow  $\rightarrow$ 

شکل ۲-۹: مدار معادل مدل کل- کل برای یک سنگ کانیسازیشده (Ghorbani et al., 2007; Emond, 2007).

$$\rho(\omega) = \rho_{dc} \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau)^c} \right) \right]$$
(19-7)

و

$$\sigma(\omega) = \sigma_{dc} \left[ 1 + m \left( \frac{(j\omega\tau)^c}{1 + (j\omega\tau)^c (1 - m)} \right) \right]$$
(1V-Y)

که 
$$\frac{1}{\sigma_{dc}} = \frac{1}{\sigma_{dc}}$$
 مقاومتویژه الکتریکی DC (با فرکانس صفر)،  $\sigma_{dc}$  رسانندگی الکتریکی DC (با فرکانس صفر)،  $\sigma_{dc}$  مانی  $\sigma_{dc}$  می فرکانس صفر)،  $m$  بارپذیری،  $\tau$  ثابت زمانی  $n$  فرکانس زاویه ای،  $c$  وابسته فرکانسی  $\gamma$  بدون بعد و فرکانس  $\sigma_{dc}$  می باشد.

لازم به ذکر است که روابط (۲-۱۶) و (۲-۱۷) برای بیان قطبش القایی یک منشأ منفرد مورد استفاده قرار می گیرند و در شرایطی که زمین ناهمگن باشد، از مدل کل – کل n جزئی تعمیمیافته به شکل

#### <sup>2</sup> Frequency dependence

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Time constant

رابطه (۲-۱۸) برای بیان رفتار طیفی تعداد n منبع ایجاد کننده قطبش القایی استفاده می شود (Kruschwitz, 2007).

$$\rho(\omega) = \rho_{dc} \left[ 1 - \sum_{k=1}^{k=n} m_k \left( 1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau_k)^{c_k}} \right) \right]$$
(1A-7)

همچنین پلتون و همکاران (Pelton et al., 1978) مدل زیر را برای دو منشاء ایجادکننده قطبش-القایی معرفی نمودند:

$$\rho(\omega) = \rho_{dc} \left[ 1 - m_1 \left( 1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau_1)^{c_1}} \right) \right] \cdot \left[ 1 - m_2 (1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau_2)^{c_2}}) \right]$$
(19-7)

، au و c پارامترهای وابسته به منابع قطبش القایی هستند؛ که هر کدام از آنها اطلاعاتی را در مورد au ،m خواص فیزیکی منبع ایجاد کننده ارائه مینمایند؛ که در ادامه بررسی می شوند.

برای هر سنگ قطبش پذیر، مقادیر  $\rho$  و m وابسته به تخلخل و مساحت سطوح تماس کانیهای فلزی در معرض سیال داخل حفرات هستند. افزایش کانیهای فلزی باعث کاهش مقاومت ویژه  $\rho_{dc}$  و افزایش بارپذیری می شود. کارهای آزمایشگاهی و تجارب صحرایی نشان داده است که ثابت زمانی و اوابسته فرکانسی بیشتر وابسته به بافت کانیهای فلزی موجود در سنگ می باشند؛ که این بافت با وابسته فرکانسی می شود جوامع دانههای فلزی و نیز توزیع اندازه دانهها در هر جامعه از ذرات قطبش پذیر بیان می شود (Xu, 2013).

.(Alter Timps, 2010	ی منعیر ( ۲۵, 2011 )	دل مصنوعی با بارپدیر	مترهای مدل کل- کل برای ما	جدول ۲۰۱۰ پاراه
وابسته فركانسى (-)	ثابت زمانی (S)	بارپذیری (-)	مقاومتویژه (Ωm)	مدل
۰,۴	١	۰,۱–۰,۶	۵۰۰	مدل ۱
۰,۴	•,••)-)••	۰,۴	۵۰۰	مدل ۲

۰,۴

۵..

مدل ۳

جدول ۲-۲: پارامترهای مدل کل- کل برای مدل مصنوعی با بارپذیری متغیر ( After Phillips, 2010; Fu, 2011).

۰,۱-۰,۶

١

با استفاده از اطلاعات این جدول ۲-۲، تأثیر تغییر پارامترهای مدل کل-کل در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

الف-۱) پارامتر بارپذیری

برای بررسی تأثیر تغییرات پارامتر بارپذیری بر پاسخ مدل کل-کل، با استفاده از اطلاعات جدول ۲-۲ (مدل ۱) و به وسیله رابطه (۲-۱۶)، دادههای رسانندگی الکتریکی مختلط در بازه فرکانسی ۹٫۱ میلی-هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز تولید شد. مؤلفه حقیقی، موهومی و تغییر فاز رسانندگی الکتریکی مختلط مربوط به این دادهها به ترتیب در شکل ۲-۱۰، شکل ۲-۱۱ و شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. همان طور که از روی این شکلها مشاهده میشود، با افزایش بارپذیری، شیب تغییرات منحنی مؤلفه حقیقی، شدت مؤلفه موهومی و شدت تغییر فاز رسانندگی مختلط افزایش مییابد. تغییر بارپذیری محل (زمان یا فرکانس) پاسخ IP را تغییر نمی دهد؛ بلکه فقط دامنه آن را تغییر می دهد.



شکل ۲-۱۰: تغییرات مؤلفه حقیقی رسانندگی مختلط در حوزه فرکانس، با بارپذیری متغیر.



شکل ۲-۱۲: تغییرات فاز رسانندگی مختلط در حوزه فرکانس، با بارپذیری متغیر.

الف-۲) ثابت زمانی

تجارب صحرایی و تحقیقات نشان میدهد که ثابت زمانی مستقیماً وابسته به اندازه دانههای کانیهای فلزی منشأ ایجاد اثر قطبشالقایی میباشد. برای کانیهای فلزی با ابعاد کوچک، بیشینه اختلاف فاز در فرکانسهای بالا رخ میدهد و ثابت زمانی کوچک است. برای کانیهای فلزی با دانهبندی درشت، فرکانس بحرانی (فرکانس مرتبط با بیشینه اختلاف فاز) پایین بوده و ثابت زمانی بالا است. بنابراین تغییر در ثابت زمانی منعکس کننده تغییر در اندازه دانههای ذرات قطبش پذیر است (Xu, 2013). مقدار این پارامتر برای سنگهای با کانیسازی مختلف در فاصله ۱ میلی ثانیه تا ۱۰۰۰ ثانیه قرار می-

ID source		tin	ne constant	(s)	
IF source	10 <sup>-2</sup>	$10^{-1}$	1	10	100
background (non-metallic)					
gold deposits with dissem. sulfides					
bedded lead-zinc deposits					
porphyry copper deposits					
massive pyritic sulfides					
magnetite-related ultramafics					
pyrrhotite-related deposits					

جدول ۲-۲: مقادیر مختلف ثابت زمانی برای منابع مختلف کانی سازی (Kemna, 2000).

با توجه به دادههای مربوط به مدل ۲ در جدول ۲-۲، مدل کل-کل رسانندگی با تغییر ثابت زمانی در حوزه فرکانس، بهترتیب در شکل ۲-۱۳، شکل ۲-۱۴ و شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۲-۱۴ و شکل ۲-۱۴ و شکل ۲-۱۴ و منحنی مرتبط با که در شکل ۲-۱۴ و شکل ۲-۱۴ میناد دانه شابت زمانی نقطه اوج منحنی مرتبط با رسانندگی را به سمت فرکانسهای کمتر جابجا مینماید. به عبارت دیگر با کاهش اندازه دانههای قطبش پذیر که معادل کاهش ثابت زمانی است، نقطه اوج تغییر فاز (فرکانس بحرانی) به سمت فرکانسهای پایین جابجا میشود (Phillips, 2010).



شکل ۲-۱۴: تغییرات مؤلفه موهومی رسانندگی مختلط در حوزه فرکانس، با تغییر ثابت زمانی.



شکل ۲-۱۵: تغییرات فاز رسانندگی مختلط در حوزه فرکانس، با تغییر ثابت زمانی.

#### الف-٣) وابسته فركانسي

مقدار وابسته فرکانسی برای دانهبندی یکنواخت کانیها، ۵/۰ تا ۱ است. از آنجا که در سنگهای کانیسازیشده، اندازه کانیها یکنواخت نیست، *c* کاهش مییابد. برای سنگهایی که دارای کانی-سازی از نوع افشان و پراکنده هستند، مقدار آن از ۲/۰ تا ۲/۰ است. چون در این حالت دانههای کانی-سازیشده تقریباً همگن هستند. هر چند برای سنگهای شدیداً کانیسازیشده مقدار آن بین ۲/۰ تا ۲/۰ یا کمتر خواهد بود. زیرا در این حالت میزان ناهمگنی دانههای کانیسازی شده بالاست. این پارامتر معمولاً برای کانیسازی شدید رگهای، تودهای و گرافیتی دارای مقدار ۵/۰ یا بیشتر است ( Luo پارامتر معمولاً برای کانیسازی شدید رگهای، تودهای و گرافیتی دارای مقدار ۵/۰ یا بیشتر است ( در بوب چین را نشان میدهد. براساس مطالعات آزمایشگاهی، مقدار این پارامتر برای سنگهای با درجه کانیسازیهای مختلف در بازه ۲/۰ تا ۲/۰ قرار می گیرد (۱۹78). ۱/۰ تا ۶/۰ برای مدل مصنوعی تعریفشده در جدول ۲-۲ (مدل ۳) نشان داده شده است. وابسته فرکانسی، شیب مؤلفه موهومی مقاومتویژه در مقابل تغییرات فرکانس (نمودار لگاریتمی-لگاریتمی) برای فرکانسهای بالا و پایین را تعیین میکند. برای مقادیر کوچک وابسته فرکانسی، نمودار مقاومتویژه/رسانندگی در مقابل فرکانس، کاملاً هموار و برای مقادیر بزرگ آن، شیب برجسته-تر شده و نمودار مقاومتویژه/رسانندگی مختلط در مقابل فرکانس برجستهتر خواهد بود. برای وابسته فرکانسی بزرگ مقدار فرکانس بحرانی به آسانی تعیین میشود؛ اما برای مقادیر کوچک، این پارامتر چندان واضح نیست (شکل ۲-۱۶ تا شکل ۲-۱۸).

Rock type	Range of <i>c</i> values	Mean value of <i>c</i>
Weathered diorite	0.44-0.72	0.58
Diorite	0.25-0.75	0.53
Marble	0.35-0.69	0.52
Diorite porphyry	0.29-0.41	0.38
Gossan weathered alluvium	0.28–0.45	0.35
Gossan	0.14-0.48	0.31
Mineralized diorite	0.20-0.22	0.21

جدول ۲-۴: مقادیر وابسته فرکانسی برای رخنمونهای سنگی در جنوب چین (Luo and Zhang, 1998).



شکل ۲-۱۷: تغییرات مؤلفه موهومی رسانندگی مختلط در حوزه فرکانس، با تغییر وابسته فرکانسی.



شکل ۲-۱۸: تغییرات فاز رسانندگی مختلط در حوزه فرکانس، با تغییر وابسته فرکانسی.

#### ب) مدل GEMTIP

مدل GEMTIP با استفاده از تئوری محیط مؤثر<sup>۱</sup> (شکل ۲-۱۹) رفتار مقاومتویژه مختلط سنگهای ناهمگن را بیان میکند. این مدل ویژگیهای الکتریکی و فیزیکی سنگها را در مقیاس دانههای تشکیلدهنده سنگ بهشکل یک عبارت ریاضی، ترکیب میکند. این ویژگیها شامل اندازه دانهها، شکل دانهها، رسانایی کانیها، تخلخل، ناهمسانگردی، قطبشپذیری، درصد حجمی کانیها، سیال داخل حفرات و ... است (Zhdanov, 2006, 2008).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Effective medium theory (EMT)



شكل ۲-۱۹: مدل ناهمگن چندجزئي و مدل محيط مؤثر معادل آن (Zhdanov, 2008; Xu, 2013).

- مدل GEMTIP برای مقاومتویژه مؤثر (  $\rho_e$  ) مربوط به ماده ترکیبی چندجزئی با دانههای کروی به - صورت رابطه (۲۰-۲) خواهد بود.  $\rho_e = \rho_{dc} \left\{ 1 + \sum_{l=1}^{N} \left[ f_l m_l \left[ 1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau_l)^{c_l}} \right] \right] \right\}^{-1}$ (۲۰-۲)

که

$$m_{l} = 3 \frac{\rho_{dc} - \rho_{1}}{2\rho_{1} + \rho_{dc}}, \tau = \left[\frac{a_{l}}{2\alpha_{l}} (2\rho_{l} + \rho_{dc})\right]^{\frac{1}{c_{l}}}$$
(1)-7)

که  $\rho_{de}$  مقاومتویژه ماتریکس سنگ،  $f_1$  درصد حجمی هر نوع از دانهها،  $m_1$  بارپذیری هر نوع از دانهها،  $r_1$  بارمانی ما اندازه متوسط هر نوع از دانهها،  $\alpha_1$  ضریب قطبش پذیری هر یک از دانهها،  $\tau_1$  ثابت زمانی و  $\sigma_1$  پارامتر واهلش برای هر یک از دانهها است. به هر حال ماده با ادخال های کروی یک حالت ایده-آل برای کانیهاست، لذا ماده تشکیل شده از دانههای بیضوی با جهتیافتگی تصادفی را در نظر می-گیریم. رسانندگی مؤثر این ماده میتواند با احتساب میانگین جهتیافتگی محاسبه شود. در نتیجه مقاومتویژه مختلط ادخال های بیضوی جهتیافته به مورت رابطه (۲۲-۲) خواهد بود (, 2006, 2008).

$$\rho_{e} = \rho_{dc} \left\{ 1 + \sum_{l=1}^{N} f_{l} m_{l} \frac{1}{3} \sum_{a=x,y,z} \frac{2\rho_{1} + \rho_{dc}}{3h_{a}} \left[ 1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau_{l})^{c_{l}} \frac{2h_{a}}{\lambda_{1a}\overline{a}_{l}(2\rho_{1} + \rho_{dc})}} \right] \right\}^{-1}$$
(YY-Y)

$$h_a = \rho_1 \gamma_{1a} \left( \rho_{dc} - \rho_1 \right) \tag{(TT-T)}$$

و  $\gamma_{1a}$  و  $\gamma_{1a}$  پارامترهای ساختاری قطبشزدایی هستند؛ که با استفاده از ویژگیهای هندسی ادخالهای  $\lambda_{1a}$ بیضوی تعریف می شوند و تابعی از خروج از مرکز<sup>۲</sup>، و میانگین شعاع بیضوی  $\overline{a_i}$  در سه جهت استوایی و قطبی دانهها است؛ که با رابطه  $\frac{a_{lx} + a_{ly} + a_{lz}}{3}$  بیان می شود. پارامترهای مورد استفاده در مدل GEMTIP در جدول ۲-۵ توضیح داده شدهاند.

واحد	نام متغير	متغير
Ωm	مقاومتويژه مؤثر	$ ho_{e}$
Ωm	مقاومتويژه ماتريكس سنگ	$ ho_{_{dc}}$
_	محتوای حجمی کانی/ادخال	$f_l$
-	بارپذیری کانی/ادخال	$m_l$
Hz	فرکانس زاویهای	ω
S	ثابت زمانی	$ au_l$
-	پارامترهای واهلش	$c_l$
Ωm	مقاومتويژه كانى/ادخال	$ ho_l$
m	شعاع کانی/ادخال	$a_l$
$\Omega$ m.m/sec <sup>c</sup> <sub>1</sub>	قطبشپذیری سطحی	$lpha_l$
-	پارامتر قطبشزدایی حجمی	$\gamma_{\iota}$
-	پارامتر قطبشزدایی سطحی	$\lambda_l$

جدول ۲-۵: پارامترهای مدل GEMTIP (Zhdanov, 2006).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Depolarization <sup>2</sup> Eccentricity

#### ب-۱) GEMTIP دوجزئی

تأثیر پارامترهای مدل GEMTIP بیضوی دوجزئی با توجه به دادههای جدول ۲-۶ در ادامه مورد بررسی قرار گرفته و در شکل ۲-۲۰ تا شکل ۲-۲۴ به نمایش درآمده است. با توجه به شکل ۲-۲۰، افزایش مقاومتویژه (کاهش رسانندگی) موجب کاهش شدت مؤلفه حقیقی و موهومی طیف رسانندگی مختلط میشود. با توجه به شکل ۲-۲۱ افزایش درصد حجمی کانی قطبشپذیر موجب افزایش شدت مؤلفه حقیقی و موهومی طیف رسانندگی مختلط میشود.

	جزئی (Fu, 2013).	, GEMTIP بیضوی دو	ل به مدل مصنوعی	:: پارامترهای مربوط	جدول ۲-۶
Model	DC	Volume	ellipticity	Time	Frequency
	resistivity	fraction (%)		constant	dependent
Model 1	50-500	10	4	0.5	0.5
Model 2	50	1-10	4	0.5	0.5
Model 3	50	10	0.125-8	0.5	0.5
Model 4	50	10	4	0.001-10	0.5
Model 5	50	10	4	0.5	0.01-0.9



49



تأثیر پارامتر بیضوی، e، بر طیف رسانندگی مختلط در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل برای مقادیر بیضوی کوچکتر از یک، با افزایش مقدار این پارامترشدت مؤلفه حقیقی و موهومی کاهش یافته و فرکانس بحرانی به سمت فرکانسهای بالاتر جابجا میشود. هر چند برای مقادیر بیضوی بزرگتر از یک، با افزایش مقدار این پارامتر، شدت مؤلفههای حقیقی و موهومی افزایش یافته فرکانس بحرانی در مؤلفه موهومی به سمت فرکانسهای پائین جابجا میشود. تأثیر تغییر پارامترهای ثابت زمانی و وابسته فرکانسی بر پاسخ مدل GEMTIP بیضوی در شکل ۲-۲۳

کل-کل میباشد؛ که از تکرار توضیح آن در اینجا خودداری میشود.





شکل ۲-۲۳: تأثیر تغییرات پارامتر ثابت زمانی بر مؤلفههای حقیقی (سمت چپ) و موهومی (سمت راست) رسانندگی



# ب-۲) مقایسه GEMTIP کروی و بیضوی

برای بررسی تأثیر شکل ادخالهای قطبش پذیر، با خروج از مرکزهای دلخواه، بر رفتار طیفی مقاومت-ویژه/ رسانندگی مختلط، پاسخ دو مدل تحلیلی GEMTIP کروی و بیضوی در شکل ۲-۲۵ ارائه شده است. با توجه به این شکل، با فرض یکسان بودن همه پارامترها، زمانی که خروج از مرکز دانههای بیضوی یک در نظر گرفته شود، پاسخ هر دو مدل GEMTIP یکسان خواهد بود.



شکل ۲-۲۵: مقایسه پاسخ مدل GEMTIP برای یک ترکیب دوجزئی با ادخالهای کروی و بیضوی با خروج از مرکز ۱ (Fu, 2013).

## ب-۳) GEMTIP سەجزئى

رفتار طیفی رسانندگی و مقاومتویژه مختلط مربوط به دو مدل مصنوعی با پارامترهای ارائهشده در جدول ۲-۷ در شکل ۲-۲۶ تا شکل ۲-۲۸ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می شود، در اثر وجود دو منبع قطبش پذیر، دو پیک بر روی مؤلفه های موهومی و اختلاف فاز ایجاد شده است. همچنین انحنای منحنی طیف مؤلفه حقیقی دو بار به وضوح دچار تغییر شده است. در این اشکال اثر ادخال های در شت ر (ثابت زمانی بزرگتر و بیضوی بزرگتر) در فرکانس پائین تر و اثر ادخال های کوچکتر (ثابت زمانی کوچکتر و بیضوی کمتر) در فرکانس بالا نمود یافته است.

جدول ۲-۲: پارامترهای مربوط به مدل مصنوعی GEMTIP کروی و بیضوی سهجزئی (Fu, 2013; Lin et al., 2015).

ρ <sub>dc</sub>	$\mathbf{f}_1$	<b>m</b> <sub>1</sub>	tau <sub>1</sub>	<b>C</b> <sub>1</sub>	e <sub>1</sub>	$\mathbf{f}_2$	$m_2$	tau <sub>2</sub>	<b>C</b> <sub>2</sub>	e <sub>2</sub>
300	5%	2.9	30	0.8	1	15%	2.9	0.003	0.6	1
200	15%	-	0.01	0.9	1	10%	-	0.9	0.9	4



این مدل با در نظر گرفتن مکانیسمها و منابع قطبش متعدد، طیف SIP را به چندین ریز طیف تقسیم می نماید. برای این منظور هر دو مؤلفه دامنه و فاز مقاومت ویژه حاصل برهم نهی تعداد n طیف دبای می نماید. برای این منظور هر دو مؤلفه دامنه و فاز مقاومت ویژه حاصل برهم نهی تعداد n طیف دبای متفاوت در نظر گرفته می شوند که هر طیف دبای با ثابت زمانی  $\tau_k$  و بارپذیری  $m_k$  خاص خود مشخص می گردد. براساس این روش امپدانس مختلط با رابطه (۲-۲) بیان می شود ( Weller, 2008).

$$R(\omega) = R_0 \left( 1 - \sum_{k=1}^n m_k \left( 1 - \frac{1}{1 + j\omega\tau_k} \right) \right) \tag{(YF-Y)}$$

برای بیان مسأله به صورت سیستم معادلات خطی، امپدانس به صورت رابطه (۲-۲۵) نرمالایز شده و مؤلفه حقیقی و موهومی آن به صورت روابط (۲-۲۶) و (۲-۲۷) درخواهد آمد ( Nordsiek and): Weller, 2008):

$$R_{norm}(\omega) = \frac{R_0 - Z(\omega)}{R_0}$$
(Ya-Y)

$$R'_{norm}(\omega) = \sum_{k=1}^{n} m_k (\omega \tau_k)^2 (1 + (\omega \tau_k)^2)^{-1}$$
(19-7)

$$R_{norm}''(\omega) = \sum_{k=1}^{n} m_k . (\omega \tau_k) . (1 + (\omega \tau_k)^2)^{-1}$$
(YY-Y)

طیف هدایت الکتریکی مربوط به یکی از نمونههای برداشت شده از کانسار طلای کرویان در شکل ۲۹-۲ نشان داده شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Deby Decomposition



شکل ۲-۲۹: مدل DD مربوط به طیف رسانندگی مختلط نمونه سنگی از کانسار طلای کرویان. در قسمت پائین نمودار میلهای بارپذیری در مقابل لگاریتم ثابت زمانی هر یک از اجزای دبای نشان داده شده است.

$$\begin{pmatrix} \frac{(\omega_{1}\tau_{1})^{2}}{1+(\omega_{1}\tau_{1})^{2}} & \cdots & \frac{(\omega_{1}\tau_{n})^{2}}{1+(\omega_{1}\tau_{n})^{2}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{(\omega_{p}\tau_{1})^{2}}{1+(\omega_{p}\tau_{1})^{2}} & \cdots & \frac{(\omega_{p}\tau_{n})^{2}}{1+(\omega_{p}\tau_{n})^{2}} \\ \frac{(\omega_{1}\tau_{1})^{2}}{1+(\omega_{1}\tau_{1})^{2}} & \cdots & \frac{(\omega_{1}\tau_{n})^{2}}{1+(\omega_{1}\tau_{n})^{2}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{(\omega_{p}\tau_{1})^{2}}{1+(\omega_{p}\tau_{1})^{2}} & \cdots & \frac{(\omega_{p}\tau_{n})^{2}}{1+(\omega_{p}\tau_{n})^{2}} \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} m_{1} \\ \vdots \\ m_{n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R' norm(\omega_{1}) \\ \vdots \\ R' norm(\omega_{1}) \\ \vdots \\ R'' norm(\omega_{1}) \\ \vdots \\ R'' norm(\omega_{1}) \end{pmatrix}$$

## SIP مدلسازی وارون دادههای SIP

برای مدلسازی دادههای SIP با استفاده از مدل GEMTIP سهجزئی، از روشهای بهینهسازی ترکیبی بر مبنای الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup> (GA) و بهینهسازی ازدحام ذرات<sup>۲</sup> (PSO) که به اختصار CGAPSO نامیده شده و روش حداقل مربعات استفاده شده است.

## الف) روش بهینهسازی ترکیبی GA-PSO

برای بازیابی پارامترهای مدل واهلش GEMTIP بیضوی از دادههای SIP مصنوعی در جدول ۲-۷، از الگوریتم CGAPSO استفاده شده است. در این الگوریتم طبق آنچه که در فلوچارت شکل ۲-۳۰ نشان داده شده، در هر تکرار از الگوریتم، جامعه پارامترهای(جامعه کروموزومها) بازیابیشده با روش الگوریتم ژنتیک بهعنوان فضای جستجوی روش PSO در نظر گرفته می شوند.

## الف- ۱) الگوريتم ژنتيک (GA)

روش GA یک روش جستجوی عام است؛ که از مسئله تکامل زیستی الهام گرفته است. مراحل اصلی این روش شامل مقداردهی اولیه"، ارزیابی'، انتخاب'، آمیزش" و جهش<sup>\*</sup> میباشد ( Sen and Stoffa,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Genetic algorithm

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Particle swarm optimization

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Initialization

2013) که هر یک از آنها در ادامه تشریح شدهاند.

( $m^+$ ) مرحله مقداردهی اولیه: در این مرحله جمعیت تصادفی با اندازه N<sub>pop</sub>، در فاصله بین حد بالا ( $m^+$ ) و حد پائین ( $\bar{m}$ ) پارامترهای مدل تولید میشود. هر سطر از جمعیت تولید شده به عنوان یک جواب احتمالی برای مسأله در نظر گرفته میشود؛ که به هر یک از این جوابها یک فرد<sup>۵</sup> گفته میشود. ۲) ارزیابی: در این مرحله تابع هزینه و تابع شایستگی<sup>۶</sup> هر یک از پاسخهای تصادفی (افراد) تولیدشده در مرحله قبل، بهترتیب طبق روابط (۲-۲۹) و (۲-۳۰) محاسبه میگردند.

$$\varphi(\boldsymbol{m}) = \|(\boldsymbol{d}^{obs} - G(\boldsymbol{m}))/\boldsymbol{d}^{obs}\|/\sqrt{n-1}$$
(Y9-Y)

$$\mathcal{F}(k) = 1/\sum_{l=1}^{N_{pop}} \exp(\varphi(k) - \varphi(l)) \tag{(Y-Y)}$$

که در این روابط  $d^{obs}$  دادههای SIP مشاهدهای، n تعداد دادهها، G مـدل GemtiP و  $\varphi$  تـابع هزینـه است.

۳) مرحله انتخاب: در این مرحله با استفاده از روش چرخ رولت (روابط (۲-۳۱) و (۲-۳۳)) افراد تصادفی برای انجام آمیزش انتخاب میشوند؛ که افراد دارای کمترین تابع هزینه (بیشترین شایستگی) دارای شانس انتخاب بیشتری خواهند بود.

$$P_{k} = \frac{\mathcal{F}(k)}{\sum_{k=1}^{N_{pop}} \mathcal{F}(k)} \tag{(1-1)}$$

$$C_k = \sum_{j=1}^k P_j \tag{(T-T)}$$

<sup>1</sup> Evaluation

<sup>2</sup> Reproduction (Selection)

<sup>3</sup> crossover

<sup>4</sup> Mutation

<sup>5</sup> Individual

<sup>6</sup> Fitness function
که در این روابط  $P_k$  احتمال انتخاب فرد kام و  $C_k$ ، جمع تجمعی احتمال هر یک از افراد میباشد. برای انتخاب فرد kام که باید در فرآیند آمیزش شرکت داده شود، اندیس اولین عدد تصادفی بین صفر و ۱ که مقدار آن کمتر از یا مساوی با  $C_k$  باشد، را برابر k در نظر گرفته و سپس فرد kام انتخاب می-شود.

۴) مرحله آمیزش و جهش ژنی: هر دوی این مراحل با اعمال تغییرات در جامعه اولیه، جامعه جدید تولید می کنند. در فرآیند آمیزش با تبادل یکسری اطلاعات بین افراد جفتشده، جفتهای جدید تولید می گردد. در فرآیند جهش یکی از پارامترهای مدل به صورت تصادفی انتخاب شده و با احتمال از پیش تعیینشده در آن تغییر ایجاد می شود. در این تحقیق احتمال آمیزش و جهش بهترتیب برابر ۷,۰ و ۲,۰ در نظر گرفته شدهاند. پارامتر مدل جهش یافته با استفاده از رابطه (۲-۳۳) بهروزرسانی می گردد:

$$\boldsymbol{m}^{mut} = \boldsymbol{m}^{old} + sl.\,N(0,1) \tag{(TT-T)}$$

که در آن N توزیع نرمال استاندارد و sl طول گام است؛ که با استفاده از رابطه (۳۴-۲) محاسبه می-شود.

$$sl = \eta(\boldsymbol{m}_{max} - \boldsymbol{m}_{min}) \tag{14-1}$$

که در آن *π* مقدار ثابتی است که در این مطالعه مقدار آن ۰٫۱ در نظر گرفته شده است. روش GA قابلیت بسیار بالائی در مدلسازی مدلهای غیرخطی پیچیده دارد اما یکی از کاستیهای این روش، زمانبربودن آن تا همگرائی به جواب بهینه است. برای رفع این مشکل میتوان آن را با روشهای سریعتر تلفیق نمود. روش PSO در عین این که در اکثر مسائل بهینهسازی از دقت قابل مقایسه با روش GA برخوردار است، سرعت همگرائی آن به جواب بهینه به مراتب بیشتر از روش GA میباشد. یکی از دلایل این امر، امکان یافتن پاسخ مسئله در فضای جستجوی کوچکتر نسبت به روش GA میباشد (Hassan et al., 2005; Engelbrecht, 2007). لذا برای اینکه بتوان از مزایای هر دو

روش استفاده نمود، روش GA با PSO تلفیق شد.

الف- ۱) الگوريتم بهينهسازي تجمع ذرات (PSO)

$$\boldsymbol{v}^{c} = k[\boldsymbol{v}^{c-1} + w_1.rand(N_m)(\boldsymbol{m}^{l} - \boldsymbol{m}^{c}) + w_2.rand(N_m)(\boldsymbol{m}_g - \boldsymbol{m}^{c})]$$
(Ya-Y)

سپس پارامترهای مدل با استفاده از رابطه (۲-۳۶) بروز رسانی میشود.

$$\boldsymbol{m}^{c+1} = \boldsymbol{m}^c + \boldsymbol{v}^c \tag{(79-7)}$$

 $m_g$  که در آن  $m^c$  پارامتر مدل در مرحله تکرار کنونی،  $v^c$  سرعت کنونی،  $m^l$  بهترین پارامتر مدل،  $m_g$  بهترین پارامتر مدل یافته شده با الگوریتم قبل از مرحله تکرار کنونی و  $w_1$  و  $w_2$  ضرایب انقباضی بهترین پارامتر مدل یافته شده با الگوریتم قبل از مرحله (۳۷-۲) محاسبه می شود. هستند. K فاکتور انقباضی است؛ که با استفاده از رابطه (۲-۳۷) محاسبه می شود.

$$K = \frac{2}{\left|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}\right|} \tag{(YY-Y)}$$

Engelbrecht, ) که در آن  $\phi > 4$  (ا تضمین می کند ( $\phi > 4$  ) که در آن  $\phi = w_1 + w_2, \phi > 4$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Particles

برابر ۴,۱ مقدار  $\varphi$  برابر ۱۵۹۵ (2007). بنابراین در شرایط استفاده از ضریب انقباضی، مقدار  $\varphi$  برابر ۴,۱ در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب مقادیر  $w_1$  و  $w_2$  برابر ۲٫۰۵ خواهد بود و با توجه به رابطه (۲-۳۷)، مقدار k نیز ۹٫۷۲۹ نیز ۰٫۷۲۹ نیز معادیر الگوریتم، باید حدود بالا و پائین سرعت نیز تعیین شود؛ که برای این منظور به صورت زیر عمل شده است:

$$\boldsymbol{v}^{+} = 0.1 * (\boldsymbol{m}^{+} - \boldsymbol{m}^{-})$$
 $\boldsymbol{v}^{-} = -\boldsymbol{v}^{+}$ 
(٣٨-٢)

که در آن  $v^-$  و  $v^+$  حدود بالا و پائین سرعت میباشند.

نتایج مدلسازی دادههای SIP مصنوعی (جدول ۲-۲) با استفاده از الگوریتم CGAPSO در شکل ۲-۲۱ و جدول ۲-۸ برای دادههای بدون نوفه و نوفهدار (۳٪) ارائه شدهاند. در هر دو حالت، مدل بازیابی شده برازش خوبی به دادهها دارد و پارامترهای مدل، به جز ثابت زمانی بازیابی شده از دادههای نوفهدار، با دقت خوبی بازیابی شدهاند. علت عدم بازیابی پارامتر ثابت زمانی می تواند به دو دلیل باشد: ۱) نوفه موجود در دادهها مانع همگرایی به پاسخ مدل با دقت بالا شده است و ۲) تأثیر متقابل پارامترهای ثابت زمانی و بیضوی باعث شده است؛ که آنها نوعی همبستگی داشته باشند و بازیابی مطلوب هر دوی آنها به صورت همزمان صورت نگرفته است.



شكل ۲-۳۰: فلوچارت الگوريتم تركيبى CGAPSO



شکل ۲-۳۱: مؤلفههای حقیقی (اشکال a و d)، موهومی (اشکال b و e) و اختلاف فاز (اشکال c و f) حاصل از مدل-سازی دادههای SIP مصنوعی با استفاده از الگوریتم ترکیبی CGAPSO در دو حالت دادههای بدون نوفه (ستون سمت چپ) و دادههای دارای ۳٪ نوفه (ستون سمت راست) (Sharifi et al., 2019).

.(et al., 2019					
GEMTIP parameters	Noise free data	Noisy data (3% noise)			
$\rho_0$	200.00	199.96			
$f_{I}$	14.98%	12.07%			
$ au_1$	0.00997	1.1410			
<i>e</i> <sub>1</sub>	1.12	1.5711			
$c_1$	0.900	0.7854			
$f_2$	10.00%	12.43%			
$ au_2$	0.8999	0.0053			
<i>e</i> <sub>2</sub>	4.00	4.4818			
$c_2$	0.8999	0.9835			

جدول ۲-۸: پارامترهای بازیابی شده مدل مصنوعی GEMTIP بیضوی سهجزئی با استفاده الگوریتم CGAPSO ( Sharifi

### SIP تلفيق روش الكترومغناطيس هوابرد با روش

برای تلفیق روش الکترومغناطیس با روش SIP، مقاومتویژه/رسانندگی مختلط با استفاده از مدل واهلش مناسب در معادله الکترومغناطیس (رابطه (۲-۶)) وارد شده و پارامتر گذردهی ویژه ارائه شده توسط سیمون و همکارانش (Siemon et al., 2009a) به صورت زیر اصلاح می گردد:

$$\alpha_n^2 = \left(\frac{j\omega\mu_n}{\rho_n(\omega)} + \lambda^2 - \omega^2 \varepsilon_n \mu_n\right), \tag{79-7}$$

$$c_n(\omega) + \lambda^2 - \omega^2 \varepsilon_n \mu_n, \qquad (79-7)$$

$$c_n(\omega) + \lambda^2 - \omega^2 \varepsilon_n \mu_n, \qquad (79-7)$$

$$c_n(\omega) + \lambda^2 - \omega^2 \varepsilon_n \mu_n, \qquad (79-7)$$

$$c_n(\omega) + \lambda^2 - \omega^2 \varepsilon_n \mu_n, \qquad (79-7)$$

که توسط سیمون یک مقدار حقیقی و ثابت در نظر گرفته شده بود، یک مقدار مخـتلط و وابسـته بـه فرکانس در نظر گرفته شده است.

در بیشتر تحقیقات منتشرشده پیشین برای اعمال اثر مقاومت ویژه طیفی در معادله الکترومغناطیس حوزه فرکانس از مدل کل-کل استفاده کردهاند (Emond et al., 2006; Goold et al., 2008). در این تحقیق، طیف مقاومت ویژه دادههای SIP آزمایشگاهی مربوط به نمونههای برداشت شده از کانسار طلای کرویان با استفاده از مدلهای کل-کل، GEMTIP کروی و تجزیه دبای، مدل سازی شد؛ که در نهایت با توجه به شواهد کانی شناسی مدل های GEMTIP و تجزیه دبای نتایج قابل اطمینانی تولید نشد و تنها مدل کل-کل (رابطه (۲-۱۶)) برای این کار مناسب تشخیص داده شد. ۲-۴-۲- تأثیر پارامترهای مدل بر دادههای الکترومغناطیسی

با توجه به روابط (۲-۵) تا (۲-۷) مهمترین پارامترهای مدل عبارتند از تراوایی مغناطیسی، ضریب گذردهی الکتریکی، مقاومتویژه/ هدایت الکتریکی، ارتفاع پرواز و ضخامت لایههای زمین شناسی. در ادامه به بررسی تأثیر این پارامترها بر دادههای الکترومغناطیسی برداشت شده بر روی یک نیم فضای همگن پرداخته شده است. برای بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای مدل بر دادههای مربوطه از اطلاعات جدول ۲-۹ و جدول ۲-۱۰ استفاده شده است.

جدول ۲-۹: پارامترهای مربوط به مدل همگن مورد استفاده برای بررسی نقش پارامترهای مدل بر روی دادههای الکترومغناطیسی هوابرد حوزه فرکانس.

قطبشالقايي	مقاومتویژه ( $\Omega { m m}$ )	ضریب گذردهی (F/m)	تراوائی مغناطیسی (H/m)	مدل
NA	47	$\mathcal{E}_0$	(1-1, $\delta$ ) $\mu_0$	مدل ۱
NA	47	(1- $\Delta$ ·) $\mathcal{E}_0$	$\mu_0$	مدل ۲
NA	) • • - ) • • • •	$\mathcal{E}_{o}$	$\mu_0$	مدل ۳

جدول ۲-۱۰: پارامترهای قطبش القایی مدل همگن مورد استفاده برای بررسی نقش پارامترهای مدل بر روی دادههای الکترومغناطیسی هواد د جوزه فرکانس.

المسرومات سياسي موارد سرا مسل						
گذردهی	تراوائی	وابسته	ثابت زمانی (۲)	بارپذیری	مقاومتويژه	مدل
الكتريكي (F/m)	مغناطيسي	فر کانسی	(5)		( <u>12m</u> )	
	( <b>H</b> /m)					
$\mathcal{E}_0$	$\mu_0$	۰,۴	١	۰,۱–۰,۹	47	مدل ۴
$\mathcal{E}_0$	$\mu_0$	۰,۱–۰,۹	١	۴, ۰	47	مدل ۵
$\mathcal{E}_0$	$\mu_0$	۰,۴	•,• \-\ • • •	۰,۴	47	مدل ۶

### الف) تأثیر پارامترهای مرتبط با اثر القای الکترومغناطیسی

اثر القای الکترومغناطیسی بر دادههای HEM، با استفاده از پارامترهای مدل مصنوعی نیمفضای همگن با مشخصات درجشده در جدول ۲-۹ شبیهسازی شده و نتایج آن در شکل ۲-۳۳ و شکل ۲-۳۳ نشان داده شده است. در شکل ۲-۳۳ (سمت چپ) اختلاف مؤلفههای حقیقی ((ΔZ) Re (ΔZ)) و موهومی ( ΔZ)) نسبت به حالتی که تراوایی مغناطیسی مدل با مقدار آن در هوا برابر باشد (ΔZ)، در مقابل تغییرات تراوایی مغناطیسی به تصویر در آمده است (مدل ۱). با توجه به شکل ۲-۳۳ با افزایش تراوائی مغناطیسی، اختلاف مؤلفه حقیقی و اختلاف مؤلفه موهومی افزایش و اختلاف فاز کاهش مییابد. همچنین در شکل ۲-۳۲ (سمت راست) اختلاف مؤلفه حقیقی و اختلاف مؤلفه موهومی نسبت به حالتی که ضریب گذردهی الکتریکی مدل با مقدار آن در هوا برابر باشد، در مقابل تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی نشان داده شده است؛ که با توجه به آن، با افزایش ضریب گذردهی الکتریکی، قدر مطلق اختلاف مؤلفه حقیقی و موهومی افزایش و اختلاف فاز کاهش مییابد. تأثیر پارامترهای مقاومتویژه (مدل ۳) نیز در شکل ۲-۳۳ (سمت چپ) به نمایش در آمده؛ که با توجه به آن، با افزایش مقاومتویژه، مؤلفه حقیقی و موهومی کاهش و اختلاف فاز افزایش مییابد.

الف) تأثیر پارامترهای مرتبط با IP

اثر IP در دادههای HEM، با استفاده از دادههای جدول ۲-۱۰ شبیهسازی شده است. نتایج شبیه-سازی در شکل ۲-۳۳ (سمت راست) تا شکل ۲-۳۵ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۲-۳۳ نشان داده شده است، وجود اثر IP منجر به تولید مقادیر منفی در فرکانسهای پائین در مؤلفه حقیقی می گردد. همچنین با توجه به این شکل، با افزایش فرکانس، افزایش مقدار بارپذیری موجب افزایش شدت مؤلفه حقیقی می شود. نقطه تلاقی منحنیها بر روی

نمودارهای مؤلفه موهومی و اختلاف فاز به مقدار پارامتر ثابت زمانی بستگی دارد به گونهای که با کاهش مقدار این پارامتر، محل این نقطه به سمت فرکانسهای بالاتر جابجا می شود. با توجه به شکل ۲-۳۳ رفتار مؤلفه موهومی و اختلاف فاز در فرکانسهای کمتر از فرکانس تلاقی منحنیها مشابه مولفه حقیقی است؛ اما در فرکانسهای بالاتر از آن، رفتار معکوسی را بروز می دهد؛ یعنی با افزایش بارپذیری شدت مؤلفه موهومی و اختلاف فاز کاهش می یابد.





شکل ۲-۳۴ رفتار مؤلفههای حقیقی، موهومی و اختلاف فاز دادههای الکترومغناطیس هوابرد را در اثر تغییر پارامتر ثابت زمانی نشان میدهد. با توجه به این شکلها افزایش پارامتر مذکور در فرکانسهای پائین موجب افزایش مؤلفه حقیقی و کاهش اختلاف فاز می شود؛ اما مؤلفه موهومی ثابت می ماند. در



این شکل (سمت راست) اثر ارتفاع پرواز نیز به نمایش در آمده است. با توجه به این شکل با افزایش

ارتفاع مقدار هر یک از مؤلفههای فوق کاهش می یابد.

شکل ۲-۳۳: تغییرات مؤلفههای حقیقی، موهومی و اختلاف فاز دادههای HEM در مقابل تغییر مقاومتویژه (سمت چپ) و مولفههای حقیقی ، موهومی و اختلاف فاز ایجاد شده در دادههای HEM در اثر تغییر بارپذیری (سمت راست) در ارتفاع پرواز ۳۰ متر.



شکل ۲-۳۴: مؤلفههای حقیقی، موهومی و اختلاف فاز ایجاد شده در دادههای الکترومغناطیسی هوابرد در اثر تغییر پارامتر ثابت زمانی در ارتفاع ۳۰ متری (سمت چپ) و در ارتفاعهای مختلف و فرکانس پائین (سمت راست).

اثر تغییر پارامتر وابسته فرکانسی بر روی رفتار مؤلفههای حقیقی، موهومی و اختلاف فاز دادههای الکترومغناطیس هوابرد در شکل ۲-۳۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکلها، افزایش این پارامتر موجب افزایش مؤلفه حقیقی و کاهش شدت اختلاف فاز در فرکانسهای بالا می شود؛ اما مؤلفه



موهومی ثابت میماند. همچنین با افزایش ارتفاع پرواز، شدت هر سه مؤلفه کاهش مییابد.

شکل ۲-۳۵: مؤلفههای حقیقی، موهومی و اختلاف فاز ایجاد شده در دادههای الکترومغناطیسی هوابرد در اثر تغییر پارامتر وابسته فرکانسی در ارتفاع ۳۰ متری (سمت چپ) و در ارتفاعهای مختلف و فرکانس بالا (سمت راست).

۲-۵- مدلسازی وارون دادههای الکترومغناطیس هوابرد

با توجه به وابستگی غیرخطی میدان مغناطیسی ثانویه به پارامترهای مدل (روابط (۲-۵)، (۲-۶)، (۲-۲) و (۲-۳۹))، برای بازیابی پارامترهای مدل، باید الگوریتمهای غیرخطی وارونسازی را بکار برد. علاوه بر این، ممکن است تابع هزینه (تابع عدم برازش) بسیار پیچیده بوده و شامل چندین کمینه محلی و یک کمینه مطلق ایشد. بنابراین، با این پیش فرض، در عمل استفاده از یک الگوریتم بهینه-سازی عام برای پیدا کردن نقطه بهینه مطلق توجیهپذیر خواهد بود. برای این منظور دو روش الگوریتم رقابت استعماری و شبیه سازی تبرید خطی پیاده سازی شده؛ که با توجه به بالا بودن سرعت الگوریتم شبیهسازی تبرید خیلی سریع، برای مدلسازی دادههای واقعی HEM از این الگوریتم استفاده شده است. همچنین از طرف دیگر یکی از کاستیهای اصلی روشهای بهینهسازی عام، سرعت يائين همگرائي آنها به جواب بهينه است (Sen and Stoffa, 2013; Lin et al., 2015). بنابراین برای سرعت بخشیدن به فرآیند مدلسازی، استفاده از یک روش مناسب بهینهسازی محلی امری ضروری است. لذا بهمنظور بهرهمندی از مزایای هر دو روش، روش ترکیبی شامل الگوریتم شبیهسازی تبرید خیلی سریع و مارکوارت- لونبرگ برای انجام مدلسازی وارون مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که مقادیر بازیابی شده برای پارامترهای مدل به وسیله الگوریتم VFSA نزدیک به نقطه كمينه مطلق است (Sen and Stoffa, 2013)؛ مي توان از آنها به عنوان مدل اوليه در مدل سازي وارون بهوسيله الگوريتم ماركوارت- لونبرگ استفاده كرده و حركت به سمت نقطه مينيمم مطلق را سرعت بخشيد.

## ۲-۵-۲-الگوریتم شبیهسازی تبرید خیلی سریع

استفاده از این روش در مدلسازی دادههای ژئوفیزیک، براساس معادلسازی<sup>۵</sup> فرآیند فیزیکی تبرید

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Misfit functional

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Local minimum

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Global minimum

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Imperialist Competitive Algorithm

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Equivalency

(خنکنمودن)<sup>۱</sup> و فرآیند کمینهسازی خطای برازش استوار است. بدین ترتیب که در فرآیند بهینه-سازی به شبیهسازی سیر تکاملی یک سیستم فیزیکی در حین خنکشدن و قرار گرفتن در یک موقعیت با کمترین سطح انرژی، پرداخته میشود (Sen and Stoffa, 2013). روش شبیهسازی تبرید در وارونسازی دادههای سونداژ مقاومتویژه (Sen et al., 1993; Börner, 2001). و مدلسازی داده-های مگنتوتلوریک (Dosso and Oldenburg, 1991) با موفقیت استفاده شده است. در این رساله از روش الگوریتم شبیهسازی تبرید خیلی سریع (Ingber, 1989) برای رسیدن نزدیکشدن به نقطه بهینه عام استفاده شده است.

m برای اجرای روش VFSA، نقطه تصادفی  $m_0$  با انرژی  $(m_0)$  انتخاب می شود. انرژی بردار (پارامترهای مدل) از طریق معادل سازی با تابع هدف  $\phi$  برای یک مدل لایه ای با تعداد n لایه به صورت (پارامترهای مدل) از طریق معادل سازی با تابع (پارامترهای در ۲۰) خواهد بود (Börner, 2001):

$$\varphi(\boldsymbol{m}) = \|(\boldsymbol{d} - f(\boldsymbol{m}))/\boldsymbol{d}\|/\sqrt{n-1}$$
(f.-T)

$$m^{C+1} = m^{C} + \Delta m$$
 (۴۱-۲)  
که در آن  $m^{C}$  پارامترهای کنونی مـدل و  $\Delta m$  آشـفتگی<sup>۲</sup> مـدل در مرحلـه کنـونی اسـت و از رابطـه  
(۴۲-۲) بدست میآید:

$$\Delta \boldsymbol{m} = y_i (\boldsymbol{m}^+ - \boldsymbol{m}^-) \tag{(fT-T)}$$

و

$$m^+ < m < m^- \tag{$77-7}$$

انتخاب شده از توزیع یکنواخت  $u_i$  می باشد؛ که با استفاده از عدد تصادفی  $u_i$  انتخاب شده از توزیع یکنواخت  $y_i$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Annealing

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Perturbation

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Cauchy distribution

توليد مى شود  $(u_j \in U[0,1])$ .

$$y_j = sign(u_j - \frac{1}{2})T_j \left[ \left( 1 + T_j \right)^{|2u_j - 1|} - 1 \right]$$
 (44-7)

نقطه كمينه مطلق را مي توان به صورت زير پيدا كرد (Ingber, 1989; Sen et al., 1993):

$$T_j(k) = T_{0j} \exp(-C_j k^{0.5})$$
 (۴۵-۲)  
در این رابطه  $T_{0j}$ ، دمای اولیه پارامتر j و  $C_j$  ضریب زوال (کاهش)<sup>۲</sup> دما است.

در هر مرحله از تکرار وارونسازی، انتقال از موقعیت کنونی به یک موقعیت جدید (بروز رسانی پارامترهای مدل) با یک مقدار احتمال مشخص، پذیرفته می شود. معیار پذیرش پارامترهای جدید محاسبه شده، تابع تغییر تابع هزینه (
$$\phi(\mathbf{m}^{C+1}) - \phi(\mathbf{m}^{C+1})$$
) است. اگر  $0 > \Phi A$  احتمال پذیرش پارامترهای بارامترهای جدید ایر محاسبه شده، تابع تغییر تابع هزینه ( $\phi(\mathbf{m}^{C+1}) - \phi(\mathbf{m}^{C+1})$ ) است. اگر  $0 > \phi A$  احتمال پذیرش پارامترهای جدید محاسبه شده، تابع تغییر تابع هزینه ( $\phi(\mathbf{m}^{C+1}) - \phi(\mathbf{m}^{C+1})$ ) است. اگر  $0 > \phi A$  احتمال پذیرش بارامترهای جدید محاسبه شده از بابع هزینه ( $\phi(\mathbf{m}^{C+1}) - \phi(\mathbf{m}^{C+1})$ ) مورد پذیرش قرار خواهد گرفت ( Börner 2001; Sen 3):

$$P(\varphi, T) = \exp(-\Delta \varphi/T) \ge rand(0, 1) \tag{49-1}$$

ICA) الگوريتم رقابت استعماری (ICA)

این الگوریتم یکی از روشهای بهینهسازی عام است؛ که از تکامل سیاسی- اجتماعی جوامع انسانی الهام گرفته شده است (Atashpaz-Gargari and Lucas, 2007). برای اجرای این الگوریتم، تعدادی کشور اولیه (گزینههای اولیه برای پارامترهای مدل) به صورت تصادفی تولید می شود؛ که هر عنصر جمعیت، یک کشور نامیده می شود. کشورها به دو دسته مستعمره و استعمار گر تقسیم می شوند.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Uniform distribution

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Decay coefficient

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Boltzmann distribution

سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل میدهند؛ به گونهای که هر استعمار گر، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سمت خود جذب نموده و آنها را کنترل می کند (Atashpaz-Gargari, and Lucas, 2007). مراحل اجرای الگوریتم رقابت استعماری به شرح زیر است:

الف) مقداردهي اوليه':

این مرحله شامل ایجاد کشورهای اولیه به تعداد دلخواه، انتخاب تعدادی از بهترین کشورها به عنوان استعمارگر و تخصیص مستعمره به امپریالیستها به عنوان مستعمره است. برای این منظور تعداد مشخصی کشور اولیه ( $N_{country}$ ) به صورت تصادفی در بازه  $m_{min} < m < m_{max}$  تولید می گردند؛ که هر مشخصی کشور اولیه ( $N_{country}$ ) به صورت تصادفی در بازه یم  $m_{min} < m < m_{max}$  تولید می گردند؛ که هر مشخصی کشور با لیه ( $N_{country}$ ) به صورت تصادفی در بازه به منابع مدف برای هر کشور با استفاده از کشور به صورت بردار [ $m_{1}, m_{2}, ..., m_{p}$ ] تعریف و مقدار تابع هدف برای هر کشور با استفاده از رابطه (۲-۴) محاسبه می شود. سپس تعدادی از کشورها ( $N_{imp}$ )، با کمترین مقدار تابع هدف، به-

برای تقسیم مستعمرات اولیه بین امپریالستها، هر امپریالیست متناسب با قدرت آن، تعدادی از کشورهای باقیمانده را جذب می کند. برای انجام این کار، با داشتن مقدار تابع هدف هر امپریالیست با استفاده از قاعده بولتزمن (رابطه (۲-۴۷)) احتمال جذب مستعمره بوسیله امپریالسیت *ن*ام محاسبه می گردد:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Initialization

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Roulette wheel

 $\varphi_{new}(imp) = \varphi(imp) + \eta.mean(\varphi(col))$ (\*\lambda-\gamma)

در این رابطه  $\eta$  عدد کوچکی است؛ که مقدار آن ۰٫۱ در نظر گرفته شده است.

ب) همگونسازی':

در این مرحله، موقعیت مستعمرات را به سمت امپریالیست حرکت داده و سعی میشود پارامترهای مدل در مستعمره به مقادیر متناظر آنها در امپریالیست نزدیک شوند (شکل ۲-۳۶). میزان حرکت معدل در مستعمره به سمت امپریالیست (x) با انحراف زاویهای  $\theta$  از محور واصل امپریالیست و مستعمره به صورت تصادفی از طریق رابطه (۲-۴۹) محاسبه میگردد. در این شکل، فاصله میان استعمار گر و مستعمره با b نشان داده شده است. x نیز عددی تصادفی با توزیع یکنواخت میباشد ((۲-۴۹))؛ که میزان حرکت میزان حرکت میزان حرکت و مستعمره با b نشان داده شده است. x نیز عددی تصادفی با توزیع یکنواخت میباشد ((۲-۴۹))؛ که میزان حرکت میتمره با b نشان داده شده است. x نیز عددی تصادفی با توزیع یکنواخت میباشد ((۲-۴۹)))؛ که میزان حرکت مستعمره رابطه (۲-۴۹)) را نشان میدهد:

$$x \sim U(0, \psi. d)$$
 (۴۹-۲)  
که در آن 2 >  $\psi$  > *I* است.  
 $\theta$  به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انتخاب میشود (رابطه (۲-۵۰)):  
 $\theta \sim U(-b,b)$  (۵۰-۲)  
در این رابطه، d پـارامتری دلخـواه است؛ کـه افـزایش آن باعـث افـزایش شـعاع جسـتجوی اطـراف  
امپریالیست شده و کاهش آن نیز باعث میشود؛ تا رفتار مستعمرات (پارامترهای مدل) نزدیک به بردار  
واصل مستعمره به استعمارگر، حرکت کنند. با در نظر گرفتن واحد رادیان برای  $\theta$ ، عددی نزدیـک بـه  
(Atashpaz-Gargari, and Lucas, 2007).

<sup>1</sup> Assimilation



شکل ۲-۳۶: تغییر موقعیت یک مستعمره به سمت امپریالیست مربوطه (Goudarzi et al., 2016).

ج) انقلاب (جهش)':

در این مرحله مستعمرات در موقعیت جدید قرار می گیرند و پارامترهای مدل با استفاده از رابطه (۵۱-۲) بروزرسانی می شوند

$$m{m}_{new} = m{m}_{old} + sl.N(0,1)$$
 (۵۱-۲۰)  
که در آن *N* توزیع نرمال استاندارد بوده و *ls* طول گام بوده که از رابطه (۲-۵۲) بدست می آید:  
 $sl = \eta(m{m}_{max} - m{m}_{min})$  (۵۲-۲)  
در این رابطه  $\eta$  مقدار ثابتی است؛ که در این مقاله ۲٫۱ در نظر گرفته شده است.  
د) رقابت مستعمره با امپریالیست:  
در این مرحله مقدار تابع هدف مستعمره انقلابیافته (جهشیافته) با مقدار تابع هدف مربوطه مقایسه  
می شود و در صورتی که مقدار تابع هدف مستعمره کوچکتر باشد ( $0 > \varphi L$ )؛ جای آنها بـا هـم عـوض  
می شود.  
 $\Delta \phi = \phi(col) - \phi(imp)$  (۵۳-۲)

سپس با فراخوانی رابطه (۲-۴۸) مقدار تابع هدف امپریالیستها محاسبه می شود. و) در این مرحله براساس مقدار تابع هدف محاسبه شده در مرحله قبل، یک مستعمره از ضعیف ترین

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Revolution

امپریالیست (دارای بیشترین مقدار تابع هدف در بین سایر امپریالیستها) حذف شده و بهصورت تصادفی با استفاده از روش چرخ رولت به امپریالیست دیگری اختصاص داده میشود. امپریالیستی که تابع هزینه کمتری داشته باشد؛ شانس برنده شدن بیشتری خواهد داشت. در صورتی که یک امپریالیست پس از تکرارهای متعدد هیچ مستعمرهای برای آن باقی نماند، خود آن بهعنوان یک مستعمره به امپریالیست دیگری تعلق خواهد گرفت. ی) در این مرحله کمترین مقدار تابع هدف از بین تمام امپریالیستها را انتخاب کرده و در صورتی که شرایط خاتمه الگوریتم محقق شده باشد، پارامترهای بازیابیشده برای مدل را چاپ میکنیم.

۲-۵-۲ الگوریتم مارکوارت - لونبرگ

معمولاً تعداد پارامترهای مدل (p) از تعداد دادههای اندازه گیریشده (b) در روش الکترومغناطیس هلیکوپتری بیشتر است. بنابراین وارونسازی این دادهها یک مسأله فرومعین ٔ است و نیازمند استفاده از یک الگوریتم تکراری مقاوم ٔ با قابلیت اعمال پارامتر منظمسازی <sup>۳</sup> میباشد. الگوریتم مارکوارت وانبرگ یکی از الگوریتمهایی است که این شرایط را فراهم میکند و استفاده از پارامتر منظمسازی، مشکل مقادیر تکین در روش های غیرخطی کمترین مربعات را برطرف میسازد (2013). در این روش، با استفاده از روش های غیرخطی کمترین مربعات را برطرف می از (2013). در برازش دادههای مشکل مقاده از روش منظمسازی تیخونف<sup>۴</sup> (Everett, 2013; Zhdanov, 2015) تابع عدم برازش دادههای مشاهده از روش منظمسازی می گردد ((۲۰–۵۴)).

 $min \| d^{obs} - G(m) \|_2$  subject to  $\| W_m m \|_2$  (۵۴-۲) در روش کمترین مربعات نظمیافته، پس از انجام محاسبات ریاضی (مراجعه شود به 2013) تابع هزینه بهصورت رابطه (۲–۵۵) بدست خواهد آمد:

$$\varphi(\boldsymbol{m}) = \frac{1}{2} \|\boldsymbol{d}^{obs} - G(\boldsymbol{m})\|^2 + \frac{\mathcal{R}}{2} \|W_m \boldsymbol{m}\|^2$$
 (۵۵-۲)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Underdetermined

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Robust iterative algorithm

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Regularization

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Tikhonov regularization scheme

که در آن  $\mathcal{R}$  پارامتر منظم سازی و  $W_m$  ماتریس وزندهی پارامترهای مدل است. نقش این ماتریس اعمال هموارسازی بر منحنی برازشیافته به دادههای مشاهدهای است. این ماتریس میتواند با تقریب مشتقات اول (۲-۵۶) و دوم (۲-۵۷) با استفاده از روش تفاضل محدود محاسبه شود ( Menke, 2012; مشتقات اول (۲-۹۵). در روش مارکوارت- لونبرگ از ماتریس همانی برای وزندهی به پارامترهای مدل استفاده می شود (M = I).

$$D^{(1)} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$
( $\Delta \mathcal{F}$ -Y)

$$D^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$
( $\Delta Y - Y$ )

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
 ( $\Delta A-Y$ )

معادله نرمال مربوط به تابع هدف براساس ماتریس ژاکوبین به صورت زیر بدست می آید ( , Everett, ) معادله نرمال مربوط به تابع هدف براساس ماتریس ژاکوبین به صورت زیر بدست می آید ( , 2013; Aster et al., 2013):

$$(J^{T}J + \mathcal{R}W_{m})\delta \boldsymbol{m} = J^{T}.\Delta \boldsymbol{d}$$

$$(\Delta 9-\Upsilon)$$

در این رابطه J ماتریس ژاکوبین،  $\delta m$  جهت جستجو و  $\Delta d$  اختلاف بین دادههای مشاهدهای و پاسخ مدل پیشرو براساس پارامترهای محاسبه شده است. پارامترهای مـدل بـا اسـتفاده از رابطـه (۲-۶۰) بروزرسانی می گردد:

 $(\mathcal{P} \cdot - \mathcal{T})$ 

در عمل، این الگوریتم از یک مدل اولیه شروع شده و پس از تکرارهای متوالی، زمانی که یک شرط از پیش تعیینشده (مانند تعداد تکرار مشخص یا میزان خطای عدم برازش معین) تأمین گردد، متوقف میشود. بروزرسانی پارامترهای مدل پس از هر تکرار نیازمند استفاده از یک روش قابل اعتماد برای تعیین جهت جستجو و طول گام حرکت به سوی مرحله بعدی است. برای این منظور از روش جستجوی خطی براساس شرایط آرمیجو<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این روش نخست جهت جستجو تعیین شده و با ثابت گرفتن آن سعی در تعیین طول گام میشود. این روش بر کاهش تابع هدف (رابطه (۲–۵۵)) در هر تکرار نسبت به مرحله قبلی استوار است و بدین ترتیب همگرائی الگوریتم به نقطه بهینه را تأمین مینماید. بر این اساس طول گام باید شرایط رابطه (۲–۶۹) را تأمین نماید (Nocedal, 2006):

$$\varphi(\boldsymbol{m}_{k+1}) \le \varphi(\boldsymbol{m}_k) + c_1 \cdot sl \cdot J(\boldsymbol{m}_k)^T \cdot \delta \boldsymbol{m}$$
(81-7)

که در آن 1 < c \_ 0 < 0 .

۲-۵-۳-۱ محاسبه ماتریس ژاکوبین

الگوریتم مارکوارت- لونبرگ بر اساس خطیسازی تابع هدف غیرخطی استوار است. به همین دلیل دقت و پایداری این الگوریتم به شدت وابسته به ماتریس ژاکوبین است. برای محاسبه ماتریس ژاکوبین دو روش مرسوم است:

الف) استفاده از تقريب تفاصل محدود (An et al., 2011)

برای محاسبه ژاکوبین با استفاده از تقریب تفاضل محدود سه روش پیشرو<sup>7</sup> (رابطه (۲-۶۲))، پسرو<sup>7</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Armijo

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Forward finite difference

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Backward finite difference

(رابطه (۲-۶۳)) و مرکزی (رابطه (۲-۶۴)) قابل استفاده است.

$$\frac{F(x+sl.\,\delta m) - F(x)}{sl} = \mathcal{O}(sl) \tag{FT-T}$$

$$\frac{F(x) - F(x - sl.\,\delta m)}{sl} = \mathcal{O}(sl) \tag{97-7}$$

$$rac{F(x+sl.\,\delta m{m})-F(x-sl.\,\delta m{m})}{2sl}=\,\mathcal{O}(sl^2)$$
در این روابط  $x$  پارامتر مدل،  $sl$  طول گام و  $\delta m{m}$  جهت جستجو میباشند.

### ب) محاسبه مشتق رابطه تحليلي

استفاده از روش تفاضل محدود ممکن است در طول فرآیند مدلسازی وارون با بی ثباتی همراه شود (Huang and Fraser, 2003)؛ لذا در صورت دسترسی به روش حل تحلیلی، مطمئن ترین روش برای محاسبه ماتریس ژاکوبین استفاده از مشتقات رابطه تحلیلی خواهد بود. با توجه به دسترسی به حل تحلیلی روابط مورد استفاده در مدل سازی یک بعدی داده های الکترومغناطیسی، در این رساله با استفاده از قاعده مشتق زنجیره ای، مشتقات جزئی رابطه پیشرو نسبت به پارامترهای مدل محاسبه شده است.

همچنین بهمنظور تقلیل اثر مقیاس و نیز پرهیز از تولید مقادیر منفی برای پارامترهای مدل در طول فرآیند وارونسازی، با استفاده از تبدیل لگاریتمی پارامترهای مدل تبدیل یافتهاند. عناصر ماتریس ژاکوبین با رابطه (۲-۶۵) محاسبه میشوند:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Central finite difference

$$J = \frac{\partial \mathbf{Z}}{\partial \widetilde{\mathbf{m}}} \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_1}{\partial \widetilde{m}_1} & \cdots & \frac{\partial Z_1}{\partial \widetilde{m}_p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Z_d}{\partial \widetilde{m}_1} & \cdots & \frac{\partial Z_d}{\partial \widetilde{m}_p} \end{bmatrix}$$
(90-7)

که در آن

$$\widetilde{\boldsymbol{m}} = \ln \left[ \rho_j, \mu_j, \varepsilon_j, m, \tau, c, t_1, t_2, h \right]^T, j = 1, 2, 3$$
(۶۶-۲)

$$\frac{\partial \mathbf{Z}}{\partial \widetilde{\mathbf{m}}} = \frac{\partial \mathbf{Z}}{\partial \mathbf{m}} \exp(\widetilde{\mathbf{m}}) \tag{$\mathcal{P}^{\scale}\mathcal{P}^{\scale}\mathcal{P}}}$$

$$\frac{\partial \mathbf{Z}}{\partial \mathbf{m}} = \frac{hr^2 \lambda^3 \exp(-2h\alpha_0)}{\alpha_0} \begin{cases} \sum_{i=1}^{120} \frac{\partial R_{TE}}{\partial \mathbf{m}} w_i & m \neq h \\ \sum_{i=1}^{120} \sum_{k=1}^3 \frac{\partial \mathbf{Z}_k}{\partial \mathbf{m}} w_i & m = h \end{cases}$$
(۶۸-۲)

$$\frac{\partial \mathbf{Z}_{k}}{\partial \mathbf{m}} = \begin{cases} \frac{\partial R_{TE}}{\partial \mathbf{m}} & k = 1 \\ R_{TE} \left( \left( \frac{3\alpha_{0}}{\lambda} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial h} - \frac{\partial \alpha_{0}}{\partial h} \right) / \alpha_{0}^{3} \right) & k = 2 \\ R_{TE} \left( \frac{1}{h} - 2 \left( \alpha_{0} + h \frac{\partial \alpha_{0}}{\partial h} \right) \right) & k = 3 \\ R_{TE} \left( \frac{1}{h} - 2 \left( \alpha_{0} + h \frac{\partial \alpha_{0}}{\partial h} \right) \right) & k = 3 \end{cases}$$
As cr liver and the set of the set of

$$e(sl) = \|f(\boldsymbol{m} + sl.\Delta\boldsymbol{m}) - f(\boldsymbol{m}) - sl.J(\boldsymbol{m}).\Delta\boldsymbol{m}\|_{2}^{2} \sim \mathcal{O}(sl^{2})$$
(Y--Y)

در این رابطه [10<sup>-10</sup>, 10<sup>-1</sup>] sle طول گام و J ماتریس ژاکوبین است. نتایج اعتبارسنجی ماتریس ژاکوبین محاسبه شده است. همان گونه که در این ژاکوبین محاسبه شده است. همان گونه که در این شکل نشان داده شده است. ماتریس ژاکوبین محاسبه شده، دقت مرتبه دوم را به خوبی تأمین نموده است.



### ۲-۶- مدلسازی دادههای مصنوعی

بهمنظور بررسی اثر IP، مدل لایهای شامل لایه روباره، لایه آنومال حاوی اثر قطبش القایی و لایه سنگ بستر مطابق شکل ۲-۳۸ در نظر گرفته شده است. پارامترهای مدل، شامل مقاومتویژه و ضخامت لایهها، پارامترهای بارپذیری، ثابت زمانی و وابسته فرکانسی، برای هر یک از لایهها در شکل نشان داده شده است. دادههای حاصل از برداشت الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس (پیچه همصفحه افقی DIGHEM)، در دو حالت مختلف، با استفاده از رابطه (۲-۷)، شبیه سازی شده است. در حالت اول اثر قطبش القایی در نظر گرفته نشده و پارامترهای مدل فقط شامل مقاومتویژه و ضخامت لایهها میباشند (A Model A). در حالت دوم اثر قطبش القایی در لایه آنومال (لایه دوم) وارد شده است (Model B). دادههای تولید شده در جدول ۲-۱۱ نشان داده شدهاند. بر اساس دادههای این جدول، اعمال اثر قطبش القایی باعث کاهش شدت مؤلفه حقیقی و تغییر علامت آن در فرکانس-های پائین شده است؛ که این ویژگی میتواند بهعنوان یک ویژگی مرتبط با اثر منبع قطبش پذیر در اکتشافات الکترومغناطیسی مورد توجه قرار گیرد. همچنین در فرکانسهای بالاتر شدت مؤلفه حقیقی در حالتی که مدل شامل اثرات IP باشد (Model A) نسبت به مقادیر متناظر در مدل A Model A افزایش یافته است.



شکل ۲-۳۸: نمایش شماتیک برداشت دادههای الکترومغناطیس هوابرد بر روی یک مدل سهلایه شامل روباره، زون آنومال و سنگ بستر (Sharifi et al., 2018).

	Model A		Model B		
f(Hz)	R(ppm)	O (ppm)	R (ppm)	O (ppm)	
387	0.1297	2.5643	-1.2304	4.5559	
1820	1.6367	11.2904	-1.8809	31.2986	
8225	15.0716	40.2127	71.4838	95.7983	
41550	80.9692	96.1284	171.4035	89.7164	
133200	162.8604	143.2635	233.1485	108.0198	

جدول ۲-۱۱: دادههای الکترومغناطیس هوابرد شبیهسازی شده در حوزه فرکانس (DIGHEM) در دو حالت بدون اثر قطبش القایی (Model A) و با اثر قطبش القایی (Model B) (Sharifi et al., 2018) (Sharifi et al., 2018).

بهمنظور ارزیابی قابلیت الگوریتمهای ذکر شده برای بازیابی پارامترهای مدل لایهای الکترومغناطیسی حاوی اثرات قطبش القایی، از دادههای مصنوعی تولیدشده در شکل ۲-۳۸، (جـدول ۲-۱۱) اسـتفاده شده است.

در الگوریتم ICA، به ترتیب پس از تعداد ۵۰۰۰ تکرار و ۱۵۰ تکرار (شکل ۲-۳۹) پارامترهای مدل از دادههای بدون نوفه و نوفهدار (حاوی ۵٪ نوفه تصادفی) به صورت جدول ۲-۱۲بازیابی شدهاند. همان-گونه که در جدول مشاهده می گردد، در هر دو حالت پارامترهای مدل با دقت قابل قبول بازیابی شده-اند؛ اما تعداد تکرارهای زیاد در این روش، مستلزم صرف زمان زیاد است.



حاوى ۵٪ نوفه (سمت راست).

رقابت استعماري				
Model Parameter	Exact value	Recovered		
		Noise free	Noise 5%	
$\rho_1$	10000	9946.7	10482	
$\rho_2$	500	610.6	581.77	
$\rho_3$	4200	2378.4	3743.3	
т	0.911	0.9317	0.9517	
τ	0.001	0.0017	0.0023	
С	0.5	0.49	0.4228	
$t_1$	50	50.17	51.4	
$t_2$	50	50.3	43.36	

جدول ۲-۱۲: نتایج مدلسازی دادههای الکترومغناطیسی حاوی اثرات قطبش القایی با استفاده از روش الگوریتم

مؤلفههای حقیقی، موهومی و اختلاف فاز ایجاد شده برای مقادیر دقیق و بازیابیشدهی پارامترهای مدل، در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می گردد، پارامترهای بازیابیشده بهخوبی به دادههای مصنوعی برازش یافته است.

با توجه به سرعت پائین همگرائی در روش ICA، استفاده از آن برای دادههای واقعی با حجم زیاد از نظر زمانی مقرون به صرفه نیست و به همین دلیل روش سریعتر الگوریتم شبیه سازی تبرید خیلی سریع (VFSA) که با سرعت به مراتب بهتر از ICA عمل می نماید، برای پیاده سازی الگوریتم بهینه -سازی عام انتخاب گردیده است و برای تسریع همگرائی پاسخ مدل به پاسخ بهینه، در مراحل پایانی فرآیند بهینه سازی از الگوریتم محلی مار کوارت - لونبرگ استفاده شده و بدین ترتیب یک الگوریتم هیبریدی (VFSA-ML) به کار گرفته شده است.

بهمنظور بررسی اهمیت توجه به اثر IP در مدلسازی دادههای الکترومغناطیسی، دو حالت A Model A و Model I ز منظر مخالف با توجه/عدم توجه به اثر قطبش القایی در آنها مورد بررسی قرار گرفته اند. بدین معنی که با فرضهای نادرست وجود اثر قطبش القایی در A Model و عدم وجود آن در Model I بدین معنی که با فرضهای نادرست وجود اثر قطبش القایی در A Model و عدم وجود آن در Model B پارامترهای مدل ها بازیابی شده اند. دو حالت جدید ایجاد شده به تر تیب با آ Model A و آ ما ما در Model B و قدم وجود آن در Model B و قد قده ال پارامترهای مدل ها بازیابی شده اند. دو حالت جدید ایجاد شده به تر تیب با A است، پارامترهای در جدول T ما ما ما و قد قطبش القایی قرار نگرفت اند (Model A و قد از قطبش القایی بازیابی شده از داده ها ی که تحت تأثیر قطبش القایی قرار نگرفت ها در است. کوچک بوده و تأثیری بر سایر پارامترهای مدل نگذاشته است (آ Model). اما در صورتی که دادههای برداشت شده Model). اما در صورتی که دادههای برداشت شده Model) و این اثر در مدل سازی نادیده گرفته (Model B) و این اثر در مدل سازی نادیده گرفته شود (آ Model)؛ خطای زیادی در سایر پارامترهای بازیابی شده ایجاد خواهد نمود.



شکل ۲-۴۰: مؤلفههای حقیقی (بالا)، موهومی (وسط) و زاویه فاز (پائین) دادههای الکترومغناطیسی شبیهسازی-شده بر روی مدل سهلایهای برای دادههای بدون نوفه (سمت چپ) و نوفهدار حاوی ۵٪ نوفه تصادفی (سمت راست).

بدون اثر قطبش القایی (Model A) و با اثر قطبش القایی (Model B)					
Model	Model A	Model Ã	Model B	Model <b><b>B</b></b>	
Parameter					
$\rho_1(\Omega m)$	10000	10000	10000	9848.7	
$\rho_2(\Omega m)$	500	500.0058	500	70.7743	
$\rho_3(\Omega m)$	4200	4200	4200	7.0739e8	
$t_1(m)$	50	50	50	49.0939	
$t_2(m)$	50	50	50	23.1033	
т	Non-IP	2.3480e-5	0.911	IP is neglected	
τ (s)	Non-IP	9.4928e-4	0.001	IP is neglected	
с	Non-IP	1.1103e-5	0.5	IP is neglected	

جدول ۲-۱۳: دادههای الکترومغناطیس هوابرد شبیهسازی شده در حوزه فرکانس (DIGHEM) در دو حالت

نتایج مدلسازی پارامترهای Model B (پارامترهای مدل مصنوعی شکل ۲-۳۸)، با استفاده از الگوریتم VFSA و VFSA-ML در جدول ۲-۱۴ (در دو حالت بدون نوفه و اضافه کردن ۱٪ نوف به دادهها) نشان داده شده است. در حالت استفاده از دادههای حاوی نوفه، پارامترهای مدل با خطای نزدیک ۱٪ و در حالت استفاده از دادههای بدون نوفه (شکل ۲-۴۱)، پارامترهای مدل با دقت بسیار بالا و خطای نزدیک به صفر بازیابی شدهاند. همان گونه که مشاهده می شود؛ استفاده از الگوریتم هیبریدی VFSA-ML نتایج بهتری را نسبت به VFSA ایجاد نموده است. نتایج این مدل سازی در شکل ۲-۴۲ نشان داده شده است. همچنین مدل کل کل برازش یافته به دادهها براساس پارامترهای SIP بازیابی شده از دادههای است. همچنین مدل کل ۲-۶۲ بنشان داده شده است.



شكل ۲-۴۱: روند همگرائي الگوريتم ماركوارت- لونبرگ به پاسخ بهينه (Sharifi et al., 2018).





شکل ۲-۴۳: مدل کل-کل پارامترهای قطبش القایی طیفی بازیابی شده از دادههای الکترومغناطیس هوابرد در دو حالت بدون نوفه (ستون سمت چپ) و اضافهنمودن ۱٪ نوفه (ستون سمت راست).

Model	VFSA		VFSA-ML		
Parameter					
	Noise free	Noise 1%	Noise free	Noise 1%	
$\rho_1$	7924.25	9411.33	10000	10111.35	
$\rho_2$	510.45	944.84	500	675.44	
$\rho_3$	5650.52	1470.17	4200	1591.93	
m	0.9607	0.947	0.911	0.927	
τ	0.084	0.0047	0.001	0.0023	
С	0.352	0.49	0.5	0.514	
$t_1$	<i>53.93</i>	49.73	50	49.94	
$t_2$	14.51	53.61	50	45.74	

جدول ۲-۱۴: پارامترهای بازیابیشده برای Model B با استفاده از الگوریتمهای VFSA و VFSA-ML.

# ۳- فصل سوم

# مبانی ژئوشیمی و تهیه نقشه پتانسیل معدنی

#### ۳–۱– مقدمه

برای استخراج ساختار چندمتغیره دادههای ژئوشیمیایی روش آنالیز مؤلفههای اصلی (PCA) بر روی آنها در فضای واقعی و Simplex پیادهسازی شده است. لازم به ذکر است که فضای واقعی پس از اعمال تبدیلات لگاریتم ریشهای بر روی دادههای ژئوشیمیائی در دسترس قرار خواهد گرفت؛ اما در فضای Simplex این تبدیلات اعمال نشدهاند.

### ۲-۳- پردازش دادههای ژئوشیمیایی

در مطالعات ژئوشیمی قبل از تفسیر دادهها، ابتدا نیاز به پردازش آنها میباشد. در روشهای مرسوم که در فضای Simplex انجام میشوند، ابتدا دادههای سنسورد و خارج از ردیف تعیین شده و اصلاح می-گردد. سپس از آنجایی که بیشتر روشهای پردازشی با فرض توزیع نرمال دادههای ژئوشیمیایی توسعه یافتهاند و از طرفی عمده دادههای خام نرمال نمیباشند، باید در مرحله بعدی نرمالسازی انجام گیرد. دادههای خارج از ردیف دارای اهمیت خاصی در بین دادههای ژئوشیمیایی هستند؛ زیـرا نمونـههای آنومال غالباً در بین دادههای خارج از ردیف قرار میگیرند. لذا اصلاح مقادیر خارج از ردیف صوفاً برای کمک به نرمالسازی توزیع آماری دادههای ژئوشیمیائی صورت میگیرد و در تفسیر نهائی، اثر مقادیر خارج از ردیف نیز اعمال میگردد (حسنی پاک، ۱۳۸۴).

از آنجا که روش آنالیز مؤلفههای اصلی برای آشکارسازی ساختار چندمتغیره دادهها از تخمین گرهای ماتریس کوواریانس و میانگین دادهها بهره میبرد و این دو تخمین گر هر دو به مقادیر خارج از ردیف حساس هستند، لازم است از تخمین گرهای مقاوم<sup>۲</sup> برای این منظور استفاده شود. تخمین گر حداقل دترمینان ماتریس کوواریانس (MCD)<sup>۳</sup> قادر به تأمین این شرایط است. لذا روش چندمتغیره PCA با استفاده از این تخمین گر اصلاح شده (Filzmoser et al ., 2009) و در مطالعات آماری حاوی دادههای

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Principal Component Analysis

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Rubost

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Minimum Covariance Determinant

خارج از ردیف تحت عنوان روش PCA مقاوم مورد استفاده قرار می گیرد. لذا با توجه به وجود تعداد قابل توجه مقادیر خارج از ردیف در دادههای ژئوشیمی مورد استفاده در این تحقیق، به جای استفاده از روش PCA کلاسیک از PCA مقاوم استفاده شده است.

در فضای واقعی نیز که از طریق تبدیلات لگاریتمی قابل دستیابی است، پس از انجام تصحیح دادههای سنسورد و تبدیل لگاریتم ریشهای ایزومتریک ، روش PCA مقاوم بر روی دادههای انتقالیافته توسط تبدیل لگاریتم ریشهای ایزومتریک، پیادهسازی شده و سپس برای تفسیر نهائی ماتریس وزنی و بار فاکتوری با استفاده از تبدیل لگاریتمی ریشهای مرکزی وارون تبدیل یافتهاند.

در این روشهای مقاوم دادههای خارج از ردیف به طور مستقیم در کل مراحل تجزیه و تحلیل و تفسیر دادههای ژئوشیمی مورد استفاده قرار گرفته و نیازی به تصحیح و حذف اثر این دادههای با ارزش نیست.

### ۳-۳- روش تجزیه و تحلیل مؤلفههای اصلی

برای پیادهسازی روش PCA بر روی یک مجموعه داده ژئوشیمیائی شامل N نمونه که هر نمونه نیز دارای تعداد D متغیر (عنصر ژئوشیمیائی) است، میتوان از رابطه (۳-۱) استفاده نمود (al ., 2009; Tharwat, 2016):

$$X^* = (X - repmat(\mu^T, N, 1))G_x$$
 (۱-۳)  
در ایـن رابطـه ( $\mu^T, N, 1$ ) مـاتریس دادههـا،  $\mu$  بـردار میـانگین  
در ایـن رابطـه ( $X_{II}, x_2, ..., x_N$ ),  $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{iD}\}$  مـاتریس دادههـا،  $\mu$  بـردار مـانگین  
حسابی متغیرها، T ترانهاده، repmat عملگر تکرار بردار  $\mu^T$  به تعداد N سـطر و  $G_x$  از تجزیـه مقـادیر  
تکین کوواریانس ماتریس X بهصورت رابطه (۲-۳) بدست می آید.

$$Cov(X) = G_x L G_x^T \tag{7-7}$$

مؤلفههای اصلی محاسبه شده، ار تو گونال با همبستگی صفر و در جهت بیشترین واریانس هستند.

۳-۳-۱- روش ماتریس کوواریانس با کمترین دترمینان

در مطالعات چندمتغیره، چنانچه ماتریس دادهها حاوی مقادیر خارج از ردیف باشد، تخمین گرهای موقعیت (میانگین حسابی) و پراکندگی (کوواریانس) بهشدت تحت تأثیر مقادیر خارج از ردیف قرار می گیرند. برای حل این مشکل روشهای مقاوم در مقابل مقادیر خارج از ردیف توسعه یافتهاند. یکی از مرسوم ترین این روشها، ماتریس کوواریانس با کمترین دترمینان (MCD) است. در این روش برای تعیین کمترین ماتریس کوواریانس با کمترین دترمینان (MCD) است. در این روش برای مرسوم ترین این روشها، ماتریس کوواریانس با کمترین دترمینان (MCD) است. در این روش برای تعیین کمترین ماتریس کوواریانس با کمترین دترمینان (MCD) است. در این روش برای تعیین کمترین ماتریس کوواریانس با کمترین دترمینان (CD) است. در این روش برای تعیین کمترین ماتریس کوواریانس، میتوان از روشهای مختلف بهینه سازی استفاده نمود. بدین استفاده قرار می گیرد. H به گونهای تعیین می شود که N/(H -N) بزر گتر از تعداد دادههای خارج از ردیف باشد (2009) به میتوان تابع استفاده قرار می گیرد. H به گونهای تعیین می شود که N/(H -N) بزر گتر از تعداد دادههای خارج از ردیف باشد (2009) به میتوان تابع استفاده قرار می گیرد. H به گونهای تعیین می شود که N/(H -N) بزر گتر از تعداد دادههای خارج از می فرد با تعییز H کمینه این در ماتریس کوواریانس این زیر مجموعه از دادهها، به عنوان تابع مدف، با تغییر H کمینه سازی می گردد. در صورتی که افزایش H موجب بروز مقادیر تکین در ماتریس مدف، با تغییر H کمینه سازی می گردد. در صورتی که افزایش H موجب بروز مقادیر تکین در ماتریس مدف، با تغییر H کمینه سازی می گردد. در صورتی که افزایش H موجب بروز مقادیر تکین در ماتریس مدف، با تغییر H کمینه سازی می گردد. در صورتی که افزایش H موجب بروز مقادیر تکین در ماتریس مدف، با تغییر H کمینه سازی می گردد. در صورتی که افزایش H موجب بروز مقادیر تکین در ماتریس مدفرای ای ترمی مواریانس این زوش با روشهای متداول تابع مدف، با تغییر H کمینه می گردد. در صورتی که افزایش H موجب بروز مقادیر تکین در ماتریس مدفر باری در مازین بی می می توان عملکرد آنها را به مود بخشید.

یکی از روشهای متداول در تعیین مقادیر خارج از ردیف در روشهای چندمتغیره، استفاده از فواصل ماهالانوبیس ٔ است. فواصل ماهالانوبیس با استفاده از رابطه (۳-۳) قابل محاسبه است.

$$MD(x) = \sqrt[2]{(x_i - T(X))C(X)^{-1}(x_i - T(X))^t}$$
 ((X) تخمین گر کواریانس است.  
که در آن (T(X) تخمین گر ماتریس میانگین و (C(X) تخمین گر کواریانس است.  
در شکل ۳-۱ غلظت دو ترکیب شیمیائی A و B از یک نمونه بر روی یک نمودار دوبعدی به صورت  
نقطهای نشان داده شده است. همچنین فواصل ماهالانوبیس بر مبنای دو روش کلاسیک و MCD به  
نمایش در آمده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Mahalanobis distance


شکل ۳-۱: نمایش دو متغیره از دو ترکیب شیمیایی موجود در تعدادی نمونه از یک ماده. دو بیضی برازش یافته به دادهها با استفاده از ماتریس کوواریانس و حداقل دترمینان ماتریس کوواریانس، به ترتیب با رنگ قرمز و آبی نشان داده شدهاند (Hubert et al., 2018).

با توجه به این شکل، چنانچه از روش کلاسیک برای تعیین کوواریانس استفاده شود، بیضی تلرانس محاسبه شده براساس فواصل ماهالانوبیس کلاسیک بازتر بوده و بیشتر داده ها را پوشش میدهد؛ اما بیضی تلرانس محاسبه شده برای روش MCD بسته تر بوده و تعداد داده بیشتری خارج از آن قرار گرفته اند. این بدین معنی است که روش کلاسیک قابلیت محدود تری نسبت به روش مقاوم در شناسائی مقادیر خارج از ردیف دارد (شکل ۳-۲).



# ۳–۴– دادههای ترکیبی

$$X = Closure[x_1, x_2, ..., x_D] = \left[\frac{k \cdot x_1}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, \frac{k \cdot x_2}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, ..., \frac{k \cdot x_D}{\sum_{i=1}^{D} x_i}\right]$$
(۴-۳)  

$$Y = Closure[x_1, x_2, ..., x_D] = \left[\frac{k \cdot x_1}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, \frac{k \cdot x_2}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, ..., \frac{k \cdot x_D}{\sum_{i=1}^{D} x_i}\right]$$
(۴-۳)  

$$Y = Closure[x_1, x_2, ..., x_D] = \left[\frac{k \cdot x_1}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, \frac{k \cdot x_2}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, ..., \frac{k \cdot x_D}{\sum_{i=1}^{D} x_i}\right]$$
(۴-۳)  

$$Y = Closure[x_1, x_2, ..., x_D] = \left[\frac{k \cdot x_1}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, \frac{k \cdot x_2}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, ..., \frac{k \cdot x_D}{\sum_{i=1}^{D} x_i}\right]$$
(۴-۳)  

$$Y = Closure[x_1, x_2, ..., x_D] = \left[\frac{k \cdot x_1}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, \frac{k \cdot x_2}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, ..., \frac{k \cdot x_D}{\sum_{i=1}^{D} x_i}\right]$$
(۴-۳)  

$$Y = Closure[x_1, x_2, ..., x_D] = \left[\frac{k \cdot x_1}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, \frac{k \cdot x_2}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, ..., \frac{k \cdot x_D}{\sum_{i=1}^{D} x_i}\right]$$
  

$$Y = Closure[x_1, x_2, ..., x_D] = \left[\frac{k \cdot x_1}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, \frac{k \cdot x_2}{\sum_{i=1}^{D} x_i}, ..., \frac{k \cdot x_D}{\sum_{i=1}^{D} x_i}\right]$$

در مرحله بعد با استفاده از روشهای تبدیل لگاریتم ریشهای، دادهها را از حالت بسته خارج می شوند. روشهای مختلفی برای تبدیلات لگاریتم ریشهای توسعه یافتهاند. از جمله می توان به تبدیل لگاریتمی افزایشی که اولین بار توسط اتچیسون (Aitchison, 1986) معرفی گردید (رابطه (۳-۵))؛ اشاره نمود.

$$alr(X) = (ln\frac{x_1}{x_j}, ln\frac{x_2}{x_j}, ..., ln\frac{x_{D-1}}{x_j})$$
 (Δ-٣)

که در آن alr عملگر تبدیل لگاریتم افزایشی، X بردار غلظت کل عناصر در سیستم بسته و x<sub>i</sub> غلظت

هر یک از عناصر است که لگاریتم آنها بر لگاریتم غلظت عنصر *زx* تقسیم می شود. لذا نتایج این در این تبدیل، لگاریتم یکی از متغیرها از لگاریتم تک تک بقیه متغیرها کسر می شود. لذا نتایج این روش، بسته به نظر کارشناسهای مختلف و انتخاب متغیرهای مختلف که لگاریتم آن از لگاریتم بقیه کم شود، متفاوت خواهد بود. همچنین تعداد متغیرها به 1-D متغیر کاهش می یابد. برای رفع نواقص تبدیل لگاریتمی افزایشی، تبدیل لگاریتم ریشه ای مرکزی توسط اتچیسون معرفی گردید (Aitchison, 1986). تبدیل لگاریتم ریشه ای مرکزی برای نمونه ترکیبی D- بعدی X به-

$$y = (y_1, y_2, ..., y_D) = \left( \log \frac{x_1}{\sqrt[D]{\prod_{i=1}^D x_i}}, \log \frac{x_2}{\sqrt[D]{\prod_{i=1}^D x_i}}, ..., \log \frac{x_D}{\sqrt[D]{\prod_{i=1}^D x_i}} \right)$$
(۶-۳)  

$$\sum_{i=1}^{D} \frac{y_i}{\sqrt{\prod_{i=1}^D x_i}} (x_i - x_i) \sum_{i=1}^{D} \frac{y_i}{\sqrt{\prod_{i=1}^D x_i}} (x_i -$$

$$z_i = \sqrt{\frac{i}{i+1} \log \frac{i}{\sqrt{\prod_{j=1}^{D} x_j}}{x_{i+1}}}, i = 1, 2, ..., D - 1$$
  
که در آن  $z_i$  نشان دهنده مقادیر تبدیلیافته با استفاده از تبدیل لگاریتم ریشهای ایزومتریک است.

## ۳–۵– پیادهسازی روش آنالیز مؤلفههای اصلی مقاوم برای دادههای بسته

در این روش، به جای ماتریس کوواریانس از تخمین گر ماتریس کوواریانس با کمترین مربعات استفاده شده و میانگین حسابی دادهها با چشم پوشی از دادههای خارج از ردیف ( $\mu_{mcd}$ ) محاسبه می گردد. علاوه بر این، با توجه به ماهیت بستهبودن دادههای ژئوشیمی لازم است دادهها با استفاده از روش مناسب تبدیل لگاریتم ریشهای به فضای واقعی منتقل شده و سپس با استفاده از روش آنالیز مؤلف -های اصلی مقاوم مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرند. با توجه به کاستیهای روش تبدیل لگاریتمی افزایشی، این روش قابل استفاده نخواهد بود. همچنین دادههای تبدیلیافته با استفاده از تبدیل لگاریتمی ریشهای مرکزی با توجه به این که  $1 = y_i = y_i^2$ ، منجر به تولید دادههای همراستا (هم-لگاریتمی ریشهای مرکزی با توجه به این که ا ای  $y_i = 1$ ، منجر به تولید دادههای همراستا (هم-نط)<sup>1</sup> میشود که این ویژگی موجب میشود که ماتریس MCD داده تبدیلیافته تکین و در نتیجه معکوسناپذیر باشد. برای رفع این کاستی از روش تبدیل تبدیل لگاریتم ریشهای ایزومتریک در اجرای روش آنالیز مؤلفههای اصلی استفاده میشود. در نتیجه تعداد متغیرهای تبدیل یافته در روش تبدیل لگاریتم ریشهای ایزومتریک به 1-D کاهش مییابد. لذا برای این که دادههای تبدیلیافته با تبدیل لگاریتم ریشهای ایزومتریک که بهوسیله روش PCA مقاوم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتهاند، قابل لگاریتم ریشهای ایزومتریک که بهوسیله روش PCA مقاوم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتهاند، قابل تفسیر باشند. با استفاده از تبدیل لگاریتمی ریشهای مرکزی وارون، بارهای فاکتوری مجدداً به فضای آلار مولی ایندر ایند و این کاریتهای روش FCA مقاوم مورد توانه مواند میل قرار گرفتهاند. تابل

مراحل انجام روش PCA مقاوم بر روی دادههای بسته بهصورت زیر است:

$$Z^* = (X - repmat(\mu_{mcd}^T, h, 1))G_z$$
(A- $\mathfrak{r}$ )

T که در این رابطه  $\mu_{mcd}$  بردار میانگین حسابی متغیرها با چشم پوشی از داده های خارج از ردیف T که در این رابطه  $\mu_{mcd}$  بردار میانگین کوواریانس MCD ماتریس Z بدست می آید:

$$MCD(Z) = G_z L G_z^T \tag{9-7}$$

$$G_y = UG_z \tag{11-7}$$

که ستونهای ماتریس U (ui) از طریق اعمال روش متعامدسازی گرام-اشمیت بر روی ماتریس V به-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Collinear

صورت آتی استخراج میشود:

 $V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \vdots \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ \vdots & 0 & -1 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & -1 \end{bmatrix}_{D \times D - 1}$ (17-7)

$$u_i = \sqrt{\frac{i}{i+1}} \left[ \frac{1}{i}, \dots, \frac{1}{i}, -1, 0, \dots, 0 \right], i = 1, 2, \dots, D - 1$$
(17-7)

۳-۶- مدلسازی پتانسیل معدنی

با توجه به این که در فرآیند پیجوئی مواد معدنی روشهای مختلف ژئوفیزیک، ژئوشیمی و زمین-شناسی مورد استفاده قرار می گیرد، تصمیم گیری در مورد وضعیت کانیزائی در یک منطقه مطالعاتی بر اساس اطلاعات اکتشافی بدستآمده از طریق هر کدام از این روشها، مستلزم استفاده از روشی مناسب برای تلفیق لایههای اطلاعات اکتشافی بهمنظور انجام مدل سازی پتانسیل معدنی میباشد (Carranza, 2008). یکی از ابزارهای بسیار سودمند در این زمینه، محیط GIS است؛ که امکانات وسیعی را برای این منظور فراهم مینماید. در این رساله از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی<sup>۱</sup> برای تلفیق لایههای اطلاعاتی استفاده شده است؛ که در ادامه توضیح داده میشود.

۳-۶-۲- روش تحلیل سلسله مراتبی

این روش دانش محور مبتنی بر مقایسه زوجی و دو به دوی گزینه ها و معیارها در یک ساختار سلسله مراتبی و محاسبه ارزش نسبی گزینه های موجود می باشد. سامانه های اطلاعات مکانی (GIS) در گستره وسیعی از کاربردها با مسأله تعیین ارزش، وزن دهی و انتخاب روبرو می باشند. از این رو روش

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Fuzzy AHP

تحلیل سلسله مراتبی با موفقیت در این سامانه ها بکار گرفته شده است. برای اجرای این روش، از طریق طراحی پرسشنامه و نظر خواهی از متخصصان علوم زمین، میزان اهمیت هر یک از معیارهای اکتشافی (لایه های اطلاعاتی) به صورت زوجی و بر اساس یک جدول مقیاس مناسب (جدول ۳-۱) تعیین شده و ماتریس مقایسه زوجی (ماتریس *A*) تشکیل می گردد (Saaty, 2008).

$$A = \begin{bmatrix} a_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$
(14-7)

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
٩	کاملا مرجح یا کاملا مهم تر یا کاملا مطلوب تر
Y	ترجيح با اهميت يا مطلوبيت خيلى قوى
۵	ترجيح با اهميت يا مطلوبيت قوى
٣	کمی مرجح یا کمی مهم تر یا کمی مطلوب تر
١	ترجيح يا اهميت يا مطلوبيت يكسان
۸.۶.۴.۲	ترجيحات بين فواصل

جدول ۳-۱: مقادیر ترجیحات برای مقایسه های زوجی (Saaty, 1990).

پس از تشکیل ماتریس A، درایههای ماتریس با استفاده از رابطه (۳-۱۵) نرمالایز میشوند و بدین ترتیب مجموع هر یک از ستونهای ماتریس برابر یک خواهد شد (Saaty, 1990).

$$\overline{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}} \tag{12-7}$$

در رابطه (۳-۱۵) a<sub>ij</sub> درایههای ماتریس A میباشند که مقدار نرمالایز شده هر یک برابر مقدار 
$$\overline{a}_{ij}$$
 است.  
است.  
در خاتمه بردار وزن معیارها با میانگین گیری بر روی هر ردیف از ماتریس نرمالایز شده به صورت رابطه  
(۳-۱۶) بدست میآید.

$$w_j = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \tag{19-7}$$

۳-۶-۲ روش فازی

براساس مفهوم فازیسازی، متخصصان علوم زمین با استفاده از تعریف یک حد آستانهای مناسب برای هر معیار، به هر یک از دادههای هر معیار درجه عضویتی بین صفر و یک اختصاص میدهند. مثلاً مقدار صفر به نواحی بدون رخداد ماده معدنی و مقدار یک به نواحی کانیسازی شده اختصاص می-یابد. مقدار این درجه عضویت با استفاده از دانش کارشناسی تعیین میشود ( Nykäne and یابد. مقدار این درجه 2007; Carranza, 2008).

$$\begin{split} \widetilde{A}_{i} &= \left\{ \left( X_{ij}, \mu_{\widetilde{A}_{i}}(X_{ij}) \right) \mid X_{ij} \in X_{i} \right\}, \end{split} \tag{17-7} \\ 0 &\leq \mu_{\widetilde{A}_{i}}(x_{ij}) \leq 1 \\ \text{c} (Istimute in the constraints of the const$$

۱- تعیین درجه عضویت فازی ٔ

در روش تلفیق لایههای اطلاعاتی در محیط GIS با استفاده از روش فازی، در گام نخست بایـد تمـام لایهها به نقشه رستری تبدیل شوند. از آنجا که هر کدام از نقشهها مربوط بـه ویژگیهای اکتشـافی متفاوتی هستند (لذا دارای واحدهای متفاوتی نیز هستند)؛ که باید با استفاده از عملگرهای فازی هم-مقیاس شوند. در نتیجه تمامی مقادیر بین صفر و یک قرار خواهند گرفت. مناطقی از نقشه کـه دارای پیکسلهای با ارزش یک هستند، کاملاً عضو مجموعه خواهند بود؛ اما مناطقی که دارای پیکسلهای با ارزش صفر هستند، از عضویت مجموعه خارج خواهند بود. شکل ۳-۳ عضویت فازی را نشان میدهد. در این شکل، محور عمودی میزان درجه عضویت فازی را نشان میدهد؛ که مقادیر آن بین صفر تا یک است. هر چه درجه عضویت یک کلاس از یک معیار به یک نزدیکتر باشد، نشان میدهد که پیکسل-مهای مرتبط با آن کلاس بر روی نقشه اهمیت بیشتری در تهیه نقشه پتانسیل دارد. محـور افقـی هـم مقادیر غیرفازی پیکسلها را نشان میدهد. با توجه به این شکل عدد ۱۰ بر روی محـور افقـی هـم مقادیر غیرفازی پیکسلها را نشان میدهد. با توجه به این شکل عدد ۱۰ بر روی محـور افقـی هـم راست فاصله گرفته شود. از میزان مطلوبیت آن کاسته شده و درجه عضویت فازی نیز کاهش مییابد. همچنین محدودههای بین ۱۰ تا ۴ و ۱۶ تا ۲۰ دارای درجه عضویت فازی صفر بوده و از نظر کانیزائی نامناسـ هستند.



شكل ٣-٣: نمايش عضويت فازى ( Wilpen and Kristen, 2007).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Fuzzy membership

برای تعیین درجه عضویت فازی هر یک از مقادیر در نقشههای اکتشافی، توابع مختلفی در GIS وجود دارد. بهعنوان مثال میتوان به توابع گوسی، خطی و ... (شکل ۳-۴) اشاره نمود ( Wilpen and Kristen, 2007; Carranza, 2008).



استفاده از روش گوسی زمانی مناسب است که هدف اختصاص بیشترین درجه عضویت به یک مقدار خاص باشد و عضویت فازی بقیه مقادیر پیکسلها با فاصله گرفتن از مقدار مطلوب کاهش یابد ( Wilpen and Kristen, 2007).

در روش خطی، یک تابع خطی بین مقادیر کمینه و بیشینه ارزشها و مقادیر به کار گرفته می شود. مقادیری که کمتر از ارزش کمینه باشند، فاقد درجه عضویت خواهند بود و مقادیری که بیشتر از ارزش بیشینه باشند، ارزش فازی یک را دریافت می کنند ( Wilpen and Kristen, 2007). البته می توان از تابع لجستیکی زیر (رابطه (۳-۱۸)) نیز برای فازی سازی نقشه های تخمینی چند کلاسه استفاده نمود (Zimmermann, 1991; Carranza, 2008):

$$\mu_{\widetilde{A}_{i}} = \frac{1}{1 + \exp(-a(cs_{ij} - b))} \tag{1A-T}$$

که در این رابطه a نقطه عطف، b شیب تابع عضویت لجستیک و cs<sub>ij</sub> بیانگر امتیاز کلاس x<sub>ij</sub> است که با استفاده از رابطه (۳-۱۹) بدست میآید.

$$cs_{ij} = w_i * w_{ij} \tag{19-7}$$

که در این رابطه w<sub>i</sub> معیار اکتشافی iام و w<sub>ij</sub> وزن کلاس jام از iامین معیار (نقشه) اکتشافی است.

$$\mu_F = MIN(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N) \tag{(Y - Y)}$$

عملگر OR فازی از رابطه (۲۱-۳) برای تلفیق لایههای اطلاعاتی بهره میبرد.

$$\mu_F = \prod_{i=1}^N \mu_i \tag{17-7}$$

عملگر جمع جبری فازی از رابطه (۳-۲۳) برای تلفیق اطلاعات استفاده می کند و در مواردی که دو یا چند شاهد اکتشافی یک فرضیه (وجود یا عدم وجود کانیزائی) را تأیید می کنند، استفاده از این روش

<sup>3</sup> Fuzzy OR

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Fuzzy overlay

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Fuzzy AND

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Fuzzy Algebraic product

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Fuzzy Algebraic sum

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Fuzzy Gamma

$$\mu_F = 1 - \prod_{i=1}^{N} (1 - \mu_i)$$
((٣-٣))

عملگر گاما فازی با استفاده از رابطه (۳-۲۴) بین دو عملگر فازی ضرب و جمع فازی ارتباط برقرار می کند. با انتخاب صحیح مقدار پارامتر گاما (بین ۰ و ۱) اثرات کاهشی و افزایشی مرتبط با این دو عملگر را در راستای دستیابی به خروجی بهتر مورد استفاده قرار میدهند.

$$\mu_F = \left(\prod_{i=1}^N \mu_i\right)^{1-\gamma} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^N (1-\mu_i)\right)^{\gamma} \tag{(Yf-T)}$$

### ۳-۶-۳- روش تحليل سلسله مراتبي فازي

از آنجا که روش تحلیل سلسله مراتبی براساس مقایسه نسبی و بر مبنای یک جدول مقیاس مطلق معیارها است، استفاده از جدول مقیاس برای تعیین برتری معیارها با عدم قطعیت همراه خواهد بود. بنابراین در چنین شرایطی استفاده از مقادیر فازی به بهبود نتایج کمک مینماید ( ,.Karimi et al بنابراین در چنین شرایطی استفاده از مقادیر فازی به بهبود نتایج کمک مینماید ( , یا دوش تحلیل 2011). در این رساله برای تلفیق نقشههای زمین شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیکی، از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده شده است. برای این منظور با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و بر مبنای نظر کارشناسی وزن هر یک از لایههای اکتشافی فازی شده تعیین و در نهایت برای تعیین نقشه پتانسیل مطلوب، این لایههای وزندار فازی با استفاده از عملگر گاما فازی با هم تلفیق شدهاند.

# ۴- فصل چهارم

# مطالعات ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی منطقه آلوت

## ۴-۱- مطالعات آزمایشگاهی

#### SIP مطالعات ٩-١-١

#### الف- آمادهسازی نمونهها

قبل از انجام مطالعات SIP، مراحل آمادهسازی شامل برش و تهیه نمونه ها، اشباع و غوط هورسازی نمونه های سنگی در محلول آب نمک، اندازه گیری وزن نمونه های خشک و اشباع شده برای محاسبه تخلخل و ... در آزمایشگاه انجام شد.

در اولین مرحله از فرآیند آمادهسازی نمونهها، با استفاده از تجهیزات نشان داده شده در شکل ۴-۱ نمونههای گرفتهشده از مغزههای حفاری به شکل استوانه و با ابعاد طول و قطر ۲ سانتیمتر برش یافتند (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۱: تجهیزات مورد استفاده برای برش و مغزه گیری از نمونههای حفاری.

سپس برای فراهم نمودن شرایط انتقال جریان یونی از طریق خلل و فرج سنگها و نیز تماس الکترولیت با کانیهای قطبش پذیر، نمونههای تهیهشده در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، به مدت حداقل یک شبانهروز در محلول آب نمک با رسانندگی S/m %S/m در محیط تحت مکش هـوا از محلول اشباع شدند. در ضمن برای محاسبه تخلخل، وزن نمونهها قبل و بعد از فرآیند اشباع با دقت ۰/۰۰۰۱ اندازه گیری شدند.



شکل ۴-۲: تصویر مقطع (سمت چپ) و پهلو (سمت راست) نمونههای مورد استفاده در آزمایش SIP.

نتایج محاسبات نشان داد که تخلخل نمونهها بسیار پائین و در بازه ۱/۲۷ تا ۱/۲۷ درصد است. در مرحله بعد، اندازه گیری طیف مقاومت ویژه/ رسانند گی مختلط نمونه های اشباع شده با دستگاه SIP KHz ایجام پذیرفت. ۲۰ انجام پذیرفت.



شکل ۴-۳: تصویر شماتیک از اندازه گیری مقاومت ویژه/ رسانندگی مختلط با استفاده از دستگاه SIP FUCHS III



شکل ۴-۴: بخشهای مختلف دستگاه SIP FUCHS III

همچنین دمای محیط انجام آزمایش در طول اندازه گیری ثبت شده و با استفاده از آن تصحیح دمائی بر روی دادهها انجام و با استفاده از رابطه (۲-۱۴) تصحیح هندسی بر روی آنها اعمال گردید.

## ب- نتایج مدلسازی دادههای SIP

برای تفسیر و مدلسازی دادههای SIP مدلهای واهلش مختلفی وجود دارند؛ که تعدادی از آنها در فصل دوم مورد بررسی قرار گرفتند. برای مدلسازی دادههای SIP منطقه مورد مطالعه نیز از مدلهای کل- کل، GEMTIP کروی و تجزیه دبای استفاده شد. نتایج مدلسازی با استفاده از هر یک از این مدلها در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد.

برای مدلسازی دادههای SIP، قسمتهایی از دادهها که با اثر جفتشدگی الکترومغناطیسی آلوده شدهاند؛ از فرآیند مدلسازی حذف شدهاند و سپس با استفاده از روش وارونسازی حداقل مربعات، پارامترهای مدل بازیابی شدهاند. نمونههایی که با مدل کل-کل یکجزئی مدلسازی شدهاند، فقط حاوی یک منبع اثر قطبشالقایی میباشند (شکل ۴-۵). هر چند نمونههایی که با مدل کل-کل دوجزئی تعمیمیافته مدلسازی شدهاند، حاوی دو منبع اثر قطبشالقایی میباشند (شکل ۴-۶). نتایج مدلسازی کل-کل یکجزئی و کل-کل دوجزئی تعمیمیافته در جدول ۴-۱ ارائه شده است. نتایج مدلسازی با استفاده از این دو مدل کاملاً رضایتبخش بوده و بیشتر پارامترهای بازیابیشده با شرایط فیزیکی نمونههای مورد مطالعه همخوانی دارند.

نتایج مدلسازی دادههای SIP مربوط به نمونههای مورد استفاده در شکل ۲-۶ با استفاده از مدل GEMTIP کروی (DCC) و تجزیه دبای (DD) نیز به ترتیب در شکل ۲-۹ نشان داده شدهاند. مقایسه نتایج این دو مدل نشان میدهد که مدل تجزیه دبای نسبت به مدل GEMTIP کروی بهتر به KBC13 مقایسه نتایج این دو مدل نشان میدهد که مدل تجزیه دبای نسبت به مدل GEMTIP کروی بهتر به دادههای SIP برازش یافته است. نتایج مدلسازی مدل GEMTIP کروی برای دو نمونه -KBC13 دادههای GEMTIP کروی برای دو نمونه -KBC13 دادههای GEMTIP کروی برای دو نمونه -KBC13 دادههای مدل GEMTIP کروی برای دو نمونه -KBC13 دادههای A-۹ برای دو نمونه -A-۶ این نداده شدهای دادههای مازش یافته است. نتایج مدلسازی مدل GEMTIP کروی برای دو نمونه -KBC13 دادههای A-۹ برازش یافته است. نتایج مدلسازی مدل ۹-۲ آمده است. با توجه به این شکل، این مدل نیز به خوبی به دادهها برازش یافته؛ اما نتایج مدلسازی در جدول ۴-۲ آمده است. با توجه به این شکل، این مدل نیز به خوبی به دادهها برازش یافته؛ اما نتایج مدلسازی در جدول ۴-۲ نشان میدهد توجه به رامترهای بازیابی شده با مدل GEMTIP کروی به لحاظ فیزیکی قابل توجیه نیستند. زیرا با توجه به رابطه (۲-۲۱) پارامتر بارپذیری مربوط به مدل GEMTIP کروی حداکثر برابر ۳ خواهد بود؛ در حالی که مقدار بازیابی شده با مدل GEMTIP کروی به لحاظ فیزیکی قابل توجیه نیستند. زیرا با توجه به رابطه (۲-۲۱) پارامتر بارپذیری مربوط به مدل GEMTIP کروی حداکثر برابر ۳ خواهد بود؛ در حالی که مقدار بازیابی شده با مدلسازی وارون، خیلی بیشتر از این مقدار بدست آمدهاند (پارامترهای است (و یا ۲۰). همچندین پارامترهای 11 و 21 برای نمونه -۲۹۶ درصد (پارامترهای 11 و یا ۲۰۸ و ۹۰۶ در درصد باشد. بنابراین مداو و ۹۰۶ درصد (پارامترهای با برابر ۵۶٪ و برای نمونه (۲۱) KBC12-S16 درست باشد. بنابراین مدل GEMTIP کروی دارصد باشد مدارمان درصد مدارمان درصد باشد. که یا مقدار مدل و ۹۰۶ درصد مده درست باشد. بابراین مدل GEMTIP کروی دارمان بازی که مره و ۹۰۶ درصد درست باشد. بابراین مدل GEMTIP کروی دارمان بازی که می تواند درست باشد. بابراین مدل GEMTIP کروی دارمان بازی که می توان درست باشد. بابراین مدل GEMTIP کروی دارمان بازی که می توان و ۹۰۶ دارمان بازیکی نمونه و ۹۰۶ دارمان بازیکی نمونه و ۹۰۶ دارما با ۹۰ دارمان بازیکی دارمان با ۹۰ دارمان با ۹۰ دارما با



نمی تواند برای مدل سازی داده های SIP مربوط به نمونه های مورد مطالعه در این تحقیق مورد استفاده

قرار گیرد.

شکل ۴-۵: مدل کل-کل یکجزئی برازش یافته به دادههای SIP نمونههای (BB21-76m (P1) (سمت راست) و (سمت چپ).



شکل ۴-۶: مدل کل-کل تعمیم یافته دو جزئی برازش یافته به دادههای SIP نمونههای (P2\_1)KBC13-R47-S103 (سمت راست) و (KBB21-S30-B9(P1 (سمت چپ).

			Coarse-grained pyrite		Fine-grained pyrite			
Sample	e	Rho <sub>0</sub>	<b>m</b> <sub>1</sub>	tau <sub>1</sub>	<b>c</b> <sub>1</sub>	m2         tau2           1.05E-01         1.90E-04		<b>c</b> <sub>2</sub>
100 11 60	P1	1.44E+03	0.5282028	10701.7	1.00E-02	1.05E-01	1.90E-04	2.55E-01
MB2-11.60	P2	1.95E+03	1.93E-02	1.76E+02	4.65E-01	1.35E-01	4.56E-04	2.11E-01
	P1	2.20E+03	3.16E-01	1.71E+01	3.67E-01	3.72E-01	7.74E-03	5.45E-01
KBB21-	P2_1	1.34E+03	1.67E-01	5.86E+00	2.81E-01	-	-	-
S30-B9	P2_2	1.67E+03	3.96E-01	1.41E+02	2.57E-01	6.37E-02	5.99E-04	3.31E-01
	P2_3	4.58E+03	2.21E-01	3.40E+00	2.37E-01	m2           1.05E-01           1.35E-01           3.72E-01           -           6.37E-02           -           3.58E-01           3.58E-01           3.03E-01           6.21E-01           6.237E-02           6.358E-01           6.358E-01           6.21E-01           6.236E-01           6.00E-01           1.50E-01           3.01E-01           3.01E-01           3.01E-01           3.51E-01           3.10E-01           3.12E-01           3.12E-01           1.21E-01           1.20E-01           1.60E-01	-	-
KBB21-	P1	5.97E+03	3.62E-01	7.36E+00	2.24E-01	-	-	-
76m	P2	4.38E+03	3.37E-01	7.98E+02	3.75E-01	m2           m2           1.05E-01         1           1.35E-01         2           3.72E-01         2           6.37E-02         2           6.37E-01         2           3.58E-01         3           6.35E-01         2           6.35E-01         2           6.35E-01         2           6.35E-01         2           6.00E-01         1           1.50E-01         2           3.01E-01         2           3.01E-01         2           3.01E-01         2           3.01E-01         2           3.01E-01         2           3.51E-01         2           3.51E-01         2           3.51E-01         2           3.51E-01         2           3.16E-01         2           3.16E-01         2           3.16E-01         2           3.12E-01         1           2.63E-01         2           3.16E-01         2           3.16E-01         2           3.16E-01         2           3.16E-01         2           3.16E-01 <td< td=""><td>1.61E+00</td><td>2.52E-01</td></td<>	1.61E+00	2.52E-01
	P2_1	3.67E+03	-	-	-	3.03E-01	2.21E-05	1.47E-01
KBC11-	P2_2	3.93E+03	-	-	-	6.85E-01	3.17E-02	4.24E-01
01111-1132	P2_3	2.95E+03	-	-	-	Prime           1.05E-01           1.35E-01           3.72E-01           3.72E-01           6.37E-02           6.37E-02           3.58E-01           3.03E-01           6.35E-01           6.35E-01           6.35E-01           6.35E-01           6.35E-01           6.21E-01           6.00E-01           1.50E-01           3.01E-01           3.01E-01           3.01E-01           3.01E-01           3.51E-01           3.12E-01           3.12E-01           3.12E-01           1.201E-01           1.201E-01           1.201E-01	3.18E-02	3.83E-01
	P1	6.22E+02	6.31E-01	3.30E+00	2.99E-01	-	-	-
KBC11- H114	P2_1	2.13E+03	2.18E-02	3.81E+01	6.76E-01	2.74E-01	3.99E-01	2.27E-01
П114	P2_2	3.64E+03	2.81E-01	1.00E+03	2.85E-01	2.36E-01	3.15E-01	2.37E-01
KBC11-	P2_1	2.91E+03	-	-	-	6.00E-01	5.68E-02	3.66E-01
H122	P2_2	3.14E+03	3.76E-01	2.86E+00	1.99E-01	1.50E-01	8.00E+01	1.92E-01
KBC12- R64-S88	P1	3.03E+03	6.59E-01	4.92E+04	1.59E-01	-	-	-
KBC12- \$98	P2	1.69E+03	-	-	-	3.01E-01	3.47E-02	3.87E-01
	P1	3.29E+03	-	-	-	3.01E-01	4.92E-02	3.18E-01
KBC12- \$161	P2_1	2.91E+03	-	-	-	m2           1.05E-01           1.35E-01           3.72E-01           -           6.37E-02           -           3.58E-01           3.03E-01           6.35E-01           3.03E-01           6.21E-01           6.30E-01           6.21E-01           6.00E-01           1.50E-01           3.01E-01           3.01E-01           3.01E-01           3.51E-01           3.16E-01           3.16E-01           3.16E-01           3.16E-01           3.16E-01           1.95E-01           1.95E-01           1.95E-01           1.95E-01           1.95E-01           1.95E-01	4.27E-01	3.01E-01
5101	P2_2	3.62E+03	-	-	-		1.54E-02	2.80E-01
KBCB61-	P1	1.56E+03	2.06E-02	1.55E+02	5.93E-01	1.75E-01	1.47E-02	3.19E-01
<b>S</b> 87	P2_1	4.71E+03	7.26E-02	9.07E+01	6.20E-01	3.51E-01	2.90E-05	1.96E-01
KBCB61-	P2_1	2.54E+03	-	-	-	5.79E-01	5.14E-02	3.76E-01
131m	P2_2	4.56E+03	-	-	-	2.85E-01	8.86E-02	3.53E-01
KBCB61-	P1	1.70E+03	6.22E-02	2.34E+01	5.44E-01	3.16E-01	4.47E-02	3.73E-01
S157-B32- 166m	P2	2.35E+03	-	-	.36E+00       2.24E-01       -       -         .98E+02       3.75E-01       3.58E-01       1.61E+00         -       -       3.03E-01       2.21E-00         -       -       6.85E-01       3.17E-00         -       -       6.21E-01       3.18E-00         3.00E+00       2.99E-01       -       -         3.81E+01       6.76E-01       2.74E-01       3.99E-0         .00E+03       2.85E-01       2.36E-01       3.15E-0         -       -       6.00E-01       5.68E-0         .00E+03       2.85E-01       1.50E-01       8.00E+0         .86E+00       1.99E-01       1.50E-01       8.00E+0         .92E+04       1.59E-01       -       -         -       -       3.01E-01       3.47E-0         -       -       3.01E-01       4.92E-0         -       -       2.63E-01       1.54E-0         .55E+02       5.93E-01       1.75E-01       1.47E-0         0.07E+01       6.20E-01       3.51E-01       2.90E-0         -       -       2.85E-01       8.86E-0         2.34E+01       5.44E-01       3.16E-01       4.47E-0         - </td <td>3.62E-02</td> <td>3.03E-01</td>	3.62E-02	3.03E-01	
166m	P1	4.62E+02	5.00E-01	1.14E+02	5.02E-01	3.12E-01	3.59E-01	2.35E-01
KBC13-	P2_1	4.51E+02	6.53E-01	1.28E+02	4.24E-01	1.95E-01	1.02E-02	3.65E-01
R47-S103	P2_2	7.20E+02	7.43E-01	1.02E+03	2.84E-01	1.21E-01	3.07E-03	2.98E-01
	P2_3	2.34E+03	5.24E-01	1.94E+03	4.19E-01	2.63E-01	3.39E-02	1.93E-01
KBC13-	P2_1	2.92E+03	7.93E-02	1.68E+01	3.37E-01	7.64E-02	1.12E-03	3.35E-01
KBC13- S97	P2_2	4.47E+03	3.15E-02	1.34E+03	4.33E-01	1.60E-01	4.13E-03	2.60E-01

جدول ۴-۱: نتایج مدلسازی کل-کل و کل-کل تعمیمیافته نمونههای کانسار کرویان

مقادیر بازیابیشده برای پارامترهای واهلش مدلهای کل-کل و کل-کل تعمیم یافته دوجزئی در شکل ۴-۲و شکل ۴-۸ بهصورت شماتیک نشان داده شده است.









نتیجه برازش مدل واهلش تجزیه دبای به طیف رسانندگی مختلط اندازه گیری شده بر روی نمونههای سنگی مربوط به نمونههای (KBC13-R47-S103(P2\_1) و KBB21-S30-B9(P1) به ترتیب در شکل ۲-۱۰-۴ و شکل ۴-۱۱نشان داده شدهاند. در قسمت پائین هر یک از این شکلها نمودار میلهای

بارپذیری در مقابل لگاریتم ثابت زمانی هر یک از اجزای دبای نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰: برازش مدل تجزیه دبای به دادههای SIP مربوط به نمونه (P2\_1)KBC13-R47-S103

دو پیک مرتبط با اثر قطبش القایی ناشی از حضور دو نوع کانی پیریت درشتبلور و ریزبلور در این دو نمونه بر روی مؤلفههای موهومی و زاویه فاز طیف رسانندگی مختلط به درستی بازسازی و مدلسازی

شده است.



شکل ۴-۱۱: برازش مدل تجزیه دبای به دادههای SIP مربوط به نمونه (P1)KBB21-S30-B9

همچنین فیلتر اعمال شده در این تصاویر که با رنگ سبز نشان داده شده است، امکان حذف اثر داده-های مرتبط با فرکانسهای پائین و بالا را که ممکن است تحت تأثیر خطا قرار گرفته باشند، فراهم کرده است؛ که این موضوع بویژه برای حذف اثرات جفت شدگی الکترومغناطیسی که ممکن است در فرکانس های بالا اتفاق بیافتد، اهمیت بیشتری دارد. البته مدل تجزیه دبای، صرفاً به لحاظ مدل سازی ریاضی برازش مناسبی به داده ها را فراهم می نماید و پارامترهای این مدل در حال حاضر تفسیر فیزیکی مشخصی را فراهم نمی سازند.

جدول ۴-۲: نتایج مدلسازی GEMTIP کروی سهجزئی مربوط به نمونههای (P2\_1)KBC13-R47-S103(P2\_1 و KBB21-S30-B9(P1).

			Coarse-grained pyrite				Fine-grained pyrite			
Sample		Rho <sub>0</sub>	$\mathbf{f}_1$	<b>m</b> <sub>1</sub>	tau <sub>1</sub>	<b>c</b> <sub>1</sub>	$\mathbf{f}_2$	<b>m</b> <sub>2</sub>	tau <sub>2</sub>	<b>c</b> <sub>2</sub>
KBC13-	P2_1	2.28e3	6.33e-	6.33	8.195e-04	0.332	0.446	4.46	9.015	0.38
R47-S103			01							
KBB21-	P1	2.878e3	0.685	19.86	1.757e-12	0.105	0.195	5.65	2.41e-03	0.702
S30-B9										

#### MLA -۲-۱-۴ مطالعات

برای کمک به تفسیر بهتر نتایج مطالعات SIP، تعدادی از نمونهها، با استفاده از روش MLA مورد مطالعه قرار گرفتند. این روش با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونهها، امکان تولید تصاویر الکترون برگشتی<sup>۱</sup> (BSE) و طیفسنجی پراشه اشعه ایکس<sup>۲</sup> (EDS) ذرات قابل رؤیت در تصویر BSE را فراهم نموده است. با استفاده از این روش می *ت*وان به اطلاعات مفیدی از ترکیب شیمیایی، کانیشناسی، اندازه کانیها و ... مربوط به مقاطع نازک صیقلی دست یافت. برای انجام این روش، ابتدا مقاطع نازک صیقلی از تعدادی از نمونههای مغزههای حفاری در جهات مختلف، تهیه شد و پس از انجام آنالیز MLA با استفاده از نرمافزارهای مختلف مانند Dataview و مختلف، تهیه شد و پس از انجام آنالیز MLA با استفاده از نرمافزارهای مختلف مانند BSE و MATLAB ترکیب کانیشناسی و اندازهی کانیها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتیجه آزمایشهای MLA بر روی نمونههای (1\_293) و KBC13-R47-S103) و (RES1-S30-B9) و در می است، در شکل ۴-۱۲ و شکل ۴-۱۳ نشان داده شدهاند. همان گونه که در شکل ۴-۱۳نشان داده شده است،

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Backscattered Electron Image

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Dispersive X-ray-Spectra (EDS)



شكل ۴-١٢: تصوير MLA از نمونه (P2\_1) MLA شكل ۴



شكل ۴-۱۳: تصوير MLA از نمونه (P1)KBB21-S30-B9.

همچنین با توجه به جدول ۴-۳ و شکل ۴-۱۴کانی اصلی قطبش پذیر در نمونههای سنگی پیریت می-باشد و بقیه کانیهای قطبش پذیر فراوانی بسیار کمی دارند؛ که عملاً تأثیری بر نتایج مطالعات SIP نخواهند داشت. پس با توجه به فراوانی کانی پیریت، طیف SIP ایجاد شده تنها مرتبط با تأثیر این کانی قطبش پذیر میباشد. از طرف دیگر از آنجا که مطالعات قبلی نشان داده است، دو نوع کانی پیریت عقیم (درشت بلور) و بارور (ریز بلور) در منطقه وجود دارد.

		· - / C /		. 07 .	
Mineral	KBC13-R47-	KBB21-S30-	KBC13-R47-	KBB21-S30-	
	S103(P2_1)-	<b>B9(P1)-</b>	S103(P2_1)-	<b>B9(P1)- Area%</b>	
	Wt%	Wt%	Area%		
Quartz	1.25	0.11	1.29	0.11	
Albite	44.05	68.43	45.65	70.90	
Orthoclase	24.03	9.41	25.48	9.98	
<b>Orthoclase_Ba</b>	12.04	8.88	12.77	9.42	
Muscovite	8.57	0.05	8.23	0.05	
Ilmenite	0.01	0.00	0.00	0.00	
Pyrite	6.37	7.63	3.45	4.13	
Rutile	0.68	0.04	0.44	0.02	
Calcite	0.18	4.73	0.18	4.74	
Ankerite	2.40	0.55	2.14	0.49	
Apatite	0.41	0.16	0.35	0.13	
Monazite-(La)	0.01	0.00	0.00	0.00	
Native_Gold	0.00	0.00	0.00	0.00	
Electrum	0.00	0.00	0.00	0.00	
holder	0.00	0.00	0.00	0.00	
Unknown	0.00	0.00	0.00	0.00	
Low_Counts	0.00	0.00	0.01	0.00	
No_XRay	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	

جدول ۴-۳: جدول فراوانی کانی های نمونه های (R47-S103(P2\_1) و KBC13-R47-S103(P2\_1) و KBB21-S30-B9(P1).

برای بررسی این موضوع علاوه بر استفاده از نمودار فراوانی تجمعی کانیهای پیریت (شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶)، از روش فرکتال نیز برای تعیین تعداد جوامع آماری مرتبط با اندازه کانیهای پیریت آشکار شده با روش MLA، استفاده شده است؛ که نتایج آن در شکل ۴-۱۷و شکل ۴-۱۸ نشان داده شدهاند. با توجه به این اشکال، در نمونه (1\_KBC13-R47-S103(P2، حیداقل دو جامعه آماری با اختلاف بعد فرکتال قابل توجه شناسائی شد. همچنین در نمونه (18)KB21-S30-B9، دو جامعه آماری متفاوت با بعد فرکتال متفاوت از هم تفکیک شدهاند. لذا از مقایسه نتایج بدست آمده با استفاده (KBB21-S30-B9(P1) و KBC13-R47-S103(P2\_1) و KBC13-R47-S103(P2\_1) مشخص می شود که دو نوع کانی پیریت درشت بلور (عقیم) و ریزبلور (بارور) با استفاده از روش SIP با موفقیت از هم تفکیک شدهاند؛ به گونه ای که دو پیک متفاوت با پارامترهای واهلش مختلف را بر روی طیفهای رسانندگی مختلط ایجاد نمودهاند (شکل ۴-۶ و جدول ۴-۱).

![](_page_137_Figure_1.jpeg)

شکل ۴-۴۱: فراوانی کانیهای نمونههای (MBC13-R47-S103(P2\_1) (سمت چپ) و (B9(P1)) (MBC13-R47-S103(P2)) (سمت راست) که با استفاده از روش MLA تعیین شده است.

![](_page_138_Figure_0.jpeg)

شکل ۴-۱۵: نمودار فراوانی تجمعی توزیع اندازه دانههای کانی پیریت در نمونه (P2\_1)KBC13-R47-S103

![](_page_138_Figure_2.jpeg)

شکل ۴-۱۶: نمودار فراوانی تجمعی توزیع اندازه دانههای کانی پیریت در نمونه (P1)KBB21-S30-B9

![](_page_139_Figure_0.jpeg)

شکل ۴-۱۷: نمودار آنالیز فرکتال اندازه دانههای کانی پیریت در نمونه (P2\_1)KBC13-R47-S103

![](_page_139_Figure_2.jpeg)

### ۲-۴- نتایج مدلسازی دادههای الکترومغناطیس در منطقه مورد مطالعه

برداشت دادههای HEM و مغناطیس هوابرد در منطقه آلوت، در سال ۱۳۸۳ با استفاده از سیستم DIGHEM و توسط شرکت FUGRO با فواصل خطوط پرواز ۲۰۰ متر، فواصل نقاط برداشت ۲٫۴ متر و ارتفاع اسمی سنسور ۳۰ متر انجام شده است.

برای مدلسازی دادههای الکترومغناطیس هوابرد، با توجه به این که خطوط پرواز تقریباً به موازات امتداد لایههای زمینشناسی در منطقه برداشت شدهاند (شکل ۴-۱۹) و نیز با توجه به شیبدار بودن لایهها (جهت شیب به سمت جنوب شرق (شکل ۱-۴)، استفاده از یک مدل لایهای قابل توجیه خواهد بود.

![](_page_140_Figure_3.jpeg)

شکل ۴-۱۹: موقعیت خطوط پرواز برداشت الکترومغناطیس هوابرد در منطقه کرویان. در این شکل اعداد ۱، ۲، ۳، ۶، ۷و ۹ به ترتیب نشاندهنده دولومیت و زمینهای کشاورزی، تراورتن، سنگ آهکی دگرگونشده، فیلیت و گرانیت میلونیتی، کلریت شیست و زون برشی کانیسازی شده هستند؛ که این ارزشهای عددی بر مبنای جدول ۴-۸ به هر یک از واحدهای لیتولوژی نسبت داده شدهاند.

برای این منظور یک مدل زمین سه لایه مطابق مدل مصنوعی (شکل ۲-۳۸) شامل لایه های روباره،

آنومال و سنگ بستر در نظر گرفته شد و دادههای الکترومغناطیس هوابرد برداشتشده با استفاده از پیچه هم صفحه افقی DIGHEM، با هیبرید الگوریتمهای شبیه سازی تبرید خیلی سریع و مارکوارت-لونبرگ (VFSA-ML) مدل سازی گردید؛ که برای مدل سازی دادهها و بازیابی پارامترهای مدل با استفاده از این الگوریتم، مدل اولیه پارامترها به صورت زیر انتخاب شد. برای تولید مدل اولیه مربوط به پارامتر تراوائی مغناطیسی، دادههای مغناطیسی هوابرد منطقه با استفاده از نرم افزار UBC Mag3D مدل سازی شد (شکل ۴-۲۰) و خود پذیری مغناطیسی مدل سازی-

شده با استفاده از رابطه (۴-۱) به تراوائی مغناطیسی تبدیل گردید ( Lelievre and Oldenburg, ) 2006).

 $\mu = \mu_0(1 + \chi)$  (۱-۴) که در آن  $\mu$  تراوائی مغناطیسی،  $\mu$  تراوائی مغناطیسی هوا و  $\chi$  خودپذیری مغناطیسی محاسبه شده با استفاده از نرمافزار Mag3D می باشد. در شکل ۴-۲۰ مدل سه بعدی خودپذیری مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به این که در منطقه مورد مطالعه آنومالی مغناطیسی وجود ندارد، حداکثر مقدار خودپذیری

بازیابی شده از دادهها ۰٫۰۵۶۲ است.

![](_page_141_Picture_3.jpeg)

شکل ۴-۲۰: مدل سهبعدی خودپذیری در منطقه مورد مطالعه

برای تعیین مدل اولیه تراوائی مغناطیسی در محل هر سونداژ الکترومغناطیس، میانگین کل مقادیر تراوائی مغناطیسی در سلولهای اطراف آن سونداژ در نظر گرفته شد؛ که نتایج آن در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است.

![](_page_142_Figure_1.jpeg)

شکل ۴-۲۱: نقشه میانگین تراوائی مغناطیسی در منطقه مورد مطالعه

برای تهیه مدل اولیه سایر پارامترها، بر اساس استراتژی الگوریتم VFSA-ML، از الگوریتم VFSA استفاده شد.

با توجه به استفاده از مدل کل-کل برای بازیابی پارامترهای واهلش مرتبط با اثر IP از دادههای HEM، دامنه تغییرات پارامترهای ثابت زمانی و بارپذیری در بازه (۱، ۰) تنظیم گردید. همچنین با توجه به دامنه فرکانس عملیاتی در روش HEM، تأثیر منابع قطبش پذیر با اندازه درشت عملاً حذف شده و فقط منابع قطبش پذیر ریزدانه بر دادههای برداشت شده تأثیر می گذارند. زیرا اثر قطبش القایی کانیهای پیریت با اندازه درشت، به تناسب اندازه آنها، در فرکانسهای پائین تر ظاهر می گردد.

نتایج مدلسازی این الگوریتم در محل هر یک از سونداژها با استفاده از نرمافزار Oasis Montaj به-صورت نقشه در آمده است. نقشه پارامترهای تراوائی مغناطیسی، مقاومتویژه، بارپذیری، ثابت زمانی و وابسته فرکانسی بازیابی شده به ترتیب در شکل ۴-۲۲ تا شکل ۴-۲۶ نشان داده شدهاند.

![](_page_143_Figure_1.jpeg)

شکل ۴-۲۲: نقشه تراوائی مغناطیسی بازیابی شده با استفاده از الگوریتم VFSA-ML برای لایه دوم مدل لایهای در منطقه مورد مطالعه

مقایسه بین شکل ۴-۲۱ و شکل ۴-۲۲ نشان میدهد که پارامتر خودپذیری مغناطیسی بازیابی شده با استفاده از داده های الکترومغناطیسی با نتیجه مدل سازی داده های مغناطیسی تطابق بسیار خوبی دارد.

همچنین نقشههای مقاومتویژه و بارپذیری الکتریکی بازیابی شده از داده های الکترومغناطیسی در منطقه نشان میدهد که محل کانیزائی طلای مرتبط با زون سولفیدی قطبش پذیر، با مقاومتویژه متوسط (۵۰۰ –۵۰۰۰ اهم متر) و قطبش پذیری متوسط (۳,۰ تا ۰٫۵) مشخص می گردد. با توجه به این که پارامتر ثابت زمانی وابسته به اندازه کانی های قطبش پذیر می باشد و اثر کانی های
درشت بلور در فرکانسهای پائین ظاهر می گردد، لذا نقش کانیهای پیریت درشت بلور بر روی اثرات اP IP قابل اندازه گیری با روش HEM در منطقه مورد مطالعه عملاً حذف شده و در نقشه شکل ۲۵-۲۵ پارامتر ثابت زمانی مربوط به کانیهای قطبش پذیر ریزدانه به تصویر در آمده است؛ که مقدار آن بین ۱ تا ۲٫۷ ثانیه در تغییر است. نقشه مربوط به پارامتر وابسته فرکانسی (شکل ۴-۲۶) نیز که بیانگر شدت کانیزائی و یا ناهمگنی سنگهای قطبش پذیر است نشان میدهد که مقدار آن در دامنه ۰ تا نزدیک ۲٫۷ در تغییر است؛ که انطباق بالائی با نتایج مدل سازی دادههای SIP آزمایشگاهی (جدول ۴-۱) دارد.

در محل کانسار کرویان، همچنین سه پروفیل ( با اسامی IP-Res. (KTA, KTB, KTC با استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی- دوقطبی با فواصل الکترودی ۳۰ متر و تعداد گامهای ۱ تا ۸ با استفاده از دستگاه ABEM SAS4000 برداشت شد. لازم به ذکر است که پروفیلهای مقاومتویژه و IP بر روی ترانشههای حفرشده بر روی محل آنومالی طلا در کانسار کرویان برداشت گردیدهاند. محل پروفیل Thims بر روی نقشههای مقاومتویژه (شکل ۴-۲۲) و بارپذیری (شکل ۴-۲۵) هوابرد نشان داده شده است. نتایج مدلسازی مربوط به آن نیز در شکل ۴-۶۹ نشان داده شده است. محل ناهنجاری بارپذیری الکتریکی در وسط این نقشه با رنگ بنفش مشخص شده است. مقایسه نظیر به نظیر مقاومتویژه و بارپذیری بازیابی شده از دادههای هوابرد با مقاطع مقاومتویژه و بارپذیری برداشت زمینی نشان میدهد که انطباق قابل توجهی بین آنها وجود دارد.



شکل ۴-۲۳: نقشه دوبعدی (شکل بالا) و سهبعدی (شکل پائین) لگاریتم نمائی مقاومتویژه بازیابی شده با استفاده از الگوریتم VFSA-ML برای لایه دوم در منطقه مورد مطالعه



شکل ۴-۲۴: نقشه بارپذیری بازیابی شده با استفاده از الگوریتم VFSA-ML برای لایه دوم در منطقه مورد مطالعه



شکل ۴-۲۵: نقشه ثابت زمانی بازیابی شده با استفاده از الگوریتم VFSA-ML برای لایه دوم در منطقه مورد مطالعه



شکل ۴-۲۶: نقشه وابسته فرکانسی بازیابی شده با استفاده از الگوریتم VFSA-ML برای لایه دوم در منطقه مورد مطالعه

۴-۳- نتایج مطالعات ژئوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه

دادههای ژئوشیمی مربوط به ۲۱۸ نمونه سنگ برداشتشده در منطقه کرویان بر روی شبکه ۱۰۰ متری با روش ICP-OES در آزمایشگاه ALS استرالیا انجام شده است. موقعیت نقاط نمونهبرداری بر روی شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای آماری هر یک از عناصر ژئوشیمی در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

در طول فرآیند پردازش این دادهها، عناصر U ،La ،Be ،Cd ،Bi ،Ag و W، بهدلیل بالا بودن درصد مقادیر سنسورد، حذف شدند.

			<u> </u>		<u>,,, ,, ,, ,, ,, ,, ,, ,, ,, ,, ,, ,, ,,</u>		- , ,,		
Element	Max.	Min.	Mean	Med.	Mode	Var.	St.d.	Sk.	Kurt.
Au (ppb)	4500	1.00	62.08	2.50	1.00	141138.5	375.7	9.52	100.2
Ag (ppm)	5.60	0.15	0.20	0.15	0.15	0.15	0.39	12.90	178.4
Al (%)	3.93	0.01	0.80	0.56	0.01	0.59	0.77	1.37	1.71
As (ppm)	2550	1.50	32.68	4.00	1.50	33185	182.2	12.43	168.8
Ba (ppm)	940	7.50	42.36	30.00	7.50	5255	72.49	9.24	108.8
Be (ppm)	2.50	0.38	0.40	0.38	0.38	0.04	0.19	9.25	91.04
Bi (ppm)	16.00	1.50	1.93	1.50	1.50	2.83	1.68	5.66	37.09
Ca (%)	20.00	0.05	4.84	0.50	20.00	57.30	7.57	1.38	0.10
Cd (ppm)	10.00	0.38	0.45	0.38	0.38	0.46	0.68	13.22	185.2
Co (ppm)	61.00	0.75	9.69	7.00	0.75	89.03	9.44	1.86	4.99
Cr (ppm)	135.00	0.75	14.27	7.50	0.75	374.19	19.34	3.00	12.03
Cu (ppm)	150.00	0.75	17.27	12.00	5.00	408.75	20.22	3.86	20.24
Fe (%)	15.00	0.04	2.78	2.51	0.11	5.02	2.24	1.80	6.84
Hg (ppm)	170.00	7.50	15.56	10.00	10.00	326.95	18.08	5.03	32.44
K (%)	0.66	0.01	0.13	0.10	0.01	0.01	0.12	1.62	3.45
La (ppm)	30.00	7.50	8.50	7.50	7.50	7.92	2.81	5.38	34.21
Mg (%)	6.68	0.01	0.77	0.41	0.03	1.08	1.04	2.88	10.44
<b>Mn</b> (ppm)	1745	20.0	480.2	395	195.0	115951.5	340.5	0.83	0.46
Mo(ppm)	5.00	0.75	1.03	0.75	0.75	0.43	0.65	3.13	10.40
Na (%)	0.07	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	1.44	1.46
Ni (ppm)	83.00	0.75	19.00	13.00	1.00	340.60	18.46	1.36	1.22
<b>P</b> (ppm)	3090	7.50	571	520	7.50	196779	443.6	1.53	4.94
Pb (ppm)	166.00	1.54	10.90	8.00	1.54	303.06	17.41	5.98	44.27
Sc (ppm)	1.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.07	10.99	140.3
Sr (ppm)	10.00	1.50	2.03	1.50	1.50	2.31	1.52	3.65	13.43
Ti (ppm)	13.00	0.75	2.24	1.00	0.75	4.18	2.04	2.17	5.54
U (ppm)	990	1.00	113.5	19.00	8.00	36343	190.6	2.25	4.88
V (ppm)	0.15	0.01	0.03	0.01	0.01	0.00	0.03	1.86	2.73
W (ppm)	10.00	7.50	7.60	7.50	7.50	0.25	0.50	4.64	19.74
<b>Zn</b> (ppm)	144.00	0.75	18.54	10.00	1.00	556.68	23.59	2.42	6.76

جدول ۴-۴: پارامترهای آماری عناصر ژئوشیمی مربوط به ۲۱۸ نمونه برداشتشده در محدوده کانسار کرویان

در مرحله بعد، از روش چندمتغیره و فواصل ماهالانوبیس برای بررسی وضعیت مقادیر خارج از ردیف استفاده گردید؛ که نتایج آن در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است. در این شکل دو روش شناسائی مقادیر خارج از ردیف ارائه شده است. در شکل سمت چپ که بر مبنای روش آنالیز مؤلفه های اصلی مقاوم داده های تبدیل یافته با استفاده از روش لگاریتم ریشه ای رسم شده است، نمونه های خارج از ردیف نشان داده شده اند. همچنین در شکل سمت راست که فواصل ماهالانوبیس را در مقابل فواصل مقاوم نشان می دهد، نمونه های قرار گرفته در ربع دوم دستگاه مختصات دارای مقادیر خارج از ردیف مقاوم نشان می دهد، نمونه های قرار گرفته در ربع دوم دستگاه مختصات دارای مقادیر خارج از ردیف استند. بنابراین با توجه به حضور تعداد قابل توجهی مقادیر خارج از ردیف در داده ها از روش آنای می دهد، نمونه های قرار گرفته در ربع دوم دستگاه مختصات دارای مقادیر خارج از ردیف مستند. بنابراین با توجه به حضور تعداد قابل توجهی مقادیر خارج از ردیف در داده های ژئوشیمی، استفاده از روش آنالیز مؤلفه های اصلی بر روی دو حالت داده های بسته (تبدیل نیافته) و تبدیل یافته با استفاده از روش آنالیز مؤلفه های اصلی بر ای آشکارسازی مؤلفه های اصلی پنهان در ساختار داده ها، در استفاده از روش آنای را گرفت.



شکل ۴-۲۷: نتیجه آزمایش مقادیر خارج از ردیف چند متغیره دادههای ژئوشیمی کانسار کرویان بر مبنای روش آنالیز مؤلفههای اصلی مقاوم دادههای تبدیلیافته با استفاده از روش لگاریتم ریشهای (سمت چپ) و فواصل ماهالانوبیس را در مقابل فواصل مقاوم (راست).

نتایج آنالیز مؤلفههای اصلی مقاوم بر روی دادههای بسته در شکل ۴-۲۸ ارائه شده است. با توجه به این شکل، بر مبنای معیار کیزر <sup>۱</sup> مؤلفههای اصلی PC1 تا PC5 که مقادیر ویژه آنها بیشتر از ۱ است معنیدار تشخیص داده شدهاند. این پنج مؤلفه ۷۵٫۶ درصد از کل تغییرات اصلی دادههای ژئوشیمی را توجیه مینمایند (جدول ۴-۵). شکل سمت چپ نیز پلات دونموداره مؤلفههای PC1 و PC2 را نشان

<sup>1</sup> Kaiser

میدهد؛ که با توجه به آن طلا همبستگی نزدیکی را با عنصر سرب نشان میدهد. اما با توجه به شواهد زمین شناسی و کانی شناسی منطقه این موضوع صحیح نیست. همچنین همان گونه که در جدول ۴-۵ مشاهده می شود، عنصر طلا در مؤلفه PC5 ظاهر شده و همبستگی منفی نسبتاً ضعیفی با عناصر جیوه، پتاسیم، آنتیموان و تیتانیوم و همبستگی مثبت ضعیفی با عنصر مولیبدن نشان داده است؛ که با توجه به شواهد کانی شناسی و تیپ کانی سازی، این موضوع نیز صحیح نیست. نقشه مؤلفه PC5 در شکل ۴-۳۰ به نمایش در آمده است.



شکل ۴-۲۸: نمایش دوبعدی بارهای فاکتوری PC1 و PC2 (سمت چپ) و نمودار صخرهای (سمت راست) مؤلفه-های اصلی مقاوم دادههای ژئوشیمی بسته کانسار کرویان

با توجه به شکل ۴-۲۹ که در آن مؤلفههای PC2، PC1 و PC5 به صورت سه بعدی نشان داده شده اند، طلا با عناصر سرب و مولیبدن همبستگی نشان داده است. برای تعیین ضرایب هر یک از این عناصر، از رابطه (۴-۲) استفاده شده و سپس مؤلفه جدید تحت عنوان CPC ساخته شد؛ که نقشه آن در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است.

$$CPC = \sqrt{PC_1^2 + PC_2^2 + PC_5^2} \tag{(7-f)}$$



همان گونه که قبلاً بیان شد، با توجه به شواهد کانی شناسی، طلا همراه با پیریت و کوار تز شکل گرفته است؛ که این شواهد در نتایج آنالیز PCA مقاوم داده های بسته مشاهد نمی شود. لذا استفاده از روش PCA مقاوم بر روی داده های تبدیل یافته نیز مورد توجه قرار گرفت. با توجه به نمودار صخره ای در شکل ۴-۳۲ و بر مبنای معیار کیزر تعداد پنج مؤلفه اصلی معنی دار برای این روش شناسایی شد؛ که در مجموع ۹۹٫۶ درصد از واریانس کل داده ها را توجیه می نمایند (جدول ۴-۶). با توجه به جدول ۹-۶، کانی زائی طلا در دو مؤلفه PC1 و PC4 آشکار شده است. پلات دوبعدی PC1-PC2 و نمودار های سه بعدی PC1-PC2-PC3 و PC4 آشکار شده است. پلات دوبعدی PC1-PC2 و ۱۹-۳۲ و شکل ۴-۳۳ ترسیم شده اند. نمودار PC1-PC2 با استفاده از نتایج این جدول در شکل گوگرد و آنتیموان همبستگی دارد؛ که این موضوع می تواند بیانگر کانه زائی طلا در زون سولفیدی همراه با پیریت باشد. همچنین نمودار PC1-PC2-PC4 در شکل ۴-۳۳ عنصر طلا را به تنهائی نشان میدهد؛ که هیچگونه همبستگی با سایر عنصر ندارد. با توجه به این که عنصر سیلیس در دادهها وجود ندارد، احتمالاً این موضوع در ارتباط با کانیزائی طلا همراه با کوارتز باشد؛ که با شواهد کانیشناسی هماهنگی خوبی نشان میدهد.

-			-	-	-
Element	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Au	0.04	0.15	-0.07	-0.20	0.52
Al	-0.30	0.05	0.01	-0.09	0.06
As	0.09	-0.10	-0.40	-0.36	-0.09
Ba	0.22	0.21	0.18	-0.06	-0.16
Ca	0.16	0.36	-0.25	0.03	-0.04
Со	0.28	-0.14	-0.02	-0.01	0.14
Cr	-0.25	0.18	0.13	-0.19	0.04
Cu	-0.24	0.09	0.07	0.09	-0.07
Fe	-0.28	0.02	-0.08	0.15	-0.17
Hg	0.01	-0.04	0.12	-0.58	-0.35
Κ	0.24	0.18	0.08	-0.02	-0.34
Mg	-0.01	0.43	-0.23	-0.16	0.02
Mn	-0.24	0.04	-0.09	0.18	-0.20
Мо	-0.01	0.18	0.29	-0.32	0.27
Na	0.14	0.33	0.24	-0.13	-0.02
Ni	-0.24	0.25	0.18	0.00	-0.10
Р	-0.28	-0.01	-0.13	-0.01	0.01
Pb	0.02	0.13	0.42	0.18	0.14
S	-0.19	-0.17	0.23	-0.20	0.12
Sb	-0.11	-0.20	0.00	-0.27	-0.37
Sc	0.24	-0.15	0.18	-0.08	0.05
Sr	-0.13	-0.38	0.29	-0.12	0.07
Ti	0.16	0.08	0.31	0.21	-0.32
$\mathbf{V}$	-0.26	0.22	-0.01	-0.14	-0.03
Zn	-0.27	0.07	0.06	0.12	0.01
Variance (%)	41.7	13.9	9.2	6.7	4.1

جدول ۴-۵: نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفههای اصلی مقاوم بر روی دادههای ژئوشیمی بسته



شکل ۴-۳۰: نقشه مؤلفه اصلی PC5 بر اساس نتایج



شكل PC3 ،PC1 نقشه مؤلفه اصلى PC3 ، PC1 و PC5 بر اساس نتايج جدول A-۴ (CPC = 0.46Au + 0.16Mo + 0.45Pb).



شکل ۴-۳۲: نمایش دوبعدی بارهای فاکتوری PC1 و PC2 (سمت چپ) و نمودار صخرهای (سمت راست) مؤلفههای اصلی مقاوم دادههای ژئوشیمی تبدیلیافته کانسار کرویان.

تبديليافته	دادەھاي ژئوشيمى	مقاوم بر روی	های اصلی	حليل مؤلفه	نجزیه و تح	۶: نتايج ز	جدول ۴-

Element	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Au	0.46	-0.05	0.01	0.85	-0.06
Al	-0.18	-0.15	-0.05	0.00	-0.12
As	0.28	0.17	-0.51	-0.13	0.56
Ba	0.11	-0.29	0.17	-0.07	0.03
Ca	-0.16	0.64	0.35	0.07	0.08
Со	-0.14	-0.02	-0.14	0.08	0.06
Cr	-0.27	-0.13	-0.26	0.04	-0.21
Cu	-0.04	-0.04	-0.13	-0.04	0.37
Fe	-0.05	-0.03	-0.04	0.00	-0.01
Hg	0.17	-0.01	0.04	-0.12	0.02
Κ	0.14	-0.21	0.21	-0.24	-0.06
Mg	-0.39	-0.06	-0.02	0.12	-0.05
Mn	0.01	0.10	0.00	-0.03	0.01
Mo	0.15	-0.02	0.07	-0.13	-0.06
Na	0.20	-0.14	0.26	-0.11	-0.01
Ni	-0.14	0.06	-0.36	0.01	-0.11
Р	-0.05	-0.08	0.11	0.00	-0.09
Pb	0.31	0.23	-0.22	-0.24	-0.54
S	0.13	0.00	0.07	-0.12	-0.04
Sb	0.14	0.00	0.07	-0.14	-0.06
Sc	-0.14	-0.02	0.03	0.06	-0.05
Sr	-0.11	0.46	0.20	0.03	0.05
Ti	-0.11	-0.25	0.32	-0.02	0.37
V	-0.30	-0.11	-0.10	0.15	-0.07
Zn	-0.02	-0.03	-0.09	-0.01	-0.02
Variance (%)	27.2	19.2	16.7	11.1	5.4



شکل ۴-۳۳: نمایش سهبعدی بارهای فاکتوری PC1، PC2 و PC3 (سمت چپ) و PC1 و PC4 و PC4 (سمت راست) بدست آمده از تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی مقاوم داده های ژئوشیمی تبدیل یافته کانسار کرویان.

نقشههای PC1 و PC4 و نیز نقشه ترکیبیPC1-PC2-PC3 در شکل ۴-۳۳ تا شکل ۴-۳۳ نشان داده شده است. با توجه به حضور عناصر سنگساز مانند منیزیم در مؤلفه PC1 ، که عیار آن نسبت به طلا خیلی بالاتر است، آنومالی احتمالی طلا توسط این عناصر پوشانده شده و قابل تشخیص نیست. اما با توجه به نمودار سهبعدی PC1-PC2-PC3، اثر دو عنصر منیزیم و وانادیم حذف شده و در نتیجه آنومالی طلا به همراه عناصر جیوه، مولیبدن، گوگرد و آنتیموان که با آن همبستگی دارند و بر اساس شواهد کانیشناسی قابل توجیه است. در شکل ۴-۳۲ به نمایش در آمده است. میار در نتیجه عناصر در نقشه مراه عناصر جیوه، مولیبدن، گوگرد و آنتیموان که با آن همبستگی دارند و بر اساس مواهد کانیشناسی قابل توجیه است، در شکل ۴-۳۶ به نمایش در آمده است. ضرایب هر یک از عناصر در نقشه کاری در استان در نقشه مراه عناصر میاری در شکل ۴-۶۶ به نمایش در آمده است. محالیب عناصر در عناصر در نقشه مراه قرار گرفته، محاسبه شده است.



PC1 = 0.46Au ) ۶-۴ نقشه مؤلفه اصلی PC1 دادههای ژئوشیمی تبدیل یافته بر اساس نتایج جدول ۶-۴ ( PC1 = 0.46Au ) ۰۶-۴ نقشه مؤلفه اصلی PC1 + 0.28As - 0.39Mg + 0.31Pb - 0.30V



۳۵-۴ شکل ۴-۳۵: نقشه مؤلفه اصلی PC4 دادههای ژئوشیمی تبدیلیافته بر اساس نتایج جدول ۴-۶ ( = PC4 = ) ۹-۴ ( شکل ۴-۵ (0.85Au).



شکل ۴-۳۶: نقشه مؤلفههای اصلی PC2 ،PC1 و PC3 دادههای ژئوشیمی تبدیلیافته بر اساس نتایج جدول ۴-۶ شکل PC2 ،PC1 نقشه مؤلفههای اصلی CPC = 0.46Au + 0.17Hg + 0.16Mo + 0.15S + 0.15Sb

## F-۴- تلفیق لایههای اطلاعات اکتشافی در محیط GIS

برای تلفیق لایههای اکتشافی بهمنظور تهیه نقشه پتانسیل مطلوب کانیزائی طلا در منطقه کرویان، از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در محیط GIS استفاده شد. برای این منظ ور اهمیت نقشههای زمینشناسی، گسلها، ژئوشیمی (شکل ۴-۳۵و شکل ۴-۳۶) و ژئوفیزیک (بارپذیری و مقاومتویژه) (شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۲۴) با استفاده از مقایسه زوجی معیارها و با نظر کارشناس بر اساس جدول ۳-۱ تعیین گردید (جدول ۴-۲). همچنین با توجه به کیفیبودن نقشه زمینشناسی، با استفاده از نظر کارشناسی به هر یک از واحدهای لیتولوژی یک ارزش عددی بر اساس جدول ۳-۱ اختصاص داده شد. وزن هر یک از معیارها و ارزش عددی اختصاص یافته به هر یک از واحدهای لیتولوژی در جدول ۴-۸ آمده است.

مقاومتويژه	بارپذیری	PC123	PC4	فاصـــــله از	زمينشناسي	معيار
				گسل		
• ,• 9۴۸۸۳	•,189787	۰,۲۵	۰,۲۵	۰,۰۷	•,14020	وزن

جدول ۴-۷: اهمیت نسبی هر یک از معیارهای اکتشافی برای تعیین نقشه پتانسیل مطلوب در منطقه کرویان

جدول ۴-۸: اهمیت واحدهای لیتولوژی از نظر پتانسیل کانیزائی طلا با توجه به نظر کارشناسی

•		-	0.0					
Dolomite	Mineralized	Chlorite	Metamorphosed	Phyllite/Phyllonite	Mylonitic	Travertine	Landslide	واحــــد
	Shear Zone	Schist	Limestone		Granite			ليتولوژى
١	٩	۷	٣	۶	۶	٢	١	ارزش
								عددى

در ادامه نقشههای اکتشافی با استفاده از توابع تعیین عضویت فازی گوسی و خطی فازیسازی شدهاند و با استفاده از روش تلفیق فازی گاما با همدیگر تلفیق شدهاند. برای فازیسازی لایههای زمین-شناسی، فاصله از گسل، PC4 و PC1-PC2-PC3 از تابع تعیین عضویت فازی خطی استفاده شد. البته برای فازیسازی نقشههای مقاومتویژه و بارپذیری، چون با توجه به شواهد آزمایشگاهی SIP مقادیر خیلی کم و خیلی زیاد این پارامترها مطلوب نیست و مقادیر حد واسط آنها در ارتباط با زون کانیزائی تشخیص داده شدهاند، از تابع عضویت فازی گوسی استفاده شد. نقشههای فازی مربوطه در شکل



شکل ۴-۳۸: نقشه فازی وزندار فاصله از گسل در منطقه کرویان



شکل ۴-۳۹: نقشه فازی وزندار PC4 بدستآمده از تجزیه و تحلیل مؤلفههای اصلی مقاوم دادههای ژئوشیمی تبدیل-يافته

59760

5952





در خاتمه نقشههای فازیشده با استفاده از روش گاما فازی برای تهیه نقشه پتانسیل مطلوب با هم تلفیق شدند؛ که نتیجه آن در شکل ۴-۴۳ آمده است. بر مبنای امتیاز فازی محاسبهشده برای هریک

از پیکسلهای نقشه، در نواحی با رنگ سبز احتمال کانیزائی صفر و نواحی با بالاترین احتمال کانی-زائی با رنگ قرمز نشان داده شده است. موقعیت سه پروفیل .IP-Res به نامهای KTA و KTT و KTC بر روی این شکل نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۳: نقشه پتانسیل مطلوب تهیهشده با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در منطقه کرویان

همان گونه که مشاهده می شود، قسمت ابتدائی پروفیل KTA بر ناحیه با احتمال کانی زائی بالا منطبق شده است؛ که اثر آن به صورت آنومالی بر روی مقطع بار پذیری با مقادیر بار پذیری بیشتر از ۶۵۹ میلی ثانیه و با رنگ بنفش آشکار شده و ادامه آن در داخل زمینه قرار گرفته است (شکل ۴-۴۴). همچنین نتایج مدل سازی مقطع KTB (شکل ۴-۴۵) آنومالی بار پذیری با شدت کمتری را نشان می-دهد که البته موقعیت این پروفیل بر روی نقشه پتانسیل معدنی (شکل ۴-۳۹) بر روی منطقه با احتمال کانی سازی صفر قرار گرفته است؛ که این موضوع می تواند در ار تباط با حضور کانی های پیریت در شت بلور که عقیم هستند اما می توانند اثرات II ایجاد کنند، تفسیر گردد. همچنین منطبق بر وسط پروفیل KTC (شکل ۴-۴۹) نیز آنومالی مقاومتویژه و بار پذیری به خوبی آشکار سازی شده است؛ که



این آنومالی در نقشه پتانسیل مطلوب نیز به خوبی و با رنگ قرمز آشکارسازی شده است.

شکل ۴-۴۴: مقاطع مقاومتویژه (شکل بالا) و بارپذیری (شکل پائین) پروفیل KTA



شکل ۴-۴۵: مقاطع مقاومتویژه (شکل بالا) و بارپذیری (شکل پائین) پروفیل KTB



شکل ۴-۴۶: مقاطع مقاومتویژه (شکل بالا) و بارپذیری (شکل پائین) پروفیل KTC

۵- فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

#### ۵–۱– نتیجهگیری

همان گونه که بیان شد، کانهزائی طلا در محدوده کرویان از نوع طلای تیپ پهنههای برشی است؛ که همراه رگههای کوارتز و کانیهای پیریت است. همچنین وجود دو نسل پیریت عقیم درشتدانه و بارور ریزدانه در این منطقه گزارش شده؛ که حضور کانیهای سولفیدی پیریت شرایط مطلوبی را برای مطالعات IP فراهم نموده است. با توجه به قابلیتهای روش SIP در تفکیک کانیهای قطبشپذیر، در مرحله اول انجام این رساله، دادههای SIP آزمایشگاهی بر روی نمونههای سنگی برداشتشده از مغزه-های حفاری کانسار طلای کرویان اندازه گیری و سپس با استفاده از مدلهای مختلف واهلـش تفسـیر دادهها انجام شد. نتیجه ازمایشها و مدلسازیها نشان داد که در مواردی که هر دو نوع پیریت ریزدانه و درشتدانه در نمونه حضور داشته باشند، چنانچه اختلاف اندازه آنها معنادار باشد، مؤلفه موهومي طيف مقاومتويژه/ رسانندگي مختلط و اختلاف فاز دو پيک كاملاً مجزا را تشكيل خواهند داد و در شرایطی که اندازه دانهها اختلاف معناداری ندارند؛ دو پیک ناشی از آنها در هم ادغام شـده و به صورت چشمی قابل تشخیص نیست؛ هر چند با مدل سازی می توان آنها را تفکیک نمود. این موضوع یکی از یافتههای ارزشمند این رساله میباشد؛ که تاکنون هیچگاه گزارش نشده است. لازم به ذکر است که مطالعات آماری و آنالیز فرکتال بر روی اندازه دانههای پیریت که با روش MLA اندازه گیری شده است، این موضوع را تأیید مینماید. لذا برای اولین بار دو نسل کانی پیریت با استفاده از روش SIP از هم تفکیک شدند.

مدلهای واهلش مختلفی شامل مدل کل-کل یکجزئی، مدل کل-کل دوجزئی تعمیمیافته، مدلهای GEMTIP کروی و بیضوی و مدل تجزیه دبای برای مدلسازی دادههای SIP در این رساله مورد استفاده قرار گرفتند؛ که برازش مدل کل-کل یکجزئی به دادههای SIP دارای پیک منفرد، نتایج مفیدی را تولید نمود و کارائی این مدل در مدلسازی دادههای SIP در منطقه مورد مطالعه را تأیید مفیدی را تولید نمود و کارائی این مدل در مدلسازی دادههای SIP در منطقه مورد مطالعه دا تأیید

برازش مدل کل-کل دوجزئی تعمیمیافته به دادههای SIP بدستآمده از نمونههای حاوی هر دو نسل

پیریت، نتایج رضایتبخشی را تولید نمود؛ به گونهای که پارامترهای مدل با شواهد کانی شناسی هماهنگی بالائی نشان میدهد.

برازش مدل GEMTIP کروی به دادههای SIP اندازه گیری شده در این رساله، نتایج کاملاً بهدور از واقعیت را تولید نمود و نشان داد که این مدل برای مدلسازی این دادهها مناسب نیست. زیرا پارامترهای محتوای حجمی (f) و بارپذیری (m) بیشتر از مقادیر ریاضی مربوط به مدل و فیزیکی مربوط به نمونهها است.

برازش مدل تجزیه دبای به دادهها نیز با موفقیت انجام شد؛ اما پارامترهای بدست آمده فقط دارای مفهوم ریاضی بوده و تفسیر فیزیکی معناداری ندارند.

همچنین قابلیت مدلسازی دادههای SIP با استفاده از مدل GEMTIP بیضوی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مدلسازی دادههای مصنوعی با استفاده از این مدل نشان داد که در شرایطی که دادهها حاوی نوفه باشند، با توجه به تأثیر متقابل پارامترهای ثابت زمانی و بیضوی بر روی یک دیگر، بازی ابی این پارامترها ممکن است به درستی صورت نگیرد؛ که این مسأله میتواند به عنوان یکی از کاستی های این مدل مطرح گردد.

یکی دیگر از دستاوردهای بارز این رساله، بازیابی موفق پارامترهای مدل کل-کل با استفاده از مدل-سازی یکبعدی دادههای الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس است. این بخش از تحقیق بیانگر آن است که اگر در دادههای HEM اثرات قطبش القایی وجود داشته باشد، موجب کاهش شدت مؤلفه حقیقی مقاومتویژه مختلط در فرکانسهای پائین شده و در صورت بالا بودن اثر IP، مقدار مؤلفه حقیقی در فرکانسهای پائین منفی میشود. بنابراین این ویژگی میتواند بهعنوان یک شاهد ارزشمند ژئوفیزیکی در مطالعات الکترومغناطیس در هر دو حوزه زمان و فرکانس مورد استفاده قرار بگیرد. برای انجام مدل سازی وارون دادهها از الگوریتم ترکیبی VFSA-ML استفاده شد. از مزایای استفاده از این الگوریتم، قابلیت مدل سازی مدل غیرخطی و پیچیده پیشرو حاکم بر مسأله، عدم نیاز به تولید مدل اولیه نزدیک به پاسخ اصلی، قابلیت یافتن نقطه کمینه عام و سرعت نسبتاً مناسب الگوریتم برای

بازیابی پارامترهای IP از دادههای HEM می باشد.

الگوریتم VFSA-ML بر روی دادههای الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس برداشتشده در منطقه کرویان پیادهسازی شد و محل اصلی کانیزائی طلا در ارتباط با کانی پیریت را با موفقیت آشکارسازی نمود. آزمایشهای SIP آزمایشگاهی و برداشتهای IP-Res زمینی و همچنین نتایج مطالعات ژئوشیمی وجود این آنومالی را تأیید میکنند.

مقایسه نتایج مطالعات ژئوشیمیایی با استفاده از روش آنالیز مؤلفههای اصلی مقاوم دادههای بسته و تبدیلیافته بهوسیله تبدیلات لگاریتم ریشهای نشان داد، که در مورد اخیر کانیزائی طلا در رگههای کوارتز و کانیهای پیریت بهصورت جداگانه در دو مؤلفه اصلی مجزا از هم تفکیک شدهاند. با توجه به این که نقشههای زمینشناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک هر کدام اطلاعات با ارزشی در مورد کانیزائی طلا در منطقه فراهم مینمایند؛ لایههای اطلاعاتی زمینشناسی، فاصله از گسل، مؤلفههای اصلی مرتبط با کانیزائی طلا (مؤلفههای بدست آمده از آنالیز مؤلفههای اصلی مقاوم دادههای تبدیل-یافته بهوسیله تبدیلات لگاریتم ریشهای)، نقشه مقاومتویژه و بارپذیری با استفاده از نظر کارشناسی و استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در محیط GIS با هم تلفیق شدند. آنومالی اصلی در

IP-Res نیز این موضوع را تأیید نمود.

#### ۲-۵-پیشنهادات

۱ – استفاده از روش های هوش مصنوعی نظیر شبکههای عصبی و ماشین بردار پشتیبان برای مدل-سازی دادههای SIP و برازش مدل های GEMTIP کروی و بیضوی.

منطقه کرویان با استفاده از این روش هم با موفقیت آشکارسازی شد. شواهد ژئوشیمیایی و مطالعات

۲- اعمال اثر تغییرات جانبی برای بازیابی اثرات IP از طریق مدلسازی یکبعدی دادههای الکترومغناطیس هوابرد.

۳- استفاده از روشهای مدلسازی دو بعدی و سهبعدی برای مدلسازی همزمان اثرات IP و القای

الكترومغناطيسي

۵- حل کامل معادلات ماکسول برای مدلسازی دادهای HEM با در نظر گرفتن پارامترهای رسانندگی الکتریکی مختلط.

### فهرست منابع

حسنی پاک، ع. ۱، (۱۳۸۴). "تحلیل دادههای اکتشافی"، **انتشارات دانشگاه تهران**. عربامیری، ع.، مرادزاده، ع.، رجبی، د.، فتحیان پور، ن.، سیمون، ب.، (۱۳۸۹). "بررسی دقت مـدلسازی پیشرو دادههای الکترومغناطیس هلیکوپتری در مدلسازی معکوس"، **فصلنامه علوم زمین**، شماره ۷۷، صفحه ۱۳۷ تا ۱۴۰. قوامی ریابی، س. ر.، دارابی گلستان، ف.، (۱۳۹۳). "تحلیل و مـدلسازی اکتشافی دادههای ژئوشـیمیایی ذخـایر معدنی (با نگاهی ویژه به تیپهای مختلف ذخایر مس و طلا)"، دانشگاه شاهرود.

كلاگرى، ع. ا.، (١٣٧١). "اصول اكتشافات ژئوفيزيكى"، چاپ اول، **انتشارات تابش،** ۵۸۵ ص.

Aitchison, J. (1986) "The statistical analysis of compositional data: Monographs on statistics and applied probability" *Chapman & Hall Ltd.*, London, 416 p.

Aliyari, F., Rastad, E., & Zengqian, H. (2007) "Orogenic gold mineralization in the Qolqoleh deposit, northwestern Iran" *Resource Geology*, *57*(3), 269-282.

Aliyari, F., Rastad, E., Mohajjel, M., & Arehart, G. B. (2009) "Geology and geochemistry of D–O–C isotope systematics of the Qolqoleh gold deposit, Northwestern Iran: Implications for ore genesis" *Ore Geology Reviews*, *36*(4), 306-314.

An, H. B., Wen, J., & Feng, T., (2011) "On finite difference approximation of a matrix-vector product in the Jacobian-free Newton–Krylov method" *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 236(6), 1399-1409.

Arab-Amiri, A.R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N. & Siemon, B.,(2011) "Inverse modeling of HEM data using a new inversion algorithm" *Journal of Mining and Environment*.

Aster, R., Borcher, B., Thurber, C., (2013) "Parameter Estimation and Inverse Problems" 2nd ed. *Academic Press*, Amsterdam, p. 360.

Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2007) "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition" In: *Evolutionary computation*, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on (pp. 4661-4667). IEEE.

Beard, L. P., & Nyquist, J. E. (1998) "Simultaneous inversion of airborne electromagnetic data for resistivity and magnetic permeability" *Geophysics*, 63(5), 1556-1564.

Börner, J. H. (2016) "Electrical phenomena during CO2–rock interaction under reservoir conditions: experimental investigations and their implications for electromagnetic monitoring applications" PhD thesis, *TU Bergakademie Freiberg*, Freiberg, Germany.

Börner, J. H., Herdegen, V., Repke, J. U., & Spitzer, K. (2016) "Spectral induced polarization of the three-phase system CO2–brine–sand under reservoir conditions" *Geophysical Journal International*, ggw389.

Börner, R-U., (2001) "Very Fast Simulated Annealing algorithm for 1-D Schlumberger resistivity sounding inversions (MATLAB source code)" *TU Bergakademie Freiberg*,

Freiberg, Germany. <u>https://tufreiberg.de/en/geophysik/research/electromagnetics/member</u>s/ralph-uwe-boerner.

Carranza, E. J. M. (2008) "Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS" (Vol. 11). *Elsevier*.

Cole, K. S., and Cole, R. H., (1941) "Dispersiona and absorption in dielectrics" J. Chem. Phys., v. 9, p. 341.

Commer, M., Newman, G. A., Williams, K. H., & Hubbard, S. S. (2011) "3D induced-polarization data inversion for complex resistivity" *Geophysics*, 76(3), F157-F171.

Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014) "Geophysics for the mineral exploration geoscientist" *Cambridge University Press*.

Dosso, S. E., & Oldenburg, D. W. (1991) "Magnetotelluric appraisal using simulated annealing" *Geophysical Journal International*, 106(2), 379-385.

Egozcue, J. J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G., & Barcelo-Vidal, C. (2003) "Isometric logratio transformations for compositional data analysis" *Mathematical Geology*, *35*(3), 279-300.

Eilu, P., & Groves, D. I. (2001) "Primary alteration and geochemical dispersion haloes of Archaean orogenic gold deposits in the Yilgarn Craton: the pre-weathering scenario" *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1(3), 183-200.

Emond, A. M. (2007) "Electromagnetic modeling of porphyry systems from the grain-scale to the deposit-scale using the generalized effective medium theory of induced polarization" Master of Science dissertation, *The University of Utah*.

Emond, A. M., Zhdanov, M. S., & Petersen, E. U. (2006) "Electromagnetic modeling based on the rock physics description of the true complexity of rocks: ap-plications to study of the IP effect in porphyry copper deposits" In: *SEG*, Expanded Abstracts, pp. 1313-1317.

Engelbrecht, A.P. (2007) "Computational Intelligence: An introduction (second edition)" *John Willy and son*.

Everett, M.E., (2013) "Near-surface applied geophysics" *Cambridge University Press.* 

Farquharson, C. G., Oldenburg, D. W., & Routh, P. S., (2003) "Simultaneous 1D inversion of loop–loop electromagnetic data for magnetic susceptibility and electrical conductivity" *Geophysics*, 68(6), 1857-1869.

Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2009) "Principal component analysis for compositional data with outliers" *Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society*, 20(6), 621-632.

Flores, C. & Peralta-Ortega, S.A., (2009) "Induced polarization with in-loop transient electromagnetic soundings: A case study of mineral discrimination at El Arco porphyry copper, Mexico" *Journal of Applied Geophysics*, 68(3), pp.423-436.

Fu, H. (2013) "Interpretation of complex resistivity of rocks using GEMTIP analysis" Master of science dissertation, *The University of Utah*.

Fu, L. (2011) "Induced polarization effect in time domain: Theory, modeling, and applications" Doctoral dissertation, *The University of Utah*.

Gazley, M. F., Collins, K. S., Roberston, J., Hines, B. R., Fisher, L. A., & McFarlane, A. (2015) "Application of principal component analysis and cluster analysis to mineral exploration and mine geology" In: *AusIMM New Zealand Branch Annual Conference proceedings, Dunedin, New Zealand* (pp. 131-139).

Ghorbani, A., Camerlynck, C., Florsch, N., Cosenza, P., & Revil, A. (2007) "Bayesian inference of the Cole–Cole parameters from time-and frequency-domain induced polarization" *Geophysical prospecting*, 55(4), 589-605.

Goold, J. W. (2008) "Spectral complex conductivity inversion of airborne electromagnetic data" Master of Science dissertation, *The University of Utah*.

Goold, J. W., Cox, L. H. and Zhdanov, M. S. (2007) "Spectral complex conductivity inversion of airborne electromagnetic data" *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 26, 487-49.

Goudarzi, S., Hassan, W. H., Hashim, A. H. A., Soleymani, S. A., Anisi, M. H., & Zakaria, O. M. (2016) "A novel RSSI prediction using imperialist competition algorithm (ICA), radial basis function (RBF) and firefly algorithm (FFA) in wireless networks" *PloS one*, 11(7), e0151355.

Gubatyenko, V. P., & Tikshayev, V. V., (1979) "On the variation of sign of the electromagnetic force of induction in the TEM field method" *Izv. Akad. Nauk USSR*, *Earth Phys.*, 15, 217-219.

Guptasarma, D. & Singh, B., (1997) "New digital linear filters for Hankel J0 and J1 transforms" *Geophysical prospecting*, 45(5), pp.745-762.

Haber, E., (2014) "Computational Methods in Geophysical Electromagnetics" Ed. By Thomas A. *Grandine Society for Industrial and Applied Mathematics*.

Hassan, R., Cohanim, B., De Weck, O., & Venter, G. (2005) "A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm" In: 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference (p. 1897).

Heidari, S. M., Rastad, E., Mohajjel, M., and Shamsa, M. J., (2006) "Gold mineralization in ductile shear zone of Kervian (southwest of Saqez-Kordestan province)" *Geosciences*, **58**, 18–37.

Huang, H., & Fraser, D. C., (1996) "The differential parameter method for multifrequency airborne resistivity mapping" *Geophysics*, 61(1), 100-109.

Huang, H., & Fraser, D. C., (2003) "Inversion of helicopter electromagnetic data to a magnetic conductive layered earth" *Geophysics*, 68(4), 1211-1223.

Hubert, M., Debruyne, M., & Rousseeuw, P. J. (2018) "Minimum covariance determinant and extensions" *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 10(3), e1421.

Ingber, L. (1989) "Very fast simulated re-annealing" *Math. Comput. Model.*, 12(8), 967-973.

Jamasb, A., Motavalli-Anbaran, S. H., & Ghasemi, K. (2018) "A Novel Hybrid Algorithm of Particle Swarm Optimization and Evolution Strategies for Geophysical Non-linear Inverse Problems" *Pure and Applied Geophysics*, 1-13.

Kang, S. & Oldenburg, D.W., (2016) "On recovering distributed IP information from inductive source time domain electromagnetic data" *Geophysical Journal International*, 207(1), pp.174-196.

Kang, S., Fournier, D. & Oldenburg, D.W., (2017) "Inversion of airborne geophysics over the DO-27/DO-18 kimberlites—Part 3: Induced polarization" *Interpretation*, 5(3), pp.T327-T340.

Karimi, A. R., Mehrdadi, N., Hashemian, S. J., Nabi-Bidhendi, G. R., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2011) "Using of the fuzzy topsis and fuzzy ahp methods for wastewater treatment process selection" *International journal of academic research*, 3(1).

Kearey P., Brooks, M., and Hill, I., (2002) "An Introduction to Geophysical Exploration" *Blackwell Science*.

Kemna, A. (2000) "Tomographic inversion of complex resistivity" Ruhr-Universität Bochum.

Kemna, A., Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L., ... & Zimmermann, E. (2012) "An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications" *Near Surface Geophysics*, 10(6), 453-468.

Kratzer, T. & Macnae, J.C., (2012) "Induced polarization in airborne EM" *Geophysics*, 77(5), pp.E317-E327.

Kruschwitz, S. F. (2007) "Assessment of the complex resistivity behavior of salt affected building materials" Doctoral dissertation, *University of Lancaster*, UK.

Lelievre, P.G., Oldenburg, D.W. (2006) "Magnetic forward modelling and inversion for high susceptibility" *Geophys. J. Int.*, 166(1), 76-90.

Lin, W., Zhdanov, M. S., Burtman, V., & Gribenko, A., (2015) "GEMTIP inversion of complex resistivity data using a hybrid method based on a genetic algorithm with simulated annealing and regularized conjugate gradient method" In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015* (pp. 952-956).

Loke, M. H. (2001) "Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys" Penang, Malaysia, *Universiti Sains Malaysia*. Unpublished course notes, http://www.geoelectric.com.

Luo, Y., & Zhang, G. (1998) "Theory and application of spectral induced polarization" Tulsa: *Society of Exploration Geophysicists*.

Marchant, D., Haber, E. & Oldenburg, D.W., (2014) "Three-dimensional modeling of IP effects in time-domain electromagnetic data" *Geophysics*, 79(6), pp.E303-E314.

Menke, W., (2012) "Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory" *Academic Press*, Waltham, San Diego, Oxford, Amsterdam.

Mohajjel, M. & Eshragh, A., (2008) "Geological Map of Kervian area" *Geological* survey of Iran.

Mohajjel, M., Fergusson, C. L., & Sahandi, M. R. (2003) "Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, western Iran" *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(4), 397-412.

Mundry, E., (1984) "On the interpretation of airborne electromagnetic data for the two-layer case" *Geophysical Prospecting*, 32(2), 336-346.

Nabighian, M. N. & Corbett, J. D., (1988) "Electromagnetic methods in applied geophysics- Applications" Society of Exploration Geophysicists.

Niederleithinger, E. (2003) "Spectral Induced Polarization-a tool for non-destructive testing of soils and building materials" *Proceedings of NDT-CE*.

Niroomand, S., Goldfarb, R. J., Moore, F., Mohajjel, M., & Marsh, E. E. (2011) "The Kharapeh orogenic gold deposit: geological, structural, and geochemical controls on epizonal ore formation in West Azerbaijan Province, Northwestern Iran" *Mineralium Deposita*, 46(4), 409-428.

Nocedal, J. & Wright, S., (2006) "Numerical optimization: series in operations research and financial engineering" *Springer*, New York, USA.

Nordsiek, S., & Weller, A. (2008) "A new approach to fitting induced-polarization spectra" *Geophysics*, 73(6), F235-F245.

Nykänen, V., & Salmirinne, H. (2007) "Prospectivity analysis of gold using regional geophysical and geochemical data from the Central Lapland Greenstone Belt, Finland" *Geological Survey of Finland*, 44, 251-269.

Oldenburg, D. W., Kang, S., & Marchant, D., (2015) "Inversion of time domain IP data from inductive sources" In: *International Workshop and Gravity, Electrical & Magnetic Methods and their Applications, Chenghu, China, 19-22 April 2015* (pp. 9-12). Society of Exploration Geophysicists and and Chinese Geophysical Society.

Pawlowsky-Glahn, V., Egozcue, J. J., & Tolosana-Delgado, R. (2015) "Modeling and analysis of compositional data" *John Wiley & Sons*.

Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., and Nelson, P. H. (1978) "Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP" *Geophysics*, 43, 588Đ609.

Phillips, C. R. (2010) "Experimental study of the induced polarization effect using Cole-Cole and GEMTIP models, Master of Science dissertation, *The University of Utah*.

Reitz, J.R., Milford, F.J. and Christy, R.W., (1993) "Foundations of Electromagnetic Theory" *Addison-Wesley Publishing Company*, 630 pp.

Reynolds J. M. (1997) "An Introduction to Applied and Environmental Geophysics", pp 418-459.

Routh, P.S., Oldenburg, D.W. (2001) "EM coupling in frequency-domain induced polarization data: a method for removal" *Geophysical Journal International*, 145, 59–76.

Saaty, T. L. (1990) "How to make a decision: the analytic hierarchy process" *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.

Saaty, T. L. (2008) "Decision making with the analytic hierarchy process" *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.

Scheunert, M., (2015) "3-D inversion of helicopter-borne electromagnetic data" PhD dissertation, *TU Bergakademie Freiberg*.

Seidel, M., & Tezkan, B. (2017) "1D Cole-Cole inversion of TEM transients influenced by induced polarization" *Journal of Applied Geophysics*, 138, 220-232.

Sen, M. K., & Stoffa, P. L., (2013) "Global optimization methods in geophysical inversion" *Cambridge University Press*.

Sen, M. K., Bhattacharya, B. B. & Stoffa, P. L., (1993) "Nonlinear inversion of resistivity sounding data", *Geophysics* 58, 496–507.

Sharifi, F., Arab Amiri, A. R., & Kamkar Rouhani, A. (2019) "Using a combination of genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm for GEMTIP modeling of spectral-induced polarization data" *Journal of Mining and Environment*, 10(2), 493-505.

Sharifi, F., Arab-Amiri, A.R., Börner, R-U., Kamkar-Rouhani, A. (2018) "Recovering IP effects from 1-D inversion of HEM data: case study from the Kervian gold deposit (Iran)" In *AEM2018/7<sup>th</sup> international workshop on airborn electromagnetic*, Kolding, Denmark.

Siemon, B., (2012) "Accurate 1D forward and inverse modeling of high-frequency helicopter-borne electromagnetic data" *Geophysics*, 77(4), WB71-WB87.

Siemon, B., Auken, E. & Christiansen, A.V., (2009a) "Laterally constrained inversion of helicopter-borne frequency-domain electromagnetic data" *Journal of Applied Geophysics*, 67(3), pp.259-268.

Siemon, B., Christiansen, A.V. & Auken, E., (2009b) "A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration" *Near Surface Geophysics*, 7(5-6), pp.629-646.

Siemon, B., Steuer, A., Ullmann, A., Vasterling, M., & Voß, W. (2011) "Application of frequency-domain helicopter-borne electromagnetics for groundwater exploration in urban areas" *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(16), 1373-1385.

Tharwat, A. (2016) "Principal component analysis-a tutorial" *International Journal* of Applied Pattern Recognition, 3(3), 197-240.

Wait, J. R., (1982) "Geo-electromagnetism" Academic, San Diego, Calif. 268 pp.

Weidelt, P., (1982) "Response characteristics of coincident loop transient electromagnetic systems" *Geophysics*, 47(9), pp.1325-1330.

Wilpen, L.G., Kristen, S.K., (2007) "GIS Tutorial Updated for ArcGIS 9.2: Workbook for Arc View 9" *Esri Press*, 354 p.

Xu, Z. (2013) "Three-dimension Cole-Cole model inversion of induced polarization data based on regularized conjugate gradient method" Doctoral dissertation, *The University of Utah*.

Yin, C., & Hodges, G., (2007) "Simulated annealing for airborne EM inversion" *Geophysics*, 72(4), F189-F195.

Zadeh, L. A. (1965) "Fuzzy sets" Information and control, 8(3), 338-353.

Zhdanov, M. S. (2006) "New geophysical technique for mineral exploration and mineral discrimination based on electromagnetic methods" *University Of Utah*.

Zhdanov, M. S. (2015) "Inverse theory and applications in geophysics (Vol. 36)". *Elsevier*.

Zhdanov, M.S. (2008) "Generalized effective-medium theory of induced polarization" *Geophysics*, v. 73, p. 197-211.

Zimmermann, H. J. (1991) "Fuzzy sets and its application" Boston, Hingham.

#### Abstract

Mineral resource exploration has always been the focus of interest in the field of geoscience and thereby, various techniques have been developed for this purpose.

The aim of this research work is to investigate whether the spectral induced polarization (SIP) data modeling and recovering the induced polarization effects from 1-D inversion of frequency domain helicopter-borne electromagnetic data (HEM-IP) is possible for the purpose of polarizable resource exploration. Furthermore, the analyses of geological, litho-geochemical and mineralogical data and ground-based geophysical induced polarization and resistivity (IP-Res.) surveys have been conducted for validating the result of both the SIP and HEM-IP modeling.

We conducted our case study in the Kervian area located in the southwest of Saggez city, northwest of Sanandaj-Sirjan zone. In the study area, gold mineralization is associated with quartz and pyrite minerals. However, two varieties of pyrite mineral including coarse-grained barren and fine-grained auriferous mineral have occurred in the study area. The occurrence of sulfide mineral, i.e. pyrite mineral, as well as the difference between the sizes of pyrite minerals is a favorite target for SIP investigation. Therefore, in the first step of this research work, we acquired the SIP data from 33 pieces taken from the core samples of the mineralized zone of Kervian gold deposit. To model the acquired SIP data, we applied different relaxation models including the Cole-Cole, double-phase generalized Cole-Cole, Deby decomposition and spherical and ellipsoidal GEMTIP. To recover the relaxation model parameters, we implemented a least square and combined genetic algorithm and particle swarm optimization (CGAPSO) algorithm. The results of our research revealed that all of the relaxation models are well fitted to the complex resistivity/conductivity spectra. However, the recovered model parameters of single phase Cole-Cole and the double-phase generalized Cole-Cole provide the most reliable information considering the results of mineralogical evidences. Moreover, the failure of spherical GEMTIP to recover the reliable model parameter from the measured SIP data has been revealed. In addition, the ellipsoidal GEMTIP modeling of noisy synthetic data indicates that recovering of either time constant or ellipticity cannot be achieved well because of the mutual interaction between these relaxation model parameters. However, as a prominent result of this part of our research, we could to discriminate two varieties of pyrite mineral using SIP data modeling, successfully. The result of our investigation is also verified using mineral liberation analysis (MLA) data analysis.

Our investigation, also, revealed that incorporating the SIP data into the HEM data shifts the magnitude of real part of acquired HEM data in the low frequency and it may get negative value if the IP effect is strong. This feature could be used as a novel signature for detecting the polarizable formations using frequency-domain electromagnetic data. Thereby, we developed a hybrid algorithm based on very fast simulated annealing and Marquardt-Levenberg (VFSA-ML) methods for recovering the corresponding model parameters from 1-D inversion of HEM data. We applied the code to recover the Cole-Cole model parameters from the HEM data acquired from Kervian gold deposit successfully. Furthermore, we implemented the imperialist competitive (ICA) algorithm to recover the SIP model parameters from synthetic HEM data successfully.

Then, we applied a multivariate statistical robust principal component analysis (PCA) to extract the multivariate structure of both compositional and log-ratio transformed litho-geochemical data of Kervian gold deposit.

Robust PCA of untransformed data is not capable of certifying element association. However, in the robust PCA analysis of transformed data, both varieties of gold mineralization have been revealed. The first gold occurrence is detected in PC1 and it is associated with Pb, As, Hg, Mo, S and Sb elements in quartz-sulfide veins. The second one, PC4, could be correlated with quartz veins. The results indicate that the robust PCA of logratio transformed data improves the interpretation of geochemical data and provides more reliable information about the gold mineralization of the type sought.

Eventually, the gold potential mapping has been performed by combining the exploratory evidential maps, i.e., geological, geophysical and geochemical maps, using fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) in the geographic information system (GIS) environment. The main anomaly of Kervian area is detected using our approach and it is also validated by ground-based geophysical IP-Res. Surveys.

**Key words:** Spectral induced polarization, HEM, Hybrid VFSA-ML, CGAPSO, Imperialist competitive algorithm, Robust PCA, Log-ratio transformation, Fuzzy AHP.



Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering Ph.D. Thesis in Mineral Exploration

# Development of integrated exploratory pattern based on spectral complex conductivity of frequency domain electromagnetic and geochemical data: a case study from orogenic (shear zone) gold deposit of Kurdistan, Iran

By: Fereydoun Sharifi

Supervisors: Dr. Ali Reza Arab Amiri Dr. Abolghasem Kamkar Rouhani

> Advisors: Dr. Masood Alipour-Asll Dr. Jana Börner

> > April 2019