



تخمین بهینه پارامتر منظمسازی برای بهبود معکوسسازی دو و سه -بُعدی دادههای مگنتوتلوریک

رضا قائدرحمتى

**اساتید راهنما:** دکتر علی مرادزاده دکتر نادر فتحیانپور

**اساتید مشاور:** Dr. Seong Kon Lee دکتر سهیل پرخیال

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

شهريور ۱۳۹۲

ره: ۲۶۹۶۱۱۴۳	شما تاريز ويرا	باسمه تعالی سه دفاع از رساله دکتری (	ریکی می ایک می	ىدېرى ف
بدینوسیله گواهی می شود آقای رضا قائدرحمتی دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن-اکتشاف به شماره دانشجویی ۸۸۱۷۸۴۵ ورودی سال ۱۳۸۸ در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۲۸ از رساله خود با عنوان : تخمین بهینه پارامتر منظمسازی برای بهبود				
معکوس سازی دو و سه بُعدی داده های مگنتوتلوریک				
	نائل گرديد.	به درجه :	با اخذ نمرهل	دفاع و
- 18/99	الف) درجه عالی: نمره ۲۰ – ۱۹ 🗹 ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ – ۱۷ 🗌			الف) د ۱۷ 🗌
ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹– ۱۵ [ د) غیر قابل فبول و نیاز به دفاع مجدد دارد [ ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد [			ج) در دارد	
$\bigcirc$				
امضاء	مرتبه علمي	نام و نام خانوادگی	هیئت داوران	رديف
1200	۱ - استاد تمام ۲ - دانشیار	اساتيد راهنما	۱ - دکتر علی مرادزاده ۲ - دکتر نادر فتحیان پور	١
- AK	دانشيار	استاد مدعو خارجي	دكتر سعيد ميرزائي	٢
	استاد تمام	استاد مدعو خارجي	دكتر محمدكاظم حفيظى	٣
TT,	استاديار	استاد مدعو داخلی	دكتر عليرضا عرباميرى	4
At	استاديار	استاد مدعو داخلی	دکتر علی نجاتیکلاته	0
Jou	استاديار	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشگده	خانم دکثر عابدی	\$
U		, دانشگاه:	حترم تحصيلات تكميلى	مدير م
		يد اقدامات لازم بعمل آيد.	أييد مراتب فوق مقرر فرمائ	ضمن ت
رئيس دانشكده و رئيس هيأت داوران:				
تاريخ و اعضاء:				
والمنتقاد والموقودي				

# تقدیم به برادر عزیزم حاج بهاری

# اسوه سخاوت، مهربانی و مردانگی

بزرگ مردی که نام او و کارهای نیک او همیشه در دل و جان ما ماندگار است



جهان پایدار است و ما رفتنی نماند همی نیک و بد پایدار

ز انسان نماند بجز مردمی همان به که نیکی بود یادگار

# تشکر و قدردانی

## من لم يشكر المخلوق لم يشكر الخالق

سپاس بیکران یزدان پاکی را که به من توانایی علم آموزی در مقطعی دیگر از تحصیلات را عطا نمود. پس از انجام این رساله لازم میدانم از تمامی کسانی که به هر نحوی این جانب را یاری نمودند تشکر نمایم. ابتدا از اساتید گران قدرم جناب آقایان **یروفسور علی مرادزاده و دکتر نادر فتحیان یور** به پاس راهنماییهای ارزشمندشان تشکر میکنم. بی شک انجام این تحقیق بدون راهنماییهای ارزنده این اساتید گرانقدر به خصوص استاد علی مرادزاده به خاطر زحمات بیدریغشان میسر نبوده است. از اساتید مشاورم جناب آقایان دکتر سهیل پرخیال به خاطر همکاری در تهیه دادههای مگنتوتلوریک میدان زمین گرمایی سبلان و همچنین دکتر سئونگکن لی از مؤسسه پژوهشی کیگام در کره جنوبی به خاطر راهنماییهای مفیدشان تشکر میکنم. لازم میدانم از مدیریت سابق دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک جناب آقایان دکتر دولتی و دکتر عطایی و مدیریت فعلی جناب آقای دکتر قوامی به پاس همکاریهایشان در مدت تحصیل در این دانشکده تشکر کنم. همچنین از کلیه اساتید گرانقدرم در این دانشکده کمال تشکر را دارم. از پرسنل زحمتکش دانشکده به خصوص جناب آقای حسین شاه-حسینی به خاطر مساعدتهای بیدریغشان صمیمانه تشکر میکنم. از پدر و مادر عزیزم که در این مدت کمتر فرصت یافتهام در خدمت ایشان باشم ابتدا عذرخواهی و سپس تقدیر و تشکر میکنم. از برادران و خواهران عزیزم به خصوص برادر بزرگوارم حاج بهاری به خاطر حمایتهای سخاوتمندانه-شان در دوران تحصيلات ابتدايي تا به امروز صميمانه تشكر ميكنم. از همسرم به خاطر شكيبايي و فداکاریهای فراوان شان و سختیهایی که به خاطر اینجانب در این مدت متحمل شدهاند کمال تشکر را دارم. همچنین از فرزندان عزیزم آروین و آپتین، گلهای زندگی، به خاطر تحمل دوری و غربت در این مدت تقدیر و تشکر می کنم. در پایان از تمامی معلمان و دوستان عزیزم تشکر می نمایم. کلیه مطالب مندرج دراین رساله نتیجه تحقیقات این جانب میباشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن ذکر شده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نو آوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود میباشد. روش مگنتوتلوریک یکی از روشهای الکترومغناطیسی است؛ که از میدانهای طبیعی برای به نقشه درآوردن تغییرات مقاومتویژه الکتریکی زیر سطح زمین استفاده میکند. عمق نفوذ بالای روش مگنتوتلوریک باعث کاربرد آن در اکتشاف ساختارهای عمیق مثل اکتشاف منابع زمین گرمایی و هیدروکربوری شده است. به همین دلیل این روش دارای جایگاه خاصی در میان سایر روشهای ژئوفیزیکی است. همانند سایر روشهای ژئوفیزیکی، مدلسازی دادههای مگنتوتلوریک برای تغسیر ساختارهای زمین امری اجتنابناپذیر است.

مسئله معکوس مگنتوتلوریک یک مسئله غیرخطی و به شدت جورنشده (ill-posed) است. لذا برای اجتناب از مشکل عدم یکتایی پاسخ، این مسئله عمدتاً به روش منظمسازی تیخونف حل میشود. در حل منظم مسئله معکوس، پارامتر منظمسازی نقش یک متعادل کننده را دارد. اگر این پارامتر مقدار بزرگی انتخاب شود، تأثیر میزان برازش در مدل کم میشود و در مقابل اگر این پارامتر مقدار کوچکی انتخاب شود تأثیر منظمسازی در مدل کم شده و مسئله معکوس به یک مسئله با شرایط ناجور (-ill ordition) تبدیل میشود و ممکن است ساختارهای غیر واقعی در مدل ایجاد شود. پارامتر منظم-سازی رفتار حل منظم را کنترل میکند و دارای نقشی تعیین کننده در مدل سازی بوده و باید با دقت انتخاب شود. در الگوریتمهای موجود معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک این پارامتر به صورت سعی و خطا یا با استفاده از روش اصل اختلاف تخمین زده میشود. در این مطالعه هدف این است که با لحاظ دقت و سرعت مدل سازی، روش یا روشهایی برای تخمین خودکار و بهینه پارامتر منظم-در معکوسسازی دو و سهبعدی دادههای مگنتوتلوریک او بهینه پارامتر منظم-

برای رسیدن به هدف، پس از مطالعه و بررسی روشهای مختلف انتخاب پارامتر منظمسازی در حل مسائل عمومی جورنشده، ۱۲روش آن انتخاب و همراه با بهبودهای لازم برای حل مسئله معکوس دو-بُعدی مگنتوتلوریک طراحی و در محیط MATLAB کد نویسی شدهاند. این روشها شامل روشهای اصل اختلاف، اعتبار سنجی تقاطعی تعمیم یافته (GCV)، GCV بهبود یافته، منحنی L با الگوریتم بیشترین انحناء، منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی، تخمین خطا برژنسکی و همکاران، تخمین خطا ریچل و همکاران، نقطه ثابت، شبه بهینگی، مربع کای، طرحی بر اساس روش مجو و نسبت عدم برازش به نرم مدل می باشند. این روشها در یک کد منبع موجود برای معکوسسازی دوبُعدی

(MT2DInvMatlab) منظور گردیده و تحلیلهای لازم با معکوسسازی دوبُعدی دو سری داده مصنوعی و واقعی انجام شده است. نتایج حاصله نشان میدهند که روشهای GCV بهبود یافته، منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی، نسبت عدم برازش به نرم مدل و طرحی بر اساس روش مجو از نظر دقت، سرعت و خودکار بودن تخمین و انتخاب پارامتر منظمسازی در مسئله معکوس دوبُعدی بهتر از دیگر روش های فوق عمل میکنند. به همین جهت در مرحله بعد با انجام برنامه نویسیهای لازم، با تعميم روش نسبت عدم برازش به نرم مدل به صورت نسبت عدم برازش به مجموع عدم برازش و نرم مدل به عنوان روش پیشنهادی انتخاب پارامتر منظمسازی در برنامه معکوسسازی سه-بُعدى فضاى دادهها استفاده شد. سپس بررسيهاي لازم با آزمايشهاي معكوسسازي سهبُعدي داده-های مگنتوتلوریک دو مثال مصنوعی و دو دسته داده واقعی منطقه زمین گرمایی سبلان انجام گردیده است. در این بررسیها نتایج مدلسازی معکوس با استفاده از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش اصل اختلاف که در برنامه مذکور موجود می باشد، از نظر دقت و سرعت، مقایسه شده اند. نتایج حاصل نشان میدهند که روش پیشنهادی علاوه بر بهبود قابل ملاحظه در دقت نتایج مدلسازی، زمان محاسبات معکوس سازی را نیز حداقل ۳۰ درصد نسبت به روش موجود کاهش میدهند که این مسئله در مدلسازی معکوس سه بعدی از اهمیت بالایی بر خوردار است. همچنین با استفاده از نتایج مدلسازی معکوس سهبُعدی روش پیشنهادی و تلفیق آنها با دیگر دادههای اکتشافی موقعیت منابع انرژی زمین گرمایی در ناحیه غرب و جنوب غرب و همچنین شمال سبلان مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه موقعیت دو منطقه داغ مشخص کننده منابع زمین گرمایی در دو ناحیه مذکور به خوبی تعیین گردیده و نحوه ارتباط این منابع با مناطق دگرسانی توسط گسلهای موجود در منطقه به طور مفصل توجیه و تفسیر شده است.

**کلمات کلیدی:** مگنتوتلوریک، مدلسازی، معکوسسازی دوبُعدی، معکوسسازی سهبُعدی، پارامتر منظمسازی، میدان زمین *گ*رمایی سبلان.

### مقالات مستخرج از رساله:

قائدرحمتی، ر، مرادزاده، ع، فتحیان پور، ن، لی، س، (۱۳۹۱لف)، "معکوس سازی دادههای مصنوعی مگنتوتلوریک به منظور بررسی توانایی این دادهها در اکتشاف مواد معدنی"، پانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ص۴۱، تهران. قائدرحمتی، ر، مرادزاده، ع، فتحیان پور، ن، لی، س، (۱۳۹۱ب)، "معکوس سازی دوبعدی دادههای پروفیل زنی آرایه الکترومغناطیسی (EMAP) منطقه اکلاهومای آمریکا، پانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران"، ص۵۱، تهران. قائدرحمتی، ر، مرادزاده، ع، فتحیان پور، ن، پرخیال، س، (۱۳۹۲)، "مدل سازی وارون و تفسیر دوبعدی مدادههای نیمرخزنی آرایه الکترومغناطیسی (EMAP)، مجله **ژئوفیزیک ایران**، جلد ۲، شماره ۱، مجله **ژئوفیزیک ایران**، جلد ۲۰ شماره ۱،

- Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N. (2011) "Inversion of synthetic MT data related to a conceptual model of geothermal system" International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina (GEOINDO), Khon Kaen, Thailand.
- Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N., Lee, S. K., Porkhial, S. (2013a) "3-D inversion of MT data from the Sabalan geothermal field, Ardabil, Iran" Journal of Applied Geophysics, 93, 12–24.
- Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N., Lee, S.K. (2013b) "Investigating 2-D MT inversion codes using real field data" Arab J. Geosci., DOI 10.1007/s12517-013-0869-6.

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه و کلیات
۲	١ – ١ – مقدمه
۶	۱-۲- سابقه روشهای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک
۱۲	۳-۱- طرح مسئله و ضرورت تحقيق
14	۱-۴-۱ اهداف و روش تحقیق
۱۵	-۵−۱ ساختار رساله
۱۷	فصل دوم: مبانی روش مگنتو تلوریک
۱۸	<i>−</i> ۱−۲ مقدمه
۱۸	۲-۲-منشاء میدانهای الکترومغناطیس در روش مگنتوتلوریک
T1	۲-۳- مفاهيم پايه انتشار ميدانهاي الكترومغناطيس
71	۲-۲-۱ معادلات ما کسول
74	۲-۳-۲ مدلهای میدان الکترومغناطیس
۲۵	۲-۳-۳- امواج الکترومغناطیس تخت در یک محیط همگن و همسان گرد
۲۸	۲-۳-۲ انتشار میدانهای الکترومغناطیس تخت در یک زمین لایهای افقی
٣٠	۲-۴- روش مگنتوتلوریک
۳۰	۲-۴-۲ مفهوم مقاومتویژه ظاهری و سونداژ در روش مگنتوتلوریک
۳۱	۲-۴-۲ ارتباط بین منحنی سونداژ مگنتوتلوریک و مدل واقعی مقاومتویژه یکبُعدی
۳۲	۲-۴-۲ امپدانس و توابع انتقال قائم مگنتوتلوریک
۳۵	۲-۴-۲-میدانهای مگنتوتلوریک در محیط ناهمگن دوبُعدی و مفهوم قطبشهای E و H
۳۷	۲-۴-۲ اندازه گیری و پردازش دادههای مگنتوتلوریک
۴۰	۲-۴-۲ دادههای مقاومتویژه ظاهری و فاز مگنتوتلوریک
۴۲	۲-۵- تحلیل ابعادی و تعیین امتداد ژئوالکتریکی ساختار زیر سطحی
۴۲	۲-۵-۲ بردارهای القایی مغناطیسی
ff	۲-۵-۲- آشفتگیهای سطحی
¥8	TE-۵-۲- رفتار مُدهای TE و TM در برخورد با ناهمگنیهای جانبی
۴۸	۲-۵-۴- پارامترهای ابعادی سویفت و باهر
۴۹	۲-۵-۵- نمودارهای قطبی امپدانس

## فهرست مطالب

۵۰	۲-۵-۹- تحليل ابعادي والديم
۵۲	فصل سوم: مبانی روشهای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک
۵۳	۱-۳ – مقدمه
۵۵	۳-۲- معکوسسازی یکبُعدی دادہھای مگنتوتلوریک
۵۵	۳-۲-۲ روش تبديل تقريبي بوستيک
۵۷	۳-۲-۲ روش معکوسسازی هموار (معکوس سازی اُکام)
۶۲	۳-۳- معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک
97	۳-۳-۱ روش معکوسسازی هموار (معکوسسازی اُکام)
۶۳ .	۳-۳-۲ روش معکوسسازی فضای دادهها
99	۳-۳-۳ روشهای معکوسسازی دوبُعدی بر اساس تقریب ماتریس حساسیت
۶۸	۳-۳-۴- روش معکوسسازی با استفاده از زیرفضای مدل
۶٩ .	۳-۳-۵- روش معکوسسازی با استفاده از زیرفضای دادهها
٧٠	۳-۳-۶- روش معکوسسازی گرادیان مزدوج غیرخطی
۷٣	۳-۳-۷ سایر روشهای معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک
۷۶	۳-۴- معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک۳
۷۶	۳-۴-۴ روش معکوسسازی هموار گوس-نیوتن
۷۷	۳-۴-۴ روش معکوسسازی فضای دادهها
۷٩	۳-۴-۳- معکوسسازی به روش گرادیان مزدوج
٨٢	۳-۴-۴- معکوسسازی به روش گرادیان مزدوج غیرخطی
٨٣	۳-۴-۵- معکوس سازی به روش شبه-نیوتنی حافظه محدود
٨۴	۳-۴-۴- روشهای معکوسسازی بر اساس تقریب بورن
٨۵	۳-۵- جمعبندی و نتیجه گیری
ے با	فصل چهارم: بررسی عملی نقاط قوت و ضعف روشهای معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک
٨٨	تأکید بر نقش پارامتر منظمسازی
٨٩	۱–۴–مقدمه
٨٩	۴-۲- مدل سازی معکوس دادههای مصنوعی

٨٩	۴-۲-۲ مدل مصنوعی ۱
۹۲	۴-۲-۲- مدل مصنوعی ۲
٩۶	۴-۳- مدلسازي معكوس دادههاي واقعى
۹۶	۴-۳-۲ دادههای منطقه اکلاهوما
۱۰۵	۴-۳-۲ دادههای منطقه زمین گرمایی سبلان
117	۴-۴- نتیجه گیری
<b>ی با تعیین روش مناسب برای</b>	فصل پنجم: بهبود الگوریتم معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک
118	انتخاب پارامتر منظمسازی
١١٧	۵–۱– مقدمه
١٢٠	۵-۲- اصول روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی
١٢٠	۵-۲-۲ روش اصل اختلاف
177	GCV-۲-۲- روش GCV و GCV اصلاح شده
174	۵-۲-۲ روش منحنی L
۱۲۵	۵-۲-۴ روش تخمین خطا
١٢٧	۵-۲-۵ روش نقطه ثابت
١٢٨	۵-۲-۶- روش شبه بهینگی
١٢٨	-۲-۵-روش مربع کای (x <sup>2</sup> )
١٢٩	۵-۲-۸ روش مجو
۱۳۰	۵-۲-۹ روش نسبت عدم برازش به نرم مدل
1771	۵-۳- تحلیلهای عددی
۱۳۱	۵–۳–۱ – دادههای مصنوعی
۱۳۹	۵-۳-۲ دادههای واقعی
۱۴۸	۵–۳–۳ دادههای مصنوعی حاوی نوفه
۱۵۳	۵-۴- بحث و نتیجه گیری
عاظ روش مناسب برای انتخاب	فصل ششم: بهبود مدلسازی معکوس سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک با ك
18.	پارامتر منظمسازی
181	۶–۱ – مقدمه

188	۶-۲- مدل سازی معکوس دادههای مصنوعی
188	۶-۲-۲ - مثال اول
189	۶-۲-۲- مثال دوم
۱۷۳	۶-۳- مدلسازی معکوس دادههای واقعی
۱۷۳	۶-۳-۱ میدان زمین گرمایی سبلان
۱۷۷	۶-۳-۲ دادههای مگنتوتلوریک و تحلیل ابعادی آنها
۱۷۸	۶-۳-۳- معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک منطقه غرب سبلان
۱۸۲	۶-۳-۴ تفسیر نتایج معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک منطقه غرب سبلان
۱۹۲	۶-۳-۵- معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک منطقه شمال سبلان
198	۶-۳-۶- تفسیر نتایج معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک منطقه شمال سبلان
۲۰۱	فصل هفتم: نتايج و پيشنهادات
202	<ul> <li>−۱−Υ</li> </ul>
۲۰۳	۲-۲- نتایج
۲۰۸	۳-۷- پیشنهادات
۲۱۰	منابع
221	پيوست الف
226	پيوست ب
۲۳۱	پيوست ج
797	پيوست د

# فهرست اشكال

صفحه	عنوان
۲۰	شکل (۲-۱): مسیر ظاهری یک جریان پلاسمای خورشیدی از خورشید به طرف زمین
۲۶	شکل (۲-۲): انتشار عمقی میدان الکترومغناطیس تخت در یک محیط همگن و همسان گرد
۲۸	شكل (۲-۳): تضعيف دامنه موج الكترومغناطيس نسبت به عمق در يك زمين همگن
۲۸	شکل (۲-۴): عمق پوست به عنوان تابعی از مقاومتویژه و فرکانس در یک زمین همگن
۲۹	شکل (۲-۵): انتشار میدانهای الکترومغناطیس تخت در یک زمین لایهای افقی
۳۶	شکل (۲-۶): تشریح مُدهای TE و TM در یک مدل ساده دوبُعدی با ناپیوستگی قائم ( $ ho_1  eq  ho_2$ )
۳۸	شکل (۲-۷): آرایش سنجندهها برای اندازه گیری مؤلفههای میدان الکتریکی و مغناطیسی
۴۰	شکل (۲–۸): نمونه سریهای زمانی اندازه گیری شده برای مؤلفههای افقی میدان مگنتوتلوریک
۴۳	شکل (۲-۹): مؤلفه حقیقی بردارهای القایی (مطابق قرارداد پارکینسون) ترسیم شده روی یک
۴۵	شکل (۲-۱۰): اثرات گالوانیک برای یک ناهمگنی رسانا (سمت چپ) و یک ناهمگنی مقاوم
۴۷	شکل (۲–۱۱): پاسخهای مقاومتویژه و فاز ظاهری برای مُدهای TE و TM برای یک مدل ساده دوبُعدی
۵۰	شکل (۲–۱۲): مثالی از نمودارهای قطبی امپدانس برای مدلهای یکبُعدی، دوبُعدی و سهبُعدی
۵۶	شکل (۳-۱): منحنیهای مقاومتویژه ظاهری به صورت تابعی از فرکانس زاویهای (۵) برای یک لایه
۹۱	شکل (۴-۱): الف- یک مدل مصنوعی مشابه کار پلرین و همکاران [Pellerin and et al., 1996]، بر اساس
94	شکل (۴–۲): الف– یک مدل مقاومتویژه شامل یک توده رسانا با مقاومتویژه ۱۰ اهم-متر به همراه
۹۵	شکل (۴–۳): الف- یک مدل مقاومتویژه شامل یک توده رسانا با مقاومتویژه ۱۰ اهم- متر به همراه
۹۶	شکل (۴-۴): نقشه موقعیت اندازه گیری های EMAP و مگنتوتلوریک در منطقه اکلاهوما
۹۹	شکل (۴-۵): مدلهای به دست آمده از معکوسسازی دوبُعدی دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی
۱۰۱	شکل (۴–۶): مقایسه دادههای تئوری مقاومتویژه ظاهری و فاز حاصل از مدلسازی معکوس دوبُعدی دادههای .
۱۰۲	شکل (۴–۷): مقایسه دادههای تئوری مقاومتویژه ظاهری و فاز حاصل از مدلسازی معکوس دوبُعدی دادههای .
۱۰۴	شکل (۴–۸): مدل معکوس به دست آمده برای دادههای مقاومتویژه ظاهری و فاز دو مُد TM و TE
۱۰۴	شکل (۴-۹): مقایسه دادههای تئوری مقاومتویژه ظاهری و فاز حاصل از مدلسازی معکوس دوبُعدی
۱۰۶	شکل (۴–۱۰): موقعیت پروفیلهای مگنتوتلوریک در منطقه زمین گرمایی سبلان
۱۰۷	شکل (۴–۱۱): مدلهای معکوس دوبُعدی به دست آمده با الگوریتمهای مختلف برای دادههای مُد TM
۱۰۸	شکل (۴–۱۲): مقایسه شبهمقاطع دادههای تئوری مقاومتویژه (مقاطع سمت راست) و فاز
117	شکل (۴–۱۳): ترسیم مقادیر عدم برازش به عنوان تابعی از نرم مدل در تکرار دوم اجراهای مختلف
۱۲۵	شکل (۵-۱): شکل عمومی منحنی L
۱۳۲	شکل (۵-۲): الف- یک مدل مصنوعی مطابق مدل منظور شده توسط لی و همکاران
۱۳۶	شکل (۵-۳): تغییرات عدم برازش و نرم مدل در تکرارهای مختلف معکوسسازی
۱۳۸	شکل (۵-۴): الف- یک مدل مصنوعی مطابق مدل منظور شده توسط ساساکی
141	شکل (۵-۵): مدلهای حاصل از معکوسسازی دوبُعدی دادههای مقاومتویژه ظاهری و فاز
147	شکل (۵–۴): مقایسه شبه مقاطع دادههای مشاهدهای مقاومتویژه ظاهری و فاز مُد TE
147	شکل (۵–۷): مقایسه شبه مقاطع دادههای مشاهدهای مقاومتویژه ظاهری و فاز مُد TM

ن

149	شکل (۵–۸): مدلهای حاصل از معکوسسازی دوبُعدی دادههای مقاومتویژه ظاهری و فاز مُد TM
141	شکل (۵-۹): مقایسه شبه مقاطع دادههای مشاهدهای مقاومتویژه ظاهری و فاز مُد TM
۱۵۰	شکل (۵-۱۰): مدل معکوس دوبُعدی به دست آمده از دادههای مصنوعی شکل (۵-۴-الف)
107	شکل (۵–۱۱): تغییرات تابع GCV بهبود یافته نسبت به پارامتر منظمِسازی در هر تکرار
107	شکل (۵–۱۲): منحنی های (L شکل) حاصل از تغییرات نرم مدل نسبت به مقدار عدم برازش
۱۵۳	شکل (۵–۱۳): تغییرات مقادیر عدم برازش و نرم مدل به عنوان توابعی از پارامتر منظمسازی
194.	شکل (۶-۱): یک مدل مصنوعی سهبُعدی بر اساس یک مدل مفهومی برای منابع زمینگرمایی
188	شکل (۶-۲): مقاطع مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سهبعدی دادههای مصنوعی
۱۷۰	شکل (۶-۳): یک مدل مصنوعی سهبُعدی به عنوان یک مدل مفهومی برای منابع زمین گرمایی
177	شکل (۶-۴): مقاطع مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سهبُعدی دادههای مصنوعی
۱۷۳	شکل (۶–۵): موقعیت محدودههای مورد مطالعه روی نقشه توپوگرافی منطقه زمین گرمایی سبلان
۱۷۵	شکل (۶-۶): نقشه زمینشناسی منطقه زمین گرمایی سبلان
178	شکل (۶-۷): نقشه توپوگرافی میدان زمین گرمایی منطقه غرب و جنوب غرب سبلان
۱۷۹	شکل (۶–۸): مقاطع افقی (الف) و قائم (ب) شبکه بلوکهای مقاومتویژه
۱۸۱	شکل (۶–۹): مقایسه دو مقطع مقاومتویژه حاصل از مدلهای معکوس سهبُعدی
۱۸۳	شکل (۶–۱۰): مقاطع افقی مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک
۱۸۴	شکل (۶–۱۱): مقاطع افقی مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک
۱۸۶	شکل (۶–۱۲): مقایسه شبه مقاطع دادههای مشاهدهای مقاومتویژه برای هر مؤلفه امپدانس
۱۸۷	شكل (۶–۱۳): مقايسه مقاطع مقاومتويژه حاصل از معكوسسازي سهبُعدي
۱۸۹	شکل (۶–۱۴): مدل معکوس دوبُعدی در طول پروفیل P01 به همراه دادههای حفاری
۱۹۰	شکل (۶–۱۵): مقاطع مقاومتویژه در طول پروفیلهای P08 (در سمت چپ) و P07
۱۹۵	شکل (۶–۱۶): مقایسه مقاطع قائم حاصل از معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک
۱۹۹	شکل (۶–۱۷): مقاطع افقی مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک
۲۰۰	شکل (۶–۱۸): مقایسه شبه مقاطع دادههای مشاهدهای مقاومتویژه برای مؤلفههای اصلی امپدانس
779	شکل (ب-۱): همبستگی بین مقاومتویژه، دگرسانی و درجه حرارت برای منابع زمین گرمایی
227	شکل (ب-۲): مدل مقاومتویژه مفهومی برای سیستم زمینگرمایی با دگرسانی وسیع
۲۳۰	شکل (ب-۳): یک مدل مفهومی برای سیستم زمین گرمایی در موقعیت توپوگرافی شدید
۲۳۰ .	شکل (ب-۴): مدل مفهومی برای میدان زمین گرمایی درجه حرارت بالا
268	شکل (د-۱): منحنیهای مقاومتویژه ظاهری و فاز برای هر چهار مؤلفه امپدانس
789	شکل (د-۲): منحنیهای مقاومتویژه ظاهری و فاز برای هر چهار مؤلفه امپدانس
271	شکل (د-۳): بردارهای القای مغناطیسی برای چهار محدوده زمانتناوب در ۴۱ ایستگاه اندازهگیری
777	شکل (د-۴): نمودارهای قطبی امپدانس برای چهار محدوده زمان تناوب در ۴۱ ایستگاه اندازه گیری
۲۷۳	شکل (د-۵): مقادیر چولگی حساس به فاز (چولگی باهر) در زمانهای تناوب ۰/۰۱ تا ۱۰۰ ثانیه
278	شکل (د-۶): مقادیر چولگی حساس به فاز (چولگی باهر) در زمانهای تناوب ۱۰/۰ تا ۱۰۰ ثانیه

# فهرست جداول

#### صفحه

عنوان

جدول (۴-۱): مقادیر RMS، نرم مدل و تعداد پارامتر منظم سازی مورد جستجو
جدول (۲-۴): مقادیر RMS، نرم مدل و تعداد پارامتر منظم سازی مورد جستجو
جدول (۴-۳): مقادیر مختلف RMS و نرم مدل برای اجراهای مختلف معکوس سازی
جدول (۵-۱): مقادیر پارامتر منظم سازی برای روش های مختلف انتخاب این پارامتر
جدول (۵-۲): مقادیر پارامتر منظمسازی برای روشهای مختلف انتخاب این پارامتر
جدول (۵-۳): مقادیر پارامتر منظمسازی برای روشهای مختلف انتخاب این پارامتر
جدول (۵-۴): مقادیر پارامتر منظمسازی برای روشهای مختلف انتخاب این پارامتر
جدول (۵-۵): مقادیر پارامتر منظمسازی برای روشهای مختلف انتخاب این پارامتر
جدول (۵-۶): زمان لازم برای انجام ۱۰ تکرار معکوس سازی دادههای مصنوعی
جدول (۶-۱): مقادیر پارامتر منظم سازی، RMS و نرم مدل در تکرارهای مختلف معکوس سازی
جدول (۶-۲): مقادیر پارامتر منظم سازی، RMS و نرم مدل در تکرارهای مختلف معکوس سازی
جدول (۶–۳): مقادیر پارامتر منظمسازی، RMS و نرم مدل در تکرارهای مختلف معکوسسازی
جدول (۶-۴): مقادیر پارامتر منظم سازی، RMS و نرم مدل در تکرارهای مختلف معکوس سازی
جدول (د-۱): نتایج تحلیل ابعادی ۸ ایستگاه مگنتوتلوریک معرف در منطقه مورد مطالعه
جدول (د-۲): نتایج تحلیل ابعادی ۵ ایستگاه مگنتوتلوریک معرف در منطقه شمال سبلان

# فهرست اختصارات

ABIC: Akaike Bayesian Information Criterion	ملاک اطلاعات بیزین آکاییک
ACB: Active Constrain Balancing	متعادلسازي قيد فعال
AMT: Audio Magnetotelluric	مگنتوتلوریک در حوزه فرکانس شنوایی
CG: Conjugate Gradient	گرادیان مزدوج
CPU: Central Processing Unit	واحد پردازنده مرکزی
CSEM: Controlled Source Electromagnetic	الكترومغناطيس با منبع كنترلي
DC: Direct Current	جريان مستقيم
EDC: Energy Development Corporation	شرکت توسعه انرژی
EM: Electromagnetic	الكترومغناطيس
EMAP: Electromagnetic Array Profiling	پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی
GCV: Generalized Cross Validation	اعتبارسنجى تقاطعي عمومي شده
GN: Gauss Newton	گوس-نيوتن
GRRI: Generalized Rapid Relaxation Inversion	معكوسسازي واهلش سريع عمومي شده
MT: Magnetotelluric	مگنتوتلوریک
MTP: Magnetotelluric Profiling	پروفیلزنی مگنتوتلوریک
MTS: Magnetotelluric Sounding	سونداژ مگنتوتلوريک
NLCG: Nonlinear Conjugate Gradient	گرادیان مزدوج غیرخطی
RAM: Random Access Memory	حافظه دستیابی تصادفی
REBOCC: Reduced Basis Occam's Inversion	معکوسسازی کاهش یافته بر پایه اُکام
RMS: Root Mean Squares	جذر میانگین مربعات
RRI: Rapid Relaxation Inversion	معكوسسازي واهلش سريع
SKM: Sinclair Knight Merz	نام یک شرکت
TEM: Time Domain Electromagnetic	الكترومغناطيس حوزه زمان
TSVD: Truncated Singular Value Decomposition	تجزيه مقادير تكين ناقص

# فهرست علائم و واحدها

E: Electric field (V/m)	بردار میدان الکتریکی (ولت بر متر)
<b>D:</b> Electric displacement (C/m <sup>2</sup> )	بردار جریانهای جابجایی (کولن بر متر مربع)
<b>J:</b> Electrical current density $(A/m^2)$	بردار چگالی جریان الکتریکی (آمپر بر متر مربع)
H: Magnetic field intensity (A/m)	بردار شدت میدان مغناطیسی (آمپر بر متر)
<b>B:</b> Magnetic induction (wb/m <sup>2</sup> )	بردار القای مغناطیسی (وبر بر متر مربع)
q: Electrical charge density (C/m <sup>3</sup> )	چگالی بار الکتریکی (کولن بر متر مکعب)
$\epsilon_0$ : Electrical permittivity of free space (8.85 × 10 <sup>-12</sup> F/m)	ظرفیت ویژه دی الکتریکی فضای آزاد (۱۰ <sup>-۱۲</sup> ×۸/۸۵ فاراد بر متر)
ε: Electrical permittivity (A.sec/V.m)	ظرفیت ویژه دی الکتریکی (آمپر. ثانیه بر ولت. متر)
$\mu_0$ : Magnetic permeability of free space (1.2566×10 <sup>-6</sup> H/m)	قابلیت گذردهی فضای آزاد ( <sup>۴-</sup> ۱۰×۱/۲۵۶۶ هانری بر متر)
μ: Magnetic permeability (V.sec/A.m)	ی. قابلیت گذردهی مغناطیسی (ولت. ثاتیه بر آمپر)
σ: Electrical conductivity (1/Ohm.m = S/m)	رسانایی ویژه الکتریکی (۱ بر اهم-متر یا زیمنس بر متر)
$\rho_a$ : Apparent resistivity (Ohm-m)	مقاومت ویژه ظاهری (اهم متر)
$E_x, E_y, E_z$	مؤلفههای میدان برداری الکتریکی
$H_x, H_y, H_z$	مؤلفەھاي ميدان برداري مغناطيسي
Z: Impedance tensor	تانسور امپدانس
$Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$	مؤلفههای تانسور امپدانس
$T_{zx}$ , $T_{zy}$ : Magnetic transfer function (Tipper)	توابع انتقال مغناطیسی (تیپر)
$\chi^2$ : Chi square	مربع کای، بیان کنندہ تابع توزیع آماری مربع کای
1-D: One-dimensional	یکبُعدی
2-D: Two-dimensional	دوبُعدى
3-D: Three-dimensional	سەبُعدى
f: Frequency (Hz)	فرکانس بر حسب هرتز
δ: Skin depth	عمق پوست ميدان الكترومغناطيس بر حسب متر
η: Bahr skew parameter	پارامتر چولگی باهر
$\lambda$ : Regularization parameter	پارامتر منظمسازی
φ: Phase (degree)	فاز بر حسب درجه
ω: Angular frequency (= $2\pi$ f)	فرکانس زاویهای

فصل اول مقدمه و کلیات

#### ۱–۱– مقدمه

اساس روشهای ژئوفیزیکی مطالعه انتشار میدانهای فیزیکی مختلف در درون زمین میباشد. یکی از پرکاربردترین این میدانها، میدان الکترومغناطیس<sup>۱</sup> بوده که توسط چشمههای طبیعی یا مصنوعی تولید میشود. روشهای الکترومغناطیسی برای مطالعه رفتار این میدان در درون زمین به کار گرفته میشوند. این روشها به همراه روشهای میدان پتانسیل<sup>۲</sup> و لرزهنگاری<sup>۳</sup> سه دسته اصلی روشهای ژئوفیزیکی را تشکیل میدهند.

روش مگنتوتلوریک<sup><sup>†</sup></sup> یکی از روشهای الکترومغناطیسی است؛ که از میدانهای طبیعی زمین برای به نقشه درآوردن تغییرات مقاومتویژه الکتریکی<sup>۵</sup> زیر سطح زمین استفاده می کند [;Tikhonov, 1950 [Cagniard, 1953]. عمق نفوذ بالای میدانهای الکترومغناطیس در روش مگنتوتلوریک (از دهها متر تا دهها کیلومتر) که تقریباً به صورت امواج تخت<sup>2</sup> در زمین نفوذ می کنند؛ باعث شده است که این روش جایگاه ویژهای در بین سایر روشهای الکترومغناطیس داشته باشد. امروزه روش مگنتوتلوریک در اکتشاف ساختارهای زمین شناسی و منابع زمین گرمایی<sup>۷</sup>، هیدروکربوری و معدنی دارای کاربرد وسیعی می باشد. البته عمق اکتشاف بالای این روش به واسطه میدانهای با فرکانس پایین، باعث کاربرد خاص آن برای اکتشاف ساختارهای عمیق زمین شناسی، منابع زمین گرمایی و هیدروکربوری و همچنین خایر معدنی عمیق شده است [300]

منشاء اصلی میدانهای طبیعی الکترومغناطیس در این روش در محدوده فرکانسی ۰/۰۰۰۱ تا ۱۰۰۰۰ هرتز، فعالیتهای خورشیدی و آذرخشهای بزرگ مقیاس است. این فعالیتها میدانهای الکترومغناطیسی تولید میکنند که در فضای بین یونسفر<sup>۸</sup> و سطح زمین منتشر میشوند. در روش

- <sup>4</sup>- Manetotelluric (MT)
- <sup>5</sup>-Electrical resistivity
- <sup>6</sup>- Plain waves
- <sup>7</sup>- Geothermal <sup>8</sup>- Ionosphere

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Electromagnetic (EM)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Potential field methods

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Seismic methods

مگنتوتلوریک جریانهای الکتریکی در اثر تغییرات میدان الکترومغناطیسی طبیعی در زمین القا می-شوند. این جریانهای القایی میدانهای الکترومغناطیس ثانویه را تولید کرده و باعث تغییر میدان الکترومغناطیسی کل در سطح زمین میشوند. جریان القایی تولید شده در زمین به بزرگی میدانهای Telford et al., 1990; Dobrin and [ الکترومغناطیسی و خواص الکتریکی سنگها بستگی دارد [ Savit, 1988].

در روش مگنتوتلوریک با ثبت مؤلفههای عمود بر هم نوسانات میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین، میتوان توزیع رسانایی الکتریکی زیر سطح را به دست آورد. تغییرات این مؤلفههای میدان به صورت دادههای سری زمانی<sup>۱</sup> اندازه<sup>2</sup> بری میشوند. سپس در طی فرآیند پردازش، با تبدیل این سریهای زمانی از حوزه زمان به حوزه فرکانس، مقادیر این میدانها در حوزه فرکانس محاسبه میشود و با انجام یک مجموعه عملیات ریاضی، کمیت مهمی به نام امپدانس<sup>۲</sup> که بیان کننده ارتباط خطی بین مؤلفههای افقی میدان الکتریکی تولید شده به واسطه مؤلفههای افقی میدان مغناطیسی منبع است، محاسبه میشود. در حالت عمومی این امپدانس به صورت یک تانسور<sup>۲</sup> دوبُعدی بوده و مؤلفههای آن به صورت توابعی از فرکانس، بیان کننده توزیع رسانایی زمین هستند. در مرحله بعد دادههای مقاومتویژه ظاهری و فاز امپدانس برای مؤلفههای مختلف تانسور امپدانس (یا زمان- شوند. سپس با ترسیم منحنیهای مقاومتویژه ظاهری و فاز به صورت توابعی از فرکانس (یا زمان- تناوب<sup>3</sup>) و بررسی این منحنیها، میتوان یک تفسیر اولیه برای تغییرات مقاومتویژه زیر سطحی بیان نمود [1901]، مرحله نهایی تفسیر با استفاده از مدلسازی دادهها صورت میگیرد. البته قبل نمود [2003]، مرحله نهایی تفسیر با استفاده از مدلسازی دادهها صورت می محاسبه می- میتورد. این منحنیها، میتوان یک تفسیر اولیه برای تغییرات مقاومتویژه زیر سطحی بیان میدر این این منحنیها، میتوان یک تفسیر اولیه مرای تغییرات مقاومتویژه زیر سطحی بیان نمود [201]

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Time series

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Impedance

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Tensor

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Period

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>- Dimensionality analysis

بسیاری از موارد تخمین امتداد ژئوالکتریکی ساختارها از اساسیترین مراحل تحلیل قبل از مدلسازی

و تفسیر دادهها بخصوص برای مدلسازی دوبعدی میباشد [Siripunvaraporn, 2012]. از آنجا که تفسیر کیفی دادههای خام ژئوفیزیکی به علت وجود خطا و همچنین ظاهری بودن عمقها و شکل آنومالیها نمیتواند توزیع خواص زیر سطحی را بیان کند؛ بنابراین مدلسازی این دادهها امری اجتناب ناپذیر است. یک روش سنتی برای تحلیل دادههای ژئوفیزیکی، ساخت مدلهای مختلف زمینشناسی و مقایسه دادههای تئوری محاسبه شده از این مدلها با دادههای شاهدهای است. این روش به مدلسازی پیشرو<sup>۱</sup> موسوم است. هدف اصلی اندازه گیری دادههای ژئوفیزیکی، تخمین ساختارهای زمین شناسی زیر سطحی است و این کار به خاطر طبیعت ساختارهای زمین، مسئله بسیار مشکلی است. مدل واقعی زمین معمولاً با یک مدل ساده زمین شناسی تخمین زده شده و سعی می-شود تا پارامترهای مدل مورد نظر توسط دادههای مشاهدهای تعیین شود. این مسئله به مدلسازی معکوس<sup>7</sup> یا معکوس سازی<sup>7</sup> موسوم است. در واقع مسئله پیشرو از فضای پارامترهای مدل به فضای دادهها تعریف میشود؛ در صورتی که مسئله معکوس از فضای دادهها به فضای پارامترهای مدل به فضای

تفسیر دادههای مگنتوتلوریک همانند سایر روشهای ژئوفیزیکی بدون مدلسازی دادهها امری امکان-ناپذیر است. استفاده از روشهای پیشرو برای دادههای مگنتوتلوریک به خصوص در مسائل دو و سه بُعدی کاری طاقت فرسا است. چون در این روشها پاسخ مدل به صورت سعی و خطا به دادههای مشاهدهای برازش شده و مجموعه پاسخها نیز در این روش قابل ملاحظه است. به طور کلی روشهای مدلسازی معکوس به خاطر نیرومندی، سرعت و توانایی در تشخیص عدم قطعیتها نسبت به روش-های پیشرو ترجیح داده می شوند [Newman and Alumbaugh, 2000].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Forward Modeling

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Inverse modeling

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Inversion

مسئله معکوس مگنتوتلوریک همانند اغلب روشهای ژئوفیزیکی از دسته مسائل جورنشده (بدوضع)<sup>۱</sup> میباشد. عمدتاً در مسائل معکوس، پاسخ یکتا نیست. منظور این است که ممکن است دو یا چند مدل با دو یا چند منبع مختلف وجود داشته باشند که دسته داده یکسانی را تولید کنند. برای حل این گونه مسائل معمولاً از روشهای منظمسازی<sup>۲</sup> استفاده میشود. یکی از روشهای منظمسازی که در حل مسائل معکوس ژئوفیزیکی از جمله مسئله معکوس مگنتوتلوریک کاربرد وسیعی دارد، روش منظم-سازی تیخونف<sup>۳</sup> [Tikhonov and Arsenin, 1977] است. مطابق این روش مسئله معکوس به صورت زیر نوشته میشود:

$$\Psi(\mathbf{m}) = \Psi_{\rm d}(\mathbf{m}) + \lambda^2 \Psi_{\rm m}(\mathbf{m}) \tag{1-1}$$

که در آن **m** بردار پارامترهای مدل،  $\Psi$  تابع هدف<sup><sup>3</sup></sup> یا تابع جریمه<sup>۵</sup> مسئله معکوس که باید کمینه شود؛  $\Psi_d$  تابع عدم برازش<sup>2</sup> که بیان کننده نیکوئی برازش بین دادههای مشاهدهای و دادههای تئوری است،  $\Psi_m$  یک پایدار کننده که بیان کننده نرم مدل<sup>۷</sup> یا ناهمواری<sup>۸</sup> مدل است و  $\lambda$  ضریب لاگرانژ<sup>۹</sup> یا یا پارامتر منظمسازی<sup>۱۰</sup> است؛ که مقادیر نرم مدل و عدم برازش را در کمینه کردن تابع هدف کنترل میکند؛ به طوری که اگر  $\lambda$  مقدار بزرگی انتخاب شود، تأثیر میزان برازش در مدل کم میشود و همچنین اگر  $\lambda$  مقدار کوچکی انتخاب شود، از اهمیت پایداری مدل کاسته میشود. جمله دوم در سمت راست رابطه (۱–۱) به بخش منظمسازی معروف است. مسئله معکوس به انضمام این جمله را

- <sup>1</sup>- Ill-posed
- <sup>2</sup>- Regularization
- <sup>3</sup>- Tikhonov regularization
- <sup>4</sup>-Objective function
- <sup>5</sup>- Cost function
- <sup>6</sup>- Misfit
- <sup>7</sup>- Model norm
- <sup>8</sup>- Roughness
- <sup>9</sup>- Lagrange multiplier
- <sup>10</sup>- Regularization parameter

تا به امروز الگوریتمهای مختلفی برای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک در حالتهای یک، دو و سه بُعدی ٔ توسعه داده شده است. اما هنوز هم برخی از مؤلفهها و پارامترهای معکوسسازی از جمله چگونگی انتخاب و تنظیم پارامتر منظمسازی در این الگوریتمها نیاز به بحث و توسعه بیشتر دارد.

۲-۱- سابقه روشهای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک

در ژئوفیزیک مسائل معکوس غالباً غیرخطی می باشند. در واقع با بسط جمله اول در سمت راست رابطه (۱-۱) تابع پیشرو برای محاسبه دادههای تئوری در رابطه وارد می شود و به واسطه غیرخطی بودن این تابع پیشرو مسئله معکوس غیرخطی می شود. روش استاندارد برای حل مسئله معکوس غیر-خطی در ژئوفیزیک، معکوسسازی به روش خطیسازی ۲ و حل تکراری آن است. به این صورت که تابع پیشرو با استفاده از دو جمله اول بسط سری تیلور حول یک مدل مرجع تقریب زده می شود؛ سپس یک جواب این مسئله معکوس خطی شده به روش کمترین مربعات ، محاسبه شده و این جواب جواب به عنوان مدل مرجع جدید محسوب می شود و فرآیند تکراری به همین روش ادامه می یابد [Rodi and Mackie, 2001]. این روش خطی نمودن مسئله معکوس، خطی سازی به روش گوس-نیوتن ۵ هم گفته می شود. همچنین روش هایی از این قبیل که در آن ها مسئله معکوس به روش گوس-گوس-نیوتن خطی شده و معادلات خطی حاصل به روش مستقیم کمترین مربعات حل می شوند را روشهای گوس-نیوتن میگویند [Siripurnvaraporn and Egbert, 2000]. اکثر الگوریتمهای معکوس سازی داده های مگنتوتلوریک بر پایه روش گوس-نیوتن هستند. برای مدل های یک بُعدی این قبيل الگوريتمها شامل كارهاى يو [Wu, 1968] و جاپ و وزوف [Jupp and Vozoff, 1975] بوده كه در آنها مسئله معکوس غیرخطی به روش گوس-نیوتن خطی شده و با استفاده از روش کمترین مربعات حل مي شود. همچنين الگوريتم هاي كانستيبل و همكاران [Constable et al., 1987] و

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- One, two and three-dimensional

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Nonlinear

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Linearization

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Least-squares

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>- Gauss-Newton (GN)

اسمیت و بوکر [Smith and Booker, 1988] که در آنها حل کمترین مربعات خطی شده با توجه به قید هموار بودن به دست میآید، از این نوع هستند. جاپ و وزوف الگوریتم خود را برای مدل دوبُعدی توسعه دادند [Jupp and Vozoff, 1977]. به علاوه الگوریتمهائی برای حل منظم شده مسئله معکوس دوبُعدی توسط جیراسک و همکاران [Jiracek et al., 1987]، مدن و مکی [ Rodi, 1989] deGroot-Hedlin and Constable, مدن و کانستیبل [ Smith and Booker, 1991] و اسمیت و بوکر [Rodi, 1989]، دی گروت- هدلین و کانستیبل [ Smith and Constable, ارودی ال989] و اسمیت و بوکر [Smith and Booker, 1991] ارائه شده است که همگی از نوع گوس-نیوتن هستند.

در حل مسئله معکوس مگنتوتلوریک به روش گوس-نیوتن، حجم محاسبات در تولید و ساخت ماتریس حساسیت<sup>۱</sup> (ماتریس ژاکوبین<sup>۲</sup>) چندین مرتبه بیشتر از محاسبه یک حل پیشرو است. حتی زمانی که از روش تقابل میدانهای الکترومغناطیس<sup>۳</sup> [, Rodi, 1976; McGillivray and Oldenburg, 1976; McGillivray and Oldenburg, 1990] هم استفاده شود، باز هم حجم محاسبات برای ساخت ماتریس حساسیت (به خصوص در مدل سه بعدی) بسیار زیاد است. علاوه بر آن روشهای خطی شده تکراری دارای یک هسته محاسباتی برای حل سیستم خطی معادلات معکوس سازی در هر تکرار روی فضای مدل هستند. این دو بخش یعنی ساخت ماتریس حساسیت و حل سیستم معادلات خطی به خصوص ساخت ماتریس حساسیت باعث شدهاند، حل مسائلی که دارای حجم قابل ملاحظه هستند (از نظر تعداد دادهها و تعداد پارامترهای مدل)؛ مستلزم سیستمهای محاسباتی خاص از نظر سرعت پردازنده<sup>۴</sup> (CPU) و حافظه دستیابی

تصادفی<sup>۵</sup> (RAM) باشند [Newman and Alumbaugh, 2000; Han et al., 2008]. برای رفع این مشکل و در راستای عملی نمودن مسائل معکوس دوبعدی حجیم و معکوسسازی سه-بُعدی دادههای مگنتوتلوریک، الگوریتمهای مختلفی توسعه داده شده است. الدنبرگ و الیز [Oldenburg and Ellis, 1991] با حل مسائل معکوس یک بُعدی برای تقریب پاسخ مدل معکوس دو-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Sensitivity matrix

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Jacobian

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Electromagnetic reciprocity relations

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Central Processing Unit (CPU)

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>- Random Access Memory (RAM)

بُعدى و انجام محاسبات پیشرو دوبُعدى براى برازش به مدل، یک روش معکوسسازى تقریبى دوبُعدى توسعه دادند. یک روش برای تقریب ماتریس حساسیت بر پایه محاسبه میدانهای الکترومغناطیس در یک زمین همگن یا یکبُعدی است؛ که در معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک توسط اسمیت و بوکر [Smith and Booker, 1991] به کار گرفته شده است. در واقع در این روش که به روش معکوس سازی واهلش سریع ٔ یا RRI موسوم است، حساسیتها برای یک زمین همگن محاسبه شده و به جای مقدار دقیق، حساسیتها در معکوسسازی دوبُعدی به کار گرفته می شوند. همچنین این نوع تقریب برای محاسبه معمول مدل معکوس دوبُعدی و سهبُعدی دادههای الکترومغناطیس توسط فركوهارسون و الدنبر الدنبر [Farquharson and Oldenburg, 1996] به كار گرفته شد. الدنبر گ و همكاران [Oldenburg et al., 1993]، روش زیرفضا<sup>۲</sup> را كه در آن حل مسئله معكوس به حل مسئله در یک فضا با ابعاد کمتر از فضای مدل به نام زیرفضا منتهی میشود، توسعه دادند. موفقیت این روش به انتخاب بردارهای یایه زیر فضا بستگی دارد؛ که این انتخاب کار سادهای نبوده و با یک انتخاب نادرست برای این بردارها، ممکن است معکوس سازی منجر به تولید مدل های نادرست شود. يوچيدا [Uchida, 1993] روش ABIC (ملاک اطلاعات بيزين آکاييک)<sup>۳</sup> را برای انتخاب پارامتر منظمسازی بهینه یا به طور معادل شرط هموارسازی بهینه برای معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک توسعه داد.

مکی و مدن [Mackie and Madden, 1993] با استفاده از روش گرادیان مزدوج<sup>†</sup>، الگوریتمی را برای معکوس سازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک توسعه دادند. در این الگوریتم مسئله معکوس خطی شده از نوع گوس-نیوتن به روش تکراری گرادیان مزدوج حل می شود. در این روش از ساخت ماتریس حساسیت به طور صریح اجتناب می شود.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Rapid Relaxation Inversion (RRI)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Subspace

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Akaike Bayesian Information Criterion (ABIC)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Conjugate Gradient (CG)

یمانه و همکاران [Yamane et al., 1996]، یک الگوریتم تعمیم یافته معکوسسازی سریع [GRRI] بر پایه کار اسمیت و بوکر [Smith and Booker, 1991] را برای مدلسازی معکوس دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک توسعه داده و سپس آن را برای حالت سهبُعدی نیز به کار بردند [ 2000].

برای کاهش حجم محاسبات در بخش حل سیستم معادلات خطی معکوسسازی، سیریپورن واراپورن و اگبرت [Siripunvaraporn and Egbert, 2000] با توسعه یک الگوریتم معکوسسازی دوبُعدی بر پایه روش اُکام<sup>۲</sup> [Constable et al., 1987]، نشان دادند که حل مسئله معکوس را میتوان از فضای مدل به فضای دادهها تبدیل نمود. در این روش با توجه به این که تعداد دادهها معمولاً کمتر از تعداد پارامترهای مدل است، به طور قابل توجهی در زمان محاسبات صرفهجویی میشود.

یک روش برای بهبود بازدهی کار بر پایه تقریب سریع طرح مدل سازی پیشرو توسط معادلات انتگرالی به صورت تقریبهای شبه-خطی<sup>7</sup> و شبه-تحلیلی<sup>4</sup> است [;Torress-Verdin and Bostick, 1992; ] بر پایه (Torress-Verdin and Habashy, 1994; Zhdanov and Fang, 1996; Tseng et al., 2003). بر پایه همین روش، الگوریتم معکوس سازی شبه-خطی دادههای الکترومغناطیس توسط ژادانو و همکاران [Zhdanov et al., 2000] توسعه داده شد. هر چند این روش یک تقریب سریع از معکوس سازی داده-های الکترومغناطیس بوده که در عمل نیز برای دادههای مگنتوتلوریک به کار رفته است؛ اما این روش هم همانند دیگر روشهای تقریب دارای محدودیت است. به طوری که این روش برای مدلهای با اختلاف رسانایی کم مناسب بوده ولی در محیطهای با اختلاف رسانایی قابل توجه دارای دقت کم است.

رودی و مکی [Rodi and Mackie, 2001] از روش گرادیان مزدوج غیرخطی به طور مستقیم برای کمینه کردن تابع هدف مسئله معکوس استفاده کرده و یک الگوریتم معکوس سازی دوبُعدی را برای

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Generalized RRI

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Occam

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Quasi-linear

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Quasi-analytic

دادههای مگنتوتلوریک توسعه دادند. در این روش هم همانند روش مکی و مدن [ Madden, 1993 [Madden, 1993] از ساخت صریح ماتریس حساسیت اجتناب می شود. مشابه همین روش توسط نیومن و آلومباخ [Neman and Alumbaugh, 2000] برای معکوس سازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک توسعه داده شد. این روش در ابتدا فقط برای مدل های مصنوعی به کار گرفته شد ولی در کارهای بعدی برای دادههای واقعی [Newman et al., 2008]، البته با یک مجموعه حجیم پردازنده به صورت موازی، به کار رفت.

ساساکی [Sasaki, 2001] امکان معکوس سازی سه بعدی داده های الکترومغناطیس را با ارائه روش حل مؤثر پیشرو در الگوریتم معکوس سازی از نوع گوس-نیوتن، برای مثال های مصنوعی و در یک شبکه درشت برای پارامترهای مدل بررسی نمود. وی بعدها [Sasaki, 2004] با تقریب ماتریس حساسیت به روش شبه-نیوتنی<sup>۱</sup> یک الگوریتم معکوس سازی سه بعدی برای داده های مگنتوتلوریک بر پایه روش هموار گوس-نیوتن توسعه داد و این الگوریتم را برای مثال های مصنوعی و یک مثال واقعی با حجم داده متوسط و تعداد کم پارامتر مدل برای مؤلفه های اصلی تانسور امپدانس مگنتوتلوریک اجرا نمود.

سیریپورن واراپورن و همکاران [Siripurnvaraporn et al., 2005] با توسعه الگوریتم قبلی خودشان [Siripurnvaraporn and Egbert, 2000]، روش معکوسسازی در فضای دادهها را به عنوان روشی مؤثر برای معکوسسازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک معرفی کردند. این روش در ابتدا فقط برای مثالهای مصنوعی و در کارهای بعدی [ ,AMT and Egbert and Egbert, 2006; البته فقط برای [2009]، برای دادههای واقعی مگنتوتلوریک در حوزه فرکانس شنوایی<sup>۲</sup> ( (AMT)، البته فقط برای مؤلفههای اصلی امپدانس به کار گرفته شد. امروزه این روش به عنوان یک روش استاندارد برای Heise et al., 2008; Xiao et al., 2010; البته میشود [ ,2010] [ Ghaedrahmati et al., 2013]

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Quasi-Newton

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Audio Magnetotelluric (AMT)

برای اجتناب از محاسبات مربوط به ماتریس حساسیت با استفاده از تلفیق روش گرادیان مزدوج و روش فضای دادهها در حل مسئله معکوس، یک الگوریتم معکوسسازی دوبُعدی برای دادههای مگنتوتلوریک توسط سیریپورن واراپورن و اگبرت [Siripurnvaraporn and Egbert, 2007] توسعه داده شد و برای مثالهای مصنوعی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین هن و همکاران [ Han داده شد و برای مثالهای مصنوعی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین هن و همکاران [ tan داده شد و برای مثالهای مصنوعی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین هن و همکاران ا داده شد و برای مثالهای مصنوعی مورد تجزیه و تعلیل قرار گرفت. همچنین هن و همکاران ا مسئله معکوس سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک را توسعه دادند. آنها با استفاده از یک روش حل موازی (با استفاده از چند پردازنده) این الگوریتم را برای مثالهای مصنوعی و یک مثال واقعی کوچک به کار گرفتند.

لی و همکاران [Lee et al., 2009a] روش متعادل سازی قید فعال <sup>۱</sup> یا ACB [Yi et al, 2003]، را در معکوس سازی دوبًعدی داده های مگنتوتلوریک در یک الگوریتم گوس-نیوتن صریح به کار گرفتند. در این روش پارامتر منظم سازی به عنوان یک پارامتر فضایی در درون تفکیک حل پارامتری منکه [Menke, 1989] قرار می گیرد و با استفاده از این تفکیک تخمین زده می شود. در واقع الگوریتم ACB در این روش برای به دست آوردن یک قید بهینه همواری اجرا می شود.

روش بهینهسازی شبه-نیوتنی حافظه محدود<sup>۲</sup> به عنوان روشی جدید برای حل مسئله معکوس سه-بُعدی دادههای مگنتوتلوریک توسط اودیو و اودیوا [Avdeeve and Avdeeva, 2009] توسعه داده شده است. در این روش هم همانند روش گرادیان مزدوج و گرادیان مزدوج غیرخطی از ساخت صریح ماتریس حساسیت اجتناب میشود. این روش فقط برای مثالهای مصنوعی اجرا شده است. از مزیت-های اصلی این روش، نیاز به حافظه نسبتاً کم و از معایب آن نرخ همگرایی کمتر نسبت به دیگر روشها است [Siripurnvaraporn, 2012].

سیریپورن واراپورن و ساراکورن [Siripurnvaraporn and Sarakorn, 2011] الگوریتم دوبُعدی حل معادلات خطی معکوس سازی در فضای داده ها توسط روش گرادیان مزدوج [Siripurnvaraporn and

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Active Constrain Balancing (ACB)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Limited-memory quasi-Newton optimization

Egbert, 2007]، را برای حالت سه بعدی توسعه دادند. آنها با تجزیه و تحلیل دادههای مصنوعی و واقعی توسط این الگوریتم اظهار نمودند که این الگوریتم نسبت به الگوریتم سه بعدی فضای دادهها واقعی توسط این الگوریتم اظهار نمودند که این الگوریتم نسبت به الگوریتم سه بعدی فضای دادهها [Siripurnvaraporn et al., 2005] به زمان محاسباتی بیشتری نیاز دارد. همچنین در این الگوریتم و روش دوبعدی نظیر برخلاف روشهای اکام و فضای دادهها پارامتر منظم سازی در طول فرآیند [Siripurnvaraporn, 2012] معکوس سازی ثابت در نظر گرفته می شود. اخیراً سیریپورن واراپورن [Siripurnvaraporn, 2012] روش های معکوس سازی ثابت در نظر گرفته می شود. اخیراً سیریپورن واراپورن [Siripurnvaraporn, 2012] بخشهای معکوس سازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک را مورد بررسی قرار دادهاند. در این کار بخش های اصلی معکوس سازی شامل تابع پیشرو، محاسبه حساسیتها و الگوریتم معکوس سازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک بررسی شده است.

# 1-۳- طرح مسئله و ضرورت تحقيق

در هر مسئله معکوس که به روش منظمسازی حل میشود، تخمین مناسب مقدار پارامتر منظمسازی یکی از مسائل مهم و حائز اهمیت است [ Haber and Oldenburg, 2000; Farquharson and ] به طوری که Oldenburg, 2004; Bauer and Kindermann; 2009; Kaltenbacher et al., 2011]. به طوری که تخمین مناسب این پارامتر میتواند باعث پایداری معکوسسازی و همگرا شدن به مدلی مناسب شود. در مقابل تخمین نامناسب این پارامتر ممکن است باعث عدم ناپایداری معکوسسازی و انحراف به سمت مدلهای غیر واقعی گردد.

به طور کلی در الگوریتمهای موجود برای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک که در بخش قبلی روند توسعه آنها بررسی گردید (و در فصل سوم هم به طور مفصل تر مورد بحث قرار می گیرند)، از دو تدبیر رایج برای تخمین پارامتر منظمسازی استفاده می شود. در تدبیر اول این پارامتر به صورت تجربی تخمین زده می شود و در طول فرآیند معکوس سازی ثابت می ماند. الگوریتم رودی و مکی [Rodi and Mackie, 2001] یک مثال شاخص از این دسته می باشد. در این شیوه، الگوریتم معکوس سازی باید به ازای تعدادی از مقادیر مختلف این پارامتر اجرا شود؛ تا مدل معکوس مناسب حاصل شود. در تدبیر دوم که در روش اَکام [Costable et al., 1987] و دیگر روشهای بر پایه اَکام استفاده می شود. پارامتر منظمسازی در هر تکرار معکوسسازی با استفاده از روش اصل اختلاف (یا اصل عدم انطباق)<sup>۱</sup> تخمین زده می شود. روش اصل اختلاف توسط هنسن [Hansen, 1997] به طور کامل انطباق)<sup>۱</sup> تخمین زده می شود. روش اصل اختلاف توسط هنسن [Hansen, 1997] به طور کامل معکوس- انطباق)<sup>۱</sup> تخمین زده می شود. روش اصل اختلاف توسط هنسن [Hansen, 1997] به طور کامل معکوس- انطباق)<sup>۱</sup> تخمین زده می شود. روش اصل اختلاف توسط هنسن [Hansen, 1997] به طور کامل معکوس- انطباق)<sup>۱</sup> تخمین زده می شود. روش اصل اختلاف توسط هنسن [Hansen, 1997] به طور کامل معکوس- مدره است. این روش به سطح نوفه <sup>۲</sup> داده ها وابسته است. در این روش باید هر تکرار معکوس- سازی برای محدوده وسیعی از پارامترهای منظمسازی اجرا شود؛ تا زمانی که مقدار عدم برازش به عدم برازش هدف که همان سطح نوفه داده ها است برسد. در صورت رسیدن به مقدار عدم برازش مد عدف، معکوسسازی در همان تکرار متوقف می شود. در غیر این صورت کمترین مقدار عدم برازش مد هدف، معکوسسازی در همان تکرار متوقف می شود. در غیر این صورت کمترین مقدار مدم برازش مد اظر قرار گرفته و معکوسسازی تا رسیدن به عدم برازش هدف در تکرارهای بعدی ادامه می باید. الگوریتمهای شاخص معکوسسازی داده های مگنتوتلوریک که از این روش استفاده می کنند شامل الگوریتمهای کانستیبل و همکاران [Constable et al., 1987]، سیریپونواراپورن و اگبرت [Siripunvaraporn et al.] و معکاران [Siripunvaraporn et al.] و سیریپونواراپورن و همکاران [Siripunvaraporn et al.] وسیند.

چون در تدبیر اول پارامتر منظمسازی به صورت سعی و خطا تخمین زده می شود و برای همه تکرار-های معکوس سازی یکسان و ثابت در نظر گرفته می شود، نمی تواند از دقت کافی برخوردار باشد. همچنین اجراهای مختلف معکوس سازی به ازای مقادیر مختلف پارامتر منظم سازی در این شیوه مستلزم هزینه های محاسباتی است. در خصوص تدبیر دوم، با توجه به این که در داده های واقعی سطح نوفه داده ها مشخص نیست؛ لذا استفاده از روش اصل اختلاف که نیازمند اطلاع از سطح نوفه داده ها می باشد ممکن است کارآیی لازم را نداشته و حتی مشکلاتی در حل مسئله معکوس ایجاد نماید. فر کوهار سون و الدنبر گ [Farquharson and Oldenburg, 2004] نیز به این نکته اشاره نموده اند که به خاطر عدم اطلاع از سطح نوفه در داده های واقعی نمی توان از روش اصل اختلاف استفاده نمود. همچنین باوئر و لوکاس [Bauer and Lukas, 2011] در یک بررسی کامل از روش های انتخاب پارامتر

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Discrepancy principal method

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Noise level

منظمسازی نشان دادهاند که برای تخمین مناسب پارامتر منظمسازی توسط این روش نیاز به اطلاع از سطح دقیق نوفه دادهها میباشد. به طوری که عدم اطلاع از سطح نوفه دادهها منجر به حل ضعیف مسئله معکوس میشود. ریچل و رودریگز [Reichel and Rodriguez, 2012] نیز در یک بررسی مشابه از روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی برای مسائل جورنشده گسسته بیان نمودهاند که در صورت در دست داشتن یک تخمین صحیح از سطح نوفه دادهها میتوان با استفاده از روش اصل اختلاف یک مقدار مناسب برای پارامتر منظمسازی تخمین زد. اما با توجه به این که معمولاً سطح نوفه دادهها به طور دقیق مشخص نیست، روش اصل اختلاف را نمیتوان در همه موارد به کار گرفت. در بند قبل، سابقه و روند توسعه روشهای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک بررسی گردید. با توجه به این بررسیها دیده میشود که در توسعه روشها کمتر در خصوص پارامتر منظمسازی بحث شده است. لذا با توجه به موارد فوق، انجام بررسیهای بیشتر و همه جانبه برای انتخاب روش یا روش-مهایی برای تخمین مناسب و بهینه پارامتر منظمسازی در معکوسسازی سریع و دقیق دادههای مگنتوتلوریک ضروری میباشد.

## 1-۴- اهداف و روش تحقيق

هدف اصلی این تحقیق، تخمین مناسب و بهینه پارامتر منظمسازی در معکوسسازی دو و سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک است. به همین منظور نخست روش یا روشهایی مناسب با لحاظ دقت و سرعت برای تخمین پارامتر منظمسازی در مسئله معکوس دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک طراحی میشود. سپس یکی از این روشها برای مسئله معکوس سه بُعدی توسعه داده میشود. جهت نیل به این اهداف، ابتدا مطالعات پایه روش مگنتوتلوریک و بررسی روشهای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک انجام میشود. سپس با انجام آزمایشهای عملی معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک، روش تخمین پارامتر منظمسازی در الگوریتمهای موجود بررسی میشود. در ادامه با مطالعه روشهای انتخاب یا تخمین پارامتر منظمسازی به طور عام در مسائل جورنشده که به روش مگنتوتلوریک طراحی شده و با کد نویسیهای لازم در محیط MATLAB ، این روشها در کد منبع<sup>۱</sup> معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک [Lee et al., 2009a] وارد میشوند. در مرحله بعد با انجام آزمایشهای عددی برای دادههای مصنوعی و واقعی، این روشها مورد بررسی قرار میگیرند و در نهایت روشهای مناسب انتخاب میشوند. با توجه به هدف کار، مرحله بعدی توسعه یکی از روش-های موفق در مرحله قبل برای مسئله معکوس سه بعدی است. لذا در این مرحله با تهیه برنامههای های موفق در نمایس این مرحله بعدی توسعه یکی از روش-های موفق در مرحله قبل برای مسئله معکوس سه بعدی است. لذا در این مرحله با تهیه برنامههای مای موفق در مرحله قبل برای مسئله معکوس سه بعدی است. لذا در این مرحله با تهیه برنامههای مای موفق در مرحله قبل برای مسئله معکوس سه بعدی است. لذا در این مرحله با تهیه می مای مای می موفق می موفق در مرحله قبل برای مسئله معکوس سه بعدی است. لذا در این مرحله با تهیه برنامههای معکوس سازی سازی سازی سرحله با تهیه برنامههای معکوس سازی سازی می مرحله با تهیه برنامههای معکوس سازی موفق در مرحله قبل برای مسئله معکوس سه بعدی است. لذا در این مرحله با تهرای شاخص معکوس سه بعدی است. لذا در این مرحله با تهیه برنامههای معکوس سازی سه بعدی داده مای مگذرتو ای در این مرحله بازی برای یکی از الگوریتمهای شاخص معکوس سازی می از مای در ای در نهایت از روش توسعه داده شده برای مدل سازی معکوس سه بعدی دادههای مصنوعی و واقعی مود. در نهایت از روش توسعه داده شده برای مدل سازی معکوس سه بعدی دادههای مصنوعی و واقعی می می در نهایت از روش میدان زمین گرمایی سبلان استفاده میشود و با مقایسه نتایج حاصل با نتایج حاصل از روش متوسعه داده شده برای سه بعدی، توانمندیهای روش توسعه داده شده بررسی خواهد شد.

# ۱-۵- ساختار رساله

با توجه به هدف تحقیق، این رساله در هفت فصل تدوین شده است. فصل اول به بیان مقدمه، سابقه روشهای معکوس سازی داده های مگنتو تلوریک، مسئله اصلی و ضرورت تحقیق، اهداف و روش تحقیق و ساختار رساله می پردازد.

در فصل دوم مبانی روش مگنتوتلوریک ارائه می شود. در این فصل سعی شده است به طور خلاصه منشاء میدان های الکترومغناطیس و معادلات حاکم بر آن ها بیان شود و علاوه بر آن در مورد داده های مگنتوتلوریک، روش اندازه گیری آن ها و تحلیل ابعادی این داده ها بحث شود. فصل سوم به بیان اصول تئوری روش های معکوس سازی داده های مگنتوتلوریک می پردازد. در این فصل اصول ریاضی کلیه الگوریتم های شاخص معکوس سازی داده های مگنتوتلوریک در قالب مدل های یک، دو و سه بعدی بررسی می شود.

<sup>1</sup>- Source code

فصل چهارم به بررسی نقاط قوت و ضعف روشهای معکوسسازی دوبعدی دادههای مگنتوتلوریک با تأکید بر نقش پارامتر منظمسازی در آنها میپردازد. در این فصل با توجه به اهداف این تحقیق، کلیه الگوریتمهای موجود معکوسسازی برای دادههای مگنتوتلوریک در چهار دسته طبقهبندی شده و از هر دسته یک برنامه شاخص به عنوان نماینده و معرف آن روش برای آزمایشهای عددی معکوس-سازی انتخاب میشود. سپس با انجام مدلسازی عددی دادههای مصنوعی و واقعی، پارامترهای مختلف معکوسسازی در این روشها با هم مقایسه شده و به طور خاص پارامتر منظمسازی مورد بررسی قرار می گیرد.

در فصل پنجم روشهای مختلف انتخاب پارامتر منظمسازی به طور خاص در الگوریتمهای معکوس-سازی دادههای مگنتوتلوریک و به طور عام در مسائل جورنشده فیزیکی و ریاضی بررسی می شود. سپس روشهایی برای انتخاب خودکار این پارامتر جهت بهبود هر چه بیشتر مسئله معکوس دوبعدی مگنتوتلوریک طراحی می شود و با استفاده از دادههای مصنوعی و واقعی، قابلیت عملیاتی این روش ها از نظر سرعت و دقت بررسی می شود.

در فصل ششم سعی خواهد شد تا با لحاظ یک روش مناسب برای انتخاب و تخمین خودکار پارامتر منظمسازی، الگوریتم موجود معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک بهبود یابد. سپس از این برنامه بهبود یافته برای معکوسسازی سهبُعدی دو دسته داده مصنوعی و دو مجموعه دادههای واقعی مگنتوتلوریک میدان زمین گرمایی سبلان استفاده میشود. در خاتمه نتایج حاصل از روش بهبود یافته برای ساخت مدل سهبُعدی ژئوالکتریکی با نتایج حاصل از روش متداول مدلسازی سهبُعدی مقایسه شده و تلاش میشود تا با لحاظ دیگر دادههای موجود تحلیلهای لازم ارائه شود. در فصل هفتم نیز نتایج و پیشنهادات حاصل از این مطالعه ارائه میشود.

فصل دوم مبانی روش مگنتو تلوریک

#### ۲-۱- مقدمه

به طوری که در فصل قبل اشاره گردید، روش مگنتوتلوریک یک روش الکترومغناطیس غیرفعال است؛ که در آن مؤلفههای عمود بر هم و متغیر با زمان میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین به طور همزمان اندازه گیری میشوند. همچنین هدف از اندازه گیریهای مگنتوتلوریک بررسی تغییرات مقاومتویژه ساختارهای زیر سطح زمین است. تئوری این روش بر اساس کار تیخونف [ Tikhonov 1950] و کانیار [Cagniard, 1953] میباشد.

این فصل به بیان اصول تئوری این روش، شامل منشاء میدانهای الکترومغناطیس در روش مگنتوتلوریک، مفاهیم پایه این میدانها، دادههای مگنتوتلوریک و برخی از روشهای شاخص برای تحلیل ابعادی این دادهها و تعیین امتداد ژئوالکتریکی ساختارهای زیر سطحی می پردازد.

## ۲-۲- منشاء میدانهای الکترومغناطیس در روش مگنتوتلوریک

مشاهدات طولانی مدت نشان میدهد که جهت و بزرگی میدان مغناطیسی زمین به طور پیوسته نسبت به زمان در حال تغییر است. این نوسانات میدان مغناطیسی زمین تغییرات زمینمغناطیس<sup>۱</sup> Campbell, انمیده میشود. تغییرات زمینمغناطیس دارای دو منشاء داخل و خارج زمین میباشد [ Campbell, 2003]. تغییرات با منشاء داخل، دارای دورههای زمانی با محدودهای از چند دهه تا چند قرن است. تغییرات زمینمغناطیس با منشاء خارج از زمین که به واسطه فعل و انفعالات فیزیکی ایجاد شده در فضا و خورشید است، دارای دورههای زمانی با محدودهای از ثانیه تا یازده سال است. با توجه فضا و خورشید است، دارای دورههای زمانی با محدودهای از جزئی از ثانیه تا یازده سال است. با توجه به قوانین القای الکترومغناطیس، تغییرات زمینمغناطیس یک میدان الکترومغناطیس گذرا<sup>۲</sup> در زمین رسانا تولید میکند. این میدان الکترومغناطیس گذرا نیز به نوبه خود یک جریان الکتریکی در زمین رسانا ایجاد میکند. هر چه نرخ تغییرات زمینمغناطیس بیشتر باشد، جریان الکتریکی القاء شده در

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Geomagnetic variations

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Transient
طولانی (در حد قرن) میباشند، این تغییرات در عمل جریانی در زمین ایجاد نمی کنند. اما تغییرات زمین مغناطیس با منشاء خارج از زمین به طور سریع ایجاد شده و باعث تولید جریان الکتریکی بزرگی در زمین میشوند؛ که به راحتی قابل اندازه گیری است. این جریان، جریان تلوریک<sup>۱</sup> خوانده میشود. در نتیجه کل میدان تغییرات زمین مغناطیس و جریانهای تلوریک، میدان مگنتوتلوریک خوانده شده است [Zhdanov, 2009].

به طور کلی منشاء میدان مگنتوتلوریک در محدوده فرکانسی ۲۰۰۰۱ تا ۲۰۰۰۰ هرتز، فعالیتهای خورشیدی، آذرخشها، شفقهای قطبی، حرکتهای نسبی زمین، ماه و خورشید است. این فعالیتها میدانهای الکترومغناطیسی تولید میکنند که در فضای بین یونسفر و سطح زمین منتشر میشوند. این میدانها در فواصل زیاد از چشمه به صورت امواج تخت<sup>۲</sup> با فرکانس متغیر هستند. این امواج به طور تقریباً قائم با سطح زمین برخورد کرده و به دلیل اختلاف رسانایی قابل ملاحظه زمین با هوا در زمین نفوذ میکنند و سبب القاء یک سری جریانهای الکتریکی در داخل زمین میشوند [ al., 1990]

منابع اصلی تولید میدان الکترومغناطیس در روش مگنتوتلوریک را میتوان به دو دسته تقسیم نمود: دسته اول میدانهای با فرکانس کمتر از یک هرتز و دسته دوم میدانهای با فرکانس بیشتر از یک هرتز هستند. میدان با فرکانسهای کمتر از یک هرتز به دلیل این که میتوان از آن در اکتشاف عمقهای بالا استفاده کرد، از اهمیت ویژهای برخوردار است. این میدان به طور عمده از فعل و انفعالات پیچیده بین میدان مغناطیسی دائمی زمین با جریان پلاسما<sup>۳</sup> منتشر شده از خورشید ایجاد میشود (شکل ۲–۱). در حدود یک درصد از انرژی الکترومغناطیس منتشر شده از خورشید به صورت ذرات مادی است؛ که به آن جریان پلاسما گفته میشود. این جریان ذرات مادی، بادهای خورشیدی<sup>۴</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Telluric current

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Plane wave

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Plasma

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Solar winds

از دیگر ذرات باردار مثبت و به اندازه کافی الکترون است؛ به طوری که این جریان پلاسما از نظر الکتریکی خنثی است. بادهای خورشیدی نسبت به زمان و مکان بسیار تغییرپذیر هستند و دارای سرعتی در حدود ۳۰۰ تا ۷۰۰ کیلومتر در ثانیه هستند. سرعت و چگالی این بادها نسبت به زمان

متغیر است ولی این تغییرات دارای یک دوره زمانی ۲۷ تا ۳۲ روزه هستند [Zhdanov, 2009].



شکل (۲-۱): مسیر ظاهری یک جریان پلاسمای خورشیدی از خورشید به طرف زمین [Zhdanov, 2009]

منشاء اصلی میدان الکترومغناطیس با فرکانس بیشتر از یک هرتز فعالیتهای هواشناسی به خصوص طوفانهای الکتریکی همراه با آذرخشهای بزرگ مقیاس<sup>۱</sup> است. در اثر تخلیه این آذرخشها بخشی از انرژی آنها به میدانهای الکترومغناطیس تبدیل میشود و به فواصل خیلی زیاد در فضای مابین یونسفر<sup>۲</sup> و سطح زمین منتشر میشوند. رفتار این میدانها تا حدی شبیه یک موج راهنمایی شده<sup>۳</sup> صفحات رسانای موازی است. اگر چه محل طوفانهای الکتریکی بزرگ مقیاس تا حدودی اتفاقی است؛ ولی سه مرکز عمده طوفان وجود دارد که همگی در مناطق استوایی یعنی برزیل، آفریقای جنوبی و مالایا قرار دارند [Garcia and Jones, 2002; Telford et al., 1990].

- <sup>2</sup>- Ionosphere
- <sup>3</sup>- Guided wave

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Worldwide lightning

۲-۲- مفاهیم پایه انتشار میدانهای الکترومغناطیس

#### ۲-۳-۱ معادلات ماکسول

تئوری پایه برای بررسی رفتار میدانهای الکترومغناطیس را معادلات ماکسول تشکیل میدهد؛ که اولین بار در قرن نوزدهم منتشر شد [Maxwell, 1954]. در واقع معادلات ماکسول اولین روابط جامع ریاضی بیانکننده قوانین فیزیکی حاکم بر رفتار میدانهای الکترومغناطیس بوده که تا به امروز در pobrin and Savit, 1988; Telford et الکترومغناطیس مورد استفاده قرار گرفته است [ Dobrin and Savit, 1988; Telford et بررسیهای الکترومغناطیس مورد استفاده قرار گرفته است [ Telford et و معادله برداری و دو معادله اسکالر به صورت زیر هستند:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t$$
 (قانون آمپر<sup>(</sup>) (۱-۲)

$$abla imes \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t$$
 (قانون فاراده') (۲-۲)

در اینجا H و B به ترتیب میدانهای برداری مغناطیسی (*N*/*m*/*m*) و القای مغناطیسی (*Wb/m*<sup>2</sup>) هستند. بوده و E و G به ترتیب میدانهای برداری الکتریکی (*N/m*) و جریانهای جابجائی (*C/m*<sup>2</sup>) هستند. همچنین J چگالی جریان رسانش (*A/m*) و p چگالی بار الکتریکی (*C/m*<sup>3</sup>) بوده و t بیان کننده زمان (*sec*) است. رابطه (۲–۱) بیان ریاضی قانون آمپر است (با در نظر گرفتن جریان جابجائی ماکسول) که می گوید: عبور جریان در فضا میدان مغناطیسی تولید می کند و این میدان متناسب با کل جریان موجود (رسانش به اضافه جابجائی) در آن محیط است. همچنین رابطه (۲–۲) بیان ریاضی قانون فاراده است که می گوید هر جا میدان مغناطیسی تابع زمان موجود باشد، یک میدان الکتریکی وجود

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Ampere's law

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Faraday's law

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Colomb's law

(17-7)

منفی است. خواص الکتریکی و مغناطیسی زمین یا هر محیط دیگر از طریق روابط زیر به میدان   
الکترومغناطیسی که در آن نفوذ می کند، مرتبط می شوند:  

$$J = \sigma E$$
(2–7)  
 $D = \varepsilon E$ 
(7–7)  
 $B = \mu H$ 
(7–7)  
 $T = 0$ 
(7

 $\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \mathrm{i}\omega \varepsilon \mathbf{E}$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Electrical conductivity <sup>2</sup>- Electrical permittivity <sup>3</sup>- Magnetic permeability <sup>4</sup>- Harmonic

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>-Time-dependence

$$\begin{aligned} \nabla\times \mathbf{E} &= -\mathrm{i}\omega\mu\mathbf{H} \end{aligned} (17-7) \\ (18-7) \\ \nabla. (\mu\mathbf{H}) &= 0 \\ (16-7) \\ \nabla. (\epsilon\mathbf{E}) &= q \\ (10-7) \\ \epsilon\mathbf{E}, ($$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu \epsilon \partial^2 \mathbf{H} / \partial t^2 - \mu \sigma \partial \mathbf{H} / \partial t = 0$$
 (19-7)  
avel to a vector of the set of th

$$\mathbf{V}^{\mathbf{E}} \mathbf{E} + (\mu \varepsilon \omega^{2} - 1\omega \mu \sigma) \mathbf{E} = 0 \tag{(1 - 1)}$$

$$\nabla^{2}\mathbf{H} + (\mu\varepsilon\omega^{2} - i\omega\mu\sigma)\mathbf{H} = 0 \tag{(1-1)}$$

يا

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \mathbf{k}^2 \mathbf{E} = 0 \tag{(YY-Y)}$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \mathbf{k}^2 \mathbf{H} = 0 \tag{(17-7)}$$

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>-Telegrapher's equations <sup>2</sup>-Helmholtz equations

که در آنها k عدد موج نامیده شده و به صورت زیر تعریف می شود:

 $k^2 = \mu \epsilon \omega^2 - i \omega \mu \sigma$ 

۲-۳-۲ مدل های میدان الکترومغناطیس در محیطهایی که رسانایی برابر صفر است، جمله حاوی رسانایی در معادلات تلگرافر حذف شده و این معادلات در دو حوزه زمان و فرکانس به صورت زیر ساده می شوند [Zhdanov, 2002]:  $\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 = 0$ (7 - 7) $\nabla^{2}\mathbf{H} - \mu\varepsilon\partial^{2}\mathbf{H}/\partial t^{2} = 0 \quad \downarrow \quad \nabla^{2}\mathbf{H} + \mu\varepsilon\omega^{2}\mathbf{H} = 0$  $(T\Delta - T)$ این مدل از معادلات، مدل معادله موج نامیده می شود و برای مطالعه انتشار میدان های الکترومغناطیس در محیطهای با رسانندگی ضعیف (یا نارسانا) مثل هوا به کار می رود. در بسیاری از موارد در روشهای الکتریکی از میدانهایی که به آهستگی با زمان تغییر میکنند (یعنی فرکانس کم) استفاده می شود در این موارد از بخشی از معادله که دارای مشتق درجه دوم نسبت به زمان است صرف نظر می شود. در واقع از اثر جریان های جابجایی به علت کوچک بودن فرکانس میدان صرفنظر میشود. به این رفتار انتشار امواج الکترومغناطیس یک رفتار شبه ایستا نیز گفته می شود [Zhdanov, 2009]. بنابراین با استفاده از معادلات تلگرافر این مدل انتشار میدانهای الکترومغناطیس با معادلات زیر بیان می شود:

 $\nabla^{2}\mathbf{E} - \mu\sigma \partial \mathbf{E} / \partial t = 0 \quad \forall \nabla^{2}\mathbf{E} - i\omega\mu\sigma\mathbf{E} = 0$ (19-1)

 $\nabla^{2}\mathbf{H} - \mu\sigma\,\partial\mathbf{H}/\partial\mathbf{t} = 0 \quad (\Upsilon V - \Upsilon)$ 

این مدل از معادلات به معادلات پخش<sup><sup>۲</sup> امواج الکترومغناطیس در محیط رسانا معروف هستند. حل این معادلات به صورت تحلیلی و حتی عددی بسیار مشکل است، مگر این که موج به صورت موج تخت قطبیده<sup>۳</sup> در نظر گرفته شود.</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Quasi-static

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Diffusion

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Plane polarized

مدلی از میدان الکترومغناطیس که در آن میدان اساساً به زمان وابسته نیست، مدل ایستا<sup>۱</sup> نامیده می-شود. با برابر صفر قرار دادن مشتقات نسبت به زمان در معادلات ماکسول، معادلات مربوط به این مدل حاصل میشود. با استفاده از معادلات تلگرافر، معادلات مدل ایستا در یک محیط همگن و همسان-گرد<sup>7</sup> با رسانایی ضعیف و با فرض ناچیز بودن جریانهای جابجایی به معادله لاپلاس<sup>۳</sup> تبدیل میشوند [Telford et al., 1990]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = 0 \tag{(Y - Y)}$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = 0 \tag{(Y9-7)}$$

۲-۳-۳ امواج الکترومغناطیس تخت در یک محیط همگن و همسان گرد

انتشار امواج الکترومغناطیس یا میدانهای الکترومغناطیس به صورت تخت (شکل ۲-۲) در یک محیط همگن و همسان گرد دارای دو مشخصه است [Zhdanov, 2009]: الف- بردارهای الکتریکی و مغناطیسی این میدانها روی هر صفحه افقی داده شده در محیط منتشر

شده ثابت هستند، پس باید داشته باشیم:

$$\partial \mathbf{E} / \partial \mathbf{x} \equiv \partial \mathbf{E} / \partial \mathbf{y} \equiv \partial \mathbf{H} / \partial \mathbf{x} \equiv \partial \mathbf{H} / \partial \mathbf{y} \equiv 0 \tag{(\mathcal{T} \cdot - \mathcal{T})}$$

لذا معادلات پخش یا شبه ایستایی که بیان کننده انتشار میدانهای الکترومغناطیس هارمونیک هستند، برای میدانها در این حالت که یکی از پر کاربردترین حالتهای انتشار میدانهای الکترومغناطیس است به صورت زیر نوشته می شوند. همچنین این حالت را مدل یک بُعدی معادلات هلمهولتز نیز می-گویند:

$$\partial^2 \mathbf{H} / \partial z^2 - i\omega\mu\sigma\mathbf{H} = 0 \tag{(1-1)}$$

 $\partial^2 \mathbf{E} / \partial z^2 - i\omega \mu \sigma \mathbf{E} = 0 \tag{(TT-T)}$ 

ب- این میدان ها از سطح محیط انتشار به طرف عمق تضعیف می شوند.

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

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Isotropic

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Laplace's equation



شکل (۲-۲): انتشار عمقی میدان الکترومغناطیس تخت در یک محیط همگن و همسان گرد [Zhdanov, 2009]

حل معادلات ماکسول نشان میدهد که دامنه<sup>۱</sup> میدان الکترومغناطیس نفوذ کننده در زمین با افزایش عمق کاهش مییابد، به طوری که بخشی از انرژی الکترومغناطیس به گرما تبدیل میشود. این تبدیل در فرکانسهای بالا سریعتر انجام میشود. چنانچه میدان الکترومغناطیس تختی را در نظر بگیریم که در آن موج به طور عمقی (در جهت z) منتشر شود و صفحه xy صفحه قطبش باشد و همچنین مؤلفههای میدانهای مغناطیسی و الکتریکی به صورت زیر فرض شوند:

$$H_y = H_0 e^{-i(mz - \omega t)} = H_0 e^{-\alpha z} e^{-i(\omega t - \alpha z)}$$
 (۳۳-۲)  
که در آن  $\frac{1}{2}^{1/2}$  (میدان مغناطیسی در سطح زمین است. چون  
از نظر فیزیکی تنها بخش حقیقی معادله (۲–۳۳) جواب مورد نظر است بنابراین:  
 $H_y = H_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \alpha z)$  (۳۴–۲)

<sup>1</sup>- Amplitude

در عبارت قبل e <sup>-αz</sup> نشان میدهد که دامنه موج به طور نمایی نسبت به عمق کاهش مییابد و علاو
بر آن عبارت (ωt – αz) cos نشان میدهد که تغییرات میدان مورد نظر نسبت به زمان و عمق با
صورت سينوسى همراه با اختلاف فاز مىباشد [Moradzadeh, 1998].
به عنوان یک معیار برای بیان نفوذ امواج الکترومغناطیس و یا تضعیف قدرت این امواج، پارامتری با
نام عمق پوست ٔ تعریف میشود. عمق پوست عمقی است که در این عمق دامنه موج الکترومغناطیس
در یک محیط همگن به e <sup>-1</sup> برابر مقدار اولیه خود یا مقدار آن در سطح محیط انتشار کاهش مییابد
این پارامتر به صورت تابعی از فرکانس و رسانندگی با قرار دادن z = 1/α در رابطه (۲-۳۴) به دست
ميآيد:
$\delta = (2/\omega\mu\sigma)^{1/2} \approx 503\sqrt{(\rho/f)} $ (ra-r)
در رابطه فوق δ عمق پوست بر حسب متر، ρ مقاومتویژه (عکس رسانایی) بر حسب اهم-متر (-Dhm
m) و f فرکانس بر حسب هرتز است.

وابستگی میرائی قدرت میدانهای الکترومغناطیس به فرکانس، باعث میشود تا از فرکانس برای کنترل عمقی که در آن مقاومتویژه اندازه گیری میشود استفاده شود. عمق پوست برای بیان اثر تضعیف میدان بسیار کاربردی است. شکل (۲–۳) نشان دهنده تضعیف دامنه موج الکترومغناطیس در یک زمین همگن است. این شکل همچنین نشان میدهد که عمق نفوذ در شرایط یکسان مقاومت-ویژه برای فرکانس پایین تر بیشتر است. شکل (۲–۴) نیز تغییرات عمق پوست را به صورت تابعی از مقاومتویژه و فرکانس در یک محیط همگن نشان میدهد. انتشار میدانهای الکترومغناطیس به صورت تخت در محیط همگن و در محیط همگن لایهای یکی از سادهترین و در عین حال کاربردی-ترین مسائل در روشهای الکتریکی است [Zhdanov, 2009].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Skin depth



شکل (۲-۴): عمق پوست به عنوان تابعی از مقاومتویژه و فرکانس در یک زمین همگن [Dobrin and Savit, 1988]

۲-۳-۲ انتشار میدانهای الکترومغناطیس تخت در یک زمین لایهای افقی

با در نظر گرفتن مدل انتشار میدانهای الکترومغناطیس تخت در زمین لایهای افقی به صورت شکل (۵-۲) میتوان معادلات هلمهولتز یک بُعدی را برای هر لایه از این مدل به صورت زیر نوشت [Zhdanov, 2009]:

$$\partial^2 \mathbf{H} / \partial z^2 - \mathbf{k}_{\mathbf{i}}^2 \mathbf{H} = 0 \tag{(\%-7)}$$

$$\partial^2 \mathbf{E} / \partial z^2 - \mathbf{k}_j^2 \mathbf{E} = 0 \tag{(\mathbf{T} \mathbf{T} - \mathbf{T})}$$

$$k_j^2 = i\omega\mu_0\sigma_j, \ z_j = \sum_1^j d_j$$
در این رابطه ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}(henry/m)$  قابلیت گذردهی مغناطیسی فضای آزاد است. معمولاً در این رابطه (این رابطه الکتریکی قابلیت گذردهی مغناطیسی سنگها (ای برابر قابلیت گذردهی مغناطیسی فضای آزاد منظور می شود.



 $\sigma_N$  Last layer is uniform half-space

شکل (۲-۵): انتشار میدانهای الکترومغناطیس تخت در یک زمین لایهای افقی [Zhdanov, 2009] با استفاده از معادله (۲-۱۳)، برای امواج تخت الکترومغناطیس در محیط لایهای میتوان به معادلات

ساده زیر رسید:

$$H_{x} = -\frac{1}{i\omega\mu_{0}} (dE_{y}/dz)$$
(<sup>T</sup>A-T)

$$H_{y} = \frac{1}{i\omega\mu_{0}} (dE_{x}/dz)$$
(٣٩-٢)

سپس با معرفی امپدانس ٔ موج الکترومغناطیس به صورت زیر:

$$Z_{xy} = E_x(z)/H_y(z), \ Z_{yx} = E_y(z)/H_x(z)$$
 (f-T)

<sup>1</sup> -Impedance

می توان با استفاده از معادلات هلمهولتز یک بُعدی، این امپدانسها را برای هر لایه به صورت زیر به دست آورد:  $Z_{xy} = E_x(z)/H_y(z) = \omega\mu_0/k_N$ ,  $Z_{yx} = E_y(z)/H_x(z) = \omega\mu_0/k_N$  (۴۱-۲) همچنین امپدانس در سطح زمین به صورت زیر به دست میآید، که این امپدانس فقط به رسانایی زمین و فرکانس وابسته است:  $Z_{xy} = \frac{\omega\mu_0}{k_1} R_N$  (۴۲-۲) که R ضریب تصحیح زمین لایهای <sup>(</sup> یا ضریب بازتاب برای امپدانس موج تخت برای محیط لایهای به صورت کلی است و از رابطه زیر به دست میآید:

 $R_{N} = \coth\{-ik_{1}d_{1} + \coth^{-1}[\frac{k_{1}}{k_{2}}\coth(-ik_{2}d_{2} + \coth^{-1}\left(\frac{k_{2}}{k_{3}}\coth\left(-ik_{3}d_{3} + \dots + \coth^{-1}\frac{k_{N-1}}{k_{N}}\right)\right)]\}$ 

۲-۴- روش مگنتو تلوریک

# ۲-۴-۲ مفهوم مقاومتویژه ظاهری و سونداژ<sup>۲</sup> در روش مگنتوتلوریک

همچنان که گفته شد در روش مگنتوتلوریک از میدان الکترومغناطیس طبیعی زمین به عنوان منبع میدان استفاده میشود. در این روش تغییرات زمانی مؤلفههای افقی میدانهای الکتریکی و مغناطیسی به طور عمود بر هم در سطح زمین اندازه گیری شده و پس از یک سری عملیات ریاضی پیچیده، امپدانس زمین در فرکانسهای مختلف محاسبه میشود. سپس به کمک تغییرات دامنه و فاز امپدانس محاسبه شده از این میدانها ساختار مقاومتویژه زیرسطحی تفسیر میشود [1990]. همانند روش جریان مستقیم، مقاومتویژه اندازه گیری شده در این روش به صورت مقاومتویژه ظاهری تعریف میشود و برخلاف روش جریان مستقیم که از فاصله الکترودی برای اندازه گیریهای مرتبط با عمق استفاده میشود؛ در این روش از اندازه گیری در فرکانسهای مختلف یا به طور دقیق تر

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> - Layered-earth correction factor

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> - Sounding

$$Z = \omega \mu_0 / k_1 \tag{(FT-T)}$$

سپس با توجه به تعریف عدد موج (k) و با توجه به این که مقاومتویژه (p)، عکس رسانایی (o) تعریف می شود، مقاومتویژه ظاهری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$k_1 = (i\omega\mu_0/\rho_1)^{1/2}$$
 ,  $\rho_1 = (1/\omega\mu_0) |Z|^2$  ( ۴۴-۲) ب و  $\rho_1$  ,  $\rho_1 = (1/\omega\mu_0) - 2$  (۲-۲) ر این رابطه مقاومتویژه زمین همگن و یکنواخت به دست میآید. در صورتی که زمین یکنواخت باشد مقاومتویژه به دست آمده از این رابطه یک مقاومتویژه ظاهری است.

#### ۲-۴-۲ ارتباط بین منحنی سونداژ مگنتوتلوریک و مدل واقعی مقاومتویژه یک بُعدی

منحنی سونداژ مگنتوتلوریک میتواند برای هر ساختار ژئوالکتریکی به صورت تابعی از مقاومتویژه ظاهری بر حسب فرکانس (یا پرید) ساخته شود. کاربرد اصلی این منحنی در مواردی است که زمین به طور تقریبی لایهای باشد. ارتباط بین منحنی سونداژ ژئوالکتریکی و مقطع واقعی مقاومتویژه زمین را میتوان با استفاده از معادلاتی که قبلاً در بخش انتشار امواج الکترومغناطیس در یک محیط لایهای افقی بحث شد، به دست آورد. پس با انجام یک سری عملیات جبری میتوان مدل زمین لایهای (مطابق شکل ۲–۵) را که مقاومتویژه در درون هر لایه آن ثابت است، به دست آورد [ رمطابق شکل ۲–۵) را که مقاومتویژه در درون هر لایه آن ثابت است، به دست آورد [ معاومتویژه ظاهری به صورت مقطع عمقی مقاومتویژه به صورت یک تابع ثابت تکهای <sup>۱</sup> است. در واقع مقاومتویژه ظاهری به صورت یک متوسط وزندار از مقاومتویژههای واقعی توالی لایهها است:  $\rho_a = \left| (1/H_0^2) \sum_{j=1}^{N} \rho_j \frac{d}{dz} H_y^2(z) dz \right| = \left| \sum_{j=1}^{N} \rho_j \rho_j \frac{1}{2} \int_{j=1}^{N} 2^{(j)} (1/4)$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Piecewise constant function

 $H_0 = H_y(0), q_j = (1/H_0^2) [H_y^2(z_j) - H_y^2(z_{j-1})], |\Sigma_{j=1}^N q_j| = 1, z_N = \infty$ با توجه به این رابطه مقدار تضعیف میدان مغناطیسی در لایه داده شده در عمق مورد نظر معادل ضریب وزنی است که سهم لایه داده شده را در تخمین مقاومتویژه ظاهری به دست میدهد. بیشترین وزن، مربوط به لایههایی است که در محدوده عمق پوست قرار دارند. در فرکانسهای پایین اثر عمق پوست در لایههای بالائی کاسته شده یعنی نرخ کاهش قدرت میدان کمتر است و در نتیجه وزن لایههای بالائی در تخمین مقاومتویژه ظاهری کم میشود، در صورتی که این وزن در لایههای عمقیتر بیشتر میشود [Berdichevsky and Dmitriev, 1976; Zhdanov, 2009].

۲-۴-۳ امپدانس و توابع انتقال قائم ' مگنتوتلوریک

امپدانس میدان مگنتوتلوریک در واقع بیان کننده ارتباط خطی بین مؤلفههای میدانهای الکتریکی و مغناطیسی است که در سطح زمین اندازه گیری می شوند. برای یک زمین همگن امپدانس به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{E}_{\mathbf{x}} = \mathbf{Z}\mathbf{H}_{\mathbf{y}} , \mathbf{E}_{\mathbf{y}} = \mathbf{Z}\mathbf{H}_{\mathbf{x}}$$
(49-7)

در اینجا Z امپدانس بوده و مؤلفه های میدانهای الکتریکی و مغناطیسی به طور دوطرفه بر هم عمود  $E_x$  هستند (  $E_x$  عمود بر  $H_y$  ).

در حالت عمومی برای ساختارهای ژئوالکتریکی دوبُعدی با فرض نامعلوم بودن امتداد<sup>۲</sup> ساختارها و ساختارهای سه بُعدی، امپدانس یک تانسور کامل دوبُعدی است که به آن ماتریس مگنتوتلوریک هم گفته می شود [Vozoff, 1972]. در واقع با نفوذ میدان تخت الکترومغناطیس در زمین، میدان مغناطیسی به طور عمودی در ساختارهای زمین نفوذ کرده و در اثر برخورد مؤلفه های افقی میدان مغناطیسی با ساختارهای زمین یک میدان الکتریکی تولید می شود. ارتباط بین مؤلفههای افقی این میدان تولید شده الکتریکی و میدان منبع مغناطیسی در حوزه فرکانس به صورت خطی بوده و توسط تانسور امپدانس **Z** بیان می شود [Vozoff, 1972]:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Vertical Transfer Functions

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Strike

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z}\mathbf{H} , \qquad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}_{x} = Z_{xx}\mathbf{H}_{x} + Z_{xy}\mathbf{H}_{y}$$
(FV-T)

$$E_{y} = Z_{yx}H_{x} + Z_{yy}H_{y}$$

از آنجا که میدان الکتریکی القایی و میدان منبع مغناطیسی هم فاز نیستند، مؤلفههای تانسور امپدانس مختلط بوده و لذا تانسور امپدانس مگنتوتلوریک در هر فرکانس را تانسور امپدانس مختلط مگنتوتلوریک آن فرکانس نیز می گویند.

در اندازه گیری های مگنتوتلوریک، در نواحی که ناهمگنی های جانبی الکتریکی وجود دارد، میدان مغناطیسی دارای یک مؤلفه قائم (H<sub>z</sub>) قابل ملاحظه است. البته میدان مغناطیسی دائمی زمین تقریباً در همه موقعیت های اندازه گیری زمینی و دریایی دارای مؤلفه قائم قابل ملاحظه ای است ولی این میدان در القای الکترومغناطیس منظور نمی شود. معمولاً در اندازه گیری های زمینی مگنتوتلوریک به استثنای فرکانس های خیلی بالا، به دلیل این که هوا به عنوان یک عایق کامل فرض می شود مؤلفه قائم میدان الکتریکی نزدیک صفر بوده و اندازه گیری نمی شود. البته در اندازه گیری های مگنتوتلوریک در کف دریا، در نواحی که ناهمگنی های جانبی وجود دارد این مؤلفه نیز قابل ملاحظه است. این مؤلفه ها که حاصل شده از مؤلفه های افقی میدان های مغناطیسی و الکتریکی هستند به صورت زیر محاسبه می شوند [200]

$$H_{z} = T_{zx}H_{x} + T_{zy}H_{y}$$
(۴۸-۲)

$$E_{Z} = V_{zx}E_{x} + V_{zy}E_{y}$$
(49-7)

که در آن  $T_{zx}$  و  $T_{zx}$  توابع انتقال قائم مغناطیسی یا تیپر<sup>7</sup> و  $V_{zx}$  و  $V_{zy}$  توابع انتقال قائم الکتریکی بوده و تمامی آنها مختلط هستند. در تفسیر دادههای مگنتوتلوریک معمولاً توابع انتقال مغناطیسی به انضمام تانسور امپدانس به کار گرفته میشوند. به طور خلاصه تانسور امپدانس مگنتوتلوریک و توابع انتقال قائم مغناطیسی نشان دهنده ارتباط خطی بین مؤلفههای میدان مگنتوتلوریک هستند. عناصر

<sup>1</sup>- Complex

<sup>2</sup>- Tipper

تانسور امپدانس در رابطه (۲–۴۷) که برای یک دوران نامشحص محورهای اندازه گیری میدانه  
هستند در واقع بیان کننده توزیع رسانایی در زمین بوده و ارتباطی با تغییرات منابع میدان (جریان  
های یونسفر و مگنتوسفر<sup>()</sup>) ندارند. به همین منظور به آنها توابع رسانایی الکتریکی نیز گفته میشود.  
تخمین این توابع رسانایی الکتریکی قدم اساسی در کاربرد روش مگنتوتلوریک است.  
در ساختارهای یک بُعدی 
$$0 = z_{xx}$$
 و  $z_{yx} = -Z_{yx}$  است، بنابراین تانسور امپدانس در هر  
فرکانس در غیاب نوفه به صورت زیر است:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & z \\ -Z & 0 \end{bmatrix} \tag{(\Delta \cdot - \Upsilon)}$$

 $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$  در مورد ساختارهای دوبُعدی چنانچه یکی از محورها به موازات امتداد ساختار باشد،  $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$  و  $Z_{xy} \neq Z_{yx}$  و  $Z_{xy} \neq Z_{yx}$  است، بنابراین تانسور امپدانس در هر فرکانس برای دادههای بدون نوفه به صورت زیر است:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix}$$
 ( $\Delta 1 - \Upsilon$ )

از آنجایی که در زمان اندازه گیری ندرتاً امتداد ساختارها را مشخص است؛ بنابراین محورهای اندازه-گیری در زاویههای دلخواه نسبت به امتداد ساختارها قرار می گیرند و بعداً برای تعیین امتداد ساختارها، سعی می شود عناصر قطری تانسور امپدانس را با دوران آن حذف کرد. البته با وجود نوفه این عناصر کاملاً حذف نمی شوند بلکه می توان مقدار آن ها را به حداقل رساند. برای به دست آوردن محورهای موازی و عمود بر امتداد ساختار که به آن ها محورهای اصلی<sup>۲</sup> نیز گفته می شود، محورهای اندازه گیری را تحت زاویه  $\theta$  به صورت ساعت گرد حول محور Z دوران می دهیم. بنابراین با تعریف ماتریس دوران **R** به صورت زیر:

 $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 

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

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Principle axis

می توان تانسور جدید امپدانس ((θ) 'Z) را برای زاویه های مختلف دوران با استفاده از رابطه (۲–۵۲) محاسبه نمود: (۵۲–۲) (۵۲–۲) در این رابطه  $\mathbf{R}^{T}$  ترانهاده  $\mathbf{R}$  است. در صورتی که زاویه  $\theta$  طوری انتخاب شود که مؤلفه های قطری (θ) 'Z تقریباً صفر گردد تانسور در صورتی که زاویه  $\theta$  طوری انتخاب شود که مؤلفه های قطری (θ) 'Z تقریباً صفر گردد تانسور امپدانس اصلی که عناصر قطری آن صفر هستند و شامل امپدانس های اصلی است؛ به صورت زیر حاصل می شود: ( $\theta_{0}$ ) =  $\begin{bmatrix} 0 & Z'_{xy} \\ Z'_{yx} & 0 \end{bmatrix}$ 

برای محاسبه زاویه بهینه دوران (θ<sub>0</sub>) روابطی توسط وزوف [Vozoff, 1991] ارائه شده است. از آنجایی که در ساختارهای سهبُعدی نمیتوان هیچ امتدادی برای ساختارها تعریف نمود بنابراین مؤلفه های Z<sub>xx</sub> و Z<sub>yy</sub> در هیچ امتدادی از اندازه گیری میدان های مگنتوتلوریک حذف نمیشوند. در این حالت تانسور امپدانس به نام تانسور کامل امپدانس (رابطه ۲-۴۷) نامیده میشود.

### H -۴-۴-۴-میدانهای مگنتو تلوریک در محیط ناهمگن دوبُعدی و مفهوم قطبش های E و

در ساختارهای دوبُعدی خواص الکتریکی در یک جهت ثابت است که به آن جهت امتداد میگویند. برای توصیف ساختارهای دوبُعدی معمولاً معادلات پخش میدانهای تخت الکترومغناطیس در دو مُد<sup>۲</sup> (وضعیت) بررسی میشوند [Berdichevsky and Dmitriev, 1976]. زمانی که میدان الکتریکی در جهت امتداد ساختار و میدان مغناطیسی در جهت عمود بر امتداد ساختار باشد این وضعیت را قطبش **E** مینامند که به آن مُد الکتریکی عرضی<sup>۳</sup> یا به اختصار مُد TE گفته میشود. حالتی که مؤلفه میدان الکتریکی عمود بر امتداد ساختار و مؤلفه میدان مغناطیسی در جهت ا

<sup>1</sup>- Polarization

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Mode

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Transverse Electric

مینامند که به آن مُد مغناطیسی عرضی یا به اختصار مُد TM گفته می شود. شکل (۲-۶) یک مدل (۲-۶) روانامند که به آن می دوبعدی و مُدهای TE و TM را نشان می دهد.



( $ho_1 \neq 
ho_2$ ): تشریح مُدهای TE و TM در یک مدل ساده دوبُعدی با ناپیوستگی قائم ( $ho_1 \neq 
ho_2$ )

برای به دست آوردن معادلات مربوط به مُدهای TE و TM یک مدل دوبُعدی همانند شکل (۲-۶) در نظر می گیریم. در صورتی که محور x مختصات در جهت امتداد ساختار منظور شود، در این مدل تغییرات میدان در جهت x ثابت است. برای این مدل دوبُعدی با منظور کردن تمامی مشتقات در جهت x برابر صفر، عبارات اسکالر برای معادلات ماکسول به دست می آید که بعد از یک سری عملیات جبری و تفکیک معادلات ماکسول در دو سیستم جداگانه، معادلات پخش میدان الکترومغناطیس برای دو مُد TE و TM به صورت زیر حاصل می شود [Roy, 2008]:

برای مُد TE:

$$\partial^{2} E_{x} / \partial y^{2} + \partial^{2} E_{x} / \partial z^{2} - i\omega\mu\sigma E_{x} = 0 \qquad (\Delta F - T)$$

و برای مُد TM:

 $\partial^{2}H_{x}/\partial y^{2} + \partial^{2}H_{x}/\partial z^{2} - i\omega\mu\sigma H_{x} = 0 \qquad (\Delta\Delta-\tau)$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Transverse magnetic

به خاطر این که دو سیستم معادلات مربوط به دو قطبش الکتریکی و مغناطیسی مستقل از یکدیگر هستند، در زمینهای دوبُعدی میدان کل الکترومغناطیس به مجموع دو قطبش ذکر شده مستقل کاهش مییابد.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^{\mathrm{H}} + \mathbf{E}^{\mathrm{E}}, \ \mathbf{H} = \mathbf{H}^{\mathrm{H}} + \mathbf{H}^{\mathrm{E}}$$
( $\Delta \lambda - \Upsilon$ )

در واقع مسئله مطالعه اثر میدان الکترومغناطیس در یک ساختار دوبُعدی با تجزیه میدان الکترومغناطیس به دو مسئله سادهتر که به طور جداگانه حل میشوند، تفکیک میشود. سادگی مسئله در این واقعیت است که معادلات برداری ماکسول به معادلات دیفرانسیلی اسکالر تبدیل می-شوند و این خود کاهش حجم بزرگی در محاسبات مسائل پیشرو و معکوس مدل دوبُعدی بوجود می-آورد [Zhdanov, 2009].

### ۲-۴-۲ اندازه گیری و پردازش دادههای مگنتو تلوریک

 میدان مغناطیسی معمولاً بر حسب نانو تسلا (*n*T) اندازه گیری می شود. بهترین ملاحظات برای تعیین فاصله الکترودی و جهت جفت الکترودهای میدان الکتریکی با توجه به ملاحظات عملی شامل منطقه مورد مطالعه و بررسی های فنی تخمین زده می شود. اولین ملاحظه فنی منظور نمودن امتداد ساختار زمین شناسی مورد مطالعه است. در صورتی که ساختارهای زمین شناسی دوبًعدی باشد، تجربه نشان داده است که از نقطه نظر عملی نتایج بهتر زمانی حاصل می شود که جهت سنجنده های میدان مگنتوتلوریک در امتداد یا عمود بر امتداد تشکیلات زمین شناسی باشد. در هر اندازه گیری داده ها برای محدودهای از پریدها (دوره های زمانی) به صورت سری های زمانی<sup>۱</sup> ثبت می شود (شکل ۲–۸). محدوده پریدهای مورد استفاده از یک میلی ثانیه تا یک کیلو ثانیه و یا به طور متناظر (۲۰۰۱، هرتز تا ۱۰۰۰ هرتز است. البته برای سونداژهای عمیق پریدهای یک ساعته (۳/۶ کیلو ثانیه) و یک روزه (۸۶/۴ کیلو ثانیه) نیز ممکن است نیاز شود [Zhdanov, 2009].



<sup>1</sup>- Time series data

یک بهبود در روش سونداژ مگنتوتلوریک<sup>۱</sup> روش پروفیلزنی الکتریکی<sup>۲</sup> است. در روش پروفیلزنی مگنتوتلوریک روش کار و تجهیزات مورد استفاده همانند روش مگنتوتلوریک عمومی یا همان روش سونداژ مگنتوتلوریک است؛ با این تفاوت که در این روش از یک محدوده فرکانس کوچک با پهنای باند محدود استفاده میشود. محدوده فرکانس مورد استفاده در روش پروفیلزنی مگنتوتلوریک معمولاً ۱۰/۰ تا ۱/۰ هرتز است. این باند در اکثر زمانها و در بیشتر نواحی به آسانی قابل مشاهده است. تجربه نشان داده است که روش پروفیلزنی مگنتوتلوریک در مناطقی بسیار مؤثر است که اندازه گیری-ها روی یک توالی رسوبات با ضخامت کمتر از چند کیلومتر با یک طبقه زیرین بسیار مقاوم به دست آید. در این نواحی از مقدار رسانندگی عرضی (حاصلضرب ضخامت در رسانایی ویژه) برای به نقشه در آوردن تغییرات ناحیهای ضخامت رسوبات و همچنین مشخص نمودن سنگهای رسوبی نیز استفاده میشود. نقشههای تغییر رسانندگی اغلب برای استنتاج ساختار روی سطح طبقه زیرین به کار میرود. با این وجود، این اطلاعات بایستی توسط اطلاعات مستقل دیگری از رسانایی مثل اطلاعات به دست آمده از چاههای کنترلی تکمیل شود [200]

پردازش دادههای مگنتوتلوریک شامل تبدیل سریهای زمانی اندازه گیری شده (شکل ۲–۸) برای پنج مؤلفه میدان به طیفهای چگالی توان<sup>۳</sup> در حوزه فرکانس و محاسبه توابع انتقال شامل تانسور امپدانس و توابع انتقال قائم (تیپر) میباشد. عناصر این تانسور همچنان که قبلاً گفته شد فقط به موقعیت ایستگاه اندازه گیری میدان، فرکانس و توزیع رسانایی در زمین وابسته هستند. در پیوست الف نحوه پردازش دادههای مگنتوتلوریک به طور خلاصه شرح داده شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- MT Sounding (MTS)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- MT Profiling (MTP)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Power spectra



Dobrin and Savit, ] شکل (۲–۸): نمونه سریهای زمانی اندازه گیری شده برای مؤلفههای افقی میدان مگنتوتلوریک [1988]

## ۲-۴-۴ دادههای مقاومتویژه ظاهری و فاز مگنتوتلوریک

پس از محاسبه تانسور امپدانس از مؤلفههای میدانهای مغناطیسی و الکتریکی اندازه گیری شده در سطح زمین مقادیر مقاومتویژه ظاهری (p<sub>a</sub>) و فاز (φ) برای هر مؤلفه از تانسور امپدانس با استفاده از روابط زیر به دست میآید:

$$\rho_{a}(\mathbf{f}) = \frac{1}{\omega\mu_{0}} |\mathbf{Z}_{mn}(\mathbf{f})|^{2} \tag{(\Delta 9-7)}$$

$$\varphi(\mathbf{f}) = \tan^{-1}(\mathrm{Im}\mathbf{Z}_{mn}/\mathrm{Re}\mathbf{Z}_{mn}) \tag{$\mathbf{F}$-$\mathbf{T}$}$$

که در آن m, n = x, y و  $m, n = E_m/H_n$  مؤلفه مختلط تانسور امپدانس است. همچنین Im مشخصه بخش موهومی و Re مشخصه بخش حقیقی امپدانس مختلط  $Z_{mn}$  است. اندازه مؤلفههای امپدانس به انتخاب سیستمهای مختصات بستگی دارد. با دوران سیستم مختصات با یک زاویه مشخص اندازه این مؤلفهها تغییر میکند. یک مؤلفه امپدانس ثابت برای تانسور امپدانس تعریف میشود که با دوران محور مختصات این مؤلفه ثابت میماند. این مؤلفه که امپدانس مؤثر <sup>(</sup> هم

۴۰

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Effective impedance

نامیده می شود، به صورت دترمینان ماتریس امپدانس تعریف می شود [ Berdichevsky and ] Dmitriev, 1976].

$$Z_{ef} = Z_{det} = (Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx})^{1/2}$$
(91-7)

در عمل معمولاً دو شکل مختلف از منحنیهای مقاومتویژه ظاهری و فاز مورد استفاده قرار می گیرد [Key, 2003; Zdanov, 2009]:

- منحنیهای سونداژ مگنتوتلوریک بیشترین و کمترین بر پایه مقادیر امپدانس اصلی در فرکانس -1های مختلف (مقاومتویژه ظاهری در جهت محور x ( $ho_{xy}$ ) و مقاومتویژه ظاهری در جهت محور y

 $:((\rho_{yx})$ 

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{xy}|^2, \quad \varphi_{xy} = \tan^{-1}(ImZ_{xy}/ReZ_{xy})$$
(FY-Y)

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| Z_{yx} \right|^2, \quad \phi_{yx} = \tan^{-1}(\text{Im}Z_{yx}/\text{Re}Z_{yx})$$
(FT-T)

۲- منحنیهای سونداژ مگنتوتلوریک مؤثر بر پایه امپدانس مؤثر در فرکانسهای مختلف:

$$\rho_{\rm ef} = \frac{1}{\omega \mu_0} |Z_{\rm ef}|^2 , \quad \phi_{\rm ef} = \tan^{-1} (\mathrm{Im} Z_{\rm ef} / \mathrm{Re} Z_{\rm ef})$$
 (FF-T)

در یک مدل یک بعدی منحنیهای متناظر روابط (۲-۶۲)، (۲–۶۳) و (۲–۶۴) یکسان هستند. ولی در زمین واقعی که معمولاً ساختارهای ژئوالکتریکی به صورت یک بعدی نمی باشند، این منحنیها متفاوت می باشند.

تفسیر ژئوالکتریکی دادههای مگنتوتلوریک شامل ساخت یک مدل ژئوالکتریکی زمین بوده که پاسخ آن بیشترین همخوانی را با دادههای مگنتوتلوریک داشته باشد. سادهترین مدل، مدل یک بُعدی (زمین همگن افقی) است ولی در عمل زمین واقعی کمتر به صورت یک مدل یک بُعدی است. در نتیجه همیشه منحنیهای سونداژ مگنتوتلوریک مشاهدهای در هر ایستگاه دارای انحراف نسبت به منحنی-های تئوری به دست آمده برای مدل زمین لایهای هستند. این انحرافات برای منحنیهای سونداژ مگنتوتلوریک آشفتگی نامیده می شوند و منحنیهای مشاهدهای را در این حالت منحنیهای آشفته

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

شده مینامند. منظور نمودن آشفتگیهای ایجاد شده توسط تغییرات جانبی در مقطع ژئوالکتریکی از حیاتیترین مراحل در تفسیر داده های مگنتوتلوریک است [Zhdanov, 2009].

## ۲-۵- تحلیل ابعادی و تعیین امتداد ژئوالکتریکی ساختار زیر سطحی

تخمین جهت امتداد ژئوالکتریکی و تحلیل ابعادی ساختارهای زیر سطحی یکی از مسائل مهم در بررسی و تحلیل دادههای مگنتوتلوریک است، چرا که انتخاب ابعاد مدلسازی دادهها به این تحلیلها وابسته است. روشهای معکوسسازی یک و دو بُعدی به طور نسبتاً وسیع در دسترس است در حالی که روشهای مدلسازی سه بُعدی اعم پیشرو و معکوس کمتر در دسترس بوده و هنوز هم از نظر محاسباتی یک چالش محسوب می شوند. لذا تحلیلهای ابعادی و روشهای تخمین امتداد ژئوالکتریکی می تواند از اهمیت ویژهای به خصوص برای تعیین امتداد پروفیلهای مدلسازی دو بُعدی و چرخش دادههای امپدانس برای تعیین مُدهای TT و TT برخوردار باشد.

# ۲-۵-۱ بردارهای القایی مغناطیسی

توابع انتقال قائم مغناطیسی یا تیپر که در رابطه (۲–۴۸) تعریف شد معمولاً به صورت بخش حقیقی تیپر (ReT) و بخش موهومی تیپر (ImT) به شکل بردار نمایش داده میشوند. به همین جهت به آنها پیکانها یا بردارهای القایی<sup>۲</sup> میگویند و با رابطه زیر بیان میشوند [Wiese, 1962]: ReT = Re(T<sub>zx</sub> $\hat{x} + T_{zy}\hat{y}), ImT = Im(T<sub>zx</sub><math>\hat{x} + T_{zy}\hat{y} + T_{zy}\hat{x})$ *Corect (۲–64) Corect (Sec (Sec) (Corectar) Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) Corectar) Corectar) Corectar) Corectar) Corectar) <i>Corectar) Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) Corectar) Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) Corectar) <i>Corectar) Corectar) <i>Corectar) Corectar) Corectar) Corectar) Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) <i>Corectar) Corectar) <i>Corectar)* 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Magnetic induction vectors

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Induction arrows or induction vectors

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Wiese convention

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Parkinson convention

بردار القایی ( $\varphi_{T}$ ) برای بخش حقیقی تیپر به صورت ( $\varphi_{T} = \tan^{-1}(T_{zy}/T_{zx})$  محاسبه می شود و سپس جهت آن عکس می شود تا محل آنومالی رسانا را نشان دهد [Moradzadeh, 1998]. علاوه بر آن، این بردارها نسبت به تغییرات جانبی رسانایی حساس هستند و می توانند اطلاعاتی از ابعاد ساختارهای ژئوالکتریکی را در بر داشته باشند.

در مدلهای ژئوالکتریکی یک بُعدی در غیاب نوفه هر دو مؤلفه بردار تیپر (رابطه ۲-۴۸) بایستی صفر شود و لذا اندازه بردارهای القایی نیز صفر است. در مدلهای دوبُعدی که تیپر فقط ناشی از مؤلفه میدان مغناطیسی عمود بر امتداد ژئوالکتریکی است (ناشی از مُد TE) بردارهای القایی بایستی عمود بر امتداد ساختار ژئوالکتریکی باشند. در مدلهای سه بُعدی به این صورت نبوده و اندازه این بردارها در جهت خاصی کاهش یا افزایش قابل ملاحظهای نداشته و جهت گیری مشخصی هم نشان نمی دهند. در واقع تغییر پذیری نامنظم این بردارها نشان دهنده پیچیدگی ساختارها و یا وجود نوفه است. بنابراین به کمک اندازه و جهت دادههای تیپر میتوان امتداد و ابعاد ساختارهای ژئوالکتریکی را به دست آورد. باید توجه داشت که در قرارداد وایز بردارهای القایی از آنومالی رسانا دور میشوند.



شکل (۲-۹): مؤلفه حقیقی بردارهای القایی (مطابق قرارداد پارکینسون) ترسیم شده روی یک پروفیل عمود بر امتداد ژئوالکتریکی برای یک مدل دوبُعدی. مثلثهای وارون سفید رنگ موقعیت ایستگاههای اندازه گیری مگنتوتلوریک را نشان میدهند و پیکانهای سیاه رنگ نشان دهنده بردارهای القایی هستند. همچنین حلقههای دایرهای خطوط میدان مغناطیسی قائم را برای زمانی که میدان الکتریکی در جهت امتداد آنومالی رسانا است، نشان میدهند[, Bertrand

۲–۵–۲– آشفتگیهای سطحی'

امیدانس اندازه گیری شده مگنتوتلوریک به ساختارهای زیر سطحی با محدودهای از مقیاس فضایی بستگی دارد. دادههای مگنتوتلوریک فرکانس پایین (پرید طولانی) ساختارهای ناحیهای را که به واسطه القای میدان الکترومغناطیس در زمین است برداشت میکنند. ولی ساختارهای کوچک (ناهمگنیهای سطحی) می توانند دادههای امپدانس را به واسطه اثرات گالوانیک (غیرالقایی) تحت تأثیر قرار دهند. اثرات گالوانیک زمانی ظاهر میشوند که ناهمگنیهای چند بُعدی نزدیک به سطح با ابعاد و عمق بسیار کمتر از عمق پوست میدانهای الکترومغناطیس موجود باشد. شکل (۲-۱۰) اثرات گاوانیکی را به خوبی تشریح میکند. تحلیل ابعادی دادههای مگنتوتلوریک، هر دو اثر القایی و غیر-القایی را انعکاس میدهد. آشفتگیهای القایی وابسته به فرکانس بوده و میتوانند با یک تانسور امپدانس مختلط شامل دامنه و فاز بیان شوند. در مقابل آشفتگیهای غیرالقایی که به اثرات گالوانیکی موسوم هستند وابسته به فرکانس نبوده و میتوان آن را با یک تانسور امپدانس حقیقی توصیف کرد. این اثرات فقط روی بزرگی یا دامنه دادههای امپدانس اثر دارند [Bahr, 1988; Jiracek, 1990]. به واسطه اثرات گالوانیک، بزرگی یا دامنه امپدانس تغییر کرده و در نتیجه مقاومتویژه تغییر میکند و با توجه به این که اثرات گالوانیک وابسته به فرکانس نیستند یک جابجایی در منحنی مقاومتویژه برای تمامی فرکانسها به طور یکسان ظاهر می شود. در واقع منحنی مقاومت ویژه به سمت بالا یا پایین جابجا می شود ولی شکل آن بدون تغییر باقی می ماند. همچنین با توجه به این که اثرات گالوانیکی روى فاز دادههاى امپدانس بدون تأثير هستند منحنى فاز دادهها نيز بدون تغيير باقى مىماند. اين جابجایی منحنیهای مقاومتویژه موسوم به جابجاییهای ایستا است و اغلب در محیط های مقاوم که آنومالی های رسانا کوچک مقیاس تأثیر بزرگی روی میدان های الکتریکی دارند قابل ملاحظه هستند.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Surface distortions

<sup>&</sup>lt;sup>۲</sup>- کوچک مقیاس در واقع اصطلاحی است که نشان میدهد ابعاد توده ناهمگنی کوچکتر از عمق نفوذ میدان الکترومغناطیس است. <sup>3</sup>- Galvanic

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Static shifts



شکل (۲–۱۰): اثرات گالوانیک برای یک ناهمگنی رسانا (سمت چپ) و یک ناهمگنی مقاوم (سمت راست). القای بار سطحی روی توده ناهمگنی به واسطه عبور جریانهای الکتریکی در جهت عمود بر سطح ناهمگنیها باعث تولید یک میدان الکتریکی ثانویه میشود که به میدان اولیه به طور برداری اضافه میشود [Jiracek, 1990]

قبل از مدلسازی و تفسیر دادههای مگنتوتلوریک لازم است تا جابجاییهای ایستا تشخیص داده شده و مقادیر آنها جهت تصحیح تعیین شود. در صورت وجود مقادیر قابل ملاحظه این جابجاییها و عدم تصحیح آنها، معکوس سازی ممکن است به نتایج غیر واقعی منتهی شود. روش های مختلفی برای حذف جابجاییهای ایستا و یا تصحیح آنها ارائه شده است. روش فیلتر فضایی<sup>۱</sup> یا پروفیل زنی آرایه حذف جابجاییهای ایستا و یا تصحیح آنها ارائه شده است. روش فیلتر فضایی<sup>۱</sup> یا پروفیل زنی آرایه الکترومغناطیسی<sup>۲</sup> با استفاده از اندازه گیری متراکم میدانهای مگنتوتلوریک (به خصوص میدان الکترومغناطیسی<sup>۲</sup> با استفاده از اندازه گیری متراکم میدانهای مگنتوتلوریک (به خصوص میدان الکترومغناطیسی<sup>۲</sup> با استفاده از اندازه گیری متراکم میدانهای مگنتوتلوریک (به خصوص میدان الکترومغناطیسی<sup>۲</sup> با استفاده از اندازه ایرات جابجایی ایستا را حذف می کند [ Torres-Verdin الکترومغناطیس حوزه زمانی<sup>۳</sup> (Tempo را میدانه) مقاومتویژه به دست آمده از روشهای الکترومغناطیس حوزه زمانی<sup>۳</sup> (Tempo را میدان مستقیم<sup>۴</sup> (CD) در ایستگاههای متناظر با ایستگاههای الکترومغناطیس میزه را ایرا الحافی می معلوریک (به طور قابل ملاحظه تصحیح الکترومغای را ایستگاههای متناظر با ایستگاههای الکترومغای می می ایستوریک ( در ایرا ترات می مقومتویژه به دست آمده از روشهای الکترومغای می می می می می ایستار احدف می کند [ Tempo می الکترومغای می می می می می می می این را حذف می کند [ Stenberg et al., 1988; Simpson and Warner, 1998] نمود [ Stenberg et al., 1988; Simpson and Warner, 1998]

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Spatial filtering

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Electromagnetic Array Profiling (EMAP)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> -Time domain electromagnetic (TEM)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Direct current (DC)

### TE-۵-۲- رفتار مُدهای TE و TM در برخورد با ناهمگنیهای جانبی

رفتار این دو مُد در برخورد با ناهمگنیهای جانبی متفاوت است. در مُد TE میدان الکتریکی در جهت امتداد ساختار است و جریانهای الکتریکی تمایل به شارش در جهت مؤلفههای میدان الکتریکی دارند. در نتیجه آنها روی سطح ناپیوستگی باری القاء نمی کنند. بنابراین اطلاعات حاصل از یاسخ این مُد كمتر توسط ناپیوستگیهای جانبی (ناهمگنیهای سطحی) مغشوش می شود و این مُد نسبت به ناپیوستگیهای جانبی حساسیت کمتری دارد. اما در مُد TM میدان الکتریکی عمود بر امتداد ساختار بوده و جریانهای الکتریکی وادار به عبور در راستای عمود بر امتداد ساختار می شوند و باعث القای بارهای سطحی می شوند. میدان الکتریکی ایجاد شده توسط چگالی بار سطحی به طور برداری به ميدان القاء شده اوليه اضافه مي شود. افزايش ميدان الكتريكي در نزديكي ناييوستگي در قسمت مقاوم باعث افزایش امیدانس و در نتیجه افزایش مقاومتویژه ظاهری می شود و کاهش میدان الکتریکی در قسمت رسانا باعث كاهش مقاومتويژه ظاهري مي شود (شكل ۲-۱۱). مُد TE به پروفيل مقاومتويژه که دقیقاً زیر محل قرار دارد پاسخ میدهد. یعنی این که با کاهش فرکانس و دسترسی به عمق نفوذ بیشتر، این مُد اثرات ناهمگنیهای کم عمق را نادیده می گیرد. اما پاسخ مُد TM حتی برای فرکانس-های پایین توسط ناهمگنیهای کم عمق مغشوش می شود. این امر باعث جابجایی ایستا می شود. به همین دلیل معمولاً از مُد TE برای ساختارهای عمیق و از مُد TM برای ساختارهای کم عمق استفاده می شود [Dobrin and Savit, 1988]. البته در یک بررسی کامل تر توسط بردیچوسکی و همکاران [Berdichevsky et al., 1998]، نشان داده شده است که هر چند مُد TM نسبت به ناهمگنیهای سطحي حساس تر بوده و باعث جابجاييهاي ايستا مي شود ولي اين مُد براي تفسير ساختارهاي نزديك به سطح و همچنین برای تفسیر اثرات حاصل از ساختارهای سهبُعدی مقاوم، نسبت به مُد TE قویتر است. همچنین این بررسی نشان میدهد که مُد TE نسبت به ساختارهای عمیق حساستر است و این مُد کمتر تحت تأثیر جابجاییهای ایستا قرار می گیرد. در مدلهای دوبُعدی هر دو مُد TE و TM تفسیر می شود و دادههای مربوطه در هر مُد به تنهایی و یا به طور همزمان برای مدلسازی به کار گرفته می شود [Pedersen and Engels, 2005].



شکل (۲–۱۱): پاسخهای مقاومتویژه و فاز ظاهری برای مُدهای TE و TM برای یک مدل ساده دوبُعدی. منحنی مقاومتویژه ظاهری برای مُد TE به تدریج با نزدیک شدن ایستگاههای اندازه گیری به ناحیه مقاوم، به سمت مقاومت-ویژه ناحیه مقاوم نزدیک میشود. در مقابل منحنی مقاومتویژه برای مُد TM با عبور اندازه گیریها از مرز دو ناحیه تغییر قابل ملاحظهای را نشان میدهد [Turkoglo, 2009]

۲-۵-۴- پارامترهای ابعادی سویفت' و باهر'

برای دادههای مگنتوتلوریک بدون نوفه که روی یک ساختار کاملاً دوبُعدی اندازه گیری شدهاند بعد از چرخش در جهت امتداد ساختار، مؤلفههای قطری تانسور امپدانس ( $Z_{xx}$ ,  $Z_{yy}$ ) صفر میشوند. در دادههای واقعی به دلیل وجود نوفه (در صورت وجود ساختار دوبُعدی) امتداد ساختار، امتدادی است که در آن مؤلفههای قطری تانسور امپدانس کمینه یا مؤلفههای اصلی تانسور امپدانس ( $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$ , بیشینه شوند [Swift, 1967]. زاویه امتدادی که به این صورت به دست میآید زاویه سویفت یا امتداد سویفت نامیده میشود. کمینه کردن مؤلفههای قطری یا بیشینه کردن مؤلفههای اصلی تانسور امپدانس همیشه امتداد ناحیهای یکسانی را به دست نمیدهد. لذا ملاکی جهت بررسی دقت این روش ارائه شده که به مقدار چولگی سویفت<sup>۳</sup> معروف است و با رابطه زیر بیان میشود [Swift, 1967]. S =  $\frac{|z_{xx}+Z_{yy}|}{|z_{xy}-Z_{xx}|}$ 

به طور تجربی مقادیر کمتر از ۰/۰۵ برای S نشان دهنده ساختار یک بُعدی، مقادیر بین ۰/۰۵ تا ۰/۲ نشان دهنده ساختار دوبُعدی و مقادیر بیشتر از ۰/۲ نشان دهنده ساختار سه بُعدی است [ Turkoglo,]. 2009].

ملاک سویفت برای تحلیل ابعادی ساختار، برای دادههایی که کمتر تحت تأثیر نوفه قرار گرفتهاند مفید است اما برای دادههای حاوی نوفه قابل ملاحظه مقادیر S تحت تأثیر نوفه قرار گرفته و باعث خطا در تفسیر ابعاد ساختار شده و قابل اعتماد نمی باشد.

باهر [Bahr, 1991] برای حذف اثر ناهمگنیهای سطحی در تحلیل ابعادی دادهها، تانسور امپدانس اندازه گیری شده را حاصل از مدلی شامل ناهمگنیهای سطحی کوچک روی ساختارهای ناحیهای یک یا دوبُعدی در نظر گرفت. بنابراین، هدف، تخمین جهت امتداد ساختار ناحیهای است که تحت تأثیر

- <sup>1</sup>- Swift
- ²- Bahr

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Swift skew

آشفتگیهای سطحی قرار نگرفته باشد. روش باهر همچنین به روش چولگی حساس به فاز <sup>(</sup> هم معروف است. پارامتر اصلی تحلیل ابعادی باهر چولگی حساس به فاز بوده که با 
$$\eta$$
 بیان میشود:
$$\eta = \frac{\sqrt{|\text{Im}(Z_{xy}Z_{yy}^*+Z_{xx}Z_{yx}^*)|}}{|Z_{xy}-Z_{yx}|}$$

در این رابطه نماد \* مشخصه مزدوج مختلط است. مقادیر بزرگتر از ۰/۳ برای این پارامتر به طور قطع نشان دهنده ساختار سه بعدی است در صورتی که مقادیر کوچکتر از ۰/۳ برای آن الزاماً نشان دهنده دو بعدی بودن ساختار نیست و بایستی با استفاده از ملاکهای دیگر مثل بردارهای القایی یا اندیس-های وزنی ساختارها که توسط کائو و اور [Kao and Orr, 1982] معرفی شد، بررسی شود.

## ۲-۵-۵- نمودارهای قطبی امپدانس<sup>۲</sup>

شکل نمودارهای قطبی امپدانس ملاکی برای تحلیل ابعادی و تخمین امتداد ساختار است [ Reddy et [al., 1977]، در نمودارهای قطبی امپدانس، یک مؤلفه اصلی ( $|Z_{xy}|$ ) و یک مؤلفه قطری ( $|x_x|$ ) تانسور امپدانس به صورت توابعی از زاویه چرخش ( ۲ تا ۳۶۰ درجه) ترسیم میشوند (رابطه ۲–۵۲). شکل و جهتگیری نمودارهای به دست آمده میتواند بیان کننده اطلاعاتی از ابعاد ساختار باشد. برای ساختارهای ژئوالکتریکی یک بعدی نمودارهای قطبی امپدانس اصلی دایرهای شکل است و مقادیر مؤلفههای قطری میل به صفر دارد. در ساختارهای ژئوالکتریکی دوبعدی نمودار قطبی امپدانس اصلی مؤلفههای قطری میل به صفر دارد. در ساختارهای ژئوالکتریکی دوبعدی نمودار قطبی امپدانس اصلی در جهت امتداد ساختار یا عمود بر امتداد ساختار کشیده میشوند. در صورتی که اندازه گیری روی توده مقاوم باشد کشیدگی در جهت عمود بر امتداد ساختار و اگر اندازه گیری روی توده رسانا باشد کشید کی در جهت امتداد ساختار است. همچنین نمودار قطبی امپدانس قطری در ساختارهای دوبعدی به شکل یک گلبرگ متقارن است و مقادیر این امپدانس نسبت به امپدانس اصلی نسبتاً کوچک است. در ساختارهای ژئوالکتریکی سه بعدی نیز نمودار قطبی امپدانس اصلی در یک جهت کشیده میشود ولی نمودار قطبی امپدانس قطری یک شکل گلبر گی نامتقارن تولید می کند و از نظر

<sup>1</sup>- Phase sensitive skew

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Impedance polar diagram

اندازه نیز قابل مقایسه با نمودار قطبی امپدانس اصلی است. البته افزایش بزرگی نمودار قطبی امپدانس قطری نسبت به نمودار قطبی امپدانس اصلی و شکل نامتقارن آن ممکن است به خاطر نوفه یا وجود ناهمگنیهای سطحی نیز باشد [Moradzadeh, 1998]. شکل (۲–۱۲) نمونهای از نمودارهای قطبی را برای مدلهای یکبُعدی و دوبُعدی و همچنین مدل سهبُعدی نشان میدهد. در این مدلها تانسور امپدانس به صورت زیر منظور شده است [Berdichevsky and Dmitriev, 2002]:

1-D: Z = 4 - 2i, 2-D:  $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 4-2i \\ -1+2i & 0 \end{bmatrix}$ , 3-D (a):  $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} -0.5 - 3i & 4-2i \\ -1+2i & 0.5+3i \end{bmatrix}$ 3-D (b):  $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} -0.5 - 3i & 4-2i \\ -1+2i & 0.1-i \end{bmatrix}$ 



Berdichevsky and | ان مثالی از نمودارهای قطبی امپدانس برای مدلهای یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی [Dmitriev, 2002]

## ۲-۵-۶- تحليل ابعادي والديم'

مارتی و همکاران [Marti et al., 2009]، برنامه والدیم را به عنوان یک برنامه کامل برای تحلیل ابعادی دادههای مگنتوتلوریک بر اساس نامتغیرهای چرخشی<sup>۲</sup> ویور و همکاران [ Weaver et al., 2000]، توسعه دادند. نامتغیرهای چرخشی پارامترهایی هستند که به صورت یک سری روابط جبری

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

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Rotational invariants

از مؤلفه های تانسور امپدانس تعریف می شوند به طوری که با چرخش تانسور امپدانس (مطابق رابطه ۲–۵۲) این پارامترها ثابت باقی می مانند. لازم به یادآوری است که امپدانس دترمینان یا امپدانس مؤثر که توسط رابطه (۲–۶۱) تعریف گردید نیز یک نوع پارامتر نامتغیر چرخشی است. ویور و همکاران [2000] Weaver et al. (2000]، هشت پارامتر نامتغیر چرخشی تعریف کردند و بر اساس آنها یک روش تحلیل ابعادی برای داده های مگنتوتلوریک ارائه نمودند. یکی از مسائل مهم در روش ویور و همکاران در کاربرد این روش برای داده های مگنتوتلوریک ارائه نمودند. یکی از مسائل مهم در روش ویور و همکاران وجود نوفه در جایی که قرار است مقدار یک پارامتر نامتغیر صفر شود، به ندرت این اتفاق می افتد. یعنی در داده های واقعی ممکن است هیچگاه نامتغیرهای چرخشی به طور دقیق صفر نشوند. لذا لازم است که حدود آستانه ای مناسبی برای برخی از نامتغیرهای چرخشی به طور دقیق صفر نشوند. لذا لازم برنامه والدیم مرتفع شده است. همچنین در برنامه والدیم ملاحظات دیگری نسبت به روش ویور و همکاران منظور شده است. مثلاً در این برنامه والدیم ملاحظات دیگری نسبت به روش ویور و انجام می شود و در محاسبه کلیه پارامترها میزان خطا نیز محاسبه می شود. برامه والدیم ضمن انجام انجام می شود و در محاسبه کلیه پارامترها میزان خطا نیز محاسبه می شود. برامه والدیم ضمن انجام انجام می شود و در محاسبه کلیه پارامترها میزان خطا نیز محاسبه می شود. برامه والدیم ضمن انجام انجام ای ایداد<sup>۱</sup> [2010] داده های مکنتوتلوریک، شامل کلیه ملاکهای منظور شده در برنامههای تحلیل امتداد<sup>۱</sup> [2010] داده های مکنتوتلوریک، شامل کلیه ملاکهای منظور شده در برنامههای

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Strike analysis

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Phase tensor

<sup>فصل</sup> سوم مبانی روشهای معکوسسازی دادههای مگنتو تلوریک

#### ۳–۱– مقدمه

در حل هر مسئله معکوس سه سؤال مهم مطرح می شود [Haber, 1997; Zhdanov, 2002] اول این که آیا حل یا پاسخی برای مسئله وجود دارد؟، این سؤال به روابط ریاضی برای حل مسئله بستگی دارد. به طوری که از نظر فیزیکی مسئله معکوس در حل ساختارهای واقعی زمین دارای جواب بوده ولی از نظر ریاضی ممکن است مسئله طوری طراحی شده باشد که مدل عددی کافی از دسته مدل-های داده شده برای انطباق با دادههای مشاهدهای وجود نداشته باشد. سؤال دوم این که آیا پاسخ مسئله معکوس یکتاست<sup>۹</sup>؟، منظور این است که ممکن است دو یا چند مدل با دو یا چند منبع مختلف وجود داشته باشند که پاسخ یکسانی تولید کنند. سؤال سوم این است که آیا این مسئله معکوس پایدار است؟، این سؤال زمانی مطرح میشود که اختلاف در پاسخها برای مدلهای مختلف بیشتر از نظر ریاضی به درستی طراحی شود. یا به عبارت دیگر مسئله معکوس را جورشده میگویند؛ در صورتی که سه سؤال فوق دارای پاسخ مثبت باشند و یک مسئله معکوس را جورشده گفته میشود، در

تیخونف و آرسنین [Tikhonov and Arsenin, 1977] اصول تئوری حل مسائل جورنشده را توسعه دادند. آنها یک روش منظمسازی را بر پایه تقریب یک مسئله جورنشده توسط یک تعداد از مسائل جورشده توسعه دادند.

مسئله معکوس مگنتوتلوریک به خاطر طبیعت میدان مگنتوتلوریک که به شدت غیرخطی است، یک مسئله فوقالعاده جورنشده است [Mackie and Madden, 1993]. شدت جورنشدگی مسئله معکوس مگنتوتلوریک در معکوس سازی سه بعدی به دلیل این که تعداد داده های اندازه گیری شده در مقایسه با تعداد پارامترهای مجهول مدل مورد نظر کافی نیست، تشدید می شود [ Newman and با تعداد پارامترهای مشکل جورنشدگی مسئله را می توان با منظم سازی و وارد نمودن محدودیت ها (قیدها) در مسئله تا حدود زیادی حل نمود. یک مسئله معکوس علاوه بر نیرومند بودن در تولید مدل یا صحت و دقت مدلسازی باید دارای بازدهی محاسباتی مناسب نیز باشد. با توجه به این که هسته پیشرو در معکوس سازی از دو نظر ذکر شده اهمیت بالایی دارد، لذا در مسائل معکوس، مؤثر بودن یک هسته پیشرو از نظر دقت و بازدهی محاسباتی دارای اهمیت خاصی است. مثلاً با توجه به این که بزرگی حجم محاسبات برای مدلهای سه بعدی هنوز یک چالش است، یک تدبیر مناسب در حل مسائل مدلسازی سه بعدی میدان مگنتوتلوریک، روش های مدلسازی مؤثر اختلاف محدود <sup>۱</sup> است، که در طول دو دهه گذشته رشد کرده و امروزه به خصوص برای مدلسازی سه بعدی دادههای Madden and Mackie, 1989; Mackie et al., 1993; ]

Weidelt, 1995; Smith, 1996a; Smith, 1996b; Siripurnvaraporn et al., 2002 مسلماً مطالعه و بهبود روش انتخاب پارامتر منظمسازی در معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک که هدف تحقیق میباشد بدون تسلط بر تئوری روشهای معکوسسازی این دادهها میسر نیست. در واقع در این مطالعه آزمایشهای مختلف معکوسسازی انجام میشود و در خلال این آزمایشها و تجزیه و تحلیلها از پارامترها و بخشهای مختلف معکوسسازی در روشهای مختلف بحث میشود. بنابراین لازم است تا اصول روشهای مختلف معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک با توجیه و در این مطالعه آزمایشهای مختلف معکوسسازی انجام میشود و در خلال این آزمایشها و تجزیه و تحلیلها از پارامترها و بخشهای مختلف معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک بیان شود. به همین منظور لازم است تا اصول روشهای مختلف معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک بیان شود. به همین منظور در این فصل اصول تئوری روشهای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک با توجه به الگوریتمهای موجود برای مدلهای یک، دو و سه بُعدی توضیح داده میشود. اغلب روشهای معکوسسازی داده-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Finite difference
# ۲-۲- معکوسسازی یک بُعدی داده های مگنتو تلوریک

# ۳-۲-۱- روش تبدیل تقریبی بوستیک'

در اکثر الگوریتمهای معکوس سازی یک بعدی برای میدان مگنتوتلوریک ساختار مقاومت ویژه زیر سطح به این صورت مشخص می شود که پاسخ امپدانس مدل به دادههای مشاهدهای برازش گردد [, Wu 1968; Nabetani and Rankin, 1969; Laird and Bostick, 1970; Patella, 1976; Inman, 1975; 1975; Nabetani and Rankin, 1969; Laird and Bostick, 1970; Patella, 1976; Inman, 1975; و محینین بوستیک [Vozoff and Jupp, 1975; Petrick et al., 1977; Shoham et al., 1978 شارپ [Bostick, 1969] و همچنین بوستیک [Bostick, 1977] روشهایی را برای به شارپ آوردن یک تابع پیوسته از رسانایی محیط برای تولید دادهها نسبت به عمق با استفاده از داده-های تابع فرکانس توسعه دادند. روش دوم با توجه به سادگی و سرعت نسبت به روش اول برتری دارد [Oldenburg, 1979].

روش بوستیک [Bostick, 1977] بر اساس یک مدل دولایهای است که در آن معادلات مجانبها برای منحنیهای مقاومتویژه ظاهری تابعی از منحنیهای مقاومتویژه ظاهری تابعی از 
$$ho_2$$
منحنیهای مقاومتویژه یا ضخامت D و مقاومتویژه  $ho_1$  بوده که روی یک نیمفضا با مقاومتویژه  $ho_2$ قرار گرفته است (شکل ۳-۱).

رابطه مقاومتویژه ظاهری برای مجانب فرکانس پایین برای حالتی که نیمفضای قرار گرفته در زیر لایه با ضخامت D از نظر فیزیکی بینهایت رسانا باشد، به صورت زیر به دست میآید:

$$\lim_{\substack{\omega \to 0 \\ \rho_{2 \to 0}}} \rho_a(\omega) = \omega \mu D^2$$
 (۱–۳)  
همچنین رابطه مجانب منحنی مقاومتویژه در فرکانس پایین برای حالت نیمفضای بینهایت مقاوم به  
صورت زیر به دست میآید:

$$\lim_{\substack{\rho_2 \to \infty}} \rho_a(\omega) = 1/(\omega \mu S^2)$$
 (Y-W)

در این رابطه S رسانندگی بوده که به صورت نسبت ضخامت به مقاومتویژه تعریف می شود:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Bostick's approximate transformation method



شکل (۳–۱): منحنیهای مقاومتویژه ظاهری به صورت تابعی از فرکانس زاویهای (۵) برای یک لایه با ضخامت D و مقاومتویژه  $\rho_2$  قرار گرفته است و مجانبهای این منحنیها در بخش فرکانس- مقاومتویژه  $\rho_1$  که روی یک نیمفضا با مقاومتویژه  $\rho_2$  قرار گرفته است و مجانبهای این منحنیها در بخش فرکانس- مقاومتویژه مای پایین [Dobrin and Savit, 1988]

$$S = D/\rho_1$$
 (۳-۳)  
با استفاده از رابطه (۳-۱) میتوان یک رابطه تقریبی فرکانس-عمق برای دادههای یک بُعدی  
مگنتوتلوریک به دست آورد:  
 $z = \sqrt{\rho_a/\omega\mu}$  (۴-۳)

به منظور تخمین مقاومتویژه واقعی به صورت تابعی از عمق، در یک تقریب دیگر با در نظر گرفتن محدوده مابین دو مجانب بینهایت در هر نقطه از یک منحنی مقاومتویژه ظاهری با D و Sهای مختلف رابطه زیر برای مقاومتویژه واقعی زمین یک بعدی به دست می آید:

$$ho(z) = 
ho_a(\omega)(1 - C/1 + C)$$
 (۵-۳)  
که در آن C = d(log $ho_a$ )/d(log $\omega$ ) شیب منحنی مقاومتویژه ظاهری در مقابل فرکانس در مقیاس  
لگاریتمی است.

در این تبدیل معکوس، پاسخ منحنیهای معکوس شده به لایههای رسانا بیشتر از لایههای مقاوم است و این همان موضوعی است که از فیزیک انتشار میدانهای الکترومغناطیس انتظار میرود. نکته دیگر این که در این روش معکوسسازی، محاسبه شیب منحنی مقاومتویژه ظاهری نسبت به فرکانس در دادههای صحرایی حاوی نوفه کار مشکلی است، بنابراین برای این منظور میتوان از دادههای فاز و رابطه تبدیل هیلبرت<sup>۱</sup> [Dobrin and Savit, 1988] بین فاز و شیب مقاومتویژه ظاهری به صورت زیر استفاده کرد:

 $d(\log \rho_a)/d(\log \omega) \cong (\phi^0/45) - 1 \tag{9-7}$ 

که در آن  $\Phi^0$  فاز ظاهری بر حسب درجه است.

۳-۲-۲- روش معکوسسازی هموار<sup>۲</sup> (معکوس سازی اُکام<sup>۳</sup>)

در این روش با توجه به این که مسئله معکوس دادههای سونداژ الکترومغناطیس یک مسئله غیر خطی بوده و دارای حل یکتایی نیست، برای رفع مشکل عدم یکتایی پاسخ از قید هموار بودن، استفاده می شود [Constable et al., 1987].

در الگوریتمهای اینمن [Petrick et al., 1977] و پتریک و همکاران [Petrick et al., 1977]، که از روش مارکوآرت [Marquardt, 1963] استفاده شده است، و همچنین الگوریتمهای یو [Wu, 1968] و جاپ و وزوف [Jupp and Vozoff, 1975] که در آنها مسئله غیرخطی به روش کمترین مربعات حل می-شود، مشکل عدم یکتایی پاسخ وجود دارد. الدنبرگ [Oldenburg, 1979] با استفاده از تئوری بکوس-گیلبرت<sup>4</sup> [Backus and Gilbert, 1970] این مشکل را تا حدودی مرتفع نمود.

بر اساس یکی از تئوریهای اُکام که در اوایل قرن چهاردهم نوشته شده است [ Russell, 1946; ] Constable et al., 1987] گفته می شود: این کار بیهودهای است که عملی که به روش سادهتر و تعداد مراحل کمتر انجام می شود را با اعمال پیچیدهتر و مراحل بیشتر انجام دهیم. روش معکوس سازی

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Hilbert-transform

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Smooth inversion

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Occam's inversion

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Backus-Gilbert theory

هموار یا روش آکام نیز بر این اساس توسعه و نامگذاری شده است. اساس معکوسسازی هموار یا  
جستجو برای مدل هموار این است که مدل هایی که سنخیتی با داده های مشاهدهای ندارند و ملاک-  
های مبهم و گمراه کننده که تغییرات شدید ایجاد میکنند در مجموعه پاسخها وارد نشوند  
[Constable et al., 1987]. در نتیجه انتظار می رود که نواحی دارای مقاومتویژه بالا و یا مقاومتویژه  
کم از مدل هموار در عین سادگی، معرف مدل واقعی زمین باشند. همچنین از دیگر فواید روش  
معکوس سازی هموار این است که یک مدل خاص با مشخصات انتخاب شده جستجو می شود و این  
معکوس سازی هموار این است که یک مدل خاص با مشخصات انتخاب شده جستجو می شود و این  
مدل به حدسهای اختیاری اولیه و احتمالات برنامه کامپیوتر بستگی ندارد.  
(۲-۷)  
R<sub>1</sub> = 
$$\int (dm/dz)^2 dz$$
  
در این روش معکوس سازی ابتدا قیدهای ناهمواری <sup>۲</sup> به صورت زیر تعریف می شود:  
(۲-۳)  
R<sub>2</sub> =  $\int (d^2m/dz^2)^2 dz$   
در روابط فوق Z عمق و (Z) m پارامتر مدل به عنوان تابعی از عمق است که می تواند مقاومتویژه یا  
بنابراین در یک مدل گسسته با M پارامتر مدل یا با M لایه که هر یک دارای مقاومتویژه ا m می-  
باشند این ناهمواری ها به صورت زیر نوشته می شود [Constable et al., 1987].  
باشند این ناهمواری ها به صورت زیر نوشته می شود [Constable et al., 1987].  
R<sub>1</sub> =  $\sum_{n=2}^{M} (m_i - m_{i-1})^2$   
(N-۳)  
R<sub>2</sub> =  $\sum_{n=2}^{M-1} (m_{i+1} - 2m_i + m_{i-1})^2$   
(N-۳)  
R<sub>2</sub> =  $\sum_{n=2}^{M-1} (m_{i+1} - 2m_i + m_{i-1})^2$   
(N-7)  
N<sub>2</sub>

عدم برازش که بیان کننده نیکوئی برازش بین دادههای مشاهدهای و تئوری است، به صورت زیر تعریف میشود:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Roughness constraints

$$X^2 = \sum_{j=1}^{N} (d_j - F_j[\mathbf{m}])^2 / \sigma_j^2$$
 (۱۱-۳)  
که در آن ز $\sigma$  مقدار خطای مربوط به هر داده، **m** بردار پارامترهای مدل و F تابع پیشرو<sup>'</sup> است.  
با توجه به این که مسئله مگنتوتلوریک یک مسئله غیرخطی است، ابتدا اقدام به خطیسازی تابع  
پیشرو میشود. به این صورت که با استفاده از تقریب مرتبه اول بسط تیلر<sup>Y</sup> برای تابع پیشرو حول یک  
مدل مرجع، مسئله خطی می شود [Constable et al., 1987]:

$$\mathbf{F}[\mathbf{m}] = \mathbf{F}[\mathbf{m}_0] + \mathbf{J} \Delta \mathbf{m}$$

در رابطه فوق  $\mathbf{m}_0$  یک مدل مرجع یا مدل اولیه،  $\mathbf{m}=\mathbf{m}-\mathbf{m}_0$  و J ژاکوبین<sup>T</sup> یا ماتریس حساسیت<sup>†</sup> بوده که به صورت J =  $\partial \mathbf{F}/\partial \mathbf{m}$  تعریف می شود:

	$\left[\frac{\partial F_1}{\partial m_1}\right]$	$\frac{\partial F_1}{\partial m_2}$		$\frac{\partial F_1}{\partial m_M}$
<b>J</b> =	•	•	•	
	$\frac{\partial \dot{F}_N}{\partial m_1}$	$rac{\partial \dot{F}_N}{\partial m_2}$	• 	$\frac{\partial \dot{F}_N}{\partial m_M}$

که در آن N تعداد دادهها و M تعداد پارامترهای مدل است.

(17-37)

این نوع خطیسازی، خطیسازی به روش گوس-نیوتن نیز گفته میشود و شکل عمومی آن در مسئله معکوس برای تکرار kام به صورت زیر است:

 $\mathbf{F}[\mathbf{m}_{k+1}] = \mathbf{F}[\mathbf{m}_k + \Delta \mathbf{m}] = \mathbf{F}[\mathbf{m}_k] + \mathbf{J}_k(\mathbf{m}_{k+1} - \mathbf{m}_k)$ (1°-°)

برای الگوریتم معکوس سازی شکل ماتریسی ناهمواریها را می توان به صورت زیر نوشت:  $R_{1} = \|\mathbf{Cm}\|^{2}, R_{2} = \|\mathbf{CCm}\|^{2} = \|\mathbf{C}^{2}\mathbf{m}\|^{2}$ (1۴-۳)  $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & . & . & 0 \\ -1 & 1 & 0 & . & 0 \\ 0 & -1 & 1 & . & 0 \\ . & 0 & . & . & . \\ 0 & . & . & -1 & 1 \end{bmatrix}$ 

<sup>1</sup>- Forward function

<sup>2</sup>- Taylor expansion

<sup>3</sup>- Jacobian

<sup>4</sup>- Sensitivity matrix

که در آن ||.|| مشخصه نرم<sup>(</sup> (اندازه) و C ماتریس ناهمواری است.

در معکوس سازی هموار، هدف کمینه نمودن  $R_1$  یا  $R_2$  به شرط کمینه کردن تابع عدم برازش (رابطه -۱۱-۳) است [Constable, et al., 1987]. پس با وارد نمودن ضریب لاگرانژ  $\lambda$  یا پارامتر منظم سازی، [Constable, et al., 1987] است [Tips می شود: تابع هدف یا تابع جریمه مسئله معکوس هموار به روش کمترین مربعات به صورت زیر نوشته می شود: $U(\mathbf{m}, \lambda) = \|\mathbf{Cm}\|^2 + \lambda^{-1} \|\mathbf{Wd} - \mathbf{WF}[\mathbf{m}]\|^2 - X_*^2$ 

در این رابطه W ماتریس وزنی دادهها که با توجه به خطای مربوط به هر داده یک ماتریس قطری  $W = diag\{1/\sigma_1, 1/\sigma_2, ..., 1/\sigma_N\}$  به صورت  $N \times N$  به صورت  $\{N \times N$  مقدار مجاز عدم برازش<sup>7</sup> یا عدم برازش هدف<sup>7</sup> است. همچنین تابع هدف مسئله معکوس هموار را می توان به صورت زیر هم نشان داد [Siripunvaraporn and Egbert, 2000]

$$\Psi_{\lambda}(\mathbf{m}) = \|\mathbf{C}\mathbf{m}\|^2 + \lambda^{-1} \|\mathbf{W}\mathbf{d} - \mathbf{W}\mathbf{F}[\mathbf{m}]\|^2$$
(19-7)

با خطیسازی تابع پیشرو مطابق رابطه (۳–۱۳) و کمینه کردن این تابع هدف، مسئله معکوس هموار به صورت تکراری حل می شود [Constable, et al., 1987]:

$$\mathbf{m}_{k+1}(\lambda) = [\lambda \mathbf{C}^{\mathrm{T}} \mathbf{C} + (\mathbf{W} \mathbf{J}_{k})^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \mathbf{J}_{k}]^{-1} (\mathbf{W} \mathbf{J}_{k})^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \hat{\mathbf{d}}_{k}$$
(14-7)

که در آن  $\mathbf{k} = \mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}_k] + \mathbf{J}_k \mathbf{m}_k$  نوعی از بردار دادهها، k شماره تکرار و T مشخص کننده  $\mathbf{\hat{d}}_k = \mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}_k] + \mathbf{J}_k \mathbf{m}_k$  ترانهاده<sup>†</sup> ماتریس است. پس از هر تکرار مقدار عدم برازش به صورت زیر محاسبه می شود:  $X_{k+1}^2(\lambda) = \|\mathbf{W}\mathbf{d} - \mathbf{W}\mathbf{F}[\mathbf{m}_{k+1}(\lambda)]\|^2$ (۱۸-۳)

به خاطر طبیعت غیرخطی مسئله معکوس مگنتوتلوریک رساندن عدم برازش به سطح صفر به خصوص در معکوسسازی دادههای واقعی هیچگاه تضمین نمی شود [Constable et al., 1987]. ضریب لاگرانژ λ در واقع یک نوع هموار کننده است. به طوری که اگر λ مقدار بزرگی انتخاب شود

<sup>3</sup>- Target misfit

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

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Desired misfit

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Transpose

تأثیر میزان برازش در مدل کم میشود و همچنین اگر  $\lambda$  مقدار کوچکی انتخاب شود؛ از اهمیت هموار بودن کاسته میشود. بنابراین باید این مقدار با دقت و به صورت هموار انتخاب شود. در روش اُکام محاسبات معکوسسازی معمولاً در دو مرحله انجام میشود. در مرحله اول محاسبات معکوسسازی، هدف کاهش میزان عدم برازش است. به این دلیل که معمولاً حدس اولیه یا مدل اولیه از مدلی که همخوانی نزدیکی با دادهها داشته، فاصله زیادی دارد؛ پس ابتدا در هر تکرار با انتخاب  $\Lambda$ -های مختلف سعی در کم کردن میزان عدم برازش بوده سپس در مرحله بعد با نگه داشتن این سطح از اختلاف در تکرارهای بعدی مدلی با کمترین ناهمواری به دست میآید. در صورتی که با بیش از این مقدار  $\lambda$  میزان ناهمواری به حداقل میرسد، بزرگترین مقدار انتخاب میشود، به دلیل این که با این مقدار میزان ناهمواری به حداقل میرسد [187].

برای انتخاب  $\lambda$  مناسب، باعث شده است که این روش به عنوان یک حالت خاص از روش های گوس-نیوتن محسوب شود. به طوری که در یک روش گوس-نیوتن صریح فرآیند معکوس سازی در یک مرحله انجام شده و در طول این فرآیند مقدار  $\lambda$  در کلیه تکرارهای معکوس سازی ثابت است [Siripunwaraporn, 2012]. شیوه انتخاب پارامتر منظم سازی ( $\lambda$ ) در روش اُکام در واقع بر اساس روش اصل اختلاف میباشد که در فصل پنجم به طور مفصل شرح داده می شود. مقدار پارامتر منظم-سازی انتخاب شده با توجه به این روش، مقداری است که به واسطه آن، مقدار عدم برازش در رابطه سازی انتخاب شده با توجه به این روش، مقداری است که به واسطه آن، مقدار عدم برازش در رابطه معکوس به ازای مدل به دست آمده برابر N (تعداد داده ها) است. به طوری که در هر تکرار، مسئله بعکوس به ازای مقادیر مختلف پارامتر منظمسازی حل می شود تا مقدار مناسب عدم برازش یا عدم

## ۳-۳- معکوس سازی دوبُعدی دادههای مگنتو تلوریک

۳-۳-۱ روش معکوسسازی هموار (معکوسسازی اُکام)

در معکوسسازی دوبُعدی هموار نیز اساس کار همانند روش یک بُعدی هموار است. در این روش با توجه به دوبُعدی بودن مسئله، با در نظر گرفتن محور x در جهت امتداد ساختار، ناهمواری مدل به صورت مجموع ناهمواریهای قائم و جانبی تعریف می شود [ ,deGroot-Hedlin and Constable] [1990]:

$$\mathbf{R}_{1} = \left\| \mathbf{C}_{\mathbf{y}} \mathbf{m} \right\|^{2} + \left\| \mathbf{C}_{\mathbf{z}} \mathbf{m} \right\|^{2} \tag{19-7}$$

در این رابطه  $C_y e_y e_z$  به ترتیب ماتریس ناهمواری جانبی و قائم یا عملگر ماتریسی برای بیان اختلاف مقاومتویژه بلوکهای مجاور در جهت y و z میباشند. این قید ناهمواری در واقع بیان قید ناهمواری با مشتقات اول است. ناهمواری مدل با مشتقات دوم برای یک مدل دوبُعدی به صورت زیر بیان می-شود:

$$\mathbf{R}_{2} = \left\| \mathbf{C}_{y}^{2} \mathbf{m} \right\|^{2} + \left\| \mathbf{C}_{z}^{2} \mathbf{m} \right\|^{2} \tag{(1.-7)}$$

سپس همانند روش یک بُعدی هموار، مسئله معکوس دوبُعدی آن به روش کمترین مربعات به صورت زیر تعریف می شود [deGroot-Hedlin and Constable, 1990]:

$$U(\mathbf{m},\lambda) = \|\mathbf{C}_{y}\mathbf{m}\|^{2} + \|\mathbf{C}_{z}\mathbf{m}\|^{2} + \lambda^{-1}\{\|\mathbf{W}\mathbf{d} - \mathbf{W}\mathbf{F}[\mathbf{m}]\|^{2} - X_{*}^{2}\}$$
(1)-7)

در رابطه فوق F تابع پیشرو غیرخطی دوبُعدی است. مشابه با روش یک بُعدی با خطی نمودن U و حل تکراری آن برای پارامترهای مدل داریم:

$$\mathbf{m}_{k+1}(\lambda) = [\lambda(\mathbf{C}_{y}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}_{y} + \mathbf{C}_{z}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}_{z}) + (\mathbf{W}\mathbf{J}_{k})^{\mathrm{T}}\mathbf{W}\mathbf{J}_{k}]^{-1}(\mathbf{W}\mathbf{J}_{k})^{\mathrm{T}}\mathbf{W}\hat{\mathbf{d}}_{k}$$
(77-7)

دیده می شود که روابط (۳–۲۱) و (۳–۲۲) همانند روش یک بُعدی مربوطه (روابط ۳–۱۵ و ۳–۱۷) بوده به جز در محاسبات پیشرو که در اینجا دوبُعدی است و همچنین ماتریس ناهمواری نیز در دو بُعد منظور می شود. لازم به ذکر است که برای محاسبات پیشرو مورد نیاز در مسائل معکوس سازی داده- های ژئوفیزیکی معمولاً از روشهای عددی اختلاف محدود<sup>۲</sup>، اجزای محدود<sup>۲</sup>، حجم محدود<sup>۲</sup> و معادلات انتگرالی<sup>۴</sup> استفاده میشود. در این روشهای عددی برای یک مدل دوبعدی ژئوالکتریکی، زمین با توجه به روش حل مسئله پیشرو به شبکهای از سلولهای مستطیلی، مثلثی و یا چند ضلعی تفکیک یا اصطلاحاً مشبندی<sup>۵</sup> میشود و رسانایی یا مقاومتویژه در هر سلول یکنواخت در نظر گرفته می شود. برای مدلسازی پیشرو دادههای مگنتوتلوریک هم کارهای زیادی بر اساس این روشهای عددی توسعه داده شده است [ ; 2000, 1971; Weaver et al., 1985; Weaver et al., 1986; Wannamaker et al., 1986; Wannamaker et al., 1986; Mannamaker et al., 2002 Martinelli, 1993; Pek and Verner, 1997; Siripunvaraporn et al., 2002

# ۳-۳-۲ روش معکوسسازی فضای دادهها ً

اساس این روش بر پایه روش هموار اُکام است. در این روش حل مسئله معکوس را میتوان از فضای مدل<sup>۷</sup> به فضای دادهها تبدیل نمود. به این صورت حل معادلات مربوطه از سیستم  $M \times M$  به سیستم  $M \times M$  مدل<sup>۷</sup> به فضای دادهها تبدیل نمود. به این صورت حل معادلات مربوطه از سیستم  $M \times M$  به سیستم  $N \times N$  N $\times N$  کاهش مییابد (N تعداد دادهها و M تعداد پارامترهای مدل و معمولاً N خیلی کمتر از M است). پارکر [Parker, 1994] نشان داد که کمینه نمودن تابع هدف مسئله معکوس هموار (بر اساس است). پارکر [Parker, 1994] نشان داد که کمینه نمودن تابع هدف مسئله معکوس هموار (بر اساس است). پارکر [Right  $M \times M$  به صورت ترکیب خطی از ردیفهای ماتریس حساسیت هموار (می مرابطه  $M \times M$ ) بیان کرد [Siripunvaraporn and Egbert, 2000]:

 $\mathbf{m}_{k+1} - \mathbf{m}_0 = \mathbf{C}_m \mathbf{J}_k^T \boldsymbol{\beta}_{k+1}$  (۲۳-۳) در رابطه فوق  $\mathbf{C}_m$  ماتریس کواریانس<sup>^</sup> مدل، که هموار کننده تغییرات پارامترهای مدل نسبت به مدل مرجع است. معکوس این ماتریس معادل ماتریس ناهمواری در روش اُکام است.  $\boldsymbol{\beta}_{k+1}$  یک بردار

- <sup>3</sup>- Finite volume
- <sup>4</sup>- Integral equation
- <sup>5</sup>- Meshing
- <sup>6</sup>- Data space
- <sup>7</sup>- Model space
- <sup>8</sup>- Covariance matrix

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Finite difference

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Finite element

<sup>۲</sup> ضرایب توسعه نامعلوم برای توابع پایه ( $[\mathbf{C}_{\mathbf{m}}\mathbf{J}_{\mathbf{k}}^{\mathrm{T}}]_{j}$ , j = 1, ..., N) نوابع پایه معرفهای ترایب توسعه نامعلوم برای توابع پایه معرفهای تابع دادههای خطی شده در تکرار الله (۳–۲۲) در تابع هدف مسئله معکوس هموار، تابع هدف مسئله معکوس در روش فضای دادهها به صورت زیر نوشته می شود [Siripunvaraporn and Egbert, 2000]

$$\Psi_{\lambda}(\mathbf{m}) = \boldsymbol{\beta}_{k+1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{k}^{\mathrm{n}} \boldsymbol{\beta}_{k+1} + \lambda^{-1} \{ \left( \hat{\mathbf{d}}_{k} - \boldsymbol{\Gamma}_{k}^{\mathrm{n}} \boldsymbol{\beta}_{k+1} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{C}_{\mathrm{d}}^{-1} \left( \hat{\mathbf{d}}_{k} - \boldsymbol{\Gamma}_{k}^{\mathrm{n}} \boldsymbol{\beta}_{k+1} \right) \}$$
(74-7)

در اینجا  $J_k^n = J_k C_m J_k^T$  یک ماتریس با ابعاد N × N به نام ماتریس محصول میانی<sup>7</sup> فضای دادهها است که یک ماتریس متقارن و نیمه معین مثبت<sup>4</sup> است. C<sub>d</sub> ماتریس کواریانس دادهها که در عمل همان ماتریس قطری حاصل از خطای دادهها است یعنی معکوس آن معادل ماتریس وزنی دادهها در روش اُکام است. برای کمینه نمودن این تابع هدف، با مشتق *گ*یری از رابطه (۳–۲۴) نسبت به **β** و برابر صفر قرار دادن آن داریم:

$$\boldsymbol{\beta}_{k+1} = (\lambda \mathbf{C}_{d} + \boldsymbol{\Gamma}_{k}^{n})^{-1} \hat{\mathbf{d}}_{k}$$
(٢Δ-٣)

رابطه (۳–۲۵) بیان کننده سیستم معادلات خطی در هر تکرار معکوس سازی در روش فضای دادهها است. با حل این مسئله برای  $\beta_{k+1}$ ، مدل جدید از رابطه (۳–۲۳) به دست میآید. با توجه به این که سیستم معادلات رابطه (۳–۲۵) دارای ابعاد N×N (N تعداد دادهها) است، مسئله معکوس در فضای دادهها به جستجو برای N ضریب حقیقی توسعه  $\beta_{k+1}$  به جای مدلی با M پارامتر میپردازد. سیستم معادلات خطی معکوس سازی در فضای مدل مطابق رابطه (۳–۲۲) دارای ابعاد M×M است. درست مانند روش هموار استاندارد می توان با حل این مسئله برای  $\beta_{k+1}$ ، مدل جدید را از رابطه (۳–۲۳) به دست آورد. هنچنین در این روش نیز همانند روش اُکام مقدار عدم برازش برای لاهای مختلف از رابطه ای مشابه با رابطه (۳–۱۸) محاسبه میشود.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Basis functions

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Representers

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Cross- product

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- positive semi-definite

یس در روش فضای دادهها حل مسئله معکوس در فضای مدل به حل مسئله معکوس در فضای دادهها تبدیل می شود. در صورتی که تعداد دادهها کمتر از تعداد پارامترهای مدل باشد (به خصوص در مدل-های دو و سه بُعدی) زمان محاسبات کاهش می یابد. این کاهش در زمان محاسبات در صورتی که تعداد دادهها خیلی کمتر از تعداد پارامترهای مدل باشد قابل ملاحظه است. همچنین دیگر مزیت روش فضای دادهها در این است که می توان از ماتریس کواریانس مدل ( $\mathbf{C}_{\mathrm{m}}$ ) برای بیان قید هموار بودن به طور مستقیم استفاده کرد. با توجه به این که در روش فضای مدل ساخت  ${f C}_{
m m}$  و محاسبه deGroot-Hedlin and ] معکوس آن عملی نیست، از این رو به جای  $\mathbf{C}_{\mathrm{m}}^{-1}$  از ماتریس ناهمواری Constable, 1990] استفاده می شود، ولی در روش فضای دادهها از  $\mathbf{C}_{\mathrm{m}}$  به طور مستقیم استفاده می-شود و نیازی به محاسبه معکوس آن نیست. بنابراین می توان اطلاعات اولیه ساختاری مدل را مثل اطلاعات مربوط به گسلها در ماتریس کواریانس وارد کرد [Siripunvaraporn and Egbert, 2000]. لازم به یادآوری است که در این روش هیچ گونه تقریبی در روش هموار اُکام صورت نمی گیرد، بلکه با استفاده از فرمولاسیون ریاضی، حل مسئله از فضای مدل به فضای دادهها تبدیل می شود. در صورتی که فضای دادهها دارای ابعاد مساوی و یا در مواردی بیشتر از فضای مدل باشد، این روش برتری خاصی نسبت به روش اُکام نداشته و ممکن است حجم محاسبات نیز بیشتر شود. همچنین در این روش همانند روش أكام، محاسبات مربوط به ماتريس حساسيت به طور كامل انجام مي گيرد كه ممكن است در مواردی از نظر سرعت و احتیاجات ذخیرهسازی محدودیت ایجاد نماید. نکته دیگر این که، روش فضای مدل بر پایه روش اُکام میباشد. در واقع منظور این است که در این

حصه تیکر این حد روش کسای سال بر پید روش اعام سیبست. در واقع سطور این است عاد از این روش نیز همانند روش اُکام فرآیند معکوسسازی دو مرحلهای است. همچنین هر تکرار معکوسسازی به ازای مقادیر مختلف پارامتر منظمسازی اجرا میشود تا کمترین مقدار عدم برازش در آن تکرار حاصل شود. هر چند روش انتخاب پارامتر منظمسازی در هر تکرار معکوسسازی در این روش همانند روش اُکام بر اساس روش اصل اختلاف میباشد، ولی شیوه جستجو برای مقادیر مختلف پارامتر منظم-سازی در این روش، قدری منظم از روش اُکام است.

در اینجا برای جستجو و انتخاب پارامتر منظمسازی به این صورت عمل می شود که در شروع معکوس-سازی یک مقدار اولیه به طور تجربی برای پارامتر منظم سازی تعریف می شود. همچنین برای جستجوی خطی λ یک اندازه مرحله (Δλ) هم برای این پارامتر تعریف می شود (مثلاً مقدار پیش فرض آن در الگوریتمهای دو و سه بُعدی فضای دادهها ۰/۵ در مقیاس لگاریتمی است). سپس با شروع  $\lambda - \Delta \lambda$  فرآیند معکوسسازی، مدل معکوس برای سه مقدار  $\lambda$ ، یعنی مقادیر  $\lambda$  شروع،  $\lambda + \lambda \lambda$  و محاسبه و مقدار عدم برازش و نرم مدل به طور متناظر برای آنها محاسبه می شود. هدف از این جستجو پیدا کردن  $\lambda$  متناظر با کمترین مقدار عدم برازش است. اگر با این سه مقدار  $\lambda$  عدم برازش هدف حاصل شود که معکوسسازی متوقف و مدل مربوط به کمترین عدم برازش به عنوان مدل نهایی ارائه می شود. در غیر این صورت معکوس سازی در جهت جستجو یعنی چپ یا راست (جهتی که کمترین عدم برازش حاصل شده است) پیش می رود و این کار تا زمانی که عدم برازش حداقل، مربوط به مقدار λ میانی گردد، تکرار میشود. سپس روش درونیابی پارابولیک<sup>י</sup> [Press et al., 1992] برای پیدا کردن کمترین عدم برازش مربوط به سه  $\lambda$  نهایی به کار گرفته می شود. اگر مقدار عدم برازش به دست آمده از روش درونیابی پارابولیک، از مقدار به دست آمده توسط سه λ نهایی کمتر باشد، فرآیند معکوسسازی، این مقدار را برای شروع معکوسسازی در تکرار بعد حفظ کرده و به تکرار بعدی می-رود. در غیر این صورت معکوسسازی در تکرار بعدی با همان مقدار میانی برای سه  $\lambda$  نهایی شروع می شود و همین الگوریتم تکرار می شود.

### ۳-۳-۳ روشهای معکوسسازی دوبُعدی بر اساس تقریب ماتریس حساسیت

روشهای معکوسسازی خطی شده با استفاده از روش گوس-نیوتن که روش اُکام یک حالت خاص از آنها میباشد را روشهای معکوسسازی مستقیم هم مینامند [ ,Siripunvaraporn and Egbert ور هر 2000; Rodi and Mackie, 2001]. به طوری که در بندهای قبل دیده شد در این روشها در هر تکرار، ماتریس حساسیت N × M باید به طور کامل محاسبه شود. این محاسبات در مدلهای دو-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Parabolic interpolation

بُعدی، زمانی که حجم مسئله قابل ملاحظه باشد و در مدلهای سهبُعدی بسیار زمانبر بوده و نیاز به ذخیرهسازی خاص دارند. برای حل این مشکل روشهای مختلفی بر پایه تقریب ماتریس حساسیت برای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک ارائه شده است.

یکی از روشهای مهم و کاربردی بر اساس تقریب ماتریس حساسیت، روش معکوس سازی واهلش سریع دادههای مگنتوتلوریک یا RRI است [Smith and Booker, 1991]. در این روش برای محاسبه ماتریس حساسیت، مسئله معکوس دوبُعدی به یک سری مسائل معکوس یک بُعدی تبدیل می شود و حساسیتهای تقریبی در هر ایستگاه برداشت داده به تغییرات عمقی مقاومتویژه در زیر آن ایستگاه حساسیتهای تقریبی در هر ایستگاه برداشت داده به تغییرات عمقی مقاومتویژه در زیر آن ایستگاه وابسته می شود. به این صورت با حل یک سری مسائل معکوس یک بُعدی و درون یابی افقی آنها مدل وابسته می شود. به این صورت با حل یک سری مسائل معکوس یک بُعدی و درون یابی افقی آنها مدل مقاومتویژه دوبُعدی تشکیل می شود. سپس برای برازش این مدل به دادهها از یک روش پیشرو دو مقاومتویژه دوبُعدی تشکیل می شود. سپس برای برازش این مدل به دادهها از یک روش پیشرو دوب بُعدی استفاده می شود. در این روش حساسیتهای دوبُعدی حذف می شود و لذا نسبتاً نیاز به تعداد تکرارهای بیشتری برای برازش مدل به دادهها است؛ ولی در کل حجم محاسبات به دلیل عدم محاسبه ماتریس حساسیت کامل با حساسیتهای دوبُعدی تا حدود زیادی کاسته می شود [ محاسیتهای دوبُعدی کاسته می شود و اسبتاً نیاز معراس ایم محاسبه می شود. در این روش حساسیتهای دوبُعدی حذف می شود و لذا نسبتاً نیاز به تعداد به دارهای بیشتری برای برازش مدل به دادهها است؛ ولی در کل حجم محاسبات به دلیل عدم محاسبه در ایر محاسبه می شود [ محاسبات به دلیل عدم محاسبه ماتریس حساسیت کامل با حساسیتهای دوبُعدی تا حدود زیادی کاسته می شود [ and Egbert, 2000; Rodi and Mackie, 2001]

روش دیگر برای حل مشکل حجم محاسبات معکوس سازی مستقیم که بسیار مشابه روش RRI است توسط الدنبرگ و الیز [Oldenburg and Ellis, 1991] توسعه داده شد. در این روش نیز با حل یک سری مسائل معکوس یک بعدی مدل معکوس دوبعدی تقریب زده می شود و با حل پیشرو دوبعدی کامل برازش مدل به داده ها صورت می گیرد. در این روش نیز ملاک های دوبعدی در محاسبه پارامتر-های مدل منظور نمی شود. همچنین معکوس سازی داده های تیپر در این روش مشکل است، در صورتی که میدان مغناطیس قائم به ساختارهای مجاور جانبی نسبت به ساختارهایی که درست در زیر ایستگاه اندازه گیری قرار گرفته اند حساس تر است [Siripunvaraporn and Egbert, 2000]

یکی دیگر از روشهای تقریب ماتریس حساسیت، محاسبه ماتریس حساسیت برای یک نیم فضای همگن یا لایهای است [Farquharson and Oldenburg, 1996]. در این روش محاسبات ماتریس حساسیت دقیق فقط در تکرار شماره یک لازم است و در تکرارهای بعدی این محاسبات حذف می-شود. دقت این روش بستگی به پیچیدگی ساختار مدل واقعی، نزدیکی ساختارها به ایستگاههای اندازه گیری و بزرگی اختلافات مقاومتویژه دارد.

۳-۳-۴ روش معکوسسازی با استفاده از زیرفضای مدل<sup>۱</sup>

روش دیگر برای کاهش حجم محاسبات در معکوس سازی دوب عدی داده های مگنتو تلوریک روش زیر-فضای مدل است [Oldenburg et al., 1993]. در این روش حل مسئله معکوس به حل در ابعاد کمتری از فضای مدل به نام زیرفضا تبدیل می شود. این روش نیز با هدف کاهش حجم محاسبات معکوس سازی مستقیم یا مسئله معکوس از نوع گوس-نیو تن توسعه داده شده است. به این صورت که بردار تغییرات مدل (Δm) از یک فضای M بعدی به یک زیر فضای q بعدی از فضای مدل محدود می شود و به صورت ترکیب خطی از بردارهای پایه <sup>۲</sup> نوشته می شود:

$$\Delta \mathbf{m} = \sum_{i=1}^{q} \alpha_i \, \mathbf{v}_i = \mathbf{V} \boldsymbol{\alpha} \tag{(79-7)}$$

که در آن  $\alpha$  بردار پارامترهای جدید  $\alpha_i$  و V ماتریس تشکیل شده از بردارهای پایه  $v_i$  است. با وارد نمودن رابطه (۳–۲۶) در فرمولاسیون مسئله معکوس و کمینه نمودن تابع هدف مربوطه نسبت به  $\alpha$  حل تکراری برای مسئله معکوس به جای جستجو برای M پارامتر مدل به جستجو برای q پارامتر به دست میآید.

حالت کلی انتخاب بردارهای پایه در این روش به صورت زیر است:

(37-37)

$$\mathbf{v} = (\mathbf{C}_{\mathbf{m}}^{\mathrm{T}} \mathbf{C}_{\mathbf{m}})^{-1} \nabla_{\mathbf{m}} \Psi$$

که در آن  $C_m$  ماتریس وزنی پارامترهای مدل است که به گونهای انتخاب می شود تا مدلی با مشخصات معین تولید شود،  $\nabla_m$  عملگر گرادیان و  $\Psi$  تابع هدف مسئله معکوس است. در بسیاری از مواقع به معین تولید شود، رابطه (۳–۲۷) از  $\Psi_d$  (بخش مربوط به عدم برازش از تابع هدف) و یا  $\Psi_m$  (بخش

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Model subspace

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Basis vectors

مربوط به نرم مدل از تابع هدف) استفاده میشود. در فرآیند معکوسسازی به روش زیرفضای مدل، معمولاً دو یا چند بردار پایه به صورت رابطه (۳–۲۷) انتخاب میشود. در مواقعی نیز یک بردار از بردارهای پایه به صورت ثابت فرض میشود، یعنی در تکرارهای معکوسسازی ثابت است. موفقیت این روش به انتخاب بردارهای پایه زیرفضا بستگی دارد. متأسفانه انتخاب مناسب بردارهای پایه در این روش اغلب واضح نبوده و یک انتخاب بد ممکن است یک حل ناموفق ارائه دهد. یک ترکیب از تقریب Oldenburg and [ زیرفضای مدل نیز توسط الدنبرگ و الیز به کار گرفته شده است [ Ellis, 1993].

۳-۳-۵- روش معکوسسازی با استفاده از زیرفضای دادهها

همچنان که در روش فضای دادهها شرح داده شد، در این روش حل مسئله معکوس بر اساس ترکیب خطی توابع پایه یا معرفها (۳–۲۳) است. هر تابع پایه در این روش متناظر با یک جزء داده منفرد (یعنی در یک ایستگاه، فرکانس، پاسخ و مُد) است. با توجه به این که داده های مگنتوتلوریک هموار و فراوان هستند، توابع پایه با فرکانس و موقعیت ایستگاه برداشت برای پاسخ و مد داده شده به آهستگی تغییر میکنند. پس این توابع پایه فراوان بوده و بعضی از آنها زاید است. به طوری که با یک تقریب درست میتوان یک زیرفضا از این توابع انتخاب نمود. بنابراین با توجه به فرمولاسیون روش فضای دادهها حل مسئله معکوس برای روش زیرفضای دادهها به صورت زیر نوشته میشود Siripunvaraporn and Egbert, 2000]

 $\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{C}_{\mathbf{m}}\mathbf{G}_{k}^{\mathrm{T}}\mathbf{\alpha}_{k+1} + \mathbf{m}_{0}$  (۲۸–۳) در این رابطه اگر L یک زیر مجموعه از مجموعه Nتایی دادهها باشد،  $\mathbf{\alpha}_{k+1}$  بردار L بُعدی ضرایب نامعلوم و  $\mathbf{G}_{k}^{\mathrm{T}}$  ترانهاده ماتریس حساسیت جدید کاهش یافته از ابعاد M × M به ابعاد M × L است. برای محاسبه  $\mathbf{G}_{k}^{\mathrm{T}}$  و برازش کل دادهها مشابه روابط (۳–۲۴) و (۳–۲۵)، نیاز به یک رابطه خطی بین  $\mathbf{M}_{k+1}$  و  $\mathbf{M}_{k+1}$  است. در واقع این رابطه وجود ندارد؛ مگر این که کلیه حساسیتها محاسبه شود. با این

۶٩

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Data subspace

وجود چون دادهها به طور هموار تغییر میکنند، هر داده را میتوان توسط درونیابی دادههای مجاور (مثلاً در فرکانس های همسایه در همان ایستگاه) تقریب زد. به طور مشابه حساسیت ها به صورت هموار با فرکانس یا موقعیت ایستگاه تغییر میکنند و میتوان آنها را با درونیابی حساسیتهای مجاور تقریب زد. بنابراین ماتریس حساسیت کامل دادهها ( $\mathbf{J}_{\mathbf{k}}$ ) با استفاده از ماتریس حساسیت زیر مجموعه دادهها ( $\mathbf{G}_{\mathrm{k}}$ ) و ماتریس درونیابی  $\mathbf{B}$  به صورت زیر تقریب زده می شود:  $(\Upsilon 9 - \Upsilon)$ 

$$\mathbf{J}_{\mathbf{k}} = \mathbf{B}\mathbf{G}_{\mathbf{k}}$$

با توجه به كار فركوهارسون و الدنبرگ [Farquharson and Oldenburg, 1996] و همچنين كار اسمیت و بوکر [Smith and Booker, 1991] این ماتریس درون یابی نیاز نیست که خیلی پیچیده باشد. با جایگزینی روابط (۳–۲۸) و (۳–۲۹) در تابع هدف مسئله معکوس هموار، تابع هدف در روش زیرفضای دادهها به صورت زیر به دست می آید:

$$\Psi = \boldsymbol{\alpha}_{k+1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Gamma}_{k}^{\mathrm{l}} \boldsymbol{\alpha}_{k+1} + \lambda^{-1} \{ \left( \hat{\boldsymbol{d}}_{k} - \boldsymbol{B} \boldsymbol{\Gamma}_{k}^{\mathrm{l}} \boldsymbol{\alpha}_{k+1} \right)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{d}}^{-1} \left( \hat{\boldsymbol{d}}_{k} - \boldsymbol{B} \boldsymbol{\Gamma}_{k}^{\mathrm{l}} \boldsymbol{\alpha}_{k+1} \right) \}$$
(7.-7)

در این رابطه  $\Gamma_k^l = \mathbf{G}_k \mathbf{C}_m \mathbf{G}_k^T$  محصول میانی زیرفضای دادهها است. سپس برای حل این مسئله معکوس و به دست آوردن سیستم معادلات مشابه با رابطه (۳–۲۵)، با به کارگیری روش اگبرت و همکاران [Egbert et al., 1994]، و کمینه نمودن تابع هدف، بردار ضرایب نامعلوم  $\alpha_{k+1}$  به دست ميآيد [Siripunvaraporn and Egbert, 2000]. اين روش كه روش "كاهش يافته بر يايه اُکام'" نامیده میشود دارای بازدهی محاسباتی مؤثری نسبت به روشهای اُکام و فضای دادهها است. البته به خاطر عدم اعمال بخشی از دادهها در محاسبه حساسیتها نسبت به روشهای آکام و فضای دادهها که در آنها ماتریس حساسیت به طور کامل محاسبه می شود، یک تقریب محسوب می گردد. ۳-۳-۶- روش معکوس سازی گرادیان مزدوج غیرخطی ٔ

روش معمول برای حل مسئله معکوس غیرخطی در ژئوفیزیک، خطیسازی مسئله معکوس و حل تکراری آن است. به این صورت که تابع پیشرو با استفاده از دو جمله اول بسط تیلر حول مدل تکرار

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Reduced basis Occam's inversion (REBOCC)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Nonlinear conjugate gradient (NLCG)

قبل تقريب زده می شود [Rodi and Mackie, 2001]. اکثر الگوریتم های معکوس سازی داده های مگنتوتلوریک نیز ابتدا به این صورت خطی شده و سپس به صورت تکراری حل می شوند. مثال الگوریتمهای دوبعدی برای حل منظم شده مسئله معکوس مگنتوتلوریک شامل جیراسک و همکاران [Jiracek et al., 1987]، مدن و مكى [Madden and Mackie, 1989]، رودي [Rodi, 1989] و دي گروت هدلین و کانستیبل [deGroot-Hedlin and Constable, 1990] است. همچنان که قبلاً اشاره شد، این قبیل روشها را روشهای گوس-نیوتن و یا روشهای مستقیم معکوسسازی مینامند. توليد و ساخت ماتريس حساسيت در مسائل معكوس از نوع گوس-نيوتن باعث افزايش حجم محاسبات تا چندین مرتبه بیشتر از محاسبه یک حل پیشرو است. علاوه بر آن روشهای مستقیم معکوس سازی دارای یک هسته محاسباتی برای حل سیستم معادلات خطی روی فضای مدل در هر تکرار هستند. روش معکوس سازی گرادیان مزدوج غیرخطی با هدف بهبود محاسبات در روش های معكوس سازى مستقيم توسعه داده شده است [ Rodi and Mackie, 2001; Newman and Alumbaugh, 2000]. روش گرادیان مزدوج غیرخطی به طور مستقیم برای کمینه کردن تابع هدف مسئله معکوس استفاده می شود. این روش در واقع یک روش بهینه و پایدار برای کمینه کردن تابع هدف است [Rodi and Mackie, 2001].

در روش گرادیان مزدوج غیرخطی که توسط رودی و مکی [Rodi and Mackie, 2001] توسعه داده شده است، ابتدا با استفاده از تئوری منظمسازی تیخونف و آرسنین [ Rodi and Arsenin, ا 1977] تابع هدف مسئله معکوس به صورت زیر نوشته می شود:

$$\Psi(\mathbf{m}) = (\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}])^{\mathrm{T}} \mathbf{W} (\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}]) + \lambda \mathbf{m}^{\mathrm{T}} \mathbf{C}^{\mathrm{T}} \mathbf{C} \mathbf{m}$$
(7)-7)

در این رابطه C ماتریس ناهمواری با مشتقات دوم بوده و تعریف سایر پارامترها همانند بندهای قبل است. همچنان که گفته شد، در روش گرادیان مزدوج غیرخطی این تابع هدف به طور مستقیم کمینه می شود. لذا الگوریتم معکوس سازی در این روش به صورت زیر است [ Newman and Alumbaugh,]

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{(i)} &= -\nabla \Psi(\mathbf{m}_{(i)}) = \mathbf{v}_{(i)} \mathbf{m}_{(i)} + \mathbf{v}_{(i)} \mathbf{m}_{(i)} + \mathbf{v}_{(i)} \mathbf{m}_{(i)} + \mathbf{v}_{(i)} \mathbf{m}_{(i)} \\ \mathbf{v}_{(i)} &= \mathbf{M}_{(i)}^{-1} \mathbf{r}_{(i)} \mathbf{n}_{(i)} \\ \mathbf{v}_{(i)} &= \mathbf{M}_{(i)}^{-1} \mathbf{r}_{(i)} \\ \mathbf{v}_{(i)} &= \mathbf{v}_{(i)} \mathbf{u}_{(i)} \\ \mathbf{v}_{(i)} \\ \mathbf{v}_{(i)} &= \mathbf{v}_{(i)} \mathbf{u}_{(i)} \\ \mathbf{v}_{(i)} \\$$

در روابط ارائه شده در این الگوریتم  $\Psi \Psi$  گرادیان تابع هدف رابطه (۳–۳۱) نسبت به پارامترهای مدل است، که مهمترین بخش محاسباتی در الگوریتم فوق است. محاسبه این گرادیان، شامل دو بخش یکی محاسبه گرادیان تابع عدم برازش،  $\nabla \Psi_d$ ، و دیگری محاسبه گرادیان تابع قید هموار بودن مدل یا نرم مدل<sup>۲</sup>،  $\nabla \Psi_m$ ، است:

$$\nabla \Psi = \nabla \Psi_{\mathbf{d}} + \lambda \nabla \Psi_{\mathbf{m}} \tag{(multiply of the matrix of the matri$$

محاسبه گرادیان نرم مدل نسبتاً ساده بوده و به صورت زیر انجام می شود:

(TT-T)

 $\nabla \Psi_{\mathbf{m}} = 2\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}\mathbf{m}$ 

ولی محاسبه گرادیان تابع عدم برازش مهمترین بخش محاسباتی در روش گرادیان مزدوج غیرخطی بوده که منجر به محاسبات پیشرو و محاسبه حساسیتها می شود.

همچنین  $M_{(i)}$  و  $M_{(i+1)}$  در ابتدا ماتریسهای واحد فرض می شوند ولی برای افزایش سرعت همگرایی این ماتریسها با ماتریسهای پیش آماده ساز جایگزین می شوند. بخش دوم محاسباتی در الگوریتم فوق پیدا کردن مقدار  $\alpha$  با شرایط خواسته شده است. پیدا کردن این مقدار در الگوریتم معکوس سازی

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

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Model norm

گرادیان مزدوج غیرخطی به مرحله جستجوی خطی معروف است و به روش های مختلف قابل انجام است [Newman and Alumbaugh, 2000]

از مزایای این روش اجتناب از ساخت صریح ماتریس حساسیت و از معایب آن همگرایی در تکرارهای بیشتر نسبت به روشهای آکام و فضای دادهها است. همچنین دقت شود که در این روش پارامتر منظمسازی به صورت تجربی انتخاب شده و در طول فرآیند معکوسسازی ثابت است و لذا همگرایی در این روش به پارامتر منظمسازی وابسته است.

۳–۳–۷– سایر روش های معکوس سازی دوبُعدی داده های مگنتو تلوریک

در بین سایر روشهای معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک میتوان به روشهای یوچیدا [Uchida, 1993] و لی و همکاران [Lee et al., 2009a]، به عنوان روشهای شاخصتر اشاره کرد. در این روشها یک روش گوس-نیوتن صریح جهت انتخاب بهینه پارامتر منظمسازی توسعه داده شده است. همچنان که قبلاً اشاره شد در یک روش صریح گوس-نیوتن پارامتر منظمسازی به صورت تجربی انتخاب شده و در طول فرآیند معکوسسازی ثابت میماند. در ادامه اصول دو روش یوچیدا و لی و همکاران شرح داده می شود.

#### ۳-۳-۷-۱- روش یوچیدا

روش يوچيدا به روش ABIC (ملاک اطلاعات بيزين آکاييک) معروف است. اين روش براي انتخاب پارامتر منظمسازی بهینه یا به طور معادل شرط هموارسازی بهینه توسط یوچیدا [Uchida, 1993] برای معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک توسعه شده است. در این روش نیز مشابه رابطه (۳۱–۳) یک تایع هدف منظم شده برای مسئله معکوس در نظر گرفته می شود. سیس یک تابع چگالی احتمال بیزین ً به صورت زیر تعریف می شود: (34-37)

 $L(\mathbf{d}) = \int p(\mathbf{d}/\mathbf{m})\pi(\mathbf{m})d\mathbf{m}$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Line search

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Bayesian probability density function

که در آن p(d/m) یک تابع چگالی احتمال از کمینه کردن عدم برازش و  $\pi(m)$  یک تابع چگالی احتمال از کمینه کردن نرم مدل است. زمانی که فرض می شود که خطای مشاهدهای دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  است، می توان یک تابع چگالی احتمال از کمینه کردن عدم برازش به صورت زیر تعریف کرد:

$$p(\mathbf{d}/\mathbf{m}) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right)^{\frac{N}{2}} \exp\left\{\frac{-1}{2\sigma^2} \|\mathbf{W}\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m})\|^2\right\}$$
(٣Δ-٣)

که در آن N تعداد دادهها است.

با فرض این که مشتقات فضایی مقاومتویژه دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس-کواریانس ا فرض این که مشتقات فضایی مقاومتویژه دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس-کواریانس  $\sigma^2(\lambda \mathbf{C}^{\mathsf{T}}\mathbf{C})^{-1}$ 

$$\pi(\mathbf{m}) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right)^{-\frac{1}{2}} |\lambda \mathbf{C}^{\mathsf{T}} \mathbf{C}|^{\frac{1}{2}} \exp\left\{\frac{\pi}{2\sigma^2} \|\mathbf{C}\mathbf{m}\|^2\right\}$$
(79-7)

که در آن M تعداد پارامترهای مدل و |.| نشان دهنده دترمینان ماتریس است.

با جایگذاری روابط (۳–۳۵) و (۳–۳۳) در رابطه (۳–۳۴) رابطه احتمال بیزین به دست میآید. حالا باید مدلی که این تابع بیزین را بیشینه میکند، جستجو شود. در واقع این کار معادل کمینه کردن تابع هدف معکوسسازی است. در این فرآیند نرم بهینه مدل به دست میآید. برای این منظور یک پارامتر ABIC همانند روش آکاییک [Akaike, 1980] تعریف میشود:

 $ABIC = (-2) \log(maxL(d)) + 2dim (hyper parameter)$  (۳۷–۳) که در آن dim مشخص کننده بُعد پارامترهای فوقالعاده یا خارج از رده' است. که در اینجا پارامتر منظم سازی  $\lambda$  تنها پارامتر خارج از رده است. مقادیر کم پارامتر ABIC مشخص کننده احتمال بیشتر یعنی یک مدل مناسب تر است. در معکوس سازی تکراری نرم بهینه مدل با کمینه کردن ABIC در هر ABIC تکرار به دست میآید. معمولاً در هر تکرار تعدادی پارمتر منظم سازی برای کمینه کردن ABIC در فر آزمایش می شود. به عنوان مثال در کار یوچیدا [Uchida, 1997] در معکوس سازی دادههای منطقه

<sup>1</sup>- Hyper parameter

اکلاهوما با استفاده از این روش تعداد پارامتر منظمسازی انتخاب شده در هر تکرار معکوسسازی برابر ۷ است.

### ۳-۳-۷-۲- روش لی و همکاران

لی و همکاران [Lee et al., 2009a] روش متعادلسازی قید فعال یا ACB [Yi et al, 2003] از در معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک در یک الگوریتم گوس-نیوتن صریح به کار گرفتند. اساس این روش به این صورت است که در آن پارامتر منظمسازی با یک تابع فضایی (به صورت  $\lambda(x, z)$  اساس این روش به این صرت است که در آن پارامتر منظمسازی با یک تابع فضایی (به صورت در این این روش پارامتر منظمسازی با یک تابع فضایی (به صورت است این روش به این صورت است که در آن پارامتر منظمسازی با یک تابع فضایی (به صورت اساس این روش به این صورت است که در آن پارامتر منظمسازی با یک تابع فضایی (به صورت اساس این روش به این صورت است که در آن پارامتر منظمسازی با یک تابع فضایی (به صورت اساس این روش به این صورت است که در آن پارامتر منظمسازی با یک تابع فضایی (به صورت اساس این روش به این صورت است که در آن پارامتر منظمسازی با یک تابع فضایی (به صورت اساس این روش به این صورت است که در این پارامتر منظمسازی در واقع الوریتم در این روش پارامتر میگیرد و با استفاده از این تفکیک تخمین زده میشود. ACB در معکوسسازی برای به دست آوردن یک قید بهینه همواری اجرا می شود.

با توجه به این الگوریتم پارامتر منظمسازی به طور بهینه توسط یک تابع توزیع (انتشار)<sup>۱</sup> SP<sub>i</sub> از آامین پارامتر مدل تنظیم میشود؛ که این پارامتر توسط ماتریس تفکیک پارامتر<sup>۲</sup> (R) تعریف میشود [Menke, 1989].

ماتریس تفکیک مدل R را می توان در فرآیند معکوس سازی به صورت زیر به دست آورد:
$${f R}=({f J}^{\rm T}{f J}+\lambda{f C}^{\rm T}{f C})^{-1}{f J}^{\rm T}$$

تابع توزیع که در واقع بیان کننده درجه قابل حل بودن پارامتر iام مدل است به صورت زیر تعریف می شود:

$$SP_{i} = \sum_{j=1}^{M} (w_{ij} (1 - S_{ij}) R_{ij})^{2}$$
((79-7))

که در آن M تعداد پارامترهای مدل، w<sub>ij</sub> یک فاکتور وزنی است که توسط فاصله فضایی iامین و زامین پارامترهای مدل تعریف میشود. S<sub>ij</sub> برای منظور کردن منظمسازی روی iامین پارامتر و پارامترهای

<sup>1</sup>- Spread function

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Parameter resolution matrix

همسایه است. اگر C<sub>ij</sub> صفر نباشد، مقدار S<sub>ij</sub> برابر واحد است و در صورتی که C<sub>ij</sub> برابر صفر شود مقدار آن صفر است.

در واقع تابع توزیع تعریف شده در اینجا توزیع مجموع مربعات وزندار شده به صورت فضایی برای i-امین پارامتر مدل نسبت به تمامی پارامترهای مدل است، به استثنای پارامترهایی که قید همواری روی آنها منظور شده است. در این روش پارامتر منظمسازی از درونیابی خطی لگاریتمی به صورت زیر به دست میآید.

$$\log(\lambda_{i}) = \log(\lambda_{\min}) + \frac{\log(\lambda_{\max}) - \log(\lambda_{\min})}{\log(SP_{\max}) - \log(SP_{\min})} \{\log(SP_{i}) - \log(SP_{\min})\}$$
(\*-\*)

که در آن  $SP_{max}$  و  $N_{min}$  به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر تابع توزیع و  $\lambda_{min}$  و  $N_{max}$  مقادیر بیشترین و کمترین برای پارامتر منظمسازی که توسط کاربر انتخاب می شوند. با این روش می توان یک مقدار کم پارامتر منظمسازی  $\lambda(x,z)$  برای قابلیت حل بالای پارامتر مدل تنظیم کرد؛ که آن با مقدار کم  $SP_i$  در فرآیند معکوسسازی متناظر است.

## ۳-۴- معکوسسازی سه بُعدی داده های مگنتو تلوریک

### ۳-۴-۲ روش معکوسسازی هموار گوس-نیوتن

الگوریتم معکوسسازی سه بعدی گوس-نیوتن بر پایه الگوریتمهای یک و دو بعدی این روش می باشد. روابط ریاضی مربوطه نیز همانند حالتهای یک و دو بعدی است؛ با این تفاوت که در اینجا بردار پارامترهای مدل شامل یک مدل سه بعدی، محاسبات پیشرو توسط یک تابع پیشرو سه بعدی و در نتیجه ماتریس حساسیت نیز شامل حساسیتهای سه بعدی است. در این روش نیز همانند روشهای یک و دو بعدی پارامتر منظم سازی در طول فرآیند معکوس سازی ثابت می ماند.

اجرای معکوسسازی هموار گوس-نیوتن یا روش صریح گوس-نیوتن برای مدل سه بعدی به دلیل حجم بالای محاسبات به خصوص در ساخت ماتریس حساسیت، تقریباً غیر عملی است [ Newman and Alumbaugh, 2000; Siripunvaraporn et al., 2005]. این روش در واقع یک روش فضای مدل است و حجم محاسبات و حافظه دستیابی تصادفی (RAM) در آن وابستگی بالایی به تعداد پارامتر-های مدل دارد. در این روش علاوه بر ساخت ماتریس حساسیت M × N که مهمترین بخش محاسباتی است، نیاز به حل سیستم معادلات خطی M × M یعنی M معادله و M مجهول است. در مسائل معکوس سه بعدی تعداد پارامترها آن قدر میتواند زیاد باشد که امکان حل مسئله معکوس سه-بعدی به طور صریح و مستقیم وجود نداشته باشد. بنابراین تا این زمان به دلیل امکانات موجود (کامپیوترهای در دسترس)، امکان اجرای کامل روش معکوسسازی سه بعدی صریح گوس-نیوتن حداقل برای دادههای واقعی میسر نشده است. البته ترفندهای مختلف با هدف کاهش محاسبات در اجرای این روش صورت گرفته است. از مهمترین این کار ها میتوان به کار ساساکی [Sasaki, 2001] اشاره نمود که برای دادههای مصنوعی الکترومغناطیس در یک شبکه درشت (یعنی کاهش تعداد پارامترها) انجام شده است. همچنین ساساکی [Sasaki, 2004] با تقریب ماتریس حساسیت به روش معدوس اندرهای انجام شده است. این کار ها میتوان به کار ساساکی دادههای تعداد پارامترها) انجام شده است. همچنین ساساکی [Sasaki, 2004] با تقریب ماتریس حساسیت به روش معکوسسازی سه بعدی یا روش برویدن <sup>(</sup> ایسامی ای این کار ها میتوان به کار ساساکی دوم یا سوم به بعد پارامترها) انجام شده است. همچنین ساساکی [Loke and Barker, 1996] به عدانس میانس میانوریک معکوسسازی سه بعدی گوس-نیوتن را برای دادههای مؤلفههای اصلی تانسور امیدانس مگنتوتلوریک

#### ۳-۴-۴ روش معکوسسازی فضای دادهها

همان طور که در بخش قبل اشاره شد، یکی از مشکلات عملی نشدن معکوس سازی هموار گوس-نیوتن برای حالت سه بعدی حجم بالای محاسبات در حل سیستم معادلات خطی تولید شده بعد از کمینه نمودن تابع هدف مربوطه است. به طوری که در روش معکوس سازی دو بعدی فضای دادهها شرح داده شد، این روش با تبدیل سیستم معادلات خطی معکوس سازی از فضای مدل به فضای دادهها حجم محاسبات را تا حدود زیادی کاهش می دهد. البته در این ایده فرض شده است که تعداد دادهها خیلی کمتر از تعداد پارامترهای مدل است، که معمولاً در عمل به خصوص در حالت سه بعدی به این صورت است [Siripunvaraporn et al., 2005]. در واقع در این روش فضای بی تأثیر (بخشی از فضای

<sup>1</sup>- Broyden

پارامترها که روی دادهها بی تأثیر است) از سیستم معادلات خطی معکوس سازی حذف می شود. بنابراین حجم محاسبات در ابتدا به تعداد دادههای مستقل بستگی دارد. روش فضای دادهها امکان معکوس سازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک را بر اساس روش هموار اُکام و روش صریح گوس-نیوتن، خارج از قیدهای پیچیده فراهم می کند. این روش بر اساس الگوریتم دوبعدی سیریپون واراپورن و اگبرت [Siripunvaraporn and Egbert, 2000] برای معکوس سازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک توسعه داده شد [Siripunvaraporn et al., 2005]. با بازنویسی روابط (۳–۲۳) و (۳– ۲۸) برای حالت سه بعدی روابط مسئله معکوس سه بعدی در فضای دادهها حاصل می شود.

کاهش ابعاد سیستم معادلات خطی معکوسسازی از فضای مدل به فضای دادهها به معنای کاهش در زمان محاسبات و هزینههای محاسباتی از نظر حافظه دستیابی تصادفی (RAM) و سرعت پردازش (CPU) است. به طوری که در بخش مربوط به روش معکوسسازی دوبُعدی فضای دادهها شرح داده شد، تفاوت دیگر بین دو روش فضای دادهها و فضای مدل که در واقع یک نقطه قوت برای روش فضای دادهها است، در این است که در روش فضای دادهها ماتریس کواریانس مدل ( $(\mathbf{m}^{-1})$ ) به طور مستقیم مورد استفاده قرار میگیرد. در صورتی که در روش فضای مدل، معکوس این ماتریس ( $(\mathbf{m}^{-1})$ ) نیاز است [(Siripunvaraporn et al., 2005]. در روش فضای مدل معکوس ماتریس کواریانس مدل به دلیل بازدهی کار، معمولاً با یک عملگر ناهمواری مدل [-Constable et al., 1987; deGroot]. در روش واکنده است جایگزین میشود.

هر چند در این روش تبدیل محاسبات از فضای مدل به فضای دادهها باعث کاهش قابل ملاحظه حجم محاسبات معکوس سازی شده است؛ اما هنوز هم حافظه دستیابی و سرعت محاسبات برای ساخت ماتریس حساسیت در این روش قابل توجه می باشد. به طوری که برای مسائل بزرگ از نظر تعداد دادهها و پارامترهای مدل، ممکن است محدودیت هایی ایجاد شود.

در این الگوریتم به طوری که برای الگوریتم دوبُعدی این روش توضیح داده شد، روش انتخاب پارامتر منظمسازی بر اساس روش اصل اختلاف میباشد. اگر چه استفاده از این روش برای انتخاب پارامتر منظمسازی نسبت به حالتی که پارامتر منظمسازی در الگوریتم معکوسسازی ثابت در نظر گرفته میشود، برتری دارد؛ اما ممکن است در مواردی مشکلاتی ایجاد نماید. در فصل ششم این موضوع به طور مفصل بررسی میشود. با این حال، امروزه این روش به طور وسیعی در تفسیر سه بعدی ساختار-Heise et al., 2008; Turkoghlu et al., 2009; Xiao et ] های زمینشناسی به کار گرفته میشود [al., 2010; Ghaedrahmati et al., 2013

# ۳-۴-۳- معکوسسازی به روش گرادیان مزدوج<sup>ا</sup>

بر این اساس که برای حل سیستم معادلات خطی میتوان از روش گرادیان مزدوج استفاده نمود [Mackie and Madden, 1993]، مکی و مدن [Mackie and Madden, 1993] برای حل سیستم معادلات معکوس بیشترین همانندی<sup>۲</sup> برای دادههای مگنتوتلوریک در حالت سه بعدی که یک نوع مسئله گوس-نیوتن محسوب میشود، از این روش استفاده نمودند. مسئله معکوس بیشترین همانندی برای معکوسسازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک توسط مکی و مدن به صورت زیر به کار گرفته

$$(\mathbf{J}_{k}^{H}\mathbf{C}_{d}^{-1}\mathbf{J}_{k} + \mathbf{C}_{m}^{-1})^{-1}\Delta\mathbf{m}_{k} = \mathbf{J}_{k}^{H}\mathbf{C}_{d}^{-1}(\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}_{k}]) + \mathbf{C}_{m}^{-1}(\mathbf{m}_{0} - \mathbf{m}_{k})$$
(\*1-\*)

H مدل اولیه یا یک مدل مرجع،  $\Delta m_k$  بردار تغییرات مدل، F تابع پیشرو سه بعدی و m مشخص کننده ترانهاده مزدوج مختلط (هرمیتین)<sup>۳</sup> است (سایر پارامترها در بخشهای قبل این فصل مشخص کننده ترانهاده مزدوج مختلط (هرمیتین)<sup>۳</sup> است (سایر پارامترها در بخشهای قبل این فصل تعریف شده است). در روش گوس-نیوتن در این مسئله بایستی ماتریس J<sup>H</sup>J و معکوس آن محاسبه شود. محاسبه این ماتریس و معکوس آن از مهمترین بخشهای محاسباتی و زمان بر در محاسبات مسئله معکوس است. معکوس آن از مهمترین بخشهای محاسباتی و زمان بر در محاسبات مسئله معکوس است. معروش گرادیان مزدوج برای دستیابی به یک حل تقریبی برای Δm در معادلات بیشترین همانندی با هدف اجتناب از محاسبه صریح ماتریس حساسیت استفاده می شود [ and Madden, 1993 بیشترین مزدوج برای حل معکوس سازی، از روش گرادیان مزدوج برای حال

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Conjugate gradient

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Maximum likelihood

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Complex conjugate transpose or Hermitian

تغییرات مدل در معادلات بیشترین همانندی استفاده می شود. این روش نیاز به معکوسسازی یک ماتریس بزرگ در هر تکرار را بر طرف میکند. در این روش از دو سطح تکرار استفاده میشود. یک حلقه تکرار بیرونی که تکرار معادلات بیشترین همانندی غیرخطی است و یک حلقه داخلی که مربوط به تکرارهای روش گرادیان مزدوج برای محاسبه یا تقریب  $\Delta m_k$  در هر تکرار از معکوسسازی است. در هر تکرار از معکوسسازی معمولاً به تعداد کمی از تکرارهای روش گرادیان مزدوج نیاز است؛ تا مدل جدید شود و فرآیند کلی دوباره شروع شود. مهمترین مزیت این روش در این است که در این روش نیاز نیست که به طور صریح ماتریس حساسیت ساخته شود بلکه فقط نیاز است که تأثیر این ماتریس یا ترانهاده مزدوج آن در یک بردار دلخواه معلوم شود. انگیزه و ایده انجام این کار از مدل های یک و به دلیل تعداد نسبتاً کمتر پارامترهای مدل نیازی به صرفه جویی در زمان نیست، اجرای روش گرادیان مزدوج برای معکوسسازی سهبّعدی دادههای مگنتوتلوریک، برای کاهش حجم محاسبات میتواند مؤثرتر واقع شود.

الگوریتم معکوس سازی به روش گرادیان مزدوج شامل دو حلقه محاسبات به صورت زیر است [Mackie and Madden, 1993]:

شروع حلقه (۱) برای k=1 تا بیشترین تکرارهای معکوس سازی یا تا سطح مورد قبول تکرارها: محاسبه  $[m_k]$  سپس  $(m_0 - m_k)$  و محاسبه باقیماندههای مدل به صورت  $(m_0 - m_k)$   $(m_0 - m_k)$  $b = J_k^H C_d^{-1} (d - F[m_k]) + C_m^{-1} (m_0 - m_k)$ شروع حلقه (۲) با شروع الگوریتم گرادیان مزدوج ( $m_0 = 0, r_0 = b$ ) برای i=i تا بیشترین تکرار-های الگوریتم گرادیان مزدوج یا تا سطح مورد قبول تکرارها:  $\beta_i = r_{i-1}^T r_{i-1}/r_{i-2}^T r_{i-2} \quad (\beta_0 = 0)$ جدید کردن بردار جهت جستجو  $p_i = r_{i-1} + \beta_i p_{i-1} \quad (p_1 = r_0)$ محاسبه دو حل پیشرو در هر فرکانس  $p_i = [J^H C_d^{-1} J + C_m^{-1}] p_i$   $lpha_i = \mathbf{r}_{i-1}^T \mathbf{r}_{i-1} / \mathbf{p}_i^T \mathbf{B} \mathbf{p}_i$  محاسبه طول مرحله در جهت جستجو  $\Delta \mathbf{m}_i = \Delta \mathbf{m}_{i-1} + lpha_i \mathbf{p}_i$  جدید نمودن تغییرات مدل  $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{i-1} - lpha_i \mathbf{B} \mathbf{p}_i$  ماندهها  $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{i-1} - lpha_i \mathbf{B} \mathbf{p}_i$ پایان حلقه الگوریتم گرادیان مزدوج  $\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k + \Delta \mathbf{m}$ پایان حلقه تکرارهای معکوس سازی.

مورا [Mora, 1987] یک روش، مشابه روش مکی و مدن [Mora, 1993] را با استفاده از گرادیان مزدوج کمترین مربعات غیرخطی برای معکوسسازی دادههای بازتابی لرزهای توسعه داده است. در این روش نشان داده میشود که عملیات حاصل ضرب ماتریس حساسیت در یک بردار دلخواه در هر تکرار معکوسسازی معادل یک محاسبه پیشرو است. همچنین در این کار بیان میشود که این روش برای مسائل به شدت غیرخطی ممکن است از نظر دقت مؤثر نباشد. ولی با توجه به این که محاسبه اثر **J**<sup>H</sup> روی یک بردار فقط با اجرای دو بار مدلسازی پیشرو انجام میشود و نیازی به ساخت ماتریس حساسیت در هر تکرار نیست، اجرای این روش برای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک هر چند جزء مسائل به شدت غیرخطی است، میتواند مؤثر باشد [Mackie and Mackie and].

مکی و مدن [Mackie and Madden, 1993] با نوشتن معادله معکوس بیشترین همانندی به صورت زیر:

$$\mathbf{B}\mathbf{u} = \mathbf{b} \tag{(47-7)}$$

 $\mathbf{b} = \mathbf{J}_k^H \mathbf{C}_d^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}_k]) + \mathbf{C}_m^{-1} (\mathbf{m}_0 - \mathbf{m}_k), \ \mathbf{u} = \Delta \mathbf{m}, \ \mathbf{B} = (\mathbf{J}^H \mathbf{C}_d^{-1} \mathbf{J} + \mathbf{C}_m^{-1})$ حل این مسئله را به روش استاندارد گرادیان مزدوج توسعه دادند. در این روش لازم است باقیمانده اولیه به صورت  $\mathbf{r}_0 = \mathbf{b} - \mathbf{B} \mathbf{u}_0$  معلوم باشد و نیاز است که اثر  $\mathbf{B}$  در یک بردار دلخواه در هر تکرار محاسبه شود. از مزایای این روش حافظه مورد نیاز کم، نسبت به روشهای گوس-نیوتن است و از معایب آن وابسته بودن همگرایی در این روش به انتخاب پارامتر منظمسازی است. به طوری که الگوریتم معکوسسازی بایستی برای مقادیر مختلفی از این پارامتر اجرا شود. برای برخی از مقادیر این پارامتر نیز معکوس-سازی با مشکل مواجه شده و متوقف میشود. همچنین این روش از نظر سرعت از روشهای گوس-نیوتن کندتر است [Siripunvaraporn, 2012]. اگر چه این روش در کارهای عملی توسعه پیدا نکرد اما اجتناب از ساخت صریح ماتریس حساسیت، به عنوان انگیزه اصلی، برای توسعه روشهای دو و سه بُعدی گردیان مزدوج غیرخطی از این روش گرفته شده است.

۳-۴-۴- معکوسسازی به روش گرادیان مزدوج غیرخطی

در این روش تابع هدف مسئله معکوس به صورت کمترین مربعات منظم شده با استفاده از تئوری تیخونف [Tikhonov and Arsenin, 1977] تعریف شده، سپس الگوریتم گرادیان مزدوج غیرخطی برای کمینه کردن این تابع هدف به کار میرود [Newman and Alumbaugh, 2000]. اجرای این الگوریتم همانند الگوریتم شرح داده شده برای حالت دوبُعدی در بند ۳–۳–۶ است، با این تفاوت که در اینجا روابط برای حالت سهبُعدی تبدیل و مورد استفاده قرار میگیرند. ایده این کار در واقع به کارگیری روشی مشابه روش گرادیان مزدوج در کار مکی و مدن [Newman Madden, 1993] و همچنین نیومن و آلومباخ [Mackie and Madden, 1993]، برای اجتناب از احتیاجات ذخیره سازی بالا (ساخت صریح ماتریس حساسیت) بوده است. به طوری که روش انتخاب شده به طور کامل در ارتباط با طبیعت غیرخطی مسئله معکوس مگنتوتلوریک مؤثر بوده و همچنین از نظر بازدهی محاسباتی قابل مقایسه با روش گرادیان مزدوج مکی و مدن [Mackie and Madden, 1993] است.

نیومن و آلومباخ [Newman and Alumbaugh, 2000] با به کارگیری روش گرادیان مزدوج غیرخطی برای حل مسئله معکوس سه بعدی مگنتو تلوریک نشان دادند که در مقایسه با روش گرادیان مزدوج در کار مکی و مدن این طرح به تعداد حلهای پیشرو کمتری در هر تکرار نیاز دارد. با این وجود تعداد حلهای پیشرو در یک تکرار نمی تواند ملاک باشد؛ بلکه تعداد کل حلهای پیشرو در طول معکوس- سازی مهم است. اگر روش گرادیان مزدوج غیرخطی به آهستگی همگرا شود در این صورت بازدهی محاسباتی روش در هر تکرار بیمعنی است. در نتیجه لازم است که یک پیش آمادهساز مؤثر طراحی شود که نرخ همگرایی را افزایش دهد [Newman and Alumbaugh, 2000]. با این وجود پیچیدگی تولید مدل در این طرحها هنوز هم به سرعت و حافظه پردازنده مورد استفاده وابسته است. برای حل این مشکل سری موازی پردازندهها که به طور همزمان روی مسئله عمل میکنند، توسط نیومن و آلومباخ [Newman and Alumbaugh] به کار گرفته شد.

# ۳-۴-۵- معکوس سازی به روش شبه-نیوتنی حافظه محدود'

روش شبه نیوتنی حافظه محدود یک ابزار مشهور در حل مسئله معکوس بزرگ مقیاس الکترومغناطیس است. این روش توسط نیومن و بوگز [Newman and Boggs, 2004]، هابر [ Naber, ] 2005] و پلسیکس و مولدر [Plessix and Mulder, 2008] به کار گرفته شد. در این روش نیز همانند اغلب روشهای معکوس سازی ژئوفیزیکی ابتدا تابع هدف مسئله معکوس با استفاده از روش منظم-اغلب روشهای معکوس سازی ژئوفیزیکی ابتدا تابع هدف مسئله معکوس با استفاده از روش منظم-اعریف می شود [Avdeev and Avdeeva, 2009] تعریف می شود [Avdeev and Avdeeva, 2009]: سازی تیخونف [Tikhonov and Arsenin, 1977] تعریف می شود [۹۵۲ (۳–۳۲)

که در آن  $\sigma$  بردار رسانایی الکتریکی،  $\Psi_d$  تابع عدم برازش و  $\Psi_s$  تابع پایدار کننده مدل است که می-تواند بیان کننده ناهمواری یا نرم مدل باشد. این مسئله معکوس یک مسئله بهینهسازی نمونه با باند-های ساده است. اودیو و اودیوا [Avdeev and Avdeeva, 2009] حل این مسئله معکوس برای داده-های مگنتوتلوریک در حالت سهبتعدی را به روش شبه-نیوتنی حافظه محدود با باندهای ساده توسعه مای مگنتوتلوریک در حالت سهبتعدی را به روش شبه-نیوتنی حافظه محدود با باندهای ساده توسعه دادند. همچنین این روش توسط همین محققین برای دادههای مگنتوتلوریک در حالت یکبتعدی هم بودند. همچنین این روش توسط همین محققین برای دادههای مگنتوتلوریک در حالت یکبتعدی هم بردار جهت جستجو ( $\mathbf{p}_1^{(1)}, ..., \mathbf{p}_M^{(1)}$ ) برای مدلی با تعداد M پارامتر به صورت زیر محاسبه میشود بردار جهت می مطرود مط مین محققین از می مدلی با تعداد M پارامتر به صورت زیر محاسبه میشود

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Limited-memory quasi-Newton

$$\mathbf{p}^{(l)} = -\mathbf{G}^{(l)} \nabla_{\mathbf{m}} \Psi^{(l)}, \qquad \nabla_{\mathbf{m}} \Psi^{(l)} = \left(\frac{\partial \Psi}{\partial m_{1}}, \dots, \frac{\partial \Psi}{\partial m_{M}}\right)^{\mathrm{T}} \Big|_{\sigma = \sigma^{(l)}}$$
(\*\*-7)

در این رابطه (<sup>(1)</sup>) یک تقریب برای معکوس ماتریس مشتقات دوم (هیسین) است. که در هر تکرار به  $\mathbf{m} = ...$  یک تقریب برای معکوس ماتریس مشتقات دوم (هیسین) است. که در هر تکرار به  $\mathbf{m} = ...$  میآید. <sup>(T</sup>BFGS حافظه محدود [Avdeeva, 2009] به دست میآید.  $\mathbf{m}_{k} = \frac{\sigma_{k}}{\sigma_{k}^{(0)}}$  حدید  $\mathbf{m}_{k} = \frac{\sigma_{k}}{\sigma_{k}^{(0)}}$  رسانایی سلول الم برای  $\mathbf{m}_{k} = \frac{\sigma_{k}}{\sigma_{k}^{(0)}}$  رسانایی سلول الم برای مدل اولیه است. بردار جدید رسانایی ( $\mathbf{m}_{k}^{(1+1)} = (\sigma_{1}^{(l+1)}, ..., \sigma_{M}^{(l+1)})$  از رابطه زیر به دست میآید:  $\mathbf{\sigma}_{k}^{(l+1)} = \mathbf{\sigma}_{k}^{(l)} + \alpha^{(l)} \mathbf{\sigma}_{k}^{(0)} \mathbf{p}_{k}^{(l)}$ (۴۵-۳)

که طول مرحله <sup>(1)</sup> توسط جستجوی خطی غیردقیق در فضای مدل **m** به دست میآید. این روش به خاطر نیاز به ذخیرهسازی کمتر نسبت به روشهای گوس-نیوتن برتری دارد [ Avdeev 2009] در یاز متناسب با  $M × q_{200}$  است. که در آن M تعداد پارامترهای مدل و  $n_{cp}$  تعداد جفتهای اصلاحی<sup>7</sup> در روش شبه  $n_{cp} × M$ Avdeev and Avdeeva, 2 است. که در این روش اودیو و اودیوا ا Avdeeva and Avdeeva, 2009 زیوتنی است که تعداد نسبتاً کمی است، مثلاً  $n_{cp}$  در روش اودیو و اودیوا ا (یاز ذخیرهسازی 2009] در یک مثال مصنوعی ۶ است. در صورتی که در روش های گوس-نیوتن مقدار نیاز ذخیرهسازی معمولاً متناسب با M × N است، که در آن N تعداد دادهها است. همچنین مزیت دیگر این روش در این است که از محاسبه مشتقات دوم صرف نظر میشود [2009] این است که از محاسبه مشتقات دوم صرف نظر میشود [2009] معمولاً متناسب با A × N است، که در آن N تعداد دادهها است. همچنین مزیت دیگر این روش در ور هما (مثل محاسبه مشتقات دوم صرف نظر میشود [2009] توجه به نتایج به دست آمده برای دادههای مصنوعی در این روش و مقایسه آن با نتایج مشابه در دیگر روشها (مثل روش های آکام، فضای دادهها، گرادیان مزدوج و گرادیان مزدوج غیرخطی) نرخ همگرایی این روش کمتر است [200].

۳-۴-۶- روشهای معکوسسازی بر اساس تقریب بورن<sup>۴</sup>

یک سری از روشها برای مدلسازی عددی میدانهای الکترومغناطیس بر پایه خطیسازی معادلات انتگرالی این میدانها است. عمومیترین و سادهترین روش بر این اساس تقریب بورن نامیده می شود

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Hessian matrix

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Correction pairs

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Born approximation

[Zhdanov and Fang, 1996; Zhdanov et al., 2000]. روش تقریب بورن معمولاً برای فرکانسهای پایین و برای مدلهای با اختلاف رسانایی پایین مناسب میباشد ولی برای فرکانسهای بالا و مدلهای Habashy et al., 1993; Zhdanov and Fang, 1 اختلاف رسانایی بالا دقت این روش کم است [ ,1996].

بر این اساس که روش تقریب بورن در حل مسائل کاربردی الکترومغناطیس دارای محدودیت است، روش تقریب شبه-خطی<sup>۱</sup> توسط ژادانو و همکاران [Zhdanov et al., 2000] توسعه داده شده است. روش تقریب شبه-خطی بر پایه این فرض است که میدان آنومالی به طور خطی با میدان زمینه در یک محدوده ناهمگن مرتبط میشود. نتایج به دست آمده از مثالهای مصنوعی و واقعی نشان میدهد که روش معکوسسازی تقریب شبه-خطی برای دادههای مگنتوتلوریک یک روش سریع و پایدار بوده و محدودیت اصلی آن کار کردن در محدودههای تقریب شبه-خطی است یعنی ممکن است عملاً در اختلافهای مقاومتویژه بالا دقت مناسبی نداشته باشد. ولی برای اختلاف مقاومتویژه تا حدود ۱۰۰ اهم-متر این روش میتواند دارای دقت مناسب باشد [2000 et al., 2000].

### ۳-۵- جمعبندی و نتیجه گیری

در بندهای قبل مبانی تئوری و تا حدودی جنبههای کاربردی روشهای مختلف معکوسسازی داده-های مگنتوتلوریک اعم از روشهای یک، دو و سه بُعدی مورد بررسی قرار گرفت. گذشته از روش تبدیل تقریبی بوستیک و روشهای بر پایه تقریب بورن سایر روشهای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک را میتوان در دو دسته اصلی طبقهبندی نمود. دسته اول روشها، بر پایه روشهای گوس-نیوتن هستند. در روشهای گوس-نیوتن همان طور که قبلاً بیان شد، تابع پیشرو با استفاده از روش گوس-نیوتن خطی میشود و سپس مسئله معکوس منظم خطی شده، با استفاده از روش

۸۵

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Quasi-linear approximation

می گویند. در این روش ها ماتریس حساسیت در هر تکرار به طور کامل ساخته می شود البته در برخی از این روش ها ماتریس حساسیت به روش های مختلف تقریب زده می شود.

روشهای گوس-نیوتن با توجه به الگوریتمهای موجود شامل سه روش هستند. روش اول، روش گوس-نیوتن صریح میباشد. در این روش ماتریس حساسیت به طور کامل ساخته میشود. همچنین پارامتر منظمسازی در شروع فرآیند معکوسسازی به صورت تجربی تخمین زده شده و در طول این فرآیند ثابت میماند. روش دوم، روش اُکام است. تفاوت روش اُکام با روش گوس-نیوتن صریح در این است که در این روش در هر تکرار معکوسسازی پارامتر منظمسازی تغییر میکند. در واقع در هر تکرار با استفاده از یک روش انتخاب پارامتر منظمسازی موسوم به روش اصل اختلاف، این پارامتر تخمین زده می شود. همچنین در این روش فرآیند معکوس سازی در دو مرحله انجام می شود. در مرحله اول هدف کاهش میزان عدم برازش است. پس ابتدا با انجام تکرارهای مختلف معکوسسازی، سعی در کم کردن میزان عدم برازش و رسیدن به عدم برازش هدف است. سپس در مرحله بعد با نگه داشتن این سطح از عدم برازش در تکرارهای بعدی مدلی با کمترین ناهمواری به دست میآید. روش سوم از دسته روشهای گوس-نیوتن، روش فضای دادهها است. این روش بر پایه روش آکام می باشد؛ یعنی از تمام جنبهها مانند روش اُکام بوده با این تفاوت که در آن معادلات خطی معکوسسازی در فضای دادهها حل میشوند. در مقابل روشهای گوس-نیوتن، دسته دوم روشها به نام روشهای گرادیان قرار دارند. این روشها شامل روشهای گرادیان مزدوج، گرادیان مزدوج غیرخطی و شبه نيوتني حافظه محدود ميباشند. مشخصه اصلي اين روشها اجتناب از ساخت صريح ماتريس حساسیت است. همچنین در این روشها نیز پارامتر منظمسازی همانند روش صریح گوس-نیوتن در طول فرایند معکوسسازی ثابت است.

یکی از پارامترهای مهم معکوسسازی، پارامتر منظمسازی است؛ که در تمامی روشهای گفته شده شیوه انتخاب این پارامتر بیان شده است. با توجه به جمعبندی انجام شده برای روشهای معکوس-سازی دادههای مگنتوتلوریک، دیده می شود که در کل از دو شیوه برای تخمین پارامتر منظم سازی در این روشها استفاده میشود. در شیوه اول پارامتر منظمسازی به طول تجربی تخمین زده میشود و در طول فرایند معکوسسازی ثابت میماند. در این شیوه همگرایی معکوسسازی به پارامتر منظم-سازی بستگی دارد. در عمل در این روشها برای تولید یک مدل مناسب، فرآیند معکوسسازی به ازای مقادیر مختلفی از پارامتر منظمسازی اجرا میشود. شیوه دوم برای انتخاب پارامتر منظمسازی در روشهای موجود معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک

استفاده از روش اصل اختلاف است. این شیوهی انتخاب پارامتر منظمسازی به سطح نوفه دادهها وابسته است. همچنین دارای بار محاسباتی قابل ملاحظه است. در فصلهای بعدی به طور مفصل روش انتخاب پارامتر منظمسازی مورد بحث قرار می گیرد. فصل چهارم بررسی عملی نقاط قوت و ضعف روشهای معکوس-سازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک با تأکید بر نقش پارامتر منظمسازی

#### ۴–۱– مقدمه

در فصل قبل اصول تئوری الگوریتمهای موجود معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک بیان گردید. در این فصل هدف این است تا مثالهای معکوسسازی روی دادههای مصنوعی و واقعی برای برخی از الگوریتمهای شاخص انجام شود تا توانایی این الگوریتمها در عمل بررسی گردد. در بین الگوریتمهای موجود معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک که قبلاً اشاره شد میتوان چهار الگوریتم اکام، فضای دادهها، گرادیان مزدوج غیرخطی و گوس-نیوتن صریح را به عنوان الگوریتههای شاخص معرفی نمود. برنامههای موجود به عنوان نمایندههای اصلی بر اساس این الگوریتمها به ترتیب [Siripunwaraporn and Egbert, 2000] Dasocc [Constable et al., 2006] Occam2DMT Rodi and Mackei, 2001] NLCG و Lee et al., 2009a] MT2DInvMatlab مي باشند. ابتدا با ساخت مدلهای مصنوعی و تولید دادههای مصنوعی توسط مدلسازی پیشرو نشان داده میشود که دادههای مگنتوتلوریک با توجه به محدوده فرکانسی مورد کاربرد به خوبی قادر به تفکیک آنومالیهای رسانا و مقاوم در عمق های مختلف می باشند. سیس با به کارگیری این الگوریتمها برای دادههای واقعی و مقايسه با نتايج ديگر الگوريتمها، توانايي اين الگوريتمها بررسي مي شود. در آخر با اجراي الگوريتم-های فوق برای دادههای واقعی نقاط ضعف و قوت آنها بررسی می شود. همچنین نکاتی در خصوص برخی پارامترهای معکوسسازی از جمله پارامتر منظمسازی به منظور استفاده و توسعه این الگوریتم-ها مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲-۴- مدلسازی معکوس دادههای مصنوعی

#### ۲-۴-۱ مدل مصنوعی ۱

شکل (۴-۱-الف) یک مدل مصنوعی دوبُعدی را مشابه با مدل طراحی شده توسط پلرین و همکاران [Pellerin et al., 1996]، بر پایه یک مدل مفهومی برای منابع زمین گرمایی (شکل ب-۲ در پیوست ب) نشان میدهد. این مدل شامل یک لایه رسانا مشابه یک پوشش رسی با ضخامت حدود ۳۰۰ متر و

مقاومتویژه ۱۰ اهم-متر است، که بر روی یک توده مقاومتر مشابه یک ذخیره زمین گرمایی با مقاومتویژه ۵۰ اهم-متر قرار گرفته است. هر دو بخش در درون یک زمینه مقاوم با مقاومتویژه ۲۰۰ اهم-متر قرار گرفتهاند. برای تولید دادههای مصنوعی ۱۴ ایستگاه مجازی برای اندازهگیری دادههای مگنتوتلوریک با فواصل ۵۰۰ متری در طول یک پروفیل روی مدل مذکور طراحی شده است. در تمامی ایستگاهها مقادیر مقاومتویژه ظاهری و فاز برای دو مُد TE و TM در ۳۱ فرکانس در محدوده ۶۳۱۰-۶۳۱۰ هرتز (۵ فرکانس در هر دهه) با استفاده از مدلسازی پیشرو توسط برنامه وانامیکر و همکاران [Wannamaker et al., 1987]، محاسبه شده است (این دادهها در جدول (ج-۱) پیوست ج آمدهاند). در شکل (۴–۱– الف) همچنین شبکه محاسبات پیشرو برای تولید دادههای مصنوعی روی مدل نشان داده شده است. برای نمایش بهتر توانایی معکوسسازی دادهها ۲ درصد نوفه تصادفی' به دادههای مصنوعی تولیده شده، اضافه شده است. سیس یک شبکه مناسب برای یارامترهای مدل طراحی شده که در شکل (۴–۱–ب) نشان داده شده است. مدل اولیه یک نیمفضا با مقاومتویژه ۱۰۰ اهم-متر منظور شده است. پارامتر منظمسازی شروع، مقدار RMS هدف و تعداد تکرارهای معکوس-سازی به ترتیب ۵، ۱ و ۱۰ انتخاب شدهاند. همچنین قید ناهمواری مرتبه دوم' (رابطه ۳–۱۰) برای معكوسسازي تنظيم شده است. پس از تنظيم اين پارامترها، عمليات معكوسسازي توسط الگوريتم معکوس سازی دوبُعدی اُکام روی این دادهها انجام شده است. شکل (۴–۱–ب) مدل معکوس به دست آمده برای دادههای مصنوعی فوق را در تکرار ششم معکوسسازی نشان میدهد. اگر چه مدل طراحی شده یک مدل ساده بوده ولی از نظر مقیاس هندسی و اختلاف مقاومتویژه مناطق آنومالی با هم و با محیط زمینه می تواند تا حدودی بیانگر محیطهای واقعی برای یک میدان زمین گرمایی باشد [Ghaedrahmati et al., 2011]. در این مثال دیده می شود که مدل معکوس مرز لایه رسانا را از آنومالی مقاومتر و همچنین از محیط زمینه به خوبی تمیز داده است. هر چند منطقه آنومالی با

<sup>1</sup>- Random noise

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Second-order roughness


مقاومتویژه ۵۰ اهم-متر به خوبی لایه رسانا تفکیک نشده است؛ ولی با توجه به اختلاف مقاومتویژه آن با محیط زمینه این بخش نیز قابل تفکیک است.

شکل (۴–۱): الف– یک مدل مصنوعی مشابه کار پلرین و همکاران [Pellerin and et al., 1996]، بر اساس یک مدل مفهومی برای منابع زمین گرمایی. این مدل شامل یک لایه رسانا به عنوان یک پوشش رسی با مقاومتویژه ۱۰ اهم-متر است که روی یک توده مقاوم تر به عنوان یک ذخیره زمین گرمایی با مقاومتویژه ۵۰ اهم– متر قرار گرفته است. هر دو بخش در درون یک زمینه مقاوم با مقاومتویژه ۲۰۰ اهم– متر قرار گرفتهاند. مثلثهای وارون به همراه شماره مربوطه موقعیت و نام ایستگاههای مجازی مگنتوتلوریک را نشان میدهند و خطوط قائم و افقی نشان دهنده شبکه محاسبات پیشرو برای تولید دادههای مصنوعی هستند. ب– مدل معکوس دوبعدی مقاومتویژه به دست آمده با استفاده الگوریتم معکوس سازی اکام در تکرار ششم با RMS=1.003 برای دادههای مصنوعی متناظر با مدل نشان داده

آنومالیهای هدف در موارد زیادی با روباره در تماس گالوانیک نیستند. برای این منظور مدلهای مفهومی زیادی طراحی شده است [Agostini, 1980; Hallof, 1972]. در این مثال، دو مدل دوبُعدی مقاومتویژه مشابه کار راو و بابو [Rao and Babu, 2006] بر اساس مدلهای مفهومی طراحی شده است. شكل (۴–۲–الف) يك مدل مقاومتويژه شامل يك توده رسانا با مقاومتويژه ۱۰ اهم-متر به همراه یک لایه روباره مقاومتر با مقاومتویژه ۱۰۰ اهم-متر است؛ که هر دو در یک زمینه مقاوم با مقاومتویژه ۱۰۰۰ اهم-متر قرار گرفتهاند. همچنین شکل (۴–۳-الف) یک مدل مقاومتویژه شامل یک توده رسانا با مقاومتویژه ۱۰ اهم-متر به همراه یک روباره خیلی مقاوم با مقاومتویژه ۱۰۰۰۰ اهم–متر است؛ که هر دو در یک زمینه نسبتاً مقاوم با مقاومتویژه ۱۰۰۰ اهم– متر قرار گرفتهاند. برای تولید دادههای مصنوعی مگنتوتلوریک برای هر کدام از این مدل ها، ۱۰ ایستگاه اندازهگیری مجازی مگنتوتلوریک با فواصل ۱۰۰ متر در طول پروفیلهایی روی این مدلها طراحی شده است. سیس در ۲۱ فرکانس با محدوده ۰/۱ تا ۶۳۰۰ هرتز (۵ فرکانس در هر دهه)، با استفاده از مدل سازی پیشرو همانند مثال قبل دادههای مصنوعی مقاومتویژه ظاهری و فاز برای دو مُد TE و TM برای هر مدل محاسبه شده است (این دادهها در جدول (ج-۲) پیوست ج آمدهاند). در اینجا نیز همانند مثال قبل، ۲ درصد نویز تصادفی به دادهها اضافه شده است. با اجرای برنامه معکوسسازی دوبُعدی آکام روی دادههای تولید شده برای هر مدل و کنترل شرایط معکوسسازی از جمله مقدار عدم برازش هدف، مقدار ناهمواری یا نرم مدل و پارامتر منظمسازی مورد استفاده، مدل معکوس برای هر دسته از دادهها، متناظر با مدل های ساخته شده به دست آمده است.

شکل (۴–۲–ب) مدل معکوس به دست آمده برای دادههای متناظر با مدل شکل (۴–۲–الف) را نشان میدهد. در این مدل، معکوسسازی پس از تکرار هفتم به مقدار RMS هدف که برابر ۱ منظور گردیده، رسیده است. این مدل نشان میدهد که معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک، به خوبی مدل مصنوعی متناظر را بازیابی نموده است. همچنین شکل (۴–۳–ب) مدل معکوس به دست آمده در تکرار سوم معکوسسازی از دادههای متناظر با مدل شکل (۴–۳–الف) را نشان میدهد. مقدار RMS برای این مدل نیز در حدود ۱ میباشد. در شکل (۴–۳) نیز دیده میشود که این مدل مصنوعی که بیان گر ارتباط غیر گالوانیک یک آنومالی هدف رسانا با یک روباره بسیار مقاوم است، به خوبی توسط معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک بازیابی شده است. این نتایج نشان میدهد که مطالعه پاسخ میدان الکترومغناطیس در روش مگنتوتلوریک با توجه به عمق، رسانایی و مرز روباره برای آنومالی هدف از نظر کمی و کیفی با روشهای مناسب مدلسازی عددی میسر میشود. همچنین با توجه به مقیاس مدلهای مصنوعی در شکلهای (۴–۲–الف و ۴–۳–الف) و ابعاد مدلسازی، این مدلها می-توانند بیان گر توانایی روش مگنتوتلوریک در اکتشاف آنومالیهای مرتبط با مواد معدنی باشند [قائدرحمتی و همکاران، ۱۳۹۱الف].



شکل (۴–۲): الف– یک مدل مقاومتویژه شامل یک توده رسانا با مقاومتویژه ۱۰ اهم–متر به همراه یک لایه روباره مقاوم تر با مقاومتویژه ۱۰۰ اهم–متر است که این دو بخش در یک زمینه مقاوم با مقاومتویژه ۱۰۰۰ اهم–متر قرار گرفتهاند. مثلثهای وارون به همراه شماره مربوطه موقعیت و نام ایستگاههای مجازی مگنتوتلوریک را نشان میدهند. ب– مدل معکوس دوبُعدی مقاومتویژه، به دست آمده با استفاده الگوریتم معکوس سازی اکام در تکرار هفتم، برای دادههای مصنوعی متناظر با مدل نشان داده شده در بخش (الف)



شکل (۴–۳): الف– یک مدل مقاومتویژه شامل یک توده رسانا با مقاومتویژه ۱۰ اهم– متر به همراه یک لایه روباره خیلی مقاوم با مقاومتویژه ۱۰۰۰۰ اهم–متر است که هر دو بخش در یک زمینه نسبتاً مقاوم با مقاومتویژه ۱۰۰ اهم– متر قرار گرفتهاند. مثلثهای وارون به همراه شماره مربوطه موقعیت و نام ایستگاههای مجازی مگنتوتلوریک را نشان میدهند ب– مدل معکوس به دست آمده با استفاده الگوریتم معکوس سازی اکام در تکرار هفتم برای دادههای مصنوعی متناظر با مدل نشان داده شده در بخش (الف)

۴–۳– مدلسازی معکوس دادههای واقعی

۴–۳–۱– دادههای منطقه اکلاهوما

شکل (۴-۴) موقعیت جغرافیایی پروفیل برداشت دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی (EMAP) به طول حدود ۳۰ کیلومتر و همچنین چهار ایستگاه مگنتوتلوریک با پنج مؤلفه مرسوم را در منطقه اکلاهومای آمریکا نشان میدهد.



شکل (۴-۴): نقشه موقعیت اندازه گیری های EMAP و مگنتوتلوریک در منطقه اکلاهوما (خط ضخیم و پررنگ با جهت شمال شرقی- جنوب غربی نشان دهنده پروفیل برداشت دوقطبیهای الکتریکی است. همچنین نقاط توپر چهار ایستگاه برداشت دادههای مگنتوتلوریک را نشان میدهند [Jones and Schults, 1997]

نقشه کامل زمین شناسی محلی منطقه به همراه مقاطع مختلف زمین شناسی توسط هارت [ Hart, ] 1974] تهیه شده است. با مطالعه این نقشه و گزارش مربوطه ترتیب لایه بندی قائم منطقه در زیر سطح محل برداشت های مورد مطالعه به این صورت است که لایه سطحی مربوط به دوره کرتاسه

<sup>1</sup>- Cretaceous

است؛ که جنس آن از شن، رس و سنگ آهک است. لایه دوم تا عمق حدود ۳ کیلومتر ادامه دارد و سن آن مربوط به دوره کربونیفر است که از سنگ آهک، ذغال و شیل با لایهبندیهایی از ماسهسنگ تشکیل شده است. لایه سوم مربوط به دوره دونین-سیلورین ، تا عمق تقریبی ۶ کیلومتر ادامه دارد و شامل سنگ آهک حاوی چرت، شیل، دولومیت و ماسهسنگ میباشد. لایه چهارم که مربوط به دوره کامبرین-اردوسین ۲ میباشد، تا عمق ۹ کیلومتر ادامه دارد و شامل سنگ آهک و دولومیت است و لایه انتهایی از دوره کامبرین تا عمق تقریبی ۱۱ کیلومتر و از گرانیت، ریولیت و گابرو تشکیل شده است. هدف از اندازهگیری دادههای EMAP در منطقه اکلاهوما، به نقشه در آوردن توزیع خواص الکتریکی لایههای رسوبی زیر سطحی است؛ که در زیر ناهمگنیهای سطحی قرار دارد [Ogawa, 1997]. اندازه-گیریهای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی در یک امتداد شمال شرق-جنوب غرب (شکل ۴-۴) شامل ۹۳ دوقطبی الکتریکی است [Jones and Schults, 1997]. با توجه به این که جهت پروفیل برداشت عمود بر ساختارهای اصلی زمین شناسی در منطقه است و از دوقطبی های عمودی استفاده نشده است، فقط دادههای مد TM در دسترس است. طول دوقطبیهای الکتریکی از ۲۲۰ تا ۲۵۰ متر و فاصله جدایش از ۱۴۹ متر تا ۱۰۸۹ متر در تغییر است. همچنین بازه فرکانس برداشت داده ۰/۰۰۰۵۵ تا ۳۸۴ هرتز است. علاوه بر دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی دادههای مگنتوتلوریک در چهار سونداژ، در همان محدوده فرکانسی اندازه گیری شدهاند (شکل ۴–۴). در این مطالعه کلیه دادهها شامل دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی و دادههای مگنتوتلوریک مورد بررسی قرار گرفتهاند. برای دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی فرکانسهای بیشتر از ۱۹۲هرتز و کمتر از ۱/۰۱۱۷ هرتز به دلیل بالا بودن میزان نوفه حذف شدهاند و فرکانسهای مابین این حدود برای مدلسازی و تفسیر انتخاب شدهاند. همچنین برخی دادههای مربوط به فرکانسهای این محدوده نیز به دلیل نامناسب بودن (از نظر میزان نوفه یا پرت بودن نسبت به فرکانسهای همسایه) در

- <sup>2</sup>- Devonian-Silurian
- <sup>3</sup>- Cambrian-Ordovician

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

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Electrical dipole

دوقطبیهای مختلف حذف شدهاند. برای دادههای مگنتوتلوریک نیز برخی از دادههای مربوط به فرکانسهای محدوده ذکر شده برای این دادهها بنا بر همان دلایل ذکر شده حذف شده است. برای معکوسسازی دوبُعدی دادههای منطقه اکلاهوما از دو روش گرادیان مزدوج غیرخطی و اکام استفاده شده است [قائدرحمتی و همکاران، ۱۳۹۱ب، ۱۳۹۲]. در روش گرادیان مزدوج غیرخطی با توجه به این که شبکه پارامترهای مدل و محاسبات پیشرو یکسان است و با توجه به این که محاسبات پیشرو به روش اختلاف محدود میباشد لذا برای افزایش دقت، این شبکه نسبتاً متراکم (۶۰۶۱ بلوک) تعريف شده است. مدل اوليه براي شروع معكوسسازي يك نيمفضا با مقاومتويژه ١٠ اهم-متر انتخاب شده است. با وجود این که روش مورد نظر تا حدود زیادی مشکل جابجاییهای ایستا را حل میکند؛ ولي در اينجا براي رفع كامل تر اين مشكل، جابجاييهاي ايستا به عنوان پارامترهاي آزاد در مدلسازي منظور شده و حل می شوند. با توجه به این که بیشترین اختلاف توپوگرافی در ایستگاههای برداشت داده در حدود ۲۰ متر است لذا توپوگرافی در معکوسسازی تأثیر قابل ملاحظهای ندارد. خطای منظور شده برای دادههای مقاومتویژه ظاهری و فاز در معکوسسازی به ترتیب ۱۰ و ۵ درصد در نظر گرفته شده است. اجراهای مختلف با تنظیم پارامترهای معکوسسازی از جمله مقادیر پارامتر منظمسازی مختلف، انجام شده است. در نهایت با مقدار پارامتر منظمسازی ۱۰ ( $\lambda = 10$ )، مدل معکوس مناسب در تکرار ۲۵ با RMS حدود ۲/۵ به دست آمده است (شکل ۴–۵-الف). برای مدلسازی دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی منطقه اکلاهوما روش اُکام نیز به کار گرفته شده است. ابتدا یک شبکه دوبُعدی مناسب از بلوکهای مقاومتویژه به عنوان پارامترهای مدل تعریف شده است. این بلوكها براي محاسبات پيشرو كه در اين الگوريتم به روش اجزاي محدود انجام مي شود، به بلوكهاي کوچکتری تقسیم شدهاند. تعداد پارامترهای مدل یا همان بلوکهای مقاومتویژه در این شبکه، ۲۵۰۹ بلوک است. مدل شروع برای فرآیند معکوسسازی یک نیمفضا با مقاومتویژه ۵ اهم-متر در نظر گرفته شده و مقدار پارامتر منظمسازی در شروع معکوسسازی ۵ انتخاب شده است.



شکل (۴–۵): مدلهای به دست آمده از معکوسسازی دوبُعدی دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی در منطقه اکلاهوما آمریکا. الف- با استفاده از الگوریتم گرادیان مزدوج غیر خطی (در تکرار ۲۵ با 2.5 RMS) ب- با استفاده از الگوریتم اکام (در تکرار ۱۰ با 3.7 RMS) و ج- مدل دوبُعدی به دست آمده توسط یوچیدا (RMS = 1.43) [ Uchida,

برای تعیین حدود مقدار عدم برازش هدف، ابتدا یک فرآیند معکوسسازی اولیه روی دادهها با مقدار عدم برازش هدف (RMS هدف) برابر ۱ انجام شده و دیده شده است که با این کار مقدار RMS مدل-سازی تا حدود ۳/۷ کاهش مییابد. لذا با این اطلاع مقدار عدم برازش هدف ۳/۷ انتخاب شده و با یک فرآیند جدید معکوسسازی مدلی با کمترین ساختار به شرط برازش مناسب به دادهها در تکرار ۱۰ به دست آمده است (شکل ۴–۵–ب).

با توجه به مدلهای معکوس به دست آمده از روش گرادیان مزدوج غیرخطی و روش اکام برای داده-های پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی دیده میشود که این مدلها به خوبی با هم تطابق دارند. همچنین با مقایسه این نتایج با مدل معکوس به دست آمده از دادههای مورد مطالعه توسط یوچیدا [Uchida, 1997] که در شکل (۴–۵–ج) نشان داده شده است، دیده میشود که نتایج این مطالعه ضمن تأیید نتایج کار یوچیدا توزیع مقاومتویژه زیر سطحی را به طور بهتری نشان میدهند. لازم به خکر است که مدل یوچیدا توزیع مقاومتویژه زیر سطحی را به طور بهتری نشان میدهند. لازم به فرکانس از این دادههای معدل یوچیدا توسط الگوریتم وی که در بخش ۳–۳–۷–۱ شرح داده شد برای ۱۲ ویژه ظاهری و فاز) با دادههای مشاهدهای متناظر را در ایستگاههای ۶ و ۶۰ (به ترتیب در موقعیتهای ای و ۱۷/۷ کیلومتر پروفیل) برای معکوسسازی با استفاده از روش گرادیان مزدوج غیرخطی نشان میدهد. همچنین در شکل (۴–۲) این مقایسهها برای معکوسسازی با استفاده از روش آکام نشان داده شده است.

برای بررسی بهتر مدلهای معکوس دوبعدی به دست آمده از دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی در این مطالعه، مدلسازی معکوس دوبعدی دادههای مگنتوتلوریک منطقه نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور از الگوریتم اُکام استفاده شده است. پس از تعریف شبکه مناسب برای پارامترهای مدل و محاسبات پیشرو (با توجه به فاصله ایستگاهها و عمق مورد بررسی در حدود ۱۰ کیلومتر) دیگر پارامترهای مدلسازی به طور مناسب همانند آنچه در بندهای قبل ذکر گردید تنظیم شده است.



شکل (۴–۶): مقایسه دادههای تئوری مقاومتویژه ظاهری و فاز حاصل از مدلسازی معکوس دوبُعدی دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی در منطقه اکلاهوما توسط الگوریتم گرادیان مزدوج غیرخطی با دادههای مشاهدهای در ایستگاههای ۶ (الف و ب) و ۶۰ (ج و د) که به ترتیب در موقعیتهای ۱/۵ و ۱۷/۷ کیلومتر پروفیل قرار گرفتهاند



شکل (۴–۲): مقایسه دادههای تئوری مقاومتویژه ظاهری و فاز حاصل از مدلسازی معکوس دوبُعدی دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی در منطقه اکلاهوما توسط الگوریتم اُکام با دادههای مشاهده ای در ایستگاه های ۶ (الف و ب) و ۶۰ (ج و د) که به ترتیب در موقعیتهای ۱/۵ و ۱۷/۷ کیلومتر پروفیل قرار گرفتهاند

فرآیند معکوسسازی در این الگوریتم برای دادههای مقاومتویژه ظاهری و فاز مُدهای TE و TM انجام شده است (شکل ۴–۸). این مدل به همراه نتایج به دست آمده از معکوسسازی دادههای پروفیلزنی آرایه الکترومغناطیسی (شکل ۴–۵) برای تفسیر ساختارهای زمینشناسی منطقه ارائه شده است. در شکل (۴–۹) نیز مقایسه پاسخ این مدل با دادههای مشاهدهای در ایستگاه mt-s700 برای نمونه نشان داده شده است.

با توجه به نتایج هموارتر مدلسازی معکوس به روش اکام میتوان توزیع رسوبات و ساختارهای زیر سطحی را به طور بهتری نسبت به نتایج مدلسازی گرادیان مزدوج غیرخطی و مدل به دست آمده توسط یوچیدا، تفسیر نمود. همچنین تلفیق نتایج این مدل با نتایج مدلسازی معکوس به دست آمده از دادههای چهار ایستگاه مگنتوتلوریک (شکل۴–۸) برای تفسیر ترتیب قائم لایههای زیر سطحی و همچنین موقعیت قرارگیری ساختارها میتواند مؤثر باشد. اگر چه در این بخش هدف اصلی به کارگیری الگوریتمها، مقایسه نتایج آنها و بررسی پارامترهای معکوسسازی است اما با توجه به این نتایج مدلسازیهای صورت گرفته و اطلاعات زمینشناسی از نقشه زمینشناسی منطقه [ Hart, آ، میتوان ترتیب ساختارهای زیر سطحی را به طور کلی به صورت ذیل تفسیر نمود. کاهش مقاومتویژه در نزدیک سطح، احتمالاً به خاطر وجود شن، رسوبات رسی و ماسه مرطوب به آبشور میباشد. البته ناهمگنیهای سطحی در هر سه مدل ذکر شده (شکل ۴–۵) به خوبی نشان داده شده میباشد. البته ناهمگنیهای سطحی در هر سه مدل ذکر شده (شکل ۴–۵) به خوبی نشان داده شده است. سپس افزایش مقاومتویژه با افزایش عمق، به احتمال زیاد ناشی از وجود ماسهسنگ و آهک درز و شکافدار اشباع از آب شیرین است. پس از این رسوبات احتمالاً سنگ آهک خشک همراه با دولومیت قرار گرفته است و پس از آن افزایش قابل توجه مقاومتویژه ناشی از سنگ بستر آذرین

همچنین نتایج این بخش نشان میدهد که پردازش دادههای مورد مطالعه و کنترل پارامترهای معکوسسازی از جمله طراحی شبکه پارامترهای مدل، مدل شروع معکوسسازی، پارامتر منظمسازی (برای روش گرادیان مزدوج غیرخطی)، محدوده فرکانس مورد استفاده و مقدار عدم برازش هدف (در روش اُکام) برای تولید مدل مناسب جهت تفسیر ساختارهای زمین شناسی بسیار مؤثر هستند.



شکل (۴–۸): مدل معکوس به دست آمده برای دادههای مقاومتویژه ظاهری و فاز دو مُد TM و TE از اندازه گیریهای مکل (۴–۸) مگنتوتلوریک در منطقه اکلاهوما با استفاده از الگوریتم معکوس سازی دوبُعدی اُکام



شکل (۴–۹): مقایسه دادههای تئوری مقاومتویژه ظاهری و فاز حاصل از مدلسازی معکوس دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک منطقه اکلاهوما توسط الگوریتم اُکام با دادههای مشاهدهای در ایستگاه mt-s700

۹-۳-۲- دادههای منطقه زمین گرمایی سبلان دادههای مورد مطالعه در اینجا شامل ۹ ایستگاه اندازه گیری مگنتوتلوریک روی پروفیل PO1 (شکل ۱۰-۴) در منطقه زمین گرمایی سبلان در استان اردبیل میباشد. پس از پردازش دادهها و محاسبه تانسور امپدانس مگنتوتلوریک مقادیر مقاومتویژه ظاهری و فاز برای محدوده فرکانسی ۲۰۲۸ تا ۳۲۲ هرتز محاسبه شده است [EDC, 2010]. پردازش نهایی این دادهها، تعیین مدهای TE و TT، و ۳۲۲ مرسی منحنیهای مقاومتویژه ظاهری و فاز با استفاده از نرمافزار WinGlink [Geosystem, 2003] انجام شده است. پس از حذف دادههای پرت و دادههای حاوی خطای بالا، مقادیر مقاومتویژه ظاهری و فاز برای هر دو مد TE و TT در ۵۰ فرکانس در محدوده ۱۰/۰ تا ۱۰۰ هرتز برای معکوسسازی آماده شده است. پس از حذف دادههای پرت و دادههای حاوی خطای بالا، مقادیر مقاومتویژه ظاهری و فاز برای هر دو مد TE و TT در ۵۰ فرکانس در محدوده ۱۰/۰ تا ۱۰۰ هرتز برای معکوسسازی آماده شده است. جزئیات بیشتر در خصوص این دادهها و زمینشناسی منطقه در فصل ششم به تفصیل بیان خواهد شد. همچنان که در بخش مقدمه این فصل اشاره شد در این بخش هدف اصلی، بررسی توانایی الگوریتمهای معکوسسازی دوبعدی، مقایسه نتایج این الگوریتمها و بررسی برخی پارامترهای معکوسسازی از جمله پارامتر منظمسازی میباشد.

در معکوسسازی دوبعدی برازش مناسب برای دادههای مد TM حتی برای ساختارهای شبه سه بعدی نسبت به دادههای مد TE و یا هر دو مد با هم، راحت تر قابل دست یابی است [Uchida et al., 2002]. در اکتشاف منابع زمین گرمایی با توجه به عمق مورد اکتشاف (۳-۶ کیلومتر)، معمولاً دادههای مد TM برای مدلسازی معکوس دوبعدی استفاده می شود. بر این اساس در اینجا نتایج معکوس سازی با الگوریتمهای اُکام، فضای دادهها، گرادیان مزدوج غیرخطی و گوس-نیوتن صریح برای دادههای مد TM نشان داده می شود و بررسی های لازم از نظر انتخاب پارامتر منظم سازی و نقاط ضعف و قوت این الگوریتمها صورت می گیرد. البته آزمایش های معکوس سازی دوبعدی برای سه دسته داده شامل داده-های مد TM، مد TT و هر دو مد با هم به طور جداگانه با الگوریتمهای ذکر شده نیز انجام گرفته است [Ghaedrahmati et al., 2013]. در آنجا نیز نشان داده شده است که برازش مناسب برای دادههای مُد TM نسبت به دادههای مُد TT و یا هر دو مُد با هم راحت تر قابل دست یابی است.



شکل (۴-۱۰): موقعیت پروفیلهای مکنتوتلوریک در منطقه زمین گرمایی سبلان [EDC, 2010] در آزمایشهای معکوس سازی این بخش میزان نوفه برای دادههای مقاومت ویژه ظاهری و فاز به ترتیب ۱۰ و ۵ درصد منظور شده است. همچنین سعی شده است که شبکه پارامترهای مدل و محاسبات پیشرو در آزمایش با الگوریتمهای مختلف نزدیک به هم طراحی شود. البته با توجه به این که روش ساخت این شبکهها (پیشرو و معکوس) در الگوریتمهای مختلف متفاوت است لذا این شبکهها تا حدودی با هم تفاوت دارند. در کلیه آزمایشها مدل شروع برای معکوس سازی یک نیمفضا با مقاومت-ویژه ۱۰۰ اهم معروب در نظر گرفته شده است. شکل (۴–۱۱) مدلهای معکوس دوبعدی توسط الگوریتمهای ذکر شده را برای دادههای مد MT در این بخش نشان می دهد. همچنین در شکل (۴– الگوریتمهای ذکر شده را برای دادههای مد MT در این بخش نشان می دهد. همچنین در شکل (۴–



شکل (۴–۱۱): مدلهای معکوس دوبُعدی به دست آمده با الگوریتمهای مختلف برای دادههای مُد TM مگنتوتلوریک مربوط به ۹ ایستگاه برداشت روی پروفیل P01 در منطقه سبلان (موقعیت ایستگاه با علامت v به همراه نام یا شماره ایستگاه نشان داده شده است)

به طوری که در فصل سوم در بحث تئوری الگوریتمهای آکام و فضای دادهها شرح داده شد، در این الگوریتمها از روش اصل اختلاف برای انتخاب پارامتر منظمسازی استفاده می شود یعنی در هر تکرار معکوس سازی پارامتر منظم سازی جستجو و انتخاب می شود که به ازای آن مقدار عدم برازش کمتر از عدم برازش هدف گردد و یا این که کمترین مقدار عدم برازش به ازای آن حاصل شود. لذا هر کدام از این الگوریتمها ابتدا به ازای مقدار عدم برازش هدف با RMS معادل ۱ اجرا شده و اجازه داده شده است تا معکوس سازی تا مرحله ای که میزان عدم برازش تقریباً ثابت می ماند، ادامه یابد. سپس مقدار عدم برازش نهایی در این آزمایش ها در اجرای دوم به عنوان عدم برازش هدف انتخاب می شود.



شکل (۴–۱۲): مقایسه شبهمقاطع دادههای تئوری مقاومتویژه (مقاطع سمت راست) و فاز (مقاطع سمت چپ) حاصل از مدلهای معکوس دوبُعدی با روشهای مختلف (شکل ۴–۱۱)، با دادههای مشاهده ای متناظر

نتایج این آزمایشها در جداول (۴–۱) و (۴–۲) برای بررسی تغییر مقادیر عدم برازش، نرم مدل و تعداد مقادیر پارامتر منظمسازی مورد جستجو در هر تکرار معکوسسازی نشان داده شده است. نتایج برای آزمایش اُکام (جدول ۴–۱) نشان میدهد که در اجرای اول، معکوسسازی در تکرار چهارم به مقدار RMS و نرم مدل مناسب میرسد (مدل نشان داده شده در شکل ۴–۱۱-الف).

نرم مدل	RMS	لگاریتم λ انتخاب شده	تعداد λ آزمایش شده	شماره تكرار				
۹/۰ ۲	۳/۸۵	۲/۸۲	۵	١	-			
89/86	۳/۱۵	١/٨٢	Y	٢	اجرای اول با مقدار RMS هدف برابر ۱			
26/20	۳/۰۸	۳/۰۵	۲.	٣				
۲۴/۲۸	۳/۰۸	۳/۰۵	۲۹	۴				
74/•9	۳/۰۷	۲/۴۰	٣۴	۵				
۲۸/۰۵	۳/۰۷	۳/۴۰	49	۶				
۳۴/۱۰	۳/۰۴	٣/٣۴	۲۹	٧				
۹/۰ ۲	۳/۸۵	۲/۸۲	۵	١				
89/86	۳/۱۵	١/٨٢	Y	٢	اجرای دوم با مقدار RMS هدف برابر ۳/۰۸			
28/20	۳/۰۸	۳/۰۵	۲.	٣				
۲۴/۲۸	۳/۰۸	۳/۰۵	۲۹	۴				
74/•9	٣/• ٧	۲/۴۰	٣۴	۵				
۲۴/۰۵	۳/۰۷	۳/۴۰	۲۸	۶	1			
۲۳/۹۰	۳/۰۷	۳/۲ ۱	۲.	٧				

جدول (۴-۱): مقادیر RMS، نرم مدل و تعداد پارامتر منظم سازی مورد جستجو برای هر تکرار معکوس سازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک در دو اجرای مختلف الگوریتم اُکام به ازای دو مقدار عدم برازش هدف متفاوت در آزمایش برای دادههای بروفیل PO1 در منطقه سیلان

جدول (۴-۲): مقادیر RMS، نرم مدل و تعداد پارامتر منظمسازی مورد جستجو برای هر تکرار معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک در دو اجرای مختلف الگوریتم فضای دادهها به ازای دو مقدار عدم برازش هدف متفاوت در آزمایش برای دادههای پروفیل POI در منطقه سبلان

	شماره تكرار	تعداد λ آزمایش شده	لگاریتم λ انتخاب شده	RMS	نرم مدل			
	١	۶	٣/۵	۸/۳۲	۶/۱۷			
	٢	۴	٣	۵/۶۸	۱۰/۱۸			
	٣	۴	۲/۵	۴/۱۸	۱۵/۰۵			
اجرای اول با	۴	۴	٢	۳/٧٩	۲۳/۹۷			
مقدار RMS	۵	۴	۱/۵	۲۹/۴	41/78			
هدف برابر ۱	۶	۴	١	۳/۸۳	۵۲/۰۵			
	٧	۴	۱/۵	۴/۰ ۱	۳۲/۵۲			
	٨	٣	۱/۵	٣/٧٧	۲۸/۲۶			
	٩	٣	۱/۷۴	۳/۸ ۱	<b>TV/84</b>			
	۱.	٣	۱/۷۴	۳/۸۵	۲۸/۶۵			
	١	۶	٣/۵	۸/۳۲	۶/۱۷			
احراي دوم با	٢	۴	٣	۵/۶۸	۱۰/۱۸			
PMS 1	٣	۴	۲/۵	۴/۱۸	۱۵/۰۵			
	۴	۴	٢	٣/٧٩	۲۳/۹۷			
هدف برابر ۲/۲۸	۵	۴	۱/۵	۲۹/۳	۴۱/۲۶			
1	۶	۷	١/١	٣/٧٩	۴۴/۳۵			

در تکرارهای بعدی این آزمایش، کاهش مقدار RMS ناچیز بوده و نرم مدل در حال افزایش است. انتخاب مقدار عدم برازش هدف به سطح نوفه دادهها بستگی دارد. در واقع ادامه فرآیند معکوس سازی پس از رسیدن مقدار عدم برازش به سطح نوفه دادهها علاوه بر این که مستلزم صرف زمان اضافی است در مواردی نیز منجر به همگرا شدن با مدلی نامناسب می شود. همچنین فرایند معکوس سازی به روش اکام (و روش فضای دادهها) یک فرآیند دو مرحلهای است یعنی پس از رسیدن معکوسسازی به سطح عدم برازش هدف در مرحله بعد معکوسسازی با نگه داشتن این سطح از عدم برازش در جهت هموار کردن مدل پیش میرود. لذا در صورتی عدم برازش هدف کمتر از سطح نوفه دادهها انتخاب شود، مرحله دوم معکوسسازی میسر نمی شود. در اجرای دوم معکوس سازی با این الگوریتم با انتخاب RMS هدف برابر ۳/۰۸ معکوسسازی در تکرار چهارم به این سطح از عدم برازش رسیده و در تکرار-های بعدی با کاهش نرم مدل در جهت هموار شدن مدل پیش میرود. به طور مشابه نتایج آزمایش الگوریتم فضای دادهها (جدول۴–۲) نیز نشان میدهد که معکوسسازی به ازای مقدار RMS هدف برابر با ۱ در تکرار پنجم به کمترین سطح از عدم برازش میرسد (مدل نشان داده شده در شکل ۴-۱۱-ب) و در تکرارهای بعدی این مقدار کاهش نیافته و در نوسان است. در اجرای دوم معکوسسازی با این الگوریتم با انتخاب RMS هدف برابر ۳/۴۸ معکوسسازی در تکرار پنجم به این سطح از عدم برازش رسیده و در تکرار های بعدی نتوانسته در جهت هموار نمودن مدل پیش رود و در تکرار ششم متوقف شده است.

برای آزمایش روش گرادیان مزدوج غیرخطی از نرمافزار WinGlink استفاده شده است. در این آزمایش پس از طراحی یک شبکه مناسب برای محاسبات پیشرو و معکوس با توجه به این که اعمال توپوگرافی در معکوس سازی به راحتی قابل انجام است، لذا توپوگرافی موقعیت ایستگاههای برداشت نیز در معکوس سازی منظور شده است. در الگوریتم گرادیان مزدوج غیرخطی مقدار پارامتر منظم-سازی در طول فرایند معکوس سازی ثابت است. لذا باید اجراهای مختلفی از معکوس سازی برای مقادیر مختلف این پارامتر انجام شود؛ تا مدلی با کمترین ساختار (هموارترین مدل) به شرط برازش به دادهها به دست آید. در اینجا برای انتخاب مقدار مناسب پارامتر منظمسازی ۱۱ اجرای جداگانه معکوسسازی به ازای ۱۱ مقدار مختلف پارامتر منظمسازی در محدوده ۲۰۰–۲۰۱۰ با دو تکرار اجرا شده است. سپس بر اساس روش منحنی L<sup>1</sup> [Hansen, 1997] مقادیر عدم برازش به دست آمده در تکرار دوم هر اجرای معکوسسازی (به ازای مقادیر مختلف پارامتر منظمسازی) به عنوان تابعی از نرم مدل متناظر ترسیم شده است (شکل ۴–۱۳). مقدار پارامتر منظمسازی مربوط به گوشه منحنی به دست آمده در شکل (۴–۱۳) به عنوان پارامتر منظمسازی مناسب (51 =  $\Lambda$ ) برای اجرای کامل معکوسسازی در آزمایش با این الگوریتم انتخاب شده است. شکل (۴–۱۱–ج) مدل حاصل از این آزمایش نهایی را در تکرار ۲۰ معکوسسازی با 8.28 RMS نشان میدهد.

آزمایش معکوسسازی برای الگوریتم گوس-نیوتن صریح توسط برنامه MT2DInvMatlab انجام شده است. در این برنامه بر خلاف سه الگوریتم معکوسسازی مورد بحث قبلی (اَکام، فضای دادهها و گرادیان مزدوج غیرخطی)، ساخت شبکه پارامترهای مدل و محاسبات پیشرو تا حدودی دارای محدودیت است و برای تولید شبکههای متراکمتر نمیتوان به راحتی چنین شبکهای را طراحی نمود. لذا اینجا شبکه پارامترهای مدل تا حدودی درشتتر از آزمایشهای قبل است. هر چند این برنامه بر اساس الگوریتم گوس-نیوتن صریح می باشد ولی با توجه به منظور نمودن روش متعادل سازی قید فعال (ACB) در این برنامه برای منظم سازی پارامترهای مدل، میتوان آن را تا حدودی از دیگر بایستی کمترین و بیشترین مقادیر پارامتر منظم سازی توسط کاربر انتخاب شود لذا برای رسیدن به یک مدل مناسب از نظر مقادیر عدم برازش و نرم مدل که مشخص کننده پایداری مدل است، بایستی چندین جفت کمترین و بیشترین مقدار پارامتر منظم سازی در اجراهای مختلف معکوس سازی آزمایش شود. در اینجا پس از چند آزمایش (جدول ۴–۳) مقادیر ۴ و ۱۰ به ترتیب به عنوان کمترین





شکل (۴–۱۳): ترسیم مقادیر عدم برازش به عنوان تابعی از نرم مدل در تکرار دوم اجراهای مختلف معکوسسازی به روش گرادیان مزدوج غیرخطی به ازای مقادیر مختلف پارامتر منظم سازی

جدول (۴–۳): مقادیر مختلف RMS و نرم مدل برای اجراهای مختلف معکوس سازی روی دادههای پروفیل P01 سبلان توسط الگوریتم گوس-نیوتن صریح که از روش متعادل سازی قید فعال استفاده می کند

نرم مدل	RMS	$\lambda_{max}$	$\lambda_{min}$	اجراي معكوسسازي
۳۶۰	۲/۳۰	٨	٢	١
۳۴۸	۲/۳۸	۱.	۴	٢
۳۵۹	۲/۵۳	١٢	۶	٣
888	۲/۵۹	۱۵	٨	۴

# ۴-۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده نشان میدهد که الگوریتمهای معکوسسازی که در آنها ماتریس حساسیت به طور کامل و مستقیم محاسبه میشود (یعنی روشهای اُکام، فضای دادهها و گوس-نیوتن صریح) در تکرارهای کمتری نسبت به روشهای گرادیان (یعنی روش گرادیان مزدوج غیرخطی) به مدلی با کمترین مقدار عدم برازش همگرا میشوند. البته در روش گرادیان مزدوج غیرخطی با توجه به اجتناب از ساخت صریح ماتریس حساسیت سرعت محاسبات و همچنین حافظه مورد نیاز نسبت به روشهای مستقیم معکوسسازی مناسبتر است. در آزمایشهای انجام شده با دادههای واقعی نیز این مسئله به

روشنی دیده شده است. ولی در کل زمان لازم برای یک آزمایش معکوسسازی با روش گرادیان مزدوج غیرخطی، با توجه به روش انتخاب پارامتر منظمسازی و تعداد تکرارهای لازم برای همگرایی نسبت به روشهای مستقیم (اُکام، فضای دادهها و گوس-نیوتن صریح) بیشتر است. همان طوری که قبلاً اشاره شد، در الگوریتمهای آکام و فضای دادهها مقدار پارامتر منظمسازی در هر تكرار با استفاده از روش اصل اختلاف تعیین می شود. این الگوریتم ها از این نظر كه در هر تكرار معکوسسازی مقدار مناسبی را برای پارامتر منظمسازی جستجو میکنند، نسبت به دیگر الگوریتمها (گرادیان مزدوج خطی و گوس-نیوتن صریح) که در آنها مقدار پارامتر منظمسازی در طول فرآیند معکوسسازی ثابت است، برتری دارند. اما معایبی نیز در شیوه انتخاب پارامتر منظمسازی دارند. اول این که در روش اصل اختلاف انتخاب مقدار پارامتر منظمسازی به سطح نوفه دادهها وابسته است و در دادههای واقعی هم معمولاً این سطح نوفه معلوم نیست. دوم این که در این روش نیاز به انتخاب یک مقدار اولیه برای پارامتر منظمسازی است؛ تا پارامتر منظمسازی مناسب در مقادیر حول این مقدار اولیه جستجو شود. سوم این که جستجو برای مقدار مناسب پارامتر منظمسازی در هر تکرار مستلزم محاسبات بیشتر است و در صورتی که حجم مسئله معکوس قابل ملاحظه باشد، این محاسبات ممکن است زمانبر و طاقت فرسا باشد. البته در مواردی با ارائه یک روش جستجو مناسب مثل روش ارائه شده در الگوریتم فضای دادهها که بخش مربوط به این روش در فصل سوم شرح داده شد، نسبت به الگوريتم أكام شيوه جستجو منظم مى شود و تا حدودى از حجم محاسبات اضافى كاسته مى شود. لازم به ذکر است برای مقایسه این دو الگوریتم از نظر کاربرد یا توسعه بایستی موارد دیگری را نیز در نظر گرفت. از جمله این که در روش آکام از یک هسته پیشرو اجزاء محدود استفاده می شود در صورتی که در الگوریتم فضای دادهها از هسته پیشرو اختلاف محدود استفاده می شود. همچنین در الگوریتم فضای دادهها با توجه به این که از روش فضای دادهها استفاده می شود، در مسائلی که تعداد پارامتر-های مدل بیشتر از تعداد دادهها است این الگوریتم از نظر محاسباتی مؤثرتر از روش اُکام است. آزمایشها با برنامه MT2DInvMatlab نشان میدهد که؛ اگرچه انعطاف پذیری این برنامه در ساخت شبکه پارامترهای مدل و محاسبات پیشرو تا حدودی نسبت به دیگر الگوریتمهای مورد آزمایش در این تحقیق کمتر است، ولی این برنامه دارای سه مزیت مهم است. اول این که از یک هسته پیشرو اجزاء محدود استفاده میکند، دوم اعمال توپوگرافی در آن به راحتی قابل انجام است و سوم این که از روش متعادلسازی قید فعال (ACB) برای محاسبه پارامتر منظمسازی به صورت یک تابع فضایی استفاده میکند. هر چند در روش متعادلسازی قید فعال نیز باید فرآیند معکوسسازی برای چند جفت از مقادیر منظمسازی (کمترین و بیشترین) به صورت تجربی اجرا شود؛ ولی این روش نسبت به الگوریتمهایی که در آنها مقدار پارامتر منظمسازی در طول فرآیند معکوسسازی ثابت است از نظر

در مدلهای معکوس به دست آمده از آزمایش چهار الگوریتم مورد نظر روی دادههای منطقه سبلان (شکل ۴–۱۱) دیده میشود که در کلیه مدلها تقریباً به طور یکسان مناطق رسانا و مقاوم با توجه به اختلاف مقاومتویژه قابل تمیز است. البته مقداری اختلاف در مقادیر مقاومتویژه مناطق تفکیک شده متناظر در مدلهای مختلف وجود دارد. این مسئله علاوه بر این که به خاطر برخی پارامترها از جمله متفاوت بودن هسته پیشرو، متفاوت بودن ماتریسهای وزنی برای دادهها و پارامترهای مدل و متفاوت بودن الگوریتم معکوس سازی در برنامههای مختلف مثلاً روش گرادیان نسبت به روش اُکام است؛ شیوه انتخاب پارامتر منظم سازی در الگوریتمهای مختلف نیز میتواند از علتهای اصلی آن باشد.

یک نتیجه کلی از مثالهای معکوسسازی با دادههای مصنوعی و واقعی را میتوان به این صورت بیان نمود که انتخاب پارامتر منظمسازی نقش مهمی در فرآیند معکوسسازی دارد. به طوری که در فصل سوم در بررسی تئوری الگوریتمهای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک بیان گردید، در اینجا نیز عملاً نشان داده شد که برای انتخاب پارامتر منظمسازی در الگوریتمهای موجود دو تدبیر وجود دارد. تدبیر اول به این صورت که پارامتر منظمسازی در طول فرآیند معکوسسازی ثابت میماند. در این روش برای تولید یک مدل مناسب لازم است تا فرآیند معکوسسازی با مقادیر مختلف پارامتر منظم- سازی به طور جداگانه اجرا شود. این روش علاوه بر این که از نظر بازدهی محاسباتی مناسب نمی باشد از نظر مقدار مناسب پارامتر منظمسازی باز هم دارای ابهام است. چرا که پارامتر منظمسازی یک مقدار کنترل کننده بین نرم مدل و مقدار عدم برازش است که این مقادیر هم در تکرارهای مختلف معکوسسازی تغییر میکنند. تدبیر دوم موجود همان روش اصل اختلاف است که در الگوریتمهای اُکام و فضای دادهها منظور شده است. به طوری که در بندهای قبل اشاره شد این تدبیر نسبت به تدبير قبل ارجحيت دارد. اما استفاده از اين روش به سطح نوفه دادهها وابسته است و معمولاً در داده-های واقعی این سطح نوفه مشخص نیست. همچنین با توجه به این که جستجو و آزمایش هر مقدار پارامتر منظمسازی مستلزم حل معادلات خطی معکوسسازی، جدید نمودن مدل و همچنین حل پیشرو برای محاسبه عدم برازش میباشد لذا در مسائل معکوس حجیم دوبُعدی و مسائل معکوس سه-بُعدى اين روش بازدهى محاسباتي مناسب را ندارد. لازم به ذكر است كه تعداد حلهاي پيشرو براي آزمایش هر مقدار پارامتر منظمسازی در هر تکرار به تعداد فرکانسها و تعداد مدهای پاسخ بستگی دارد و از نظر زمان محاسباتی میتواند قابل ملاحظه باشد. به علاوه به طوری که قبلاً اشاره شد انتخاب پارامتر منظمسازی اولیه در این روش که به صورت سعی و خطا انجام می شود در سرعت و دقت معکوسسازی مؤثر است. به همین منظور در فصل بعدی به طور مفصل به بررسی روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی جهت بهبود روش انتخاب این پارامتر برای مسئله معکوس مگنتوتلورک یرداخته میشود. فصل پنجم بهبود الگوریتم معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک با تعیین روش مناسب برای انتخاب پارامتر منظمسازی

#### ۵–۱– مقدمه

مطابق تعریف هادامارد [Hadamard, 1923]، مسئله جورنشده مسئلهای است که حل آن یکتا نیست. مسائل معکوس عمدتاً جزء مسائل جورنشده (بدوضع) هستند. مسئله معکوس مگنتوتلوریک نیز یک مسئله به شدت جورنشده است [Newman and Alumbaugh, 2000]. وجود پاسخ برای مسئله، یکتایی پاسخ آن و پایدار بودن مسئله شرطهای لازم برای جورشدگی (خوشوضع بودن)<sup>۱</sup> یک مسئله معکوس هستند. عدم برقراری یکی از شرط های فوق باعث جورنشدگی مسئله میشود [ Haber, معکوس هستند. عدم برقراری یکی از شرط های فوق باعث جورنشدگی مسئله میشود [ Haber, معکوس هستند. عدم برقراری یکی از شرط های فوق باعث جورنشدگی مسئله میشود [ Haber, معکوس هستند. عدم برقراری یکی از شرط های فوق باعث جورنشدگی مسئله میشود [ Haber, معکوس هستند. عدم برقراری یکی از شرط های فوق باعث جورنشده میشود [ Haber, 2002 منظم شده اکثر مسائل معکوس ژئوفیزیکی و به خصوص مگنتوتلوریک به کار گرفته میشود [ به Constable et al., 1987; Rodi and Mackie, 2001; Siripunvaraporn and Egbert, این عنوان مثال؛ , 2009; Sasaki, 2004; Lee et al, 2009a

در حل منظم مسئله معکوس (رابطه ۱–۱)، پارامتر منظمسازی دارای نقشی اساسی برای رسیدن به یک حل پایدار و همگرایی مناسب است. پارامتر منظمسازی حساسیت حل منظم پارامترهای مدل را نسبت به آشفتگی دادههای مشاهدهای کنترل میکند. یکی از مسائل مهم در روشهای منظمسازی از جمله روش تیخونف، انتخاب مناسب مقدار پارامتر منظمسازی است [ Haber and Oldenburg, 2004; Bauer and Kindermann; 2009; Kaltenbacher 2000; Farquharson and Oldenburg, 2004; Bauer and Kindermann; 2009; Kaltenbacher 2000; Farquharson and Oldenburg, 2004; Bauer and Kindermann; 2009; Kaltenbacher 2011 [ دهمچنان که قبلاً بیان شد، روشهای موجود معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک را می توان از نظر پارامتر منظمسازی به دو گروه تقسیم نمود، اول روشهایی که در آنها پارامتر منظم-سازی در طول عملیات معکوسسازی ثابت در نظر گرفته میشود. دوم روشهایی که در آنها انتخاب پارامتر منظمسازی در هر تکرار معکوسسازی بر اساس روش اصل اختلاف تخمین زده میشود. در فصل قبلی مزایا و معایب این روشها بررسی گردید.

<sup>1</sup>- Well-posed

در تعداد کمی از روشهای معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک و کارهای مشابه از روشهای دیگری برای تخمین پارامتر منظمسازی استفاده شده است که در ذیل به آنها اشاره میگردد. هابر Haber, l 1997] و هابر و الدنبرگ [Haber and Oldenburg, 2000] روش "اعتبارسنجي تقاطعي تعميم یافته" را برای تخمین پارامتر منظمسازی در حل مسئله معکوس غیرخطی گوس-نیوتن پیشنهاد دادند و الگوریتم خود را برای معکوسسازی یک بُعدی دادههای مگنتوتلوریک و همچنین ثقل سنجی ً در یک مثال مصنوعی به کار گرفتند. لی و الدنبرگ [Li and Oldenburg, 1999] روش منحنی L را برای تخمین پارامتر منظمسازی در حل مسئله معکوس سهبُعدی گوس-نیوتن میرا شده ً برای داده-های مقاومتویژه روش جریان مستقیم به کار گرفتند. روش منحنی L توسط هنسن Hansen, J توسط هنسن 1997] به طور كامل تشريح شده است. در ادامه نيز تئوري اين روش بيان مي شود. والكر Walker, ] 1999] استفاده از روش GCV را در معکوسسازی یکبُعدی دادههای الکترومغناطیس بررسی کرد. ایشان نتیجه گرفت که این روش در بعضی مواقع باعث ایجاد ساختارهای اضافه در تکرارهای اولیه می شود که در تکرارهای بعدی حذف آنها زمانبر است. فرکوهارسون و الدنبرگ [ Farquharson and . واصل اختلاف را در معکوس سازی یک بعدی داده L و اصل اختلاف را در معکوس سازی یک بعدی داده (Oldenburg, 2004) های الکترومغناطیس مورد مقایسه قرار دادند. آنها اظهار نمودند که در صورت معین بودن سطح نوفه در دادهها، بکارگیری روش اصل اختلاف در یک محدوده جستجوی مناسب میتواند یک روش مؤثر و با دقت باشد. البته با توجه به این که در این روش، هر مقدار پارامتر منظمسازی مورد جستجو معادل یک یا چند حل پیشرو است؛ لذا این روش در مسائل با حجم بالا از نظر تعداد داده و پارامترهای مدل ممکن است باعث کاهش بازدهی محاسباتی شود. همچنین این محققین اظهار نمودند که در یک طرح مناسب محدوده جستجو برای پارامتر منظمسازی، روش منحنی L از روش GCV نیرومندتر ولی از نظر سرعت کندتر است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Generalized Cross-Validation (GCV)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Gravity

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Damped

یوچیدا [Uchida, 1993] و میتسوهاتا و همکاران [Mitsuhata et al., 2002]، روش ABIC یا ملاک اطلاعات بیزین آکاییک را برای یک حل منظم شده مسئله معکوس دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک و الکترومغناطیس با منبع کنترل شده <sup>(</sup> به کار گرفتند. لی و همکاران [Lee et al., 2009a] نیز روش یی و همکاران [Yi et al., 2003]، یعنی روش متعادلسازی قید فعال که در آن پارامتر منظمسازی به صورت یک تابع فضایی تعریف میشود را برای معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک پیشنهاد دادند و در مثالهای مصنوعی و واقعی اعتبارسنجی نمودند. آنها اظهار نمودند که در این روش با تعداد کمی از پارامترهای منظمسازی که به صورت بیشترین و کمترین مقادیر در هر اجرا وارد می-

هر چند در خصوص انتخاب پارامتر منظمسازی برای حل مسائل معکوس ژئوفیزیکی کمتر کار شده است اما در حالت عمومی برای مسائل جورنشده مطالعات مختلفی انجام شده است [ Hansen and ] O'Leary, 1993; Haber and Oldenburg, 1997; Haber et al., 2000; Johnston and Gulrajani, 2000; Farquharson and Oldenburg, 2004; Rodriguez and Theist, 2005; Xiao-Bin et al., 2005; Hansen et al., 2007; Bauer and Reiß, 2008; Bauer and Kindermann, 2009; Brezinski et al., 2008; Riechel et al., 2009; Breziski et al., 2009; Bauer, 2010; Bauer and Lukas, 2011; Kaltenbacher et al., 2011; Jagannath and Yalavarthy, 2012; Mead and Lukas, 2011; Kaltenbacher et al., 2011; Jagannath and Yalavarthy, 2012; Mead and (وش های موجود انتخاب پارامتر منظمسازی را مورد مقایسه قرار دادهاند. آن ها نتیجه گرفتند که در جورنشده خاص جواب مناسب را ارائه دهد نمیتوان اظهار نمود که این روش برای تمامی مسائل جورنشده مناسب میباشد. بکارگیری یک روش منظمسازی خاص برای یک مسئله حدودی به طبیعت مسئله جورنشده بستگی دارد. در واقع بسیاری از روشهای انتخاب پارامتر منظم-سازی بایستی برای هر مسئله جورنشده خاص به طور جداگانه مورد مطالعه قرار گیرند و پارامترهای مربوطه برای آن مسئله تنظیم گردد. در ادامه مهمترین روشهای انتخاب پارامتر منظم-مرازی در این مسئله تنظیم گردد. در ادامه مهمترین روشهای انتخاب پارامتر منظم-میازی در

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Controlled Source Electromagnetic (CSEM)

مسائل جورنشده برای بکارگیری در مسئله معکوس دوبعدی مگنتوتلوریک مورد بررسی قرار میگیرند. اغلب این روش ها برای اولین بار در این مطالعه در مدلسازی معکوس داده های مگنتوتلوریک به کار گرفته می شود. ابتدا اصول تئوری این روش ها به اختصار بیان می شود. سپس برنامه MT2DInvMatlab به عنوان برنامه پایه و یا کد منبع مورد استفاده قرار می گیرد. روش های مختلف انتخاب پارامتر منظم سازی در محیط MATLAB کدنویسی شده و با منظور نمودن در الگوریتم معکوس سازی دوبعدی MT2DInvMatlab مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرند. در واقع هدف مطالعه حاضر در این بخش بهبود معکوس سازی دوبعدی داده های مگنتوتلوریک با وارد نمودن روش انتخاب پارامتر منظم سازی مناسب برای تخمین این پارامتر به صورت خودکار است. در ادامه با بکارگیری الگوریتم های بهبود یافته برای مدل سازی معکوس دوبعدی داده های مصنوعی و صحرایی توانایی این

## ۵-۲- اصول روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی

### ۵-۲-۱- روش اصل اختلاف

این روش زمانی به کار گرفته میشود که مقدار نوفه به خوبی در دادهها مشخص و مقادیر انحراف معیارها برای مقادیر نوفه معلوم است [Farquharson and Oldenburg, 2004]. در صورتی که میزان خطای دادهها دارای توزیع نرمال<sup>۱</sup> با میانگین صفر و ناهمبسته<sup>۲</sup> باشد، تابع عدم برازش (رابطه ۳–۱۱ یا -10) به صورت یک تابع توزیع <sup>2</sup> (مربع کای<sup>7</sup>) است و لذا برای یک برازش کامل مقدار تابع عدم برازش درست برابر یک است (چون برازش درست برابر N) به صورت یک تابع توزیع <sup>2</sup> (مربع کای<sup>7</sup>) است و لذا برای یک برازش کامل مقدار تابع عدم برازش درست برابر یک است و این مقدار تابع مدم برازش (ما با میانگین صفر و ناهمبسته این باشد، تابع عدم برازش (ما با میانکین صفر و ناهمبسته باشد، تابع عدم برازش (ما بطه ۳–۱۱ یا معرم ۳–۱۱) به صورت یک تابع توزیع <sup>2</sup> (مربع کای<sup>7</sup>) است و لذا برای یک برازش کامل مقدار تابع عدم برازش درست برابر N) مقدار تابع مدم برازش درست برابر یک است (چون معنار می مقدار کامل مقدار تابع مدم در واقع در مان درست برابر N) مقدار عدم برازش برای مدل به دست آمده برابر N) است. در واقع در مقداری است که به واسطه آن مقدار عدم برازش برای مدل به دست آمده برابر N) وشد. این روش مقدار عدم برازش هدف برابر تعداد دادهها معاری مدل به دست آمده برابر N) وست. در واقع در مقداری است که به واسطه آن مقدار عدم برازش برای مدل به دست آمده برابر N) وشد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Normal distribution

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Uncorrlated

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Chi-square

اصل اختلاف را به طور کامل برای مسائل خطی تشریح نموده است. کانستیبل و همکاران [Constable et al., 1987] و اسمیت و بوکر [Smith and Booker, 1988]، این روش را در الگوریتم معکوسسازی یک بعدی دادههای مگنتوتلوریک به کار گرفتند.

در مسائل معکوس غیرخطی ژئوفیزیکی این روش در هر تکرار معکوسسازی به کار گرفته میشود. به طوری که در هر تکرار، مسئله معکوس به ازای مقادیر مختلف پارامتر منظمسازی حل میشود تا مقدار مناسب عدم برازش یا عدم برازش هدف که برابر مقدار دادهها یا در عمل همان کمترین مقدار عدم برازش است به دست آید. هر حل مسئله معکوس به ازای هر مقدار پارامتر منظمسازی در هر تکرار معکوس سازی نیاز به یک بار محاسبه عدم برازش دارد. در مسئله معکوس مگنتوتلوریک این محاسبه عدم برازش که به ازای هر مقدار پارامتر منظمسازی انجام میشود نیاز به محاسبات پیشرو با توجه به تعداد فرکانسها و تعداد مُدهای قطبش مورد نظر دارد.

در کار فرکوهارسون و الدنبرگ [Farquharson and Oldenburg, 2004] برای معکوسسازی یک-بُعدی دادههای الکترومغناطیس در تکرارهای اولیه معکوسسازی، مقدار عدم برازش هدف ( $\chi^2 = N$ ) به دست نیامده است و ساختارهای اضافه هم در تکرارهای اولیه ایجاد شده است. مقدار پارامتر منظم-سازی در این کار در واقع آن مقداری از  $\lambda$  که عدم برازش را کمینه می کند انتخاب می شود تا این که به مقدار عدم برازش هدف برسد. ساختارهای اضافه معمولاً زمانی در مدل ایجاد می شود تا این که پارامتر منظم سازی خیلی کوچک انتخاب شود و برای رفع این مشکل بهتر است که مقدار اولیه پارامتر منظم سازی بزرگ انتخاب شود و اجازه داده شود تا در تکرارهای بعدی این مقدار کاهش یابد. در این Farquharson and []

#### ۲-۵-۲-۲ روش GCV و GCV اصلاح شده

روش اعتبار سنجی تقاطعی ٔ روشی بر اساس منطق معروف "یک به یک خارج ساختن" ٔ است که وهبا [Wahba, 1990] آن را برای تخمین پارامتر منظمسازی مناسب، تعریف کرد. مطابق این منطق همه دادهها به جز داده لمام معکوس شده و پاسخ مدل به دست آمده از آنها به ازای یک پارامتر منظمسازی بر اساس سعی و خطا، به دست میآید. برای این که پارامتر منظمسازی منظور شده یک مقدار مناسب باشد مقدار لمامین داده به دست آمده از پاسخ مدل ذکر شده بایستی به مقدار مشاهده-ای داده نزدیک باشد. حال این روش میتواند تکرار شود یعنی در هر اجرا یکی از دادهها حذف و مابقی دادهها در معکوسسازی منظور شود و پاسخ مربوط به داده حذف شده از مدل به دست آمده محاسبه و با مقدار واقعی آن مقایسه شود. در این صورت پارامتر منظمسازی تخمینی بایستی یک محاسبه و با مقدار واقعی آن مقایسه شود. در این صورت پارامتر منظمسازی تخمینی بایستی یک مقدار مناسب برای تمامی دادهها باشد. در واقع تابع اعتبار سنجی تقاطعی یک تابع عادی<sup>۲</sup> است. این مهدینی یک بهبود در تابع عادی CV، یک تابع CV تعمیم یافته یا عمومی شده<sup>۴</sup> (GCV) را حاصل نموده است [000]

مسئله معکوس منظم شده مطابق تئوی تیخونف در رابطه (۱-۱) را همانند توابع هدف تعریف شده در فصل سوم برای این مسئله و با توجه به پارامترهای تعریف شده در آنجا میتوان به صورت زیر نوشت: (۱-۵)  $\Psi(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W}_{d}[\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m})]\|^{2} + \lambda^{2}\|\mathbf{W}_{m}[\mathbf{m} - \mathbf{m}_{0}]\|^{2}$ که در آن **b** بردار دادهها، **m** بردار پارامترهای مدل، ( $\mathbf{F}(\mathbf{m})$  تابع پیشرو،  $\mathbf{W}_{d}$  و  $\mathbf{W}_{m}$  به ترتیب ماتریسهای وزنی برای دادهها و پارامتر های مدل، ( $\mathbf{m}_{0}$  یک مدل مرجع و  $\lambda$  پارامتر منظمسازی است.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Cross Validation

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Leaving-out-one

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Ordinary

<sup>4-</sup> Generalized Cross-Validation

$$\mathbf{m}_{k+1} = \left[\lambda^2 \mathbf{W}_m + \mathbf{J}_k^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_d \mathbf{J}_k\right]^{-1} \mathbf{J}_k^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_d [\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}_k] + \mathbf{J}_k (\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_0)] + \mathbf{m}_0$$
(7- $\Delta$ )

که در آن **J** ژاکوبین یا ماتریس حساسیت است.

برای یک مسئله معکوس غیرخطی که معمولاً مطابق رابطه (۵–۲) به روش تکراری حل میشود. روش GCV را میتوان در هر تکرار معکوسسازی خطی شده به کار گرفت. لذا با در نظر گرفتن مسئله and de and de

$$GCV_{k+1}(\lambda) = \frac{\|\mathbf{w}_{d}\hat{\mathbf{d}} - \mathbf{w}_{d}\mathbf{J}_{k}\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{J}_{k}^{T}\mathbf{w}_{d}^{T}\mathbf{w}_{d}\hat{\mathbf{d}} + \mathbf{r})\|^{2}}{[trace(\mathbf{I} - \mathbf{w}_{d}\mathbf{J}_{k}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{J}_{k}^{T}\mathbf{w}_{d}^{T}]^{2}}$$
(\(\mathcal{T} - \Delta\))

که در آن

$$\begin{split} \mathbf{M}(\lambda) &= (\mathbf{J}_k^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_d^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_d \mathbf{J}_k + \lambda^2 \mathbf{W}_m^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_m), \quad \mathbf{r} = \lambda^2 \mathbf{W}_m^{\mathrm{T}} \mathbf{W}_m (\mathbf{m}_0 - \mathbf{m}_k), \quad \hat{\mathbf{d}} = \mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}_k] \\ & \text{ همچنین منظور از strace از ین رابطه مجموع عناصر روی قطر ماتریس میباشد. \\ & \bar{\mathbf{n}}$$
 i مقدار پارامتر منظمسازی که تابع GCV در رابطه (۵–۳) را کمینه می کند مقدار مناسب پارامتر منظمسازی در این روش است. پارامتر منظمسازی تخمین زده شده توسط این روش معمولاً در تکرار - های اولیه به مقدار نهایی آن نزدیک است [Walker, 1999]، که استفاده از این تخمینها باعث ظاهر شدن ساختارهای اضافه در مدل میشود. یک بهبود ساده در این روش به این صورت است که با وارد کردن یک پارامتر پایدار کننده در تابع GCV میتوان پایداری روش را افزایش داد. این روش به روش اصلاح شده GCV معروف است [Vio et al., 2004; Bauer and Lukas, 2011]. با وارد کردن پارامتر

پایدار کننده c در رابطه (۵–۳) رابطه اصلاح شده GCV به صورت زیر نوشته می شود:

$$GCV_{k+1}(\lambda) = \frac{\|\mathbf{w}_{d}\hat{\mathbf{d}} - \mathbf{w}_{d}J_{k}\mathbf{M}^{-1}(J_{k}^{T}\mathbf{w}_{d}^{T}\mathbf{w}_{d}\hat{\mathbf{d}} + \mathbf{r})\|^{2}}{[trace(I - cW_{d}J_{k}\mathbf{M}^{-1}J_{k}^{T}\mathbf{w}_{d}^{T}]^{2}}, c > 1$$
(F- $\Delta$ )

در مثالهای ارائه شده توسط باوئر و لوکاس [Bauer and Lukas, 2011]، 3 = c منظور شده است. در کار تحقیقی حاضر با آزمایشهای مختلف مقدار مناسب این پارامتر برای دادههای مصنوعی ۵ و برای دادههای واقعی ۲۵ منظور شده است.

L -۲-۵- روش منحنی

با حل یک مسئله معکوس خطی برای مقادیر مختلف پارامتر منظمسازی و رسم منحنی عدم برازش در مقابل نرم مدل در مقیاس لگاریتمی برای مقادیر متناظر با هر پارامتر منظمسازی، مشاهده می شود که یک منحنی با شکل L به دست میآید [Hansen, 1997]. شکل (۱-۵) یک حالت عمومی برای منحنی L را نشان میدهد. در گوشه این منحنی تغییر در مقدار پارامتر منظمسازی (λ) باعث تغییرات گابل توجهی در مقدار عدم برازش و نرم مدل می شود. در صورتی که در دو شاخه این منحنی برای  $\lambda$ بزرگتر از آن در گوشه منحنی، تغییر این پارامتر کاهش کوچکی در مقدار عدم برازش و افزایش بزرگی در نرم مدل ایجاد می کند. همچنین برای  $\lambda$  کوچکتر از مقدار آن در گوشه منحنی، تغییر  $\lambda$  یک افزایش کوچک در نرم مدل و یک کاهش بزرگ در مقدار عدم برازش ایجاد می کند. لذا مقدار ۸ در گوشه منحنی میتواند یک مقدار مناسب برای تعادل دو بخش تابع هدف یعنی عدم برازش و نرم مدل باشد. برای مسئله معکوس غیرخطی با بکارگیری این ایده در مسئله معکوس خطی شده در هر تکرار معکوسسازی پارامتر منظمسازی انتخاب میشود [Li and Oldenburg, 1999]. هر چقدر که روش تقريب مسئله معكوس غيرخطي مناسبتر باشد انتخاب پارامتر منظمسازي با اين روش نيز مناسبتر است. در روش منحنی L مسئله مهم الگوریتم یا طرح مناسب برای پیدا کردن گوشه منحنی و به طور  $\lambda$  متناظر یارامتر منظمسازی مربوط به گوشه منحنی است. یک الگوریتم معمول برای پیدا کردن متناظر با گوشه منحنی L پیدا کردن نقطه بیشترین انحنا در منحنی مربوطه است [ Hansen, 1997]. انحنای منحنی L شکل را می توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- The point of maximum curvature

$$C(\lambda) = \frac{\zeta \dot{\eta} - \zeta \ddot{\eta} \dot{\eta}}{[(\zeta)^{2} + (\eta')^{2}]^{3/2}}$$
 (\Delta-\Delta)

که در آن  $\eta = \log_{10} \Psi_{\rm m}$  و  $\zeta = \log_{10} \Psi_{\rm d}$  است. زمانی که منحنی L هموار و یا دارای گوشههای محلی باشد این الگوریتم در پیدا کردن پارامتر منظم-سازی بهینه مؤثر نخواهد بود [Hansen et al., 2007]. هنسن و همکاران [Hansen et al., 2007]، یک الگوریتم آرایش تطابقی ٰ برای پیدا کردن  $\lambda$  متناظر با گوشه منحنی L توسعه دادند. این الگوریتم بر پایه آراستن منحنی  ${
m L}$  برای حذف گوشه های محلی و مشخص کردن گوشه بهینه است. لذا در دو مرحله اجرا می شود، در مرحله اول گوشههای مختلفی با استفاده از منحنی در مقیاسهای مختلف محاسبه می شود سیس در مرحله دوم گوشه بهینه از بین آنها انتخاب می شود.



۵-۲-۴ روش تخمین خطا

برژینسکی و همکاران [Brezinski et al, 2008] روشهایی برای تخمین نرم خطا<sup>۲</sup> در حل سیستم معادلات خطی توسعه دادند. بر پایه این تخمینها روشهایی برای تقریب بهینه پارامتر منظمسازی

<sup>1</sup>- Adaptive pruning

<sup>2</sup>- Norm of error

در روش منظم سازی تیخونف توسعه داده شده است [ Reichel et al., 2009; Brezinski et al., ] در روش منظم سازی تیخونف توسعه داده شده است [ 2009]. اگر یک سیستم غیر تکین ( معادلات خطی به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \tag{(\mathcal{F}-\Delta)}$$

و اگر \*x یک تقریب مناسب از حل دقیق x باشد، بردار خطا به صورت \* $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^*$  تعریف می شود. این بردار خطا به مقدار باقیمانده یعنی \* $\mathbf{r} = \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}^*$  مربوط می شود. پس این امکان وجود ندارد که مقدار خطا از مقدار باقیمانده تخمین زده شود. اگر  $\|\mathbf{A}\|$  یا  $\|\mathbf{I}^{-1}\|$  معلوم باشد مقادیر  $\|\mathbf{A}\|/\|\mathbf{A}\|$  و  $\|\mathbf{r}\|$ . $\|\mathbf{A}^{-1}\|$  می توانند به عنوان تخمین هایی از  $\|\mathbf{e}\|$  در نظر گرفته شوند و بر این اساس می توان محدوده زیر را برای  $\|\mathbf{e}\|$  تعریف کرد:

 $\|\mathbf{r}\| / \|\mathbf{A}\| \le \|\mathbf{e}\| \le \|\mathbf{A}^{-1}\| . \|\mathbf{r}\|$ (Y- $\Delta$ )

اما این تخمینها نیاز به آگاهی از نرم ماتریس A یا معکوس آن دارد. همچنین در موارد زیادی این حدود تخمین دارای دقت کافی نیست. به همین منظور برژینسکی و همکاران [ ,Brezinski et al اورشهای تخمین مناسبی برای نرم خطا توسعه دادهاند. برای حل سیستم معادلات خطی با [2008] روشهای تخمین مناسبی برای نرم خطا توسعه دادهاند. برای حل سیستم معادلات خطی با شرایط ناجور<sup>۲</sup> که معمولاً از روش منظمسازی تیخونف استفاده میشود میتوان از روشهای تخمین نرم خطا به عنوان ملاکی برای انتخاب بهینه پارامتر منظمسازی در روش تیخونف استفاده کرد. در مطالعه حاضر از دو روش بر این اساس استفاده شده است. روش اول که به طور مستقیم از این ملاک-های تخمین نرم خطا برای انتخاب پارامتر منظمسازی در مسائل جورنشده استفاده میکند می تخمین نرم خطا برای انتخاب پارامتر منظمسازی در مسائل جورنشده استفاده میکند می می می مسئله جورنشده است. روش اول که به طور مستقیم از این ملاک-می می می در روش دوم استفاده این روش با نام روش تخمین خطا برژینسکی و همکاران خوانده می شود. در روش دوم استفاده از ملاک تخمین نرم خطا در حل منظم مسئله جورنشده به روش

- <sup>1</sup>- Non-singular
- <sup>2</sup>- Ill-condition

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Partial Lanczos bidiagonalization
شرايط ناجور است [Reichel et al., 2009]. اين روش نيز در اين مطالعه با نام روش تخمين خطاي

بر این اساس، یک روش سریع برای محاسبه پارامتر منظمسازی بهینه در روش منظمسازی تیخونف توسعه داده شده است [Belge et al., 2002; Bazan, 2008; Ito et al., 2008]. در برخی از روش ها توسعه داده شده است [Belge et al., 2002; Bazan, 2008; Ito et al., 2008]. در برخی از روش ها توسعه داده شده است [Belge et al., 2002; Bazan, 2008; Ito et al., 2008]. الکوریتم مورد استفاده در این مطالعه نیز بر همین اساس است. در این روش ها تابع مورد نظر 2008]. الکوریتم مورد استفاده در این مطالعه نیز بر همین اساس است. در این روش ها تابع مورد نظر مدف شدف میشود [, این موال الکوریتم مورد استفاده در این مطالعه نیز بر همین اساس است. در این روش ها تابع مورد نظر 2008]. الکوریتم مورد استفاده در این مطالعه نیز بر همین اساس است. در این روش ها تابع مورد نظر مدف مسئله معکوس) به عنوان تابعی از پارامتر منظم سازی است. با تعریف یک مقدار اولیه برای پارامتر منظمسازی است. با تعریف یک مقدار اولیه برای منظمسازی مسئله معکوس) به عنوان تابعی از پارامتر منظم سازی است. با تعریف یک مقدار اولیه برای منظمسازی به مسئله معکوس) به عنوان تابعی از پارامتر منظم سازی است. با تعریف یک مقدار اولیه برای منظمسازی بهینه اجرا نمود. این موسعه داده می مانی مسئله منظم شده به روش تیخونف (در اینجا تابع پارامتر منظمسازی است. با تعریف یک مقدار اولیه برای منظمسازی بهینه اجرا نمود. این روش یک روش ساده و سریع بوده و برای مسائل بزرگ مقیاس نیز منظم سازی بهینه اجرا نمود. این روش یک روش ساده و سریع بوده و برای مسائل بزرگ مقیاس نیز منظم سازی بهینه اجرا نمود. این روش یک روش ساده و سریع بوده و برای مسائل بزرگ مقیاس نیز منظم سازی بهینه اجرا نمود. این روش ها مثل روشی بر پایه منحنی L به طور غیر مستقیم از روش نقطه مناسب میباشد. در برخی از روش ها مثل روشی بر پایه منحنی L به طور غیر مستقیم از روش نقطه مناسب میارامتر منظم سازی بهینه امران و سرع بوده و برای مسائل بزرگ مقیاس نیز می برای محاسبه پارامتر منظم سازی به منحنی L به طور غیر مستقیم از روش نقطه مناسب میباشد. در برخی از روش ها مثل روش تکرار نقطه ثابت استفاده میشود (وال برای منظم مازی به منحنی L به طور می می منول مان برای منظم مازی به منحنی L به منور مان برای مان مانط مازی برای مازی مان مان مازی ماز مان مازی مان مان مازی مان مانم مازی مان مازی مازی مازم مازی

<sup>1</sup>- Fixed-point

ملاک شبه بهینگی در ابتدا توسط تیخونف و آرسنین [Glasko and Kriksin, 1984] و سپس توسط گلسکو و کریکسین [Glasko and Kriksin, 1984] برای مسائل معکوس پایدار پیشنهاد گردید. این روش هم از دسته روشهایی است که پارامتر منظمسازی را بدون اطلاع از سطح نوفه دادهها انتخاب میکند. اگر  $x_{\lambda}$  یک حل منظم از مسئله معکوس به روش تیخونف به ازای پارامتر منظمسازی  $\lambda$  باشد، پارامتر منظمسازی بهینه به روش شبه بهینگی از کمینه کردن تابع زیر به دست میآید:

$$Q = \lambda \left\| \frac{dx_{\lambda}}{d\lambda} \right\| \tag{9-\Delta}$$

# $(\chi^2)$ روش مربع کای ( $\chi^2$ )

روش مربع کای یک حالت بهبود یافته از روش اصل اختلاف است که توسط مید [Mead, 2008] توسعه داده شده است. در روش اصل اختلاف تابع عدم برازش برای تخمین پارامتر منظمسازی به صورت یک تابع توزیع مربع کای در نظر گرفته می شود در صورتی که در روش مربع کای، تابع منظم

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Quasi-optimality

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Truncated Singular Value Decomposition (TSVD)

شده عدم برازش<sup>۱</sup> یعنی کل تابع هدف منظم سازی شده به صورت تابع توزیع مربع کای برای تخمین این پارامتر منظور می شود. این روش به طور مفصل در مراجع [Mead, 2008] و [ Mead and ] ( Hammerquist, 2013 اشرح داده شده است. این روش در ابتدا برای مسائل معکوس خطی سپس برای مسائل معکوس غیرخطی توسعه داده شد. مید و همرکویست [ Hammerquist, 2013 ( مسائل معکوس غیرخطی توسعه داده شد. مید و همرکویست [ Mead and Hammerquist, 2013 روش مربع کای را برای دو مسئله معکوس غیرخطی یک بعدی شامل داده های مصنوعی مقاومتویژه حاصل از اندازه گیری های القای الکترومغناطیس و همچنین داده های مصنوعی توموگرافی بین چاهی<sup>۲</sup> به کار گرفتند. آن ها نتایج این روش را با نتایج به دست آمده از روش های اکام ( Constable et al., 1987] و لونبرگ –مارکوآرت [Marquart, 1963] مقایسه نمودند و نشان دادند که روش مربع کای نتایج بهتری نسبت به روش اصل اختلاف در آن الگوریتمها ارائه می دهد.

# ۵-۲-۸- روش مجو

Marquart, ] روش مجو [Meju, 1994] برای تخمین فاکتور تعدیل<sup><sup>\*</sup></sup> در مسئله معکوس مارکوآرت [Meju, 1994] روش مجو [1963] که نقشی همانند پارامتر منظمسازی در روش تیخونف را دارد، ارائه شد. این روش یک روش تجربی است. شیوه تخمین این فاکتور به این صورت است که بزرگترین و کوچکترین مقادیر ویژه ماتریس حساسیت را به ترتیب در ۱۰ و ۲۰۱ ضرب نموده تا مقادیر  $q_s$  و  $q_s$  به دست آیند، آنگاه مقدار  $q_k$  از رابطه زیر که معادله یک سهمی بر حسب k است به دست میآید:

$$q_{k} = [(100q_{s} - q_{l}) + (q_{l} - q_{s})k^{2}]/99, \quad k = 1, 2, 3, ..., 10$$
 (1.- $\Delta$ )

سپس مقدار فاکتور تعدیل (β) kم از مجذور  $q_k$  محاسبه میشود:

$$\beta = q_k^2 \tag{11-\Delta}$$

در این روش مسئله معکوس در هر تکرار به ترتیب با فاکتور تعدیل بزرگتر حل می شود سپس جواب آن به عنوان مدل اولیه برای حل با فاکتور تعدیل کوچکتر مورد استفاده قرار می گیرد و به همین

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Regularized misfit function

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Cross-well tomography

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Meju

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Damping factor

ترتیب هر تکرار معکوسسازی با ۱۰ فاکتور تعدیل حل میشود. این روش در مسائل معکوس دو و سه بعدی حتی با حجم متوسط هم بسیار زمان بر است. چرا که به ازای هر فاکتور تعدیل فرآیند معکوس سازی شامل حل پیشرو برای محاسبه عدم برازش، ساخت ماتریس حساسیت و حل معادلات خطی معکوس بایستی به طور کامل انجام شود. در این مطالعه بر اساس روش مجو یک طرح جدید برای تخمین پارامتر منظم سازی تعریف شده است. در این طرح پارامتر منظم سازی در تکرارهای اول، دوم و سوم به ترتیب از میانگین سه مقدار سوم، دوم و اول فاکتور تعدیل به دست آمده از رابطه (۵– ۱۱) در آن تکرارها تخمین زده می شود سپس این پارامتر در تکرارهای بعدی با یک نرخ کاهشی ۹۰ درصد کاهش می یابد.

۵-۲-۹- روش نسبت عدم برازش به نرم مدل

روش نسبت عدم برازش به نرم مدل در واقع بر اساس ایجاد یک تعادل بین عدم برازش و پایدار کننده (نرم مدل) است. با در نظر گرفتن تابع هدف مسئله معکوس در رابطه (۱–۱) و معادل آن در رابطه (۱–۵) پارامتر منظمسازی در هر تکرار معکوسسازی به صورت زیر تخمین زده می شود [-Xiao]: Bin et al., 2005]:

$$\lambda^{k} = \{\Psi_{d}^{(k-1)} / \Psi_{m}^{(k-1)}\}^{1/2}$$
(17- $\Delta$ )

که در آن k شماره تکرار معکوسسازی است. در صورتی که در معکوسسازی مدل اولیه به صورت یک در آن k شماره تکرار معکوسسازی است. در صورتی  $\Psi_m^0 = 0$  است و بایستی مقدار  $\lambda^1$  به صورت تجربی یک نیمفضای همگن در نظر گرفته شود آنگاه  $\Psi_m^0 = 0$  است و بایستی مقدار  $\lambda^1$  به صورت تجربی انتخاب شود. زیاو-بین و همکاران [Xiao-Bin et al, 2005] توانایی این روش را برای مسئله معکوس یک بُعدی مگنتوتلوریک در مثالهای مصنوعی نشان دادند. مشابه این روش توسط ژادانو و همکاران یک بُعدی مگنتوتلوریک در مثالهای مصنوعی نشان دادند. مشابه این روش توسط ژادانو و همکاران [Zhdanov et al, 2011] ست. در روش آنها برای تکرار اول معکوسسازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک دریایی به کار گرفته شده است. در روش آنها برای تکرار اول معکوسسازی، منظمسازی منظور نمی شود یعنی 0 =  $\lambda_0$  و اولین پارامتر منظمسازی  $\lambda_1$  الاست (4–1) به صورت زیر تخمین زده می شود:  $\lambda_1 = \{\|W_d(d - F(m_0))\|^2 / \|W_m(m_0 - m_r)^2 \}^{1/2}$ 

که در آن  $\mathbf{m}_r$  یک مدل مرجع است. در تکرارهای بعدی پارامتر منظمسازی به صورت زیر تخمین زده میشود:  $\lambda_k = \lambda_1 q^{k-1}, \ k = 1,2,3,.., 0 < q < 1$  (۱۴-۵) ضریب q در واقع نرخ کاهش پارامتر منظمسازی را تعریف میکند. این ضریب به طور تجربی تعیین میشود. **۵–۳– تحلیلهای عددی** 

۵–۳–۱– دادههای مصنوعی

الف – مثال اول

در ابتدا توانایی روشهای انتخاب پارامتر منظم سازی در معکوس سازی دوب عدی داده های مگنتو تلوریک با به کار گرفتن در یک مثال مصنوعی ساده تشریح می شود. شکل (۵-۲-الف) یک مدل ساده دوب عدی حاوی توپوگرافی است که در آن یک توده رسانا با مقاومت ویژه ۱۰ اهم -متر در یک زمینه با مقاومت -ویژه ۱۰۰ اهم -متر قرار گرفته است. این مدل مطابق مدل طراحی شده در کار لی و همکاران [ Lee et ویژه ۱۰۰ اهم -متر قرار گرفته است. این مدل مطابق مدل طراحی شده در کار لی و همکاران [ Lee et 2009a است. برای تولید داده های مصنوعی، ۴۱ ایستگاه مجازی برای اندازه گیری داده های مصنوعی مگنتو تلوریک با فواصل ۵۰۰ متر در طول پروفیل، طراحی شده است. در تمامی ایستگاه ها مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز برای دو مُد قطبش TE و TT در ۲۱ فرکانس از ۱۰۰/۰ تا ۱۰۰۰ دو ور (۴ فرکانس در هر دهه) با استفاده از مدل سازی پیشرو توسط برنامه ژئو تولز <sup>۱</sup> [ Lee et al 2009a هر تز (۴ فرکانس در هر دهه) با استفاده از مدل سازی پیشرو توسط برنامه ژئو تولز <sup>۱</sup> [ 2009a

با طرح یک شبکه مناسب برای پارامترهای مدل و تنظیم دیگر فاکتورهای معکوسسازی، فرآیند معکوسسازی دوبُعدی با استفاده از کدهای کامپیوتری نوشته شده برای ۱۲روش انتخاب پارامتر منظمسازی مذکور، روی این دادهها انجام شده است. علی رغم این که ممکن است در برخی آزمایش-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Geotools MT AOA Geophysics Inc

ها معکوسسازی در تکرارهای اولیه به مدل مورد نظر همگرا شود ولی برای بررسی روش انتخاب پارامتر منظمسازی در تخمین این پارامتر اجازه داده شده است تا کلیه آزمایشها، تا تکرار دهم ادامه یابد.



شکل (۵-۲): الف – یک مدل مصنوعی مطابق مدل منظور شده توسط لی و همکاران [Lee et al., 2009a]، این مدل شامل یک توده رسانا با مقاومتویژه ۱۰ اهم –متر در یک زمینه با مقاومتویژه ۱۰۰ اهم متر است. مثلثهای وارون موقعیت ایستگاههای مجازی مگنتوتلوریک را نشان میدهند. ب – مدل معکوس دوبُعدی به دست آمده با استفاده از روش GCV بهبود یافته (RMS=0.08) ج – مدل معکوس دوبُعدی به دست آمده با استفاده از روش شبه بهینگی (RMS=0.11)

شکل (۵–۲) و همچنین جدول (۵–۱) نتایج این معکوسسازیها را نشان میدهند. در برخی از روش-ها مقادیر محاسبه شده برای پارامتر منظم سازی در تکرارهای اولیه، مقادیری بسیار کمتر از مقادیر مناسب این پارامتر هستند و این مقادیر باعث می شود که ادامه معکوس سازی با مشکل مواجه گردد. لذا بر اساس کار فرکوهارسون و الدنبرگ [Farquharson and Oldenburg, 2004] برای حل این

مشکل از یک طرح کنترلی با نام خنکسازی مدل <sup>(</sup> استفاده شده است. در این طرح مقدار پارامتر منظمسازی (۸) در تکرار k+1م به صورت زیر انتخاب می شود:

$$\lambda_{k+1} = \max\left(q\lambda_k, \lambda^*\right) \tag{12-a}$$

که در آن  $0.0 \ge q \ge 10.0$ ،  $\lambda_k$  پارامتر منظمسازی در تکرار کام و  $\lambda^*$  مقدار پارامتر منظمسازی انجام شده در محاسبه شده از روش انتخاب پارامتر منظمسازی است. در آزمایشهای معکوسسازی، به استثنای آزمایشهای این مطالعه 2.0 = q منظور شده است. در کلیه آزمایشهای معکوسسازی، به استثنای آزمایشهای انجام شده در انجام شده با استفاده از روشهای نسبت عدم برازش به نرم مدل و طرحی بر اساس روش مجو از رابطه (۵–۱۵) استفاده شده است. در جدول (۵–۱) مقادیر پارامتر منظمسازی منظور شده در رابطه (۵–۱۵) استفاده شده است. در جدول (۵–۱) مقادیر پارامتر منظمسازی منظور شده در رابطه (۵–۱۵) استفاده شده است. در جدول (۵–۱) مقادیر پارامتر منظمسازی منظور شده در معکوسسازی یعنی مقادیر بارامتر منظمسازی منظور شده در بابطه (۵–۱۵) استفاده شده است. در جدول (۵–۱) مقادیر پارامتر منظمسازی منظور شده در رابطه (۵–۱۵) و مقادیر بارامتر منظمسازی معکوسسازی یعنی مقادیر به دست آمده با استفاده از رابطه (۵–۱۵) و مقادیر پارامتر منظمسازی محکوسسازی دوش می محو از محاسبه شده از روش به کار گرفته شده، نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر پارامتر منظمسازی برخی روشها به کار گرفته شده، نشان داده شمه است. با مقایسه مقادیر پارامتر منظمسازی محکوس ازی یعنی مقادیر به کار گرفته شده، نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر پارامتر منظمسازی برخی روشها بسیار به هم نزدیک باشد. مثلاً مدلهای معکوس تولید شده (در تکرار دهم) برای برخی روشها بسیار به هم نزدیک باشد. مثلاً مدلهای به دست آمده برای روشهای اصل اختلاف، برخی روشها بسیار به هم نزدیک باشد. مثلاً مدلهای به دست آمده برای روشهای اصل اختلاف، برخی روش ها بسیار به هم نزدیک باشد. مثلاً مدلهای به دست آمده برای روشهای اصل اختلاف، همچنین مدلهای به دست آمده برای روشهای اصل اختلاف، محکول و همکاران، طرحی بر اساس روش مجو، شبه بهینگی، عدم براز من مدل مدل و مربع کای همدان به می مدل و مربع کای هستند. همچنین مدلهای به دست آمده برای روش های مدل و مربع کای خطا ریچل و همکاران، طرحی بر اساس روش مجو، شبه بهینگی، عدم برازش مدل و مربع کای تقریباً مثل هم میباشند. مقادیر تخمین زده مده با استفاده از روش منحنی کا با الگوریتم آرایش مدل و ای مدل و می مدن از می مدن از مدل مان و مده با استفاده از روش مان و مدل و مدل و مدل و مدی مده ها استفاده از روش مدل و مدل و مدل و مدل و مدل و مد

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Cooling-schedule-type

روشهای مختلف این امر ثابت می شود. به همین منظور در شکل (۵-۲) فقط مدل های معکوس با استفاده از روشهای GCV بهبود یافته و شبه بهینگی نشان داده شده است.

جدول (۵-۱): مقادیر پارامتر منظمسازی برای روشهای مختلف انتخاب این پارامتر در معکوسسازی دوبُعدی دادههای مصنوعی حاصل از مدل نشان داده شده در شکل (۵-۲-الف). مقادیر پارامتر منظمسازی "منظور شده" یعنی آن مقادیری که با استفاده از طرح کنترلی (رابطه ۵–۱۵) این پارامتر در معکوسسازی منظور شده است. همچنین منظور از مقادیر پارامتر منظمسازی "محاسبه شده از روش" یعنی آن مقادیری که به طور مستقیم از روش مورد نظر به دست

روش انتخاب پارامتر	پارامتر منظمسازی در تکرارهای ۱ تا ۱۰													
منظمسازى	شماره تكرار	١	٢	٣	۴	۵	۶	٧	٨	٩	١٠			
ini 1 1	منظور شده	٢	١	۰/۵	۳/ ۰	۰/۲۹	۰/۲۹	•/٢٩	٠/٢٩	٠/٢٩	۰/۲۹			
اصل احتلاف	محاسبه شده از روش	۰/۲۹	۰۳۱	٠/٣٠	۰ /۳ ۰	۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹			
COV	منظور شده	۴	٢	١	۰/۵	۰/۲۵	۰/۱۲	٠/١	٠/١	٠/١	• / ١			
GUV	محاسبه شده از روش	۰/۳۱	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	•/\	٠/١	٠/١			
	منظور شده	۴	٢	١	۰/۵	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۱۶	٠/١	٠/١			
٥٠٠٠٠ بهبود يافنه	محاسبه شده از روش	١	۰ ۳۱	۰/۳۱	٠/١	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۱	٠/١	٠/١	٠/١			
منحنى L با الگوريتم	منظور شده	۴	٢	١	۰/۵	۰/۲۵	۰/۱۲	•/•۶	۰/۵	٠/٢۵	۰/۱۲			
بيشترين انحنا	محاسبه شده از روش	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	۰/۵	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱			
منحنی L با الگوریتم	منظور شده	۴	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣			
آرایش تطابقی	محاسبه شده از روش	۵	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣			
تخمين خطا برژينسكي و	منظور شده	٢	۴/۸۶	۴/۸۶	۴/٨۶	٧/۴٩	۱.	١٠	١.	۱۰	١٠			
همكاران	محاسبه شده از روش	١	۴/۸۶	۴/۸۶	۴/٨۶	٧/۴٩	١.	١.	١٠	١٠	١٠			
تخمين خطا ريچل و	منظور شده	٢	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰			
همكاران	محاسبه شده از روش	۵/۶۸	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰			
نقطه ثابت	منظور شده	٢	١	•/94	• 199	• /97	۰/۵۹	•/۵Y	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۵۵			
لفظه تابت	محاسبه شده از روش	٠/٣٧	•/44	•/94	• 199	• /97	۰/۵۹	۰/۵۷	٠/۵٧	۰/۵۶	۰/۵۵			
۳	منظور شده	۴	۴/۱۸	4/21	4/22	۴/۲۳	4/74	4/74	۴/۲۵	4/20	۴/۲۵			
سبه بهيىدى	محاسبه شده از روش	۴/۲۳	۴/۱۸	۴/۲۱	4/22	۴/۲۳	4/74	4/74	۴/۲۵	۴/۲۵	۴/۲۵			
(2) 15	منظور شده	٢	۱/۵۷	۲/۸۳	۲/۶۸	۳/۱۹	7/87	۲/۹٩	۳/۰ ۱	۳/۲ ۱	۳/۵۲			
مربع تای ( 🗶 )	محاسبه شده از روش	•/••۶	۱/۵۷	۲/۸۳	۲/۶۸	۳/۱۹	7/87	۲/۹٩	۳/۰ ۱	۳/۲ ۱	۳/۵۲			
طرحی بر اساس	روش مجو	۳۵/۰۹	۱۵	۴/۲	۳/۷۸	٣/۴	۳/۰۶	۲/۷۵	۲/۴۸	۲/۲۳	۲			
نسبت عدم برازش	به نرم مدل	۴/۲۳	۶/۳۲	۴/۱۷	۲/۸۱	۱/۸۶	1/17	۰/۷۱	•/۴۶	۰/۳۴	٠/٢٨			

آمدہ است

برای بررسی بهتر روشهای مختلف انتخاب پارامتر منظمسازی، روند تغییر مقادیر توابع عدم برازش و نرم مدل در تکرارهای مختلف معکوسسازی نیز بررسی میشود. شکل (۵–۳) تغییرات عدم برازش و نرم مدل را در تکرارهای مختلف معکوسسازی برای کلیه آزمایشها نشان میدهد. لازم به ذکر است که در این الگوریتم [Lee et al., 2009a] از تبدیل لگاریتم طبیعی برای دادههای مقاومتویژه و پارامترهای مدل (مقاومتویژه) و همچنین از تبدیل رادیان برای دادههای فاز استفاده میشود. در شکل (۵–۳) از مقدار RMS (جذر میانگین مربعات) دادههای تبدیل یافته برای مقدار عدم برازش و از  $W_{\rm m} = \lambda$  ماتریس ناهمواری مشتقات مرتبه دوم است) به عنوان یک پایدار کننده معادل با نرم مدل استفاده ماتریس ناهمواری مشتقات مرتبه دوم است) به عنوان یک پایدار کننده معادل با نرم مدل استفاده شده است. به همین خاطر محور قائم نمودارها در این شکل برای توابع عدم برازش و نرم مدل یکسان در نظر گرفته شده است (البته مقادیر RMS محاسبه شده برای مدلهای نهایی در این مثال و مثال مای بعدی که در زیر شکل مربوطه آمده است بر اساس دادههای اصلی (تبدیل نیافته) میباشد). در مال بعدی که در زیر شکل مربوطه آمده است بر اساس دادههای اصلی (تبدیل نیافته) میباشد). در مال بعدی که در زیر شکل مربوطه آمده است بر اساس دادههای اصلی (تبدیل نیافته) میباشد). در مالت کلی کاهش مقادیر عدم برازش و نرم مدل (در شکل ۵–۳) از تکرارهای اولیه به طرف تکرارهای منظم حالت کلی کاهش مقادیر عدم برازش و نرم مدل (در شکل ۵–۳) از تکرارهای اولیه به طرف تکرارهای ای به عنوان منظم سازی را نشان دهد. اگر چه در حالت کلی تقریباً در همه روشها این روش انتخاب پارامتر منظم- سازی را نشان دهد. اگر چه در حالت کلی تقریباً در همه روشها این روند مشاهده میشود ولی با توجه به این که این مثال یک مدل مینوعی ساده و بدون منظور نمودن نوفه است، اختلافات جزئی در روند منحنیهای عدم برازش و نرم مدل میتواند قابل ملاحظه باشد. همچنین باید توانایی بازیابی بریابی بر روند منحنیهای عدم برازش و نرم مدل میتواند قابل ملاحظه باشد. همچنین باید توانایی بازیابی در روند منحنیهای عدم برازش و نرم مدل میتواند قابل ملاحظه باشد. همچنین باید توانایی بازیابی در موند منظر باشد.



تغییرات عدم برازش و خط بریده نشان دهنده تغییرات نرم مدل است)

#### ب- مثال دوم

در این مثال توانایی روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی در معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک با یک مدل مصنوعی تقریباً پیچیده بررسی میشود. شکل (۵-۴-الف) یک مدل مصنوعی را مشابه با مدل طراحی شده توسط ساساکی [Sasaki, 1989] نشان میدهد. در این مدل یک لایه رسانای ناپیوسته با مقاومتویژه ۵ اهم-متر در یک زمینه با رسانایی متوسط (مقاومتویژه ۵۰ اهم- متر) قرار گرفته است. در این مدل همچنین یک آنومالی رسانا با مقاومتویژه ۱۰ اهم-متر و یک آنومالی مقاوم با مقاومتویژه ۱۰۰ اهم-متر درست در بخش فوقانی مدل قرار گرفتهاند. برای تولید دادههای مصنوعی ۱۰ ایستگاه مجازی مگنتوتلوریک با فواصل ۲۰۰۰ متری در طول پروفیل طراحی شده است. در تمامی ایستگاهها مقادیر مقاومتویژه ظاهری و فاز برای دو مُد قطبش TT و TT در ۹ فرکانس (۰/۱، ۲/۲۰، ۵/۱، ۱، ۲/۲، ۵، ۱۰، ۲۲ و ۵۰ هرتز) با استفاده از مدلسازی پیشرو اورکانس (۱/۱، ۲/۲۰، ۵/۱، ۱، ۲/۲، ۵، ۱۰، ۲۲ و ۵۰ هرتز) با استفاده از مدلسازی پیشرو اورکانس (۱/۱، ۲/۲۰، ۵/۱، ۱، ۲/۲، ۵، ۱۰، ۲۲ و ۵۰ هرتز) با استفاده از مدلسازی پیشرو اورکانس (۱/۱، ۲/۲۰، ۵/۱، ۱، ۲/۲، ۵، ۲۰۱، ۲۲ و ۵۰ هرتز) با استفاده از رملسازی پیشرو اورکانس (۱/۱، ۱۰٫۲۲۰، ۵/۱، ۱، ۲/۲، ۵، ۱۰، ۲۲ و ۵۰ هرتز) با استفاده از رملسازی پیشرو اورکانس (۱/۱، ۱۰٫۲۲۰، ۵/۱، ۱، ۲/۱، ۵، ۱۰، ۲۲ و ۵۰ هرتز) با استفاده از روشهای اورکانس (۱/۱، ۱۰٫۲۲۰، ۵/۱، ۱، ۲/۱، ۵، ۱۰، ۲۲ و ۵۰ هرتز) با استفاده از روشهای اورکانس (۱/۱، ۱۰٫۲۲۰، ۵/۱، ۱، ۲/۱، ۵، ۱۰، ۲۲ و ۵۰ هرتز) با استفاده از روشهای این مثال قبل پس از تنظیم پارامترهای لازم فرآیند معکوسسازی دوبُعدی با استفاده از روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی شامل ۱۲ روش، روی این دادهها انجام شده است. البته روش مربع کای در این مثال قادر به محاسبه پارامتر منظمسازی نبوده و معکوسسازی در همان تکرار اول متوقف می-شود. در این مثال نیز برای بررسی بهتر اجازه داده شده است تا کلیه آزمایشها تا تکرار دهم ادامه یابد. شکل (۵–۴) و همچنین جدول (۵–۲) نتایج این معکوسسازیها را نشان میدهند.

با مقایسه مقادیر پارامتر منظمسازی تخمین زده شده از روشهای مختلف (جدول ۵–۲) باید مدلهای معکوس تولید شده (در تکرار دهم) برای برخی روشها بسیار به هم نزدیک باشد. به همین منظور در شکل (۵–۴) فقط مدلهای معکوس با استفاده از روشهای اصل اختلاف و تخمین خطا ریچل و همکاران نشان داده شده است. با توجه به این شکل دیده میشود که مدل مربوط به روش اصل اختلاف به طور بسیار بهتری نسبت به روش ریچل و همکاران مدل مصنوعی متناظر را بازیابی نموده است. مطابق جدول (۵–۲) روشهایی که نتایجی مشابه با نتایج به دست آمده برای روش اصل اختلاف حاصل نمودهاند در واقع مدلی مشابه با این روش هم ارائه دادهاند. بحث بیشتر در خصوص مقایسه روشهای مختلف انتخاب پارامتر منظمسازی پس از آزمایشهای مدلسازی برای دادههای واقعی ارائه می گردد.



شکل (۵-۴): الف – یک مدل مصنوعی مطابق مدل منظور شده توسط ساساکی [Sasaki, 1989]، این مدل شامل یک لایه رسانا گسل خورده با مقاومتویژه ۵ اهم – متر است که در یک محیط زمینه با رسانایی متوسط قرار گرفته است. این مدل همچنین دارای یک توده رسانا و یک توده مقاوم است که درست در زیر سطح قرار گرفتهاند. مثلثهای وارون موقعیت ایستگاههای مجازی مگنتوتلوریک را نشان میدهند. ب – مدل معکوس دوبعدی به دست آمده با استفاده از روش اصل اختلاف (۵.6 = RMS) ج – مدل معکوس دوبعدی به دست آمده با استفاده از روش تخمین خطا ریچل و همکاران (RMS = 0.85)

جدول (۵-۲): مقادیر پارامتر منظمسازی برای روشهای مختلف انتخاب این پارامتر در معکوسسازی دوبُعدی دادههای مصنوعی حاصل از مدل نشان داده شده در شکل (۵-۴-الف). مقادیر پارامتر منظمسازی "منظور شده" یعنی آن مقادیری که با استفاده از طرح کنترلی ( رابطه ۵-۱۵) این پارامتر در معکوسسازی منظور شده است. همچنین منظور از مقادیر پارامتر منظمسازی "منظمسازی "مورد نظر به دست از مقادیر پارامتر منظمسازی "منظمسازی "مورد نظر به دست از مقادیر پارامتر منظمسازی "

	روش انتخاب پارامتر										
١٠	٩	٨	۷	۶	۵	۴	٣	٢	١	شماره تكرار	منظمسازى
٠/٩٧	۰/۹۷	٠/٩٧	۰/۹۶	۰/٩۶	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۳	١/١	٢	منظور شده	6NI-21 1.1
۰/۹۷	٠/٩٧	٠/٩٧	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۳	١/١	•/٨	محاسبه شده از روش	اصل احتلاف
٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	•/1۲	۰/۲۵	۰/۵	١	۲	۴	منظور شده	COV
٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	• / ١	٠/١	محاسبه شده از روش	GUV
۰/۳۲	۰/۳۲	٠/٣٢	۰/۳۲	•/٣٢	۰/۵	١	١	٢	۴	منظور شده	di il. N. d. GCV
٠/٣٢	٠/٣٢	٠/٣٢	٠/٣٢	۰/۳۲	٠/٣٢	١	٠/٣٢	۰/۳۲	٠/٣٢	محاسبه شده از روش	٢ ٥٠ بهبود يافنه
۷	۰/۱	۰/۰۳	•/•۶	٠/١٢	٠/٢۵	۰/۵	١	۲	۴	منظور شده	منحنی L با الگوریتم
۷	٠/١	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	۰/۰۱	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	محاسبه شده از روش	بيشترين انحنا
٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٣	۴	منظور شده	منحنی L با الگوریتم
٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٣	٣	محاسبه شده از روش	آرایش تطابقی
١	١	١	١	١	١	١	١	٢	۴	منظور شده	تخمين خطا برژينسكي
١	١	١	١	١	١	١	١	١	۱/۱۵	محاسبه شده از روش	و همکاران
۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۳/۶۸	۴	منظور شده	تخمين خطا ريچل و
۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	۲۰/۹۶	٣/۶٨	۲/۶۸	محاسبه شده از روش	همكاران
۱/۱۳	۱/۲۱	۱/۳۰	۱/۴۰	۱/۵۰	1/88	۱/۲۴	۱/۶۸	١	٢	منظور شده	ت اف دامة:
۱/۱۳	۱/۲۱	۱/۳۰	۱/۴۰	۱/۵۰	1/87	۱/۲۴	۱/۶۸	۰/۰۳	۰/۰۲	محاسبه شده از روش	نقطه تابت
۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰ ۱	٢	۱/۹۲	١/٩٧	۱/۹۲	٢	۴	منظور شده	Ē i î
۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰ ۱	٢	۱/۹۲	١/٩٧	۱/۹۲	1/88	1/54	محاسبه شده از روش	سبە بھيىتى
٠/٧٩	۰/٨٨	٠/٩٨	۱/۰۹	۱/۲۱	1/84	۱/۴۹	1/88	۵/۵۳	۱۲/۷۸	ں روش مجو	طرحی بر اساس
۰/۰ ۱	•/• ٢	•/• ۴	•/•9	٠/١٣	۰/۳	•/87	۱/۱۳	۲/۹۹	۱/۵۴	ی به نرم مدل	نسبت عدم برازش

آمدہ است

### ۵-۳-۲ دادههای واقعی

#### الف – مثال اول

در اینجا آزمایشهای معکوسسازی و بررسی روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی برای یک دسته داده واقعی مگنتوتلوریک انجام میشود. همچنین نتایج این آزمایشها با نتایج معکوسسازی به دست آمده با استفاده از روش متعادلسازی قید فعال (ACB) مقایسه میشود. دادههای مورد مطالعه در اینجا شامل ۹ ایستگاه اندازه گیری مگنتوتلوریک روی یک پروفیل در منطقه زمین گرمایی سبلان در استان اردبیل میباشد. این دادهها در فصل چهارم این پایاننامه در بخش ۴–۳–۲ بررسی شدهاند. همچنین در فصل ششم به طور مفصل تر با نام پروفیل P01 بررسی خواهند شد. شکلهای (۵–۵)، (۵–۶) و (۵–۷) و همچنین جدول (۵–۳) نتایج آزمایشهای معکوسسازی با استفاده از روشهای مختلف انتخاب پارامتر منظمسازی را برای دادههای مگنتوتلوریک منطقه سبلان (پروفیل P01) نشان میدهند. در ضمن در دادههای واقعی، آزمایشهای معکوسسازی با استفاده از روش ACB نیز علاوه بر روشهای قبل انجام شده است. همچنان که قبلاً گفته شد در روش منظم-سازی ACB بایستی کمترین و بیشترین مقادیر برای پارامتر منظمسازی به طور تجربی انتخاب شود. لذا نیاز است چندین جفت پارامتر منظمسازی به عنوان کمترین و بیشترین مقدار  $\Lambda$  در اجراهای مختلف معکوسسازی آزمایش شود تا یک مدل مناسب از نظر مقدار عدم برازش یا هم خوانی پاسخها با دادههای مشاهدهای و همچنین از نظر نرم مدل که مشخص کننده پایداری مدل است به دست آید. در اینجا پس از چند آزمایش مقادیر  $\Lambda$  و ۱۵ به ترتیب به عنوان کمترین و بیشترین مقدار مناسب پارامتر منظمسازی به دست آمده است. شکل (۵–۵–ج) مدل حاصل از معکوسسازی دادههای واقعی

با توجه به مقادیر پارامتر منظمسازی در جدول (۵–۳) دیده میشود که برخی از روشها از جمله روشهای GCV و منحنی L با الگوریتم بیشترین انحنا قادر به تخمین پارامتر منظمسازی مناسب در این دادههای واقعی نیستند. به طوری که مقادیر تخمینی توسط این روشها، در حدود مقادیر تخمین زده شده توسط آنها در دادههای مصنوعی دو مثال قبل است. به همین خاطر معکوسسازی توسط این روشها در تکرارهای میانی به سمت مدلهایی با نرم و عدم برازش بسیار بالا منحرف میشود و در ادامه متوقف میشود. برخی از روشها مثل روش ریچل و همکاران نیز با تخمین پارامتر منظم-سازی با مقادیری بسیار بالاتر از حد مناسب باعث جلوگیری از کاهش مقدار عدم برازش شده به اندازه کافی میشوند و لذا مدل مناسب تولید نمیشود. در تعدادی از روشها نیز مثل روش منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی، مقدار پارامتر منظمسازی تا حدودی کمتر از حد مناسب تخمین زده شده واقعی در مدل ایجاد شود. تجزیه و تحلیل بیشتر نتایج روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی پس از تکمیل آزمایشها با یک دسته داده واقعی دیگر ارائه خواهد شد.



شکل (۵-۵): مدلهای حاصل از معکوس سازی دوبُعدی دادههای مقاومتویژه ظاهری و فاز هر دو مُد TE و TM از پروفیلPO1 منطقه سبلان الف- با استفاده از روش GCV بهبود یافته (RMS = 3.61) ب- با استفاده از منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی (RMS = 3.21) و ج- با استفاده از روش ACB (RMS = 3.57)



شکل (۵–۶): مقایسه شبه مقاطع دادههای مشاهدهای مقاومتویژه ظاهری و فاز مُد TE و پاسخ متناظر از مدلهای معکوس شکل (۵–۵)



شکل (۵–۷): مقایسه شبه مقاطع دادههای مشاهدهای مقاومتویژه ظاهری و فاز مُد TM و پاسخ متناظر از مدلهای معکوس شکل (۵–۵)

جدول (۵-۳): مقادیر پارامتر منظمسازی برای روشهای مختلف انتخاب این پارامتر در معکوس سازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک پروفیل P01 در منطقه سبلان. مقادیر پارامتر منظمسازی "منظور شده" یعنی آن مقادیری که با استفاده

	الساري المحاصبة الساء أز روش العلي أن مفاديري حد به طور مستقيم أز روش مورد لطر به ناسب المناه السب										
				۱ تا ۱۰	تكرارهاى	مسازی در	امتر منظم	پار			روش انتخاب
١٠	٩	٨	γ	۶	۵	۴	٣	٢	١	شماره تكرار	پارامتر منظمسازی
۵/۷۷	۵/۸۰	۵/۲۸	۵/۸۲	۵/۸ ۱	۵/۸۹	۵/۸۸	8/14	۷/۵	۱۵	منظور شده	551= ÷ 1 = 1 = 1
۵/۷۷	۵/۸۰	۵/۲۸	۵/۸۲	۵/۸۱	۵/۸۹	۵/۸۸	8/14	۶/۲۲	۵/۷۲	محاسبه شده از روش	اصل احتلاق
٠/١	۰/۱	۰/۱۳	٠/٢٧	۰/۵۴	۱/• ۸	۲/۱۶	۴/۳۳	٨/۶۶	۱۷/۳۲	منظور شده	CCV
٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	•/١	٠/١	٠/١	•/١	٠/١	محاسبه شده از روش	GC V
۶	۶	٧	γ	٨	٩	١٠	۱۷/۳	۱۷/۳	14/1	منظور شده	
۶	۶	٧	γ	٨	٩	١٠	۱۷/۳	۱۷/۳	۶	محاسبه شده از روش	۷ ۵۰ بهبود یافنه
٠/١٢	٠/٢۵	۰/۵	١	١	۰/۹۴	١/٨٧	۳/۷۵	۷/۵	۱۵	منظور شده	منحنی L با الگوریتم
۰/۰ ۱	۰/۱	۰/۰ ۱	١	١	•/\	٠/١	۰/۰ ۱	•/١	• / ١	محاسبه شده از روش	بيشترين انحنا
٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	۴	۷/۵	۱۵	منظور شده	منحنی L با الگوریتم
٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	۴	۴	۴	محاسبه شده از روش	آرایش تطابقی
١٠	١٠	١.	١٠	١٠	١٠	١٠	۳/۷۵	۷/۵	۱۵	منظور شده	تخمين خطا
١	۱۰	١٠	١٠	١.	١٠	١٠	١٠	١	1/10	محاسبه شده از روش	برژینسکی و همکاران
37/37	۲۷/۱۳	۲۵/۳۵	۲۳/۰۵	۲۰/۹۶	۱۹/۰۶	۱۳/۵۷	۱۳/۵۷	γ/۵	۱۵	منظور شده	تخمين خطا ريچل و
37/37	۲۷/۱۳	۲۵/۳۵	۲۳/۰۵	۲۰/۹۶	۱۹/۰۶	۱۳/۵۷	۱۳/۵۷	۳/٩٢	۲/۶۲	محاسبه شده از روش	همكاران
۵/۴۴	۵/۴۶	۵/۴۶	۵/۴۹	۵/۴۴	۵/۲۴	۳/۰۱	۳/۷۵	V/۵	۱۵	منظور شده	تقولو ثارين
۵/۴۴	۵/۴۶	۵/۴۶	۵/۴۹	۵/۴۴	۵/۲۴	۳/۰۱	۰/۸ ۱	٠/٢٧	۰/۲۵	محاسبه شده از روش	نقطه تابت
۱۰/۹۸	۱۰/۹۷	۱۰/۶۹	۲۰/۳۶	۱۰/۰ ۱	۹/۵۸	۹/۰۵	٨/٢۵	۷/۵۱	۱۵	منظور شده	E
۱۰/۹۸	۱٠/٩٧	۱۰/۶۹	۱۰/۳۶	۱۰/۰۱	۹/۵۸	۹/۰۵	۸/۲۵	۷/۵۱	٧/۴٧	محاسبه شده از روش	سبه بهیندی
37/84	4/04	4/49	۴/۹۹	۵/۵۵	۶/۱۶	۶/۸۵	٧/۶١	۲۸/۳۵	۶١/٩٠	س روش مجو	طرحی بر اسا
٣/٩٣	۴/۴۵	۵/۰۶	۵/۷۹	8/84	V/V	٩/٠٧	۵ ۱۱/۰	10/40	٧/۴٧	ش به نرم مدل	نسبت عدم براز

از طرح کنترلی (رابطه ۵–۱۵) این پارامتر، در معکوسسازی منظور شده است. همچنین منظور از مقادیر پارامتر منظم-سازی "محاسبه شده از روش" بعنی آن مقادیری که به طور مستقیم از روش مورد نظر به دست آمده است

با توجه به مدلهای به دست آمده از معکوسسازی با استفاده از GCV بهبود یافته (شکل ۵–۵–الف) و منحنی L (شکل ۵–۵–ب) دیده میشود که مدل به دست آمده برای GCV بهبود یافته دارای تطابق بیشتری با مدل به دست آمده با روش ACB است. این موضوع با توجه به جدول (۵–۳) و مقایسه مقادیر پارامتر منظمسازی به دست آمده برای روشهای GVC بهبود یافته و منحنی L در تکرارهای مختلف معکوسسازی به خوبی قابل تفسیر است. مقادیر پارامتر منظمسازی به دست آمده در تکرارهای مختلف معکوسسازی به خوبی قابل تفسیر است. مقادیر پارامتر منظمسازی به دست آمده یک دسته داده واقعی معکوسسازی برای روش GCV بهبود یافته از نظر تجربی برای معکوسسازی یک دسته داده واقعی مقادیری مناسب بوده و دیده میشود که به مقادیر مناسب مربوط به روش ACB بسیار نزدیک هستند. نکته دیگر در خصوص نتایج به دست آمده برای روش GCV بهبود یافته این است که به جز در تکرار اول در دیگر تکرارها مقدار پارامتر منظمسازی به سمت تکرارهای بیشتر دارای یک روند نزولی با نرخ کاهش مناسب است به طوری که چنین روندی برای پارامتر منظمسازی باعث تولید یک مدل معکوس پایدار شده است. همچنین مشاهده می شود که مقادیر پارامتر منظم-سازی به دست آمده از روش GCV بهبود یافته به جز در تکرار اول در مابقی تکرارها با مقادیر به دست آمده این پارامتر از طرح کنترلی (رابطه ۵–۱۵) یکسان است. مقادیر پارامتر منظمسازی به دست آمده از روش منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی (جدول ۵–۳) تا حدودی کمتر از حد مناسب هستند چرا این مقادیر باعث تولید مدلی با نرم بیشتر یا ناهموارتر شدهاند (شکل ۵–۵–ب). در چنین مواردی ممکن است ساختارهای غیر واقعی در مدل وارد شود.

ب- مثال دوم

دسته دوم دادههای واقعی مورد آزمایش شامل دادههای یک پروفیل اندازهگیری مگنتوتلوریک در منطقه چين خورده لچلند' در جنوب استراليا ميباشد. اين منطقه داراي رسوبات دريايي، چرتها و سنگهای آتشفشانی بازیک با سن پالئوزوئیک<sup>۲</sup> است. اندازه گیریهای مگنتوتلوریک به منظور تهیه مدل رسانایی الکتریکی در بخش مرکزی منطقه لچلند به کار گرفته شدهاند. این اندازهگیریها در ۵۳ ایستگاه روی یک خط در طول ۱۸۰ کیلومتر با آزیموت ۹۵ درجه عمود بر امتداد ساختارها انجام شدهاند. تعداد فرکانسهای منظور شده در آنها ۲۷ فرکانس در محدوده ۰/۰۰۹۲ تا ۶۶ هرتز می باشد [Lee et al, 2009a]. با توجه به حجم بالای این دادهها و همچنین تعداد زیاد آزمایشهای معکوس-سازی، در اینجا فقط دادههای مقاومتویژه و فاز مُد TM به کار گرفته شدهاند. همانند مثالهای قبل پس از تنظیم پارامترهای لازم اَزمایشهای معکوسسازی با استفاده از روشهای مختلف انتخاب پارامتر منظمسازی روی این دادهها انجام شده است. نتایج این آزمایشها در شکلهای (۵–۸) و (۵– ۹) و همچنین در جدول (۵–۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول (۵–۴) دیده می شود که تخمین پارامتر منظمسازی در این ازمایشها مشابه تخمینهای متناظر در مثال قبل است. در واقع این مثال نیز تأییدی بر نتایج مثال قبل در خصوص رفتار روشهای مختلف انتخاب پارامتر منظم-سازی در تخمین این پارامتر برای یک دسته داده واقعی است.

<sup>1</sup>- Lachland

<sup>2</sup>- Paleozoic





با توجه به شکل (۵–۸) دیده میشود که مدلهای حاصل با استفاده از دو روش GCV بهبود یافته و منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی به خوبی با هم و همچنین با مدل به دست آمده با استفاده از روش ACB تطابق دارند. در واقع این سه مدل تصاویری کاملاً یکسانی برای مدل ژئوالکتریکی منطقه لچلند استرالیا نمایش میدهند. در شکل (۵–۹) نیز شبه مقاطع دادههای تئوری حاصل از این مدلها برازش نسبتاً خوبی با دادههای مشاهدهای نشان میدهند. در واقع این برازش خوب تأییدی بر نتایج مناسب مدلسازی مربوطه است.



شکل (۵-۹): مقایسه شبه مقاطع دادههای مشاهدهای مقاومتویژه ظاهری و فاز مُد TM و پاسخ متناظر از مدلهای معکوس شکل (۵-۸)

جدول (۵-۴): مقادیر پارامتر منظمسازی برای روشهای مختلف انتخاب این پارامتر در معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک در منطقه لچلند استرالیا. مقادیر پارامتر منظمسازی "منظور شده" یعنی آن مقادیری که با استفاده از طرح کنترلی (رابطه ۵-۱۵) این پارامتر، در معکوسسازی منظور شده است. همچنین منظور از مقادیر پارامتر منظم-سازی "محاسبه شده از روش" یعنی آن مقادیری که به طور مستقیم از روش مورد نظر به دست آمده است

		روش انتخاب پارامتر									
١٠	٩	٨	٧	۶	۵	۴	٣	٢	١	شماره تكرار	منظمسازى
۲/۲۷	۲/۲۶	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۶	۳/۰	۳/۷۵	Υ/۵	۱۵	منظور شده	اما اختلاف
۲/۲۷	۲/۲۶	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۶	۳/۲	1/88	1/54	۱/۰ ۱	محاسبه شده از روش	اصل اختلاف
٠/١	۰/۱	۰/۱۳	٠/٢٧	۰/۵۴	۱/۰۸	۲/۱۶	۴/۳۳	٨/۶۶	17/37	منظور شده	GCV
٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	٠/١	محاسبه شده از روش	UC V
٢	٢	٢	٢	٢	٣	٣	۳/۷۵	۲/۵	۱۵	منظور شده	di ili ve de GCV
۲	٢	٢	٢	٢	٣	٣	۴	۴	٣	محاسبه شده از روش	٢ ٥٠ بهبود يحنه
۰/۹۳	١/٨٧	۳/۷۵	٧/۵	۱۵	۳۰	١/٨٧	۳/۷۵	۲/۵	۱۵	منظور شده	منحنی L با الگوریتم
۰/۰۱	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	۳۰	۰/۰ ۱	۰/۰ ۱	٠/١	٠/١	محاسبه شده از روش	بيشترين انحنا
٣	٣	٣	٣	٣	۴	۴	۴	Υ/۵	۱۵	منظور شده	منحنی L با الگوریتم آرایش
٣	٣	٣	٣	٣	۴	۴	۴	۴	۴	محاسبه شده از روش	تطابقى
١٠	۱.	۱.	۱.	۱.	۱.	۴/۲۱	۳/۷۵	Υ/۵	۱۵	منظور شده	تخمین خطا برژینسکی و
۱	۱.	۱۰	۱۰	۱۰	۱.	۴/۲۱	١/٧٧	١	١	محاسبه شده از روش	همكاران
۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۳/۸۳	۳/۸۳	Υ/۵	۱۵	منظور شده	تخمين خطا ريچل و
۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۳/۸۳	۳/۸۳	۲/۱۶	۵۰	محاسبه شده از روش	همكاران
۴/۲۸	4/31	۴/۳۸	۴/۳۶	۳/۸۵	۲/۹۷	١/٨٧	۳/۷۵	۲/۵	۱۵	منظور شده	تقاد ثار
۴/۲۸	۴/۳۱	۴/۳۸	۴/۳۶	۳/۸۵	۲/۹۷	۰/۱۶	• /• ۶	•/•۵	۰/۰۴	محاسبه شده از روش	فقطه تابت
۱.	٩/٩ ١	۹/۷۸	۹/۵۸	٩/٢٧	λ/λΥ	۷/۹۵	٧/٢٣	8/88	۱۵	منظور شده	E. a. d ^
١٠	۹/۹ ۱	۹/۷۸	۹/۵۸	٩/٢٧	λ/λΥ	۷/۹۵	۷/۲۳	8/88	۶/۳۲	محاسبه شده از روش	سبه بهیندی
4/84	۵/۱۶	۵/۷۳	۶/۳۶	٧/•٧	۷/۸۶	۸/۷۳	۹/۷۰	۲۷/۰۲	57/36	ں روش مجو	طرحی بر اساس
•/AY	۱/•۵	١/٢٩	۱/۶	۲/۰۵	۲/۸۴	4/41	٧/١۴	18/31	۶/۳۲	ں به نرم مدل	نسبت عدم برازش

### ۵-۳-۳- دادههای مصنوعی حاوی نوفه

نتایج آزمایشهای مختلف معکوسسازی برای مثالهای قبل (دادههای مصنوعی و واقعی) نشان می-دهد برخی از روشهای مورد مطالعه انتخاب پارامتر منظمسازی برای تخمین این پارامتر در مسئله معکوس دوبعدی مگنتوتلوریک از دقت لازم برخوردار میباشند. این روشها شامل روشهای اصل اختلاف، GCV بهبود یافته، منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی، نقطه ثابت، طرحی بر اساس روش مجو و نسبت عدم برازش به نرم مدل هستند. البته دادههای واقعی حاوی نوفه بوده و توانایی روش-های ذکر شده در تخمین پارامتر منظمسازی با حضور نوفه در آزمایشهای انجام شده با این دادهها تأیید میشود. ولی ترجیح داده میشود که تأثیر نوفه دادهها در تخمین پارامتر منظمسازی با این روشها به طور مستقیم نیز نشان داده شود. برای این منظور آزمایشهای معکوسسازی با استفاده از این روشها برای دادههای مصنوعی مثال دوم در بخش ۵-۳-۱ با حضور ۳ درصد نوفه تصادفی تکرار میشوند. انتظار میرود که برای پایدار نمودن مدل، مقادیر پارامتر منظمسازی تخمینی توسط این روشها در حضور نوفه، بیشتر از مقادیر تخمینی متناظر در عدم حضور نوفه باشد. جدول (۵–۵) مقادیر پارامتر منظمسازی تخمینی را برای این آزمایشها نشان میدهد. همچنین مدلهای معکوس به دست آمده با استفاد از روشهای GCV بهبود یافته و منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی در این آزمایشها (در تکرار دهم معکوسسازی) در شکل (۵–۱۰) نشان داده شده است.

جدول (۵-۵): مقادیر پارامتر منظمسازی برای روشهای مختلف انتخاب این پارامتر در معکوسسازی دوبعدی داده-های مصنوعی حاصل از مدل نشان داده شده در شکل (۵-۴-الف) با منظور نمودن ۳ درصد نوفه تصادفی برای این دادهها. مقادیر پارامتر منظمسازی "منظور شده" یعنی آن مقادیری که با استفاده از طرح کنترلی (رابطه ۵-۱۵) این پارامتر در معکوسسازی منظور شده است. همچنین منظور از مقادیر پارامتر منظمسازی "محاسبه شده از روش" یعنی آن مقادیری که به طور مستقیم از روش مورد نظر به دست آمده است

منابيه المنتصابات منظنيه الم	پارامتر منظمسازی در تکرارهای ۱ تا ۱۰										
روش التحاب پاراشتر شطم ساری	شماره تكرار	١	٢	٣	۴	۵	۶	۷	٨	٩	١٠
اما اختلاف	منظور شده	۴	٢	۱/۳۲	۱/۳۶	۱ ۳۱	۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۳۶	۱/۳۷	١/٣٨
اصل اختلاف	محاسبه شده از روش	۱/۲۰	۱/۵۲	۱/۳۲	۱/۳۶	۱/۳۱	۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۳۶	۱/۳۷	۱/۳۸
diala a contra	منظور شده	۴	۲	٣	۲	۲	۲	٢	١	١	١
۷ ٥٠ بهبود يافنه	محاسبه شده از روش	٢	۲	٣	۲	۲	۲	٢	١	١	١
"	منظور شده	۴	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣
متحتى ٢ بالكوريتم أرايس تطابقي	محاسبه شده از روش	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣	٣
المراجع المراجع	منظور شده	۴	۲	1/84	1/80	۱/۹۱	۲/۲۷	۱/۹۵	۲/۲۴	۱/۶۱	۱/۹۲
تقطبه تابت	محاسبه شده از روش	• /• Y	٠/١٢	1/84	۱/۶۵	۱/۹۱	۲/۲۷	۱/۹۵	۲/۲۴	1/81	١/٩٢
طرحی بر اساس روش	مجو	۱۲/۷۸	۵/۴۸	۱/۶۵	1/49	1/84	۱ ۲ ۱	۱/• ۹	۰/۹۸	۰/۸۸	۰/۷۹
نسبت عدم برازش به نر	ِم مدل	1/54	۳/۲۱	١/٧٢	۱/۳۴	1/14	۰/۹۵	۰/۸Y	۰/۷۳	• /Y •	۰/۸۵

به طور کلی دیده می شود که هر دو مدل به دست آمده تطابق نسبتاً خوبی با مدل مصنوعی شکل (۵-۴-الف) نشان می دهند. البته مدل به دست آمده با استفاده از روش GCV بهبود یافته تطابق بهتری با مدل اولیه نسبت به مدل به دست آمده با استفاده از روش منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی را نشان می دهد. شکل (۵–۱۱) تغییرات تابع GCV بهبود یافته را نسبت به پارامتر منظمسازی در هر تکرار معکوس سازی با استفاده از روش GCV نشان می دهد. دیده می شود که تابع GCV بهبود یافته در هر تکرار برای محدوده نسبتاً وسیعی از پارامتر منظم سازی دارای یک کمینه مشخص است یا به طور معادل می توان گفت که تابع GCV بهبود یافته به ازای پارامتر منظم سازی خاصی در هر تکرار معکوسسازی کمینه شده است. با توجه به جدول (۵–۵) دیده می شود که مقادیر پارامتر منظمسازی به دست آمده از این روش به جز در تکرارهای اولیه (تکرارهای ۱ و ۲) در دیگر تکرارها برابر با مقادیر به دست آمده با استفاده از طرح کنترلی (رابطه ۵–۱۵) هستند.



شکل (۵-۱۰): مدل معکوس دوبُعدی به دست آمده از دادههای مصنوعی شکل (۵-۴-الف) با منظور نمودن ۳ درصد نوفه تصادفی الف- با استفاده از روش GCV بهبود یافته (RMS = 0.47) ب- با استفاده از روش منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی (RMS = 0.73)

شکل (۵–۱۲) میزان تغییرات نرم مدل نسبت به عدم برازش متناظر، به ازای مقادیر مختلف پارامتر منکل (۵–۱۲) میزان تغییرات نرم مدل نسبت به عدم برازش منحنی L با الگوریم آرایش تطابقی، برای مدنظمسازی، در هر تکرار معکوسسازی با استفاده از روش منحنی L با الگوریم آرایش تطابقی، برای مدل معکوس به دست آمده در شکل (۵–۱۰–ب) را نشان می دهد. این منحنی ها در واقع همان منحنی های L هستند هر چند در اینجا به صورت منحنی L ایده آل نیستند و تا حدودی جزء منحنی-

های L از نوع بد [Rodriguez and Theis, 2005] قرار می گیرند. البته با توجه به جدول (۵-۵) دیده می شود که الگوریتم آرایش تطابقی به کار گرفته شده در این مطالعه برای پیدا کردن گوشههای این منحنیها از توانایی لازم برخوردار است. به طوری که مقدار به دست آمده برای پارامتر منظمسازی در هر تکرار یک مقدار مناسب است. درستی این ادعا زمانی اثبات می شود که عملیات معکوس سازی بدون منظور نمودن روش خودکار انتخاب پارامتر منظمسازی اجرا شود. یعنی پارامتر منظمسازی به طور تجربی در اجراهای مختلف تعیین شود. در این صورت دیده شده است که مقدار به دست آمده در جدول (۵-۵) برای روش منجنی L در این مثال یعنی مقدار ۳ مناسبترین مقدار برای معکوسسازی با پارامتر منظمسازی ثابت است. اگر چه مقدار پارامتر منظمسازی در این روش در کلیه تکرارها برابر ۳ به دست آمده است و همانند روشGCV بهبود یافته دارای یک روند نزولی مناسب از تکرارهای اوليه به سمت تكرارهاى نهايى [Mejue, 1994; Farquharson and Oldenburg, 2004] نمه باشد ولی این مقدار، اختلاف ناچیزی با مقادیر به دست آمده در روش GCV بهبود یافته دارد. شکل (۵-۱۳) تغییرات عدم برازش و نرم مدل، به ازای پارامترهای مختلف منظمسازی در هر تکرار معکوس-سازی برای مدل معکوس شکل (۵–۱۰–ب) را نشان میدهد. به خوبی دیده می شود تغییرات عدم برازش و نرم مدل نسبت به پارامتر منظمسازی در جهت عکس هم عمل می کنند.



شکل (۵–۱۱): تغییرات تابع GCV بهبود یافته نسبت به پارامتر منظمسازی در هر تکرار معکوسسازی برای مدل معکوس به دست آمده در شکل (۵–۱۰–الف)



شکل (۵–۱۲): منحنی های (L شکل) حاصل از تغییرات نرم مدل نسبت به مقدار عدم برازش به ازای مقادیر مختلف پارامتر منظمسازی در هر تکرار معکوسسازی برای مدل معکوس به دست آمده در شکل (۵–۱۰–ب)



شکل (۵–۱۳): تغییرات مقادیر عدم برازش و نرم مدل به عنوان توابعی از پارامتر منظمسازی در هر تکرار معکوسسازی برای مدل معکوس به دست آمده در شکل (۵–۱۰–ب)

# ۵-۴- بحث و نتیجه گیری

به طوری که در بخش مقدمه اشاره گردید، در مسائل معکوس ژئوفیزیکی که عمدتاً به روش منظم-سازی تیخونف حل میشوند، تخمین پارامتر منظمسازی برای تولید یک مدل مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. در این فصل به منظور بهبود مسئله معکوس دوبعدی مگنتوتلوریک از نظر انتخاب پارامتر منظمسازی، تقریباً کلیه روشهای موجود که به طور عمومی برای مسائل جورنشده پیشنهاد شدهاند، به همراه بهبودهای لازم برای این مسئله طراحی و به کار گرفته شده است. نتایج آزمایشها (جدول ۵-۱) برای دادههای مصنوعی مدل ساده شکل (۵-۲-الف) نشان میدهد که تقریباً تمام روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی به استثنای روشهای تخمین خطا (برژینسکی و همکاران و ریچل و همکاران) پارامتر منظمسازی را طوری تخمین میزنند؛ که تقریباً مدل مصنوعی مورد نظر بازیابی شود. در روشهای تخمین خطا مقدار این پارامتر بیشتر از مقدار مناسب تخمین زده شده است. به همین خاطر عملیات معکوسسازی نمیتواند به کمترین سطح لازم از مقدار عدم برازش برسد. این موضوع در منحنیهای تغییرات عدم برازش و نرم مدل در تکرارهای مختلف معکوسسازی نیز دیده میشود (شکل ۵-۳). همچنین بایستی دقت شود که در مدل تولید شده برای روشهای مختلف نیز اختلافاتی وجود دارد. مثلاً در مدلهای معکوس نشان داده شده در شکل (۵-۲) برای روشهای GCV بهبود یافته و شبه بهینگی به طور مشخص روش GCV بهبود یافته نتیجه بهتری ارائه نموده است.

مثال مصنوعی دوم نسبت به مثال اول قدری پیچیدهتر است. لذا انتظار میرود که مقادیر پارامتر منظمسازی تخمین زده شده در این مثال نسبت به مقادیر تخمین زده شده در مثال قبل از نظر اندازه قدری بزرگتر باشند. در واقع در این مثال نقش منظمسازی بایستی بیشتر باشد. نتایج جدول (۵–۲) نشان میدهد که این موضوع برای اغلب روشهای موفق در مثال قبل، صادق است. همچنین نتایج نشان میدهد که روشهای تخمین خطا در این مثال نیز تخمین مناسبی برای پارامتر منظمسازی ارائه نمیدهند. به نظر میرسد که روشهای تخمین خطا بیشتر تحت تأثیر تعداد دادهها و پارامترهای مدل قرار میگیرند. چرا که در این مثال تعداد دادهها و تعداد پارامترهای مدل به طور قابل ملاحظهای مدل قرار میگیرند. چرا که در این مثال تعداد دادهها و تعداد پارامترهای مدل به طور قابل ملاحظهای میشود و به همین خاطر تعداد پارامترهای مدل باعث افزایش درجه جورنشدگی مسئله میشود و به همین خاطر تعداد پارامترهای مدل در انتخاب پارامتر منظمسازی نقش مهمی دارد. اما پیچیدگی مدل در مثالهای مصنوعی و پیچیدگی ساختار برای دادههای واقعی، مسئله مهمتری است؛ که متأسفانه روشهای تخمین خطا، حداقل در مسئله معکوس دوبُعدی مگنتوتلوریک، کمتر تابع این ویژگی بودهاند. اگر چه روشهای نسبت عدم برازش به نرم مدل و طرحی بر اساس مجو نیز تا حدودی تحت تأثیر تعداد دادهها و تعداد پارامترهای مدل هستند؛ ولی بلافاصله بعد از تکرارهای اولیه این وابستگی کمتر میشود. همچنین نتایج به دست آمده برای مثال دوم توانایی کم روشهای GCV و منحنی L با الگوریتم بیشترین انحنا را برای تخمین مناسب پارامتر منظمسازی نشان میدهد. با توجه به نتایج به دست آمده برای دادههای واقعی دو مثال ارائه شده در این فصل نیز، این نکته تأیید می-شود. در خصوص روش مربع کای نیز نتایج آزمایشها فقط برای مثال اول دادههای مصنوعی، آن هم فقط برای دادههای مقاومتویژه مُد TM ارائه شده است. در دیگر مثالها، معکوسسازی در تکرارهای اولیه متوقف شده است. در واقع علت این امر تا حدودی حساسیت زیاد این روش نسبت به انتخاب ماتریس کواریانس دادهها میباشد. در این مثالها با توجه به عدم اطلاع از سطح نوفه دادهها مقدار خطای دادهها به صورت یکسان منظور شده است. با این وجود، با انتخاب سطوح مختلفی از خطا برای دادهها، این روش جواب مناسب را تولید نمیکند.

نتایج آزمایشهای معکوسسازی دوبُعدی برای دادههای واقعی دو مثال ارائه شده با نتایج معکوس-سازی دوبُعدی با استفاده از روش ACB مقایسه شده است. در روش ACB سعی شده است تا با آزمایش مقادیر مختلف تجربی برای پارامتر منظمسازی، مدل معکوس بهینه از نظر مقدار عدم برازش و نرم مدل تولید شود. نتایج آزمایشها در این دادهها (جداول ۵-۳ و ۵-۴) توانمندی برخی روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی را در تخمین مناسب این پارامتر نشان میدهند. قبل از مقایسه و بررسی جزئیتر نتایج میتوان گفت که مدلهای معکوس به دست آمده با استفاده از روشهای اصل اختلاف، GCV بهبود یافته، منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی، نقطه ثابت، طرحی بر اساس روش مجو و نسبت عدم برازش به نرم مدل قابل مقایسه با مدل به دست آمده به کمک روش های اصل اختلاف، توجه به این که دادههای واقعی معمولاً حاوی نوفه هستند توانمندی این روشها در حضور نوفه نیز تأیید میشود. البته برای این که به طور مشخص نشان داده شود که مقادیر پارامتر منظمسازی مصنوعی دوم با حضور ۳ درصد نوفه تصادفی نیز تکرار شده است. دیده میشود که مقادیر پارامتر منظمسازی در حضور نوفه از نظر اندازه قدری بزرگتر از مقادیر متناظر در عدم نوفه میباشند. برای مقایسه و اولویتبندی روشهای اخیر بایستی عواملی مثل بار محاسباتی این روشها که به بار محاسباتی معکوسسازی اضافه میشود، نیاز به اطلاعات اولیه مثل سطح نوفه دادهها، وابستگی به طرح کنترلی، میزان خودکار بودن روش و دقت بیشتر نتایج مورد توجه قرار گیرد. جدول (۵–۶) زمان لازم برای محاسبات معکوسسازی با استفاده از روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی را برای مثالهای ارائه شده در بخشهای ۵–۳–۱–الف و ۵–۳–۲–ب نشان میدهد.

جدول (۵-۶): زمان لازم برای انجام ۱۰ تکرار معکوسسازی دادههای مصنوعی مثال اول و دادههای واقعی مثال دوم مورد آزمایش برای روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی (با استفاده از یک کامپیوتر پنج هسته با CPU = 2.53GHz و (RAM = 4GB

سسازی بر حسب ثانیه	مناب المتعالية منالية مناختنا شمر	
برای دادههای واقعی مثال دوم	برای دادههای مصنوعی مثال اول	روس التحاب پارامندر منظم ساری
۵۱۷۲	7818	اصل اختلاف
۲۱۳۰	۹۵۳	GCV بهبود يافته
۱۱۸۳	880	منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی
٧٦٧	888	نقطه ثابت
٨۵۵	541	طرحی بر اساس روش مجو
۷۷۷	۶۳۷	نسبت عدم برازش به نرم مدل
٧۴٧	547	ACB

در این جدول همچنین زمان لازم برای محاسبات معکوسسازی با استفاده از روش ACB نیز برای مقایسه نتایج ارائه شده است. البته بایستی به این نکته دقت نمود که این زمان فقط برای یک بار آزمایش معکوسسازی با یک جفت پارامتر منظمسازی تجربی به عنوان بیشترین و کمترین مقدار λ در روش ACB است. برای تولید یک مدل مناسب در این روش بایستی در اجراهای مختلف عملیات معکوسسازی، چند جفت پارامتر منظمسازی به عنوان بیشترین و کمترین مقدار آزمایش شود. با توجه به نتایج جدول (۵–۶) دیده میشود که روش اصل اختلاف دارای بیشترین بار محاسباتی برای عملیات معکوسسازی است. علت مسئله این است که در این روش به ازای هر پارامتر منظمسازی مورد جستجو در هر تکرار معکوس سازی باید محاسبات مدل سازی پیشرو برای محاسبه مقدار عدم برازش انجام شود. پس از روش اصل اختلاف روش GCV بهبود یافته از سایر روش ها به استثنای روش ACB (به دلایلی که ذکر گردید) کندتر است. روش منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی نیز تا حدودی نسبت به روش های نقطه ثابت، طرحی بر اساس روش مجو و نسبت عدم برازش به نرم مدل دارای بار محاسباتی بیشتری در عملیات معکوس سازی است. دیگر روش ها تقریباً دارای بار محاسباتی دارای بار محاسباتی مدل محو و نسبت عدم برازش به نرم مدل مداری بار محاسباتی بیشتری در عملیات معکوس سازی است. دیگر روش ها تقریباً دارای بار محاسباتی یکسانی هستند. البته علاوه بر تأثیر الگوریتم و روابط پایه روش های اصل اختلاف، GCV بهبود یافته و یکسانی هستند. البته علاوه بر تأثیر الگوریتم و روابط پایه روش های اصل اختلاف، GCV بهبود یافته و منحنی L در بازدهی محاسباتی این روش ها، محدوده جستجو پارامتر منظم سازی نیز در این بازدهی مؤثر است. به طور کلی از نظر بازده محاسباتی کلیه روش ها نسبت به روش معکوس سازی با پارامتر منظمسازی نیز در این بازدهی منظم سازی ثابت برای به مؤثر است. به طور کلی از نظر بازده محاسباتی کلیه روش ها نسبت به روش معکوس سازی با پارامتر منظم سازی بای مرای منظم سازی ثابت برای به موند. چرا که در معکوس سازی با پارامتر منظم سازی برای اجراهای مختلف دست آوردن یک مدل مناسب بایستی مقادیر مختلف پارامتر منظم سازی برای اجراهای مختلف دست آوردن یک مدل مناسب بایستی مقادیر مختلف پارامتر منظم سازی برای اجراهای مختلف معکوس سازی آزمایش شود.

از نظر نیاز به اطلاعات اولیه برای اجرای روش، غیر از روش اصل اختلاف سایر روش ها برای اجرا نیاز به اطلاعات اولیه ندارند. در روش اصل اختلاف نیاز به آگاهی از سطح نوفه دادهها است. چرا که در صورت عدم اطلاع از سطح نوفه دادهها مقادیر پارامتر منظم سازی تخمین زده شده با این روش از دقت کافی بر حوردار نیستند. برای تعیین سطح نوفه دادهها در مثال های ارائه شده در این فصل، ابتدا آزمایش های معکوس سازی با استفاده از روش ACB برای دادههای مربوطه انجام شده است. سپس مقدار عدم برازش برای مدل نهایی به عنوان سطح نوفه برای آن دادهها در آزمایش های معکوس سازی با استفاده از روش اصل اختلاف منظور شده است. همچنین در این روش نیاز است که یک مقدار اولیه برای پارامتر منظم سازی در شروع معکوس سازی انتخاب شود. انتخاب مناسب این مقدار علاوه بر بازدهی محاسباتی در دقت تخمین پارامتر منظم سازی در تکرارهای بعدی معکوس سازی و نهایتاً در تولید مدل مناسب تأثیر گذار است. در واقع سایر روش ها به استثنای روش اصل اختلاف به صورت

برخی از این روشهای مورد بحث مثل روش نقطه ثابت، در تکرارهای اولیه، مقادیر پارامتر منظمسازی را بسیار کمتر از حد مناسب تخمین میزنند و در مواقعی ممکن است بدون همراهی با یک طرح کنترلی باعث توقف معکوسسازی گردند. با توجه به مقادیر مناسب پارامتر منظمسازی تخمین زده شده توسط روش GCV بهبود یافته و روند کاهشی این مقادیر در جهت تکرارهای نهایی معکوس-سازی، می توان این روش را در تخمین پارامتر منظمسازی یک روش موفق دانست. روش منحنی m L با الگوریتم آرایش تطابقی هم نسبتاً یک روش موفق است اگر چه در مواردی دقت نتایج آن به اندازه روش GCV بهبود یافته نیست. روش طراحی شده بر اساس روش مجو علاوه بر این که یک روش نسبتاً سريع است با تخمين مقادير مناسب پارامتر منظمسازي با يک روند کاهشي قابل قبول ميتواند یک روش مناسب باشد. اگر چه مقادیر تخمین زده شده توسط این روش در تکرارهای اول و دوم در مواقعی بیشتر از حد مناسب است. البته این وضعیت باعث شده است که این روش بدون نیاز به طرح کنترلی نیز موفق باشد. در خصوص روش نسبت عدم برازش به نرم مدل میتوان گفت علاوه بر این که این روش تقریباً دارای بار محاسباتی صفر است، از نظر دقت مقادیر تخمینی برای پارامتر منظم-سازی نیز روشی توانمند است. فقط در این روش بایستی دقت شود که با ادامه تکرارهای معکوس-سازی بیش از حد نیاز، مقادیر تخمینی پارامتر منظمسازی ممکن است بیش از حد لازم کوچک شده و باعث ایجاد مشکل در ادامه معکوسسازی شود. البته این مشکل با قرار دادن یک قید مناسب در معکوسسازی، مثلاً حد خاصی برای عدم برازش نهایی یا کنترل مستقیم منحنی تغییرات عدم برازش و نرم مدل قابل حل است. در بررسیهای انجام شده توسط این روش در این فصل، برای این که این روش به طور کامل به صورت خودکار عمل نماید، مقدار پارامتر منظم سازی در تکرار اول معکوس-سازی برابر اولین مقدار ویژه ماتریس حساسیت در تکرار اول منظور شده است. البته می توان برای این منظور مطابق رابطه (۵–۱۳) نیز عمل نمود.

در خاتمه با لحاظ بحثهای فوق میتوان روشهای انتخاب پارامتر منظمسازی را برای تخمین این پارامتر در معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک به صورت ذیل اولویتبندی نمود: ۱- GCV بهبود یافته ۲- منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی ۳- نسبت عدم برازش به نرم مدل ۴- طرحی بر اساس روش مجو ۵- نقطه ثابت. در مسئله معکوس سه بعدی مگنتوتلوریک حجم محاسبات نسبت به حالت دوبعدی به طور قابل ملاحظه ای افزایش مییابد. لذا برای جلوگیری از بار محاسباتی اضافی به مدل سازی، در فصل بعد ترجیح داده می شود از روش نسبت عدم برازش به نرم مدل برای تخمین پارامتر منظم سازی در معکوس سازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک استفاده شود. فصل ششم بهبود مدلسازی معکوس سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک با لحاظ روش مناسب برای انتخاب پارامتر منظمسازی

#### ۶–۱– مقدمه

در فصل قبل روشهای مختلف انتخاب پارامتر منظمسازی برای مسئله معکوس دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک طراحی و مورد مطالعه قرار گرفت و در آخر تعدادی از روشها برای این مسئله توصیه گردید. روشهای GCV بهبود یافته، منحنی m L با الگوریتم آریش تطابقی، نسبت عدم برازش به نرم مدل و طرحی بر اساس روش مجو روشهای موفقی بودهاند که برای مسئله معکوس سه ُبعدی نیز توصیه شدهاند. در این فصل هدف این است که یکی از این روشها برای تخمین مناسب پارامتر منظمسازی در مسئله معکوس سه بعدی داده های مگنتوتلوریک تعمیم داده شود. برنامه معکوس سازی سه بُعدى مورد استفاده در اين مطالعه، الگوريتم توسعه داده شده سيريپونواراپورن و همكاران [Siripurnvaraporn, et al., 2005] است. در این الگوریتم انتخاب پارامتر منظمسازی بر اساس روش اصل اختلاف می باشد. به طوری که در فصل قبل بررسی گردید، این روش یکی از روشهای مناسب برای انتخاب پارامتر منظمسازی است. اما محدودیتهایی نیز برای این روش وجود دارد. اول این که این روش به سطح نوفه دادهها وابسته است. در واقع بدون اطلاع از سطح نوفه دادهها ممکن است معکوسسازی با استفاده از این روش به مدلهای غیر واقعی منتهی شود. این موضوع در کار قائدرحمتی و همکاران [Ghaedrahmati et al., 2013b] نیز برای معکوسسازی دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین باوئر و لوکاس [Bauer and Lukas, 2011] تخمین دقیق سطح نوفه دادهها را از نقاط ضعف جدی در روش اصل اختلاف دانستهاند. به طوری که حتی تخمینهای نادرست کوچک از سطح نوفه دادهها در این روش باعث حل ضعیف مسئله معکوس می شود. یکی دیگر از مشکلات این روش، انتخاب پارامتر منظم سازی در تکرار اول معکوس سازی به صورت تجربی است. به عنوان مثال زیاو و همکاران [Xiao et al., 2010] برای تولید یک مدل مناسب سه بُعدى از يک دسته داده واقعى، با استفاده از همين برنامه سيريپونواراپورن و همکاران که در بالا به آن اشاره شد، چندین مقدار اولیه را برای پارامتر منظمسازی مورد آزمایش قرار دادهاند. وابسته بودن روش اصل اختلاف به سطح نوفه دادهها و انتخاب تجربی پارامتر منظمسازی در تکرار اول معکوس- سازی با این روش، مسائلی هستند که بر دقت مدلسازی تأثیر میگذارند. از نظر بازدهی محاسباتی نیز این روش نسبتاً کند میباشد. اگر چه در معکوس سازی سه بعدی با الگوریتم فوق سرعت محاسبات بیشتر به واسطه ساخت ماتریس حساسیت است، اما بار محاسباتی ناشی از روش اصل اختلاف نیز در مسائل با حجم بزرگ میتواند قابل ملاحظه باشد. این مسئله در کار فرکوهارسون و الدنبرگ (Ghaedrahmati et al., 2013b) قائدر حمتی و همکاران [Ghaedrahmati et al., 2013b] و همچنین در آزمایش های معکوس سازی دو بعدی فصل قبل بیان شده است. البته مشکل آزمایش مقادیر مختلف پارامتر منظم سازی برای تکرار اول معکوس سازی علاوه بر تأثیر بر دقت معکوس سازی به نوعی باعث کاهش بازدهی محاسباتی نیز میشود. این مسئله به این خاطر است که عملیات معکوس سازی بایستی برای هر مقدار این پارامتر یک بار اجرا شود.

در این فصل هدف این است تا برای بهبود معکوسسازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک از تعمیم روش نسبت عدم برازش به نرم مدل ( تعمیم رابطه ۵–۱۲) جهت انتخاب پارامتر منظمسازی استفاده شود. این روش به خاطر این که هیچ گونه بار محاسباتی اضافی بر عملیات معکوسسازی تحمیل نمی کند، انتخاب شده است. این روش برای معکوسسازی سه بعدی دو مثال مصنوعی و سپس دو مجموعه از داده های مگنتوتلوریک منطقه سبلان مورد آزمایش قرار خواهد گرفت و نتایج آن با نتایج معکوسسازی با استفاده از روش اصل اختلاف مقایسه می شود. در این آزمایش ها در ابتدا نشان داده خواهد شد که روش مورد نظر برای تخمین مناسب پارامتر منظمسازی در معکوسسازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک از توانمندی لازم برای تولید مدل مناسب برخوردار است. همچنین نشان داده غواهد شد که برای داده های واقعی مدل معکوس تولید شده در روش اصل اختلاف به سمت یک مدل فراه در معیش می رود. در مقابل، مدل به دست آمده برای این دادهها در روش پیشنهادی، یک مدل پایدار بوده و به ساختارهای واقعی بسیار نزدیک تر است. در ادامه منبع زمین گرمایی سبلان و ساختارهای مرتبط با استفاده از این مدل ها به طور کامل تفسیر می شود.
# ۶-۲- مدلسازی معکوس دادههای مصنوعی

8-۲-۱ مثال اول

شکل (۶-۱) یک مدل مصنوعی سه بعدی را مشابه با مدل طراحی شده توسط پلرین و همکاران [Pellerin et al., 1996]، بر پایه یک مدل مفهومی برای منابع زمین گرمایی (شکل ب-۲ در پیوست ب) نشان می دهد. این مدل شامل یک لایه رسانا مشابه یک یوشش رسی با ضخامت حدود ۲۵۰ متر و مقاومتویژه ۵ اهم-متر است که روی یک توده مقاومتر مشابه یک ذخیره زمین گرمایی با مقاومتویژه ۳۰ اهم-متر قرار گرفته است. هر دو بخش در درون یک زمینه مقاوم با مقاومتویژه ۲۰۰ اهم-متر قرار گرفتهاند. برای تولید دادههای مصنوعی ۴۲ ایستگاه مجازی برای اندازهگیری دادههای مگنتوتلوریک مطابق شکل (۶–۱–الف) طراحی شده است. در تمامی ایستگاهها مقادیر مؤلفههای امپدانس برای تانسور کامل امپدانس در ۸ فرکانس ۰/۰۱۴، ۰/۰۴۵، ۱/۵۲، ۰/۴۷۴، ۱/۵۲، ۴/۹۰، ۱۵/۷۵ و ۵۰/۶۱ هرتز با استفاده از مدلسازی پیشرو توسط برنامه سیرییونوارایورن و همکاران [Siripunvaraporn et al., 2005]، محاسبه شده است (این دادهها در جدول (ج-۵) پیوست ج آمده-اند). در شکل (۶–۱) شبکه محاسبات پیشرو برای تولید دادههای مصنوعی روی مدل نشان داده شده است. قبل از معکوس سازی دادهها ۵ درصد نوفه تصادفی به دادهها اضافه شده است. همچنین برای پايداري بهتر معكوسسازي همانند كار سيريپونواراپورن و همكاران Siripunvaraporn et al., l 2005]، واریانس دادهها در تشکیل ماتریس واریانس به صورت  $\left| \mathrm{Z}_{\mathrm{xv}}\mathrm{Z}_{\mathrm{vx}} \right|^{1/2}$  محاسبه شده است.

با تنظیم مناسب پارامترهای لازم، عملیات معکوسسازی توسط الگوریتم معکوسسازی سه بعدی سیریپونواراپورن و همکاران [Siripunvaraporn et al., 2005]، روی دادههای مصنوعی حاصل از مدل شکل (۶–۱) در سه اجرای جداگانه انجام شده است. در اجرای اول انتخاب پارامتر منظمسازی مطابق الگوریتم مذکور با استفاده از روش اصل اختلاف با مقدار شروع ۱ ( $1 = \lambda$ ) می باشد. در اجرای دوم برای تخمین پارامتر منظمسازی شروع با انجام یک تکرار معکوسسازی بدون منظمسازی، نسبت



مقدار عدم برازش به نرم مدل از رابطه ۵-۱۳ محاسبه می شود و به عنوان پارامتر منظم سازی اولیه

برای روش اصل اختلاف در اجرای دوم منظور می شود.

شکل (۶-۱): یک مدل مصنوعی سه بعدی بر اساس یک مدل مفهومی برای منابع زمین گرمایی (شکل ب-۲). این مدل شامل یک لایه رسانا به عنوان یک پوشش رسی با مقاومتویژه ۵ اهم-متر است که روی یک توده مقاومتر به عنوان یک ذخیره زمین گرمایی با مقاومتویژه ۳۰ اهم-متر قرار گرفته است. هر دو بخش در درون یک زمینه مقاوم با مقاومتویژه ۲۰۰ اهم- متر قرار گرفتهاند. مثلثهای وارون موقعیت ایستگاههای مجازی مگنتوتلوریک را نشان می دهند و خطوط قائم و افقی نشان دهنده شبکه محاسبات پیشرو و معکوس هستند (الف- مقطع افقی مدل و ب- یک مقطع قائم مدل در عرض ۵=۲)

اجرای سوم با تخمین پارامتر منظمسازی شروع مطابق روش اخیر یعنی رابطه (۵-۱۳) و با تعمیم رابطه (۵-۱۲) به صورت،

$$\lambda^{k} = \{\Psi_{d}^{(k-1)} / (\Psi_{d}^{(k-1)} + \Psi_{m}^{(k-1)})\}^{1/2}$$
(1-8)

که در آن k شماره تکرار معکوس سازی است، برای انتخاب پارامتر منظم سازی در دیگر تکرارها انجام می شود. از این به بعد از این روش به عنوان طرح پیشنهادی برای انتخاب پارامتر منظم سازی یاد می-شود. رابطه اخیر به همراه رابطه (۵–۱۲) توسط زیاو-بین و همکاران [Ziao-Bin et al., 2005]، برای معکوس سازی یک بُعدی داده های مگنتوتلوریک ارائه گردید ولی نتایج آن به اندازه نتایج رابطه (۵–۱۲) برای معکوس سازی یک بُعدی مناسب نبوده است. علت این امر را می توان به این صورت بیان نمود که در مدل های سه بُعدی به دلیل حجم بیشتر پارامترهای مدل نسبت به مدل های یک و دوبُعدی، مقدار نرم مدل نیز نسبتاً بیشتر بوده و برای برقراری یک تعادل مناسب بین نرم مدل و مقدار عدم برازش مقادیر پارامتر منظم سازی کوچکتری نسبت به حالتهای یک و دو بُعدی نیاز است.

نتایج سه اجرای مذکور روی دادههای مصنوعی حاصل از مدل طراحی شده شکل (۶–۱) در جدول (۱–۹) نشان داده شده است. با توجه به این نتایج دیده میشود که طرح ارائه شده برای انتخاب پارامتر منظمسازی شروع در روش اصل اختلاف مناسب میباشد. به طوری که در اجرای اول، روش اصل اختلاف پس از جستجو در مراحل مختلف مقداری نزدیک به این مقدار تخمین زده شده برای پارامتر منظمسازی شروع را در تکرار اول انتخاب میکند. در اجرای دوم، پارامتر منظمسازی انتخاب شده در تکرار اول دقیقاً برابر این مقدار تخمینی یعنی ۱۵۵۳ است. یعنی این که این مقدار پارامتر منظمسازی شروع تخمین زده شده (200 = ۸) از رابطه (۵–۱۳) کاملاً مناسب میباشد. در مثال-های بعدی نیز از این روش برای تخمین پارامتر منظمسازی شروع در روش اصل اختلاف استفاده می-شود.

		, <i>j</i> 0 0		6,,,		
٣	٢	١	شماره تکرار			
٧	۴	۴	تعداد λ مورد آزمایش			
١/٣٣	• / ١	۰/۳۱۶	مقدار ۵ انتخاب شده	اجرای اول با استفاده از روش اصل		
۱/۰۰	1/11	۲/۵۱	RMS	اختلاف با λ شروع برابر ۱		
۳۵۵۰	۸۵۸۰	111	نرم مدل			
۴	۴	٣	تعداد λ مورد آزمایش			
١/٧۵	٠/١٧۵	• /۵۵۳	مقدار ۵ انتخاب شده	اجرای دوم با استفاده از روش اصل		
۱/۰۲	۱/۰۸	۳۵۲	RMS	احتلاف با مقدار ۸ شروع خاصل از		
۳۲۳۰	۶۷۵۰	8180	نرم مدل	رابطه (۵۵–۱۱) برابر ۵۵۵٬۰		
١	١	١	تعداد λ مورد آزمایش			
۰/۵۲	۰/۵۳	• /۵۵۳	مقدار ۵ انتخاب شده	اجرای سوم با استفاده از طرح		
۰/۵۳	۰/۹۴	۳۵۳	RMS	پیشنهادی		
418.	۲۱۵۰	٨١۶٠	نرم مدل			

جدول (۶-۱): مقادیر پارامتر منظم سازی، RMS و نرم مدل در تکرارهای مختلف معکوس سازی برای سه اجرای مختلف روی دادههای مصنوعی حاصل از مدل شکل (۶-۱)

در دو اجرای اول و دوم با توجه به این که دادهها مصنوعی بوده و مقدار خطای اضافه شده به آنها از نوع خطای تصادفی با توزیع نرمال است، مقدار RMS هدف برابر ۱ منظور شده است. در این دو اجرا معکوس سازی در تکرار دوم نتوانسته است به این مقدار برسد ولی در تکرار سوم در شروع (یعنی با اولین پارامتر منظم سازی مورد آزمایش) به مقداری از RMS، کمتر از این مقدار رسیده سپس مرحله دوم معکوس سازی برای دست یافتن به این مقدار RMS اجرا شده که در نهایت مدلی تقریباً با این مقدار RMS هدف تولید نموده اند. نتایج اجرای سوم با استفاده از طرح پیشنهادی نشان می دهد که مقدار روش قادر است مقادیر پارامتر منظم سازی مناسبی در حدود همان مقادیر مناسب به دست آمده این روش قادر است مقادیر پارامتر منظم سازی مناسبی در حدود همان مقادیر مناسب به دست آمده از روش اصل اختلاف در دیگر اجراها تخمین بزند. البته با این مزیت که اجرای سوم با این طرح پیشنهادی، در تکرار دوم به مدل مناسب و مورد انتظار رسیده است. مدل تولید شده در تکرار دوم این اجرا حتی از مدل های تولید شده در تکرار سوم اجراهای اول و دوم، از نظر نرم مدل مناسب تر است. علاوه بر این امتیاز که به دقت مدل سازی مربوط می شود، از نظر حجم محاسبات و سرعت معکوس-سازی نیز اجرای سوم به دلیل عدم بار محاسباتی اضافی در معکوس سازی، مؤثرتر است. نکته دیگر این که در تکرارهای نهایی معکوسسازی به جای مقادیر کوچک تولید شده توسط روش اصل اختلاف مقادیر مناسب تر با استفاده از طرح پیشنهادی تخمین زده می شود که باعث پایداری مدل و جلوگیری از انحراف به سمت مدل های غیر واقعی می شود. با توجه به این که این مثال یک مدل ساده مصنوعی می باشد انتظار نمی رود که مدل های نهایی تولید شده در سه اجرای مذکور تفاوت قابل ملاحظه ای داشته باشند. هر چند مدل تولید شده در اجرای سوم به طور بهتری مدل مصنوعی مورد آزمایش را بازیابی نموده است. شکل (۶–۲) مدل های معکوس به دست آمده از سه اجرای مذکور را برای این داده های مصنوعی نشان می دهد. در واقع این مثال برای بررسی توانایی طرح پیشنهادی برای تخمین پارامتر منظم سازی شروع در روش اصل اختلاف و همچنین بررسی توانایی رابطه (۶–۱) برای تخمین پارامتر منظم سازی در معکوس سازی سه بعدی است. در ادامه این به بود در انتخاب پارامتر منظم سازی



شکل (۶–۲): مقاطع مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سه بعدی دادههای مصنوعی مدل شکل (۶–۱) (ردیف اول، دوم و سوم به ترتیب نشان دهنده مقاطع افقی مقاومتویژه برای اجراهای اول، دوم و سوم هستند. ردیف چهارم مقاطع، نشان دهنده مقاطع قائم برای سه اجرای مختلف در عرض ۲=0 هستند)

### ۶-۲-۲- مثال دوم

در این مثال توانایی روش پیشنهادی تخمین پارامتر منظم سازی در معکوس سازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک با مدلی پیچیده تر از حالت قبل بررسی می شود. مدل مصنوعی طراحی شده در شکل (۶–۳) نشان داده شده است. این مدل شامل یک لایه رسانا مشابه یک پوشش رسی با ضخامت حدود ۴۰۰ متر و مقاومتویژه ۱ اهم-متر است که روی یک توده مقاومتر مشابه یک ذخیره زمین گرمایی با مقاومتویژه ۱۰ اهم-متر قرار گرفته است و تا عمق ۵ کیلومتری ادامه دارد. همچنین در زیر این توده، یک توده نسبتاً مقاومتر مشابه یک منبع تولید گرما با مقاومتویژه ۱۰۰ اهم-متر قرار دارد که تا عمق ۸ کیلومتری کشیده شده است. این سه بخش در درون یک زمینه مقاوم با مقاومتویژه ۵۰۰ اهم-متر قرار گرفتهاند. برای تولید دادههای مصنوعی ۴۹ ایستگاه مجازی برای اندازهگیری دادههای مگنتوتلوریک مطابق شکل (۶–۳-الف) طراحی شده است. در تمامی ایستگاهها مقادیر مؤلفههای امیدانس برای تانسور کامل امیدانس در ۵ فرکانس ۰/۰۱، ۰/۱، ۱۰ و ۱۰۰ هرتز با استفاده از مدل-سازی پیشرو مشابه مثال قبل محاسبه شده است (این دادهها در جدول (ج-۴) پیوست ج آمدهاند). در شکل (۶–۳) شبکه محاسبات پیشرو برای تولید دادههای مصنوعی روی مدل نشان داده شده است. همچنین مشابه مثال قبل ۵ درصد نوفه تصادفی به دادهها اضافه شده است و واریانس دادهها در تشکیل ماتریس واریانس به صورت  $\left| {\rm Z}_{\rm xv} {
m Z}_{\rm vx} 
ight|^{1/2}$  محاسبه شده است.

در این مثال نیز عملیات معکوسسازی سه بعدی برای داده های مصنوعی در دو اجرای مختلف انجام شده است. اجرای اول با استفاده از روش اصل اختلاف و اجرای دوم با استفاده از طرح پیشنهادی انجام شده است. نتایج این دو اجرای مختلف برای پارامتر منظم سازی در جدول (۶-۲) نشان داده شده است. این نتایج نشان می دهد که طرح پیشنهادی توانسته است با تخمین مناسب مقادیر پارامتر منظم سازی، باعث شود تا معکوس سازی به مدلی با مقدار RMS کمتر و هموارتر نسبت به اجرای دیگر، همگرا شود.



شکل (۶–۳): یک مدل مصنوعی سه بعدی به عنوان یک مدل مفهومی برای منابع زمین گرمایی. این مدل شامل یک لایه رسانا به عنوان یک پوشش رسی با مقاومتویژه ۱ اهم-متر است که روی یک توده مقاومتر به عنوان یک ذخیره زمین گرمایی با مقاومتویژه ۱۰ اهم-متر قرار گرفته است. در زیر این توده یک توده نسبتاً مقاومتر با مقاومتویژه ۱۰۰ اهم-متر قرار دارد که مشابه یک منبع تولید گرما در منابع زمین گرمایی است. این سه بخش در درون یک زمینه مقاوم با مقاومتویژه ۵۰۰ اهم- متر قرار گرفته اند. مثلثهای وارون موقعیت ایستگاههای مجازی مگنتوتلوریک را نشان میدهند و خطوط قائم و افقی نشان دهنده شبکه محاسبات پیشرو و معکوس هستند (الف- مقطع افقی مدل و ب-یک مقطع قائم مدل در عرض (ه-۲)

			شکل (۶–۳)	های مصنوعی حاصل از مدل	روی داده
۴	٣	۲	١		شماره تکرار
۴	٣	۴	٣	تعداد λ مورد آزمایش	
• / ١	۰/۳۱۶	۰/۳۱۶	١	مقدار <i>\</i> انتخاب شده	اجراي اول با استفاده از روش اصل
1/44	1/47	١/٨٣	7/84	RMS	اختلاف
۹۵۸۰	۸۴۸۰	٨. 6.	۵۲۲۰	نرم مدل	
١	١	١	١	تعداد λ مورد آزمایش	
٠/٨٩	• /YY	٠/٧٢	١	مقدار   ۸ انتخاب شده	اجرای دوم با استفاده از طرح
۱/۳۰	1/41	۱/۶۹	7/84	RMS	پیشنهادی
۱۵۵	468	۱۷۰۰	۵۲۲۰	نرم مدل	

جدول (۶-۲): مقادیر پارامتر منظم سازی، RMS و نرم مدل در تکرارهای مختلف معکوس سازی برای دو اجرای مختلف محدول (۶-۲): مقادیر پارامتر منظم سازی، دوهای مصنوعی حاصل از مدل شکل (۶-۳)

با توجه به این نتایج (جدول ۶–۲)، در اجرای اول، روش اصل اختلاف با تخمین مقادیر نامناسب برای پارامتر منظمسازی، باعث کاهش مقدار RMS ولی افزایش قابل ملاحظه مقدار نرم مدل شده است. در صورتی که در اجرای دوم تخمین مناسب مقادیر پارامتر منظمسازی توسط روش پیشنهادی باعث شده است تا معکوسسازی به طور پایدار در جهت کاهش همزمان مقادیر RMS و نرم مدل پیش برود. درستی این تحلیل با بررسی مدلهای معکوس تولید شده در دو اجرای مذکور تأیید میشود. شکل (۶–۴) مدلهای معکوس مربوط به دو اجرای مذکور (جدول ۶–۲) را در تکرار چهارم نشان می-دهد. با توجه به این مدلها دیده میشود که مدل حاصل با استفاده از طرح پیشنهادی (اجرای دوم) به طور بهتری مدل مصنوعی مربوطه (شکل ۶–۳) را بازیابی نموده است.

علاوه بر مسائل ذکر شده که به دقت مدلسازی مربوط می شود. استفاده از طرح پیشنهادی به دلیل نداشتن بار محاسباتی اضافی بر عملیات معکوس سازی، باعث کاهش حجم محاسبات می شود. به طوری که در این مثال، معکوس سازی با استفاده از طرح پیشنهادی (روی یک کامپیوتر پنج هسته با طوری که در این مثال، معکوس سازی با استفاده از طرح پیشنهادی (روی یک کامپیوتر پنج هسته با اختلاف حدود ۲۹۰ دقیقه طول کشیده است. در واقع حجم محاسبات حدود ۳۰ درصد با استفاده از طرح پیشنهادی کاهش یافته است. این مثال و مثال قبل نشان می دهند که روش پیشنهادی علاوه بر





شکل (۶-۴): مقاطع مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سه بعدی دادههای مصنوعی مدل شکل (۶-۳) (ردیف اول و دوم (با دوم به ترتیب نشان دهنده مقاطع افقی مقاومتویژه برای اجراهای اول (با استفاده از روش اصل اختلاف) و دوم (با استفاده از طرح پیشنهادی) هستند. ردیف سوم نشان دهنده مقاطع قائم برای دو اجرای مذکور در عرض 0=۲ هستند)

# ۶–۳– مدلسازی معکوس دادههای واقعی

۶–۳–۱– میدان زمین گرمایی سبلان

میدان زمین گرمایی سبلان که هم اکنون تحت بررسی برای تولید انرژی الکتریکی است شامل نواحی شمال تا شمال غرب و غرب تا جنوب غرب کوه سبلان در استان اردبیل میباشد. پروژه زمین گرمایی سبلان به منظور اکتشاف و توسعه منابع زمین گرمایی مرتبط با فعالیتهای گرمایی سطحی در این منطقه است. بیشتر این فعالیتهای گرمایی سطحی مثل چشمههای آب گرم در دامنه غربی کوه سبلان واقع شدهاند (شکل ۶–۵).



شکل (۶-۵): موقعیت محدودههای مورد مطالعه روی نقشه توپوگرافی منطقه زمین گرمایی سبلان after EDC, ] 2010]. (محل کوه سبلان، محدوده شمال سبلان (چهارگوش قرمز) و محدوده غرب و جنوب غرب سبلان (چهارگوش بنفش) همراه با محل سونداژهای مگنتوتلوریک بعلاوه سایر اطلاعات در نقشه نشان داده شده اند)

شکل (۶-۶) نقشه زمینشناسی منطقه را نشان میدهد. سبلان یک عضو جوان از مجموعه آتشفشانی سنوزوئیک<sup>۱</sup> و متعلق به کمان ماگمایی البرز است. کمان ماگمایی البرز حاصل فرورانش بخشی از حوزه اقیانوسی نئوتتیس<sup>۲</sup> در زیر لیتوسفر<sup>۳</sup> قارهای شمال غرب ایران است. فعالیتهای آذرین در ائوسن<sup>۴</sup> با تجمع ولکانیکهای پتاسیک<sup>۵</sup> بر روی توالی از رسوبات پالئوزوئیک<sup>۶</sup> و مزوزوئیک<sup>۷</sup> آغاز گردید. این مجموعه ولکانیکی در اوایل میوسن<sup>۸</sup> توسط باتولیت مونزونیتی<sup>۴</sup> که در امتداد شمال غربی-غربی-جنوب شرقی در خط الرأس کوه سبلان رخنمون یافته، دچار دگرگونی حرارتی شدهاند. بالا آمدگی و فرسایش قابل ملاحظه این باتولیت ادامه یافته و در امتدادهای جنوب غرب و جنوب شرق روی باتولیت را توالی از رسوبات اواخر میوسن میپوشاند [

در سال ۱۹۹۸ سازمان انرژیهای نو ایران طی قراردادی با مشاور نیوزیلندی SKM <sup>۱۰</sup> اندازه گیریهای ژئوفیزیکی را با استفاده از روشهای مگنتوتلوریک، الکترومغناطیس حوزه زمانی (TEM) و جریان مستقیم (DC) انجام داد و تعدادی آنومالی رسانا مرتبط با منابع زمین گرمایی در منطقه سبلان را مشخص نمود [Bromley et al., 2000; SKM, 2005]. بزرگترین این آنومالیها در دره مویل (شکل ۶-۶) ثبت گردید. بر اساس این آنومالیها سه چاه اکتشافی بین سالهای ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ در یک آنومالی رسانا در دره مویل حفاری شد (محلهای حفاری A، B و C در شکل ۶-۷). متأسفانه در این مرحله از حفاریها نتایج موفق آمیزی به دست نیامد. بر اساس نتایج تفسیر دوباره کارهای اکتشافی تلفیقی، احتمال داده شد که سیالات با درجه حرارت بالا از جنوب یا جنوب شرق

- <sup>3</sup>- Lithosphere
- <sup>4</sup>-Eocene
- <sup>5</sup>- Potassic volcanics
- <sup>6</sup>- Paleozoic
- <sup>7</sup>- Mesozoic
- <sup>8</sup>- Miocen
- <sup>9</sup>- Mozonitic batholith
- <sup>10</sup>- Sinclair Knight Merz (SKM)

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

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Neo-Tethys





شکل (۶-۶): نقشه زمینشناسی منطقه زمین گرمایی سبلان [Kingston Morrison, 1999; EDC, 2010]. مناطق مشخص شده روی نقشه زمینشناسی با محدودههای نقطه چین که با حروف لاتین A, B, C, D, E نمایان شدهاند، مناطق مرتبط با منبع زمین گرمایی بوده که توسط مدلسازی معکوس سه بعدی مشخص شده و در آن بخش تفسیر می شوند

دادههای مگنتوتلوریک ثبت شده در سال ۱۹۹۸ در محدوده فرکانسی ۱۰۰۰–۲ هرتز از کیفیت مطلوبی برخوردار بودند. اما این دادهها برای فرکانسهای کمتر از ۲ هرتز از کیفیت خوبی برخوردار نبوده و لذا قادر به ثبت پاسخهای مربوط به عمقهای قابل ملاحظه نبودند. در سال ۲۰۰۷ سازمان انرژیهای نو سری جدید اندازه گیریهای مگنتوتلوریک با زمان تناوب طولانی را به کمک شرکت فیلیپینی EDC<sup>1</sup> طراحی و اجرا نمود. هدف از این کار تعیین موقعیت منبع احتمالی و همچنین موقعیت چاههای حفاری جدید برای توسعه تجهیزات بهرهبرداری زمین گرمایی بود [EDC, 2008]. نتایج این مطالعه تعیین یک آنومالی با مقاومتویژه کم در شرق محل حفاری E به عنوان منبع زمین-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Energy Development Corporation (EDC)

گرمایی سبلان بوده است. با توجه به ناکافی بودن ایستگاههای مگنتوتلوریک در تعیین مرزهای این آنومالی به خصوص در بخش شرق و جنوب شرق آن، اندازه گیریهای مجدد برای پوشش کامل تر منطقه توسط شرکت EDC در سال ۲۰۰۹ صورت گرفت [EDC, 2010]. تفسیر دادههای مگنتوتلوریک ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ توسط مدلهای دوبعدی، یک منطقه داغ تر<sup>1</sup> در شرق محل حفاری D را به عنوان منبع اصلی زمین گرمایی برای منطقه غرب و جنوب غرب سبلان مشخص نمود (شکل ۶-



شکل (۶-۷): نقشه توپوگرافی میدان زمینگرمایی منطقه غرب و جنوب غرب سبلان که فعالیتهای مختلف اکتشافی روی آن مشخص شده است. موقعیت ایستگاههای اندازه گیری مگنتوتلوریک که در معکوس سازی سه بعدی منظور شده-اند با علامت + به همراه نام ایستگاه در روی نقشه مشخص است. دایرههای توپر صورتی رنگ محل های حفاری را نشان میدهند. همچنین تصویر دو چاه NWS7D و NWS8D با خطوط ضخیم خاکستری رنگ روی نقشه نشان داده شده است. مسیر جریان هیدرولوژی[EDC, 2010] و منطقه داغ معرفی شده توسط شرکت EDC [2010] به ترتیب با پیکانهای سبز رنگ و یک دایره نقطه چین قهوهای رنگ نشان داده شدهاند. موقعیت مقاطع دوبعدی به همراه نام آنها به منظور تفسیر مدل سه بعدی، با خطوط قرمز رنگ نشان داده شده است

<sup>1</sup>- Hotter zone

در اینجا هدف این است که قابلیتهای روش پیشنهادی تخمین پارامتر منظمسازی جهت بهبود معکوسسازی سهبعدی در تفسیر دادههای مگنتوتلوریک منطقه سبلان مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور دو مجموعه جداگانه از دادههای برداشت شده در سالهای ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ برای مدلسازی مورد نظر قرار می گیرند. دسته اول دادههای مربوط به ایستگاههای مگنتوتلوریک واقع در منطقه غرب و جنوب غرب سبلان (شکل ۶–۵) میباشند. این دادهها شامل دادههای ۱۴ ایستگاه برداشت مگنتوتلوریک بوده که موقعیت آنها در شکل (۶–۷) مشخص شده است. دسته دیگر دادهها شامل دادههای ۱۵ ایستگاه مگنتوتلوریک در منطقه شمال سبلان میباشند. موقعیت این منطقه نیز به

#### ۶-۳-۶ دادههای مگنتوتلوریک و تحلیل ابعادی آنها

قبل از مدلسازی دادههای مگنتوتلوریک، این دادهها مورد بررسی قرار گرفتهاند و با استفاده از روش-های مختلف تحلیل ابعادی دادههای مگنتوتلوریک، ابعاد ساختارهای ژئوالکتریکی منطقه بررسی شده است. نتایج این بررسیها در پیوست (د) ارائه گردیده است.

نتایج بررسی بردارهای القایی (شکل د-۳) و تحلیل ابعادی باهر (شکل د-۵) و والدیم (جدول د-۱) بیان کننده پیچیدگی و ماهیت سه بعدی ساختارهای زیر سطحی منطقه غرب و جنوب غرب سبلان، به خصوص برای زمانهای تناوب بلند (فرکانسهای کوتاه) است. لذا ضرورت مدلسازی سه بعدی این دادهها مشخص می شود. البته نمودارهای قطبی امپدانس (شکل د-۴) و مقادیر کم امپدانسهای قطری از نظر قدر مطلق (شکلهای د-۱ و د-۲ به عنوان مثال)، بیان کننده وجود یک ساختار دو-بعدی با یک امتداد ناحیهای تقریبی در جهت شمال –جنوب هستند. در بخش معکوس سازی دادههای این منطقه نشان داده می شود که با به کار گرفتن این امتداد ناحیهای تقریبی و حذف دادههای حاوی نوفه مؤلفههای قطری امپدانس در مدل سازی معکوس سه بعدی، بازدهی کار بسیار بهتر از مدل سازی معکوس سه بعدی دادههای تانسور کامل امپدانس می باشد. تحلیلهای ابعادی برای دادههای مگنتوتلوریک منطقه شمال سبلان نیز با استفاده از روشهای تحلیل باهر و والدیم انجام شده است. نتایج تحلیل ابعادی باهر (شکل د-۶) و همچنین نتایج تحلیل والدیم (جدول د-۲) بیان کننده پیچیدگی و ماهیت سه بعدی ساختارهای زیر سطحی منطقه شمال سبلان، به خصوص برای زمانهای تناوب بلند می باشند. لذا با توجه به موارد فوق همانند منطقه غرب و جنوب غرب سبلان، ضرورت مدل سازی سه بعدی برای دادههای مگنتوتلوریک این منطقه نیز ضروری است.

#### ۶-۳-۳ معکوسسازی سه بعدی داده های مگنتو تلوریک غرب و جنوب غرب سبلان

برای اجرای الگوریتم معکوسسازی سه *بعدی* روی دادههای مگنتوتلوریک منطقه مورد مطالعه، ابتدا یک مدل اولیه با مقاومتویژه ۱۰۰ اهم-متر ساخته شده است. شکل (۶–۸) شبکه بلوکهای مقاومت-ویژه طراحی شده برای این مدل را نشان می دهد. در این شبکه ۲۸ بلوک مقاومتویژه در جهت X (شمال-جنوب)، ۲۶ بلوک در جهت Y (شرق-غرب) و ۲۰ لایه در جهت قائم طراحی شده است. ضخامت لایهها به طرف عمقهای بیشتر با ضریب ۱/۲ افزایش یافته است. ضمناً ۷ لایه هوا نیز در سطح منظور شده است. به طوری که در شکلهای (د-۱) و (د-۲) دیده می شود، دادههای مؤلفههای قطری امپدانس در برخی زمانهای تناوب حاوی مقدار خطای قابل ملاحظه هستند. این مقدار خطا-های بزرگ مانع از رسیدن معکوسسازی به مقدار عدم برازش مناسب در شروع معکوسسازی شده و مهای بزرگ مانع از رسیدن معکوسسازی به مقدار عدم برازش مناسب در نفر گرفته شده است. باعث تولید مدلهایی با تغییرات بسیار کم نسبت به مدل اولیه می شوند. برای این منظور برای مؤلفه مای اصلی و کمکی (قطری) امپدانس به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد خطای کف در نظر گرفته شده است. به همین جهت برخی از دادههای پرت و با خطای بالای ۲۰۰ درصد نیز قبل از ورود به معکوسسازی حذف شدهاند. در این مطالعه دو دسته داده به طور جداگانه برای معکوسسازی مورد آزمایش قرار کرفتهاند. در آزمایش اول که از این به بعد با آزمایش ۱<sup>°</sup> از آن نام برده می شود، دادههای مربوط به

<sup>1</sup>- Experiment 1

تانسور کامل امپدانس و در آزمایش دوم که از این به بعد با آزمایش ۲<sup>۲</sup> از آن نام برده می شود، فقط دادههای مربوط به مؤلفههای اصلی امپدانس در مدل سازی معکوس استفاده می شوند. در دو آزمایش انجام شده ۴۱ ایستگاه مورد مطالعه در ۱۶ زمان تناوب با محدوده ۰/۰۱ تا ۱۰۰ ثانیه به کار گرفته شدهاند.



مگنتوتلوریک منطقه غرب و جنوب غرب سبلان طراحی شده است. مثلثهای توپر موقعیت ایستگاههای مگنتوتلوریک را روی شبکه افقی نشان میدهند

<sup>1</sup>- Experiment 2

در آزمایشهای ذکر شده که توسط الگوریتم معکوسسازی سیریپونواراپورن و همکاران [Siripunvaraporn et al., 2005] انجام شده است، آزمایش اول یعنی معکوسسازی دادههای تانسور کامل امپدانس به طور کامل مطابق این الگوریتم اجرا شده است. اما در آزمایش دوم برای معکوس-سازی دادههای امپدانسهای اصلی، دو اجرای مختلف معکوسسازی برای این دادهها انجام شده است. در اجرای اول معکوسسازی، برای انتخاب پارامتر منظمسازی از روش اصل اختلاف استفاده شده است. در اجرای دوم، همراه با تغییراتی در الگوریتم مورد نظر برای تخمین پارامتر منظمسازی در تکرارهای مختلف معکوس سازی از طرح پیشنهادی ارائه شده، استفاده گردیده است. جدول (۶–۳) نتایج این دو اجرا را از نظر روند تخمین پارامتر منظمسازی و مقادیر تابع عدم برازش و نرم مدل به دست آمده در هر تکرار نشان میدهد. این نتایج نشان میدهند که روش اصل اختلاف با جستجوی مقادیر مختلف پارامتر منظمسازی و در نهایت انتخاب مقادیر نسبتاً کوچک این پارامتر، تلاش میکند تا مدلی با کمترین مقدار عدم برازش تولید شود. در صورتی که نرم مدل با نرخ نسبتاً بالایی افزایش مییابد. این عدم تعادل یعنی کاهش نسبتاً کم مقدار عدم برازش و افزایش نسبتاً زیاد مقدار نرم مدل به سمت تکرارهای بالاتر می تواند نشان از انحراف معکوس سازی در جهت تولید مدل های غیر واقعی باشد. یا این که احتمالاً معکوسسازی از حالت پایدار خارج شده است. در مقابل نتایج طرح پیشنهادی پایداری نسبتاً بهتری را در مقادیر عدم برازش و نرم مدل نشان میدهند. برای تأیید این تحلیلها می توان مدل تولید شده در تکرار ششم با استفاده از روش اصل اختلاف را با مدل متناظر تولید شده با استفاده از طرح پیشنهادی در همین تکرار مقایسه نمود. برای این منظور دو مقطع مقاومتویژه حاصل از دو روش مدلسازی مذکور، برای یک پروفیل شرقی-غربی که تقریباً از وسط منطقه مورد مطالعه عبور می کند، در شکل (۶–۹) مقایسه شدهاند.



شکل (۶-۹): مقایسه دو مقطع مقاومتویژه حاصل از مدلهای معکوس سهبًعدی به دست آمده از دو اجرای مختلف در آزمایش ۲. الف- با استفاده از روش اصل اختلاف ب- با استفاده از طرح پیشنهادی (این مقاطع در امتداد پروفیل P08 در شکل (۶-۷) می باشند)

با توجه به شکل (۶–۹) دیده می شود که مدل به دست آمده با استفاده از روش اصل اختلاف (شکل ۶–۹–الف) تقریباً یک مدل دو پارامتری است و از نظر توزیع مقاومتویژه با ساختارهای واقعی هم-خوانی ندارد. در واقع مدل به شدت ناهموار بوده و ساختارهای غیر واقعی در مدل وارد شدهاند. در مقابل به طوری که در بخش تفسیر نتایج مدل سازی بیان خواهد شد، مدل تولید شده با استفاده از طرح پیشنهادی (شکل ۶–۹–ب) از نظر توزیع مقاومتویژه با ساختارهای واقعی همخوانی بیشتری دارد. در این آزمایش با استفاده از روش اصل اختلاف مقدار RMS هدف که معادل سطح نوفه دادهها است به طور تجربی ۱/۷ انتخاب شده است. در همین آزمایش با استفاده از روش اصل اختلاف با

استفاده از مقادیر مختلف عدم برازش هدف در اجراهای مختلف و کنترل مقادیر عدم برازش و نرم مدل، نشان داده شده است که با انتخاب مقدار عدم برازش هدف در حدود ۲ می توان یکی از مدلهای تولید شده به ازای مقادیر مختلف پارامتر منظمسازی در تکرار پنجم که مقدار RMS آن ۱/۹۵ و نرم آن ۱۷۶۰۰ است را به عنوان مدل مورد انتظار انتخاب نمود[Ghaedrahmati et al., 2013a]. به طوری که این مدل تقریباً معادل مدل به دست آمده با استفاده از طرح پیشنهادی در تکرار پنجم معکوسسازی (جدول ۶–۳) است. البته با این تفاوت که مدل به دست آمده از طرح پیشنهادی از مدل مذکور هموارتر است. در واقع چنان که پیشتر بیان شد در روش اصل اختلاف نیاز است که سطح نوفه دادهها معلوم باشد تا به توان مدل مناسب را به دست آورد. همچنین زمان محاسبات معکوس-سازی نیز برای ۵ تکرار اول روش اصل اختلاف در جدول (۶–۵) حدود ۶۰۰ دقیقه (روی یک كامپيوتر پنج هسته با CPU= 2.53 GHz و RAM = 4GB) و براى همين ۵ تكرار با استفاده طرح پیشنهادی حدود ۴۴۰ دقیقه طول کشیده است. در واقع در طرح پیشنهادی حدود ۲۷ درصد زمان محاسبات كاهش یافته است. در ادامه تفسیر منبع زمین گرمایی غرب سبلان با استفاده از مدل به دست آمده از کنترل روش اصل اختلاف (مدلی با RMS حدود ۲ و نرم ۱۷۶۰۰ که در بالا به آن اشاره شد) که معادل مدل به دست آمده با استفاده از طرح پیشنهادی در تکرار پنجم آزمایش ۲ (جدول ۶-۳) میباشد همراه با نتایج مدلسازی آزمایش ۱ ارائه میشود.

### ۶–۳–۴ تفسیر نتایج معکوسسازی دادههای مگنتوتلوریک منطقه غرب سبلان

شکلهای (۶–۱۰) و (۶–۱۱) نتایج مدلسازی معکوس سه بعدی را به صورت مقاطع افقی مقاومت ویژه در عمقهای مختلف به ترتیب برای آزمایشهای ۱ و ۲ نشان می دهند. مقایسه این دو مدل، نشان می دهد که معکوس سازی داده های تانسور کامل امپدانس (آزمایش ۱) مدل معکوسی با تغییرات کم نسبت به مدل اولیه، به خصوص در لایه های عمیق تر تولید نموده است. در واقع این مسئله به خاطر این واقعیت است که مؤلفه های قطری امپدانس که نسبتاً حاوی نوفه هستند، مانع از به هنگام نمودن مدل توسط معکوس سازی می شوند.



شکل (۶–۱۰): مقاطع افقی مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک منطقه غرب و جنوب غرب سبلان در عمقهای مختلف برای آزمایش ۱ (لحاظ دادههای تانسور کامل امپدانس). نقاط روی مقاطع مشخص کننده موقعیت ایستگاههای اندازه گیری هستند



شکل (۶–۱۱): مقاطع افقی مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک منطقه غرب و جنوب سبلان، در عمقهای مختلف برای آزمایش ۲ با استفاده از طرح پیشنهادی (لحاظ دادههای مؤلفههای اصلی تانسور امپدانس). مناطق مشخص شده با حروف لاتین A، B، C، B، A و F مشخص کننده آنومالیهای رسانا مرتبط با منبع زمین گرمایی مورد مطالعه بوده که در بخش تفسیر نتایج بررسی می شوند. همچنین موقعیت جدید منطقه داغ تر با یک بیضی و موقعیت آن در مطالعات قبلی با یک دایره در مقطع مربوط به عمق ۴۶۰۰ متر مشخص شده است

زمانی که مؤلفههای قطری امپدانس از نظر قدر مطلق دارای مقادیر نسبتاً کوچکی باشند فلذا دارای نسبت سیگنال به نوفه کمتری هم نسبت به مؤلفههای اصلی امپدانس خواهند بود. در چنین شرایطی، این مسئله باعث کاهش کیفیت معکوسسازی دادههای تانسور کامل امپدانس از نظر اجرا برای تولید مدل مناسب میشود [Newman et al., 2008]. بنابراین مدل معکوس حاصل از دادههای مؤلفههای اصلی امپدانس در حالت آزمایش ۲ برای تفسیر ترجیح داده شده است.

شکل (۶–۱۲) مقایسه پاسخهای مدل و دادههای مشاهدهای متناظر را برای دو آزمایش ۱ و ۲ نشان میدهد. با توجه به این شکل ملاحظه میشود که در کل پاسخهای مدل، برازش نسبتاً خوبی با داده-های مشاهدهای نشان میدهند. در آزمایش ۱ پاسخهای مقاومتویژه برای مؤلفههای اصلی امپدانس نسبت به این پاسخها برای مؤلفههای کمکی، برازش بهتری را با دادههای مشاهدهای متناظر نشان میدهند. به طور کلی شبه مقاطع مقاومتویژه ظاهری برای مؤلفههای کمکی، مقاومتویژه کمتری را نسبت به شبه مقاطع مقاومتویژه ظاهری برای مؤلفههای کمکی، مقاومتویژه کمتری را نسبت به شبه مقاطع مقاومتویژه ظاهری برای مؤلفههای کمکی، مقاومتویژه کمتری را نسبت به شبه مقاطع مقاومتویژه ظاهری برای مؤلفههای اصلی نشان میدهند. این مسئله به این خاطر است که سیستم مختصات محاسبه امپدانسها تقریباً در جهت امتداد ناحیهای شمال –جنوب قرار گرفته است. لذا در این حالت مؤلفههای قطری تانسور امپدانس مگنتوتلوریک به کمترین مقدار میرسند. به طور عمومی مقادیر مقاومتویژه ظاهری مؤلفه وی<sub>x</sub>Z بیشتر از مقادیر نظیر برای مؤلفه <sub>xy</sub>Z در زمانهای تناوب بلند است. مقایسه پاسخهای مدل با دادههای مشاهدهای متناظر در آزمایش ۲ با استفاده از طرح پیشنهادی برازش بهتری را نسبت به این پاسخها با دادههای مشاهدهای در آزمایش ۱ با نشان میدهد.

به منظور ارزیابی نتایج معکوس سازی سه بعدی و مقایسه آن ها با نتایج معکوس سازی دوب عدی کارهای قبلی [EDC, 2010]، سه مقطع مقاومت ویژه P03، P02 و P06 حاصل از معکوس سازی سه بعدی آزمایش ۲ با استفاده از طرح پیشنهادی که موقعیت آن ها در شکل (۶–۷) نشان داده شده است، با مدل های دوب عدی متناظر به دست آمده در امتداد این پروفیل ها در (شکل (۶–۱۳) مقایسه شده اند. با توجه به این شکل می توان گفت که نتایج معکوس سازی سه بعدی مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج



معکوس سازی دوبُعدی نشان میدهند. اختلاف مقاومتویژه در تمامی مقاطع مدل سهبُعدی تقریباً مشابه آن در مقاطع مدل دوبُعدی است.

شکل (۶–۱۲): مقایسه شبه مقاطع دادههای مشاهدهای مقاومتویژه برای هر مؤلفه امپدانس با پاسخهای متناظر از مدل در معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک منطقه غرب و شمال غرب سبلان برای آزمایشهای ۱ و ۲ (در این مقاطع تمامی ۴۱ ایستگاه روی یک پروفیل شرقی-غربی دلخواه تصویر شدهاند)



شکل (۶–۱۳): مقایسه مقاطع مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک غرب و جنوب غرب سبلان برای آزمایش ۲ با استفاده از طرح پیشنهادی با مدلهای معکوس دوبعدی توسط EDC, 2010 [EDC, 2010] در امتداد سه پروفیل P03، P03، P04 که در شکل (۶–۲) مشخص شدهاند. مقاطع سمت چپ نشان دهنده مدلهای دو-بعدی و مقاطع سمت راست حاصل از مدل سه بعدی هستند، همچنین موقعیت ایستگاههای اندازه گیری مگنتوتلوریک برای مقایسه بهتر و برخی گسلها نیز با خطوط نقطه چین ضخیم روی مدلهای دوبعدی آورده شده است

مدل سه بعدی در راستای پروفیل PO3 یک لایه پوششی با مقاومتویژه بالا (بیشتر از ۳۰۰ اهم متر) در بخش جنوبی مقطع زیر ایستگاه ۲۴۰ را نشان می دهد. در زیر این لایه یک آنومالی رسانا با مقاومتویژه کمتر از ۱۰ اهم متر حد فاصل عمق های ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر زیر ایستگاه ۲۴۴ قرار گرفته است. همچنین یک توده مقاوم با مقاومتویژه بیشتر از ۱۰۰ اهم متر در زیر ایستگاههای ۱۱۱ و ۲۱۹ در عمق حدود ۱۵۰۰ متر تصویر شده است، که به طرف عمق با یک جهت شیب جنوبی کشیده شده است. در مقطع مدل سه بعدی PO2 دو منطقه رسانا با مقاومتویژه کمتر از ۲۰ اهم متر تصویر شده است. در مقطع مدل سه بعدی PO2 دو منطقه رسانا با مقاومتویژه کمتر از ۲۰ اهم متر تصویر شده است. در مقطع مدل سه بعدی PO2 دو منطقه رسانا با مقاومتویژه کمتر از ۲۰ اهم متر ایستگاههای ۲۱۸ و ۲۱۶ در بخش شرقی مقطع واقع شده است. در عمق کم (حدود ۵۰۰ متر) این دو منطقه به هم پیوسته شده و یک لایه رسانا نازک زنگولهای شکل را تشکیل می دهند. این شکل اهم متر) تصویر شده در مقطع PO3 در زیر این لایه نازک رسانا در زیر ایستگاه این دو منطقه به هم پیوسته شده و یک لایه رسانا نازک زنگولهای شکل را تشکیل می دهند. این شکل اهم متر) تصویر شده در مقطع PO3 در زیر این لایه نازک رسانا در زیر ایستگاه ۹۰۰ قرار گرفته و دو زنگولهای در مدل دو بعدی متناظر به طور واضح تولید نشده است. همان توده مقاوم (بیشتر از ۱۰۰ مدلقه رسانا نشان داده شده در مقطع PO3 در زیر این لایه نازک رسانا در زیر ایستگاه ۱۰۹ قرار گرفته و دو زنگولهای در مدل نده مدم مقطع PO3 در زیر این لایه نازک رسانا در زیر ایستگاه ۹۰۱ قرار گرفته و دو منطقه رسانا نشان داده شده در مقطع PO3 در زیر این لایه نازک رسانا در زیر ایستگاه ۹۰۱ قرار گرفته و دو منطقه رسانا نشان داده شده در مقطع PO3 را از هم جدا می کند. مشخصه روشن مقطع PO3 مدل منطقه رسانا نشان داده شده در مقطع PO3 را از هم جدا می کند. مشخصه روشن مقطع PO3 مدل

با توجه به مقاطع عمقی مقاومتویژه در شکل (۶–۱۱) میتوان منطقه A با مقاومتویژه کم را تعیین نمود که از شمال غرب منطقه مورد مطالعه در طول یک دره (با توجه به نقشه توپوگرافی) تا مرکز منطقه کشیده شده است. با استفاده از نقشه زمینشناسی (شکل ۶–۶)، این منطقه در طول یکی از ساختارها و گسلهای اصلی منطقه قرار گرفته است. این منطقه رسانا در واقع میتواند به عنوان یک منطقه دگرسانی تفسیر شود که به وسیله جریان سیال گرم در طول گسلها و ساختارهای نفوذپذیر ایجاد شده است. لذا این گسلها با نفوذپذیری قابل ملاحظه میتوانند اهداف خوبی برای حفاری باشند. همچنین ساختارهای نفوذپذیر که توسط چاههای I-SWN و 4-80 (به ترتیب در محلهای حفاری A و B در شکل ۶–۷) [EDC, 2010] قطع شدهاند، در این جهت قرار گرفتهاند. این موضوع با وجود چشمههای آب گرم قرار گرفته در منطقه که در نقشه زمینشناسی نشان داده شدهاند نیز تأیید میشود. ضمناً مطابق مطالعات شرکت EDC [EDC, 2010] مدل معکوس دوبُعدی در طول پروفیل P01 (شکل ۶–۱۴) نیز این منطقه رسانا را ثبت نموده است.



شکل (۶–۱۴): مدل معکوس دوبُعدی در طول پروفیل P01 به همراه دادههای حفاری [EDC, 2010] (Sm مشخصه اسمکتیت<sup>۱</sup>، II ایلیت<sup>۲</sup>، Ser سریسیت<sup>۲</sup>، و Me مشخصه متامورفیک<sup>۵</sup> است)

منطقه رسانا در شمال ناحیه مورد مطالعه که با حرف لاتین B در مقطع مقاومتویژه با عمق ۳۰۰ متر در شکل (۶–۱۱) مشخص شده است، میتواند یک منطقه دگرسانی ضخیم باشد. این منطقه در مقطع مربوط به عمق ۱۰۰۰ متر هم به طور واضح تصویر شده است و با توجه به دیگر مقاطع در این شکل تا عمق بیش از ۱۵۰۰ متر نیز ادامه یافته است. البته توزیع عمقی این منطقه رسانا در مقطع شمالی-جنوبی P07 در شکل (۶–۱۵) به طور بهتری مشخص شده است. این منطقه رسانا به احتمال قوی به

- <sup>1</sup>- Smectite
- <sup>2</sup>- Ilite
- <sup>3</sup>- Sericite
- <sup>4</sup>- Epidote
- <sup>5</sup>- Metamorphic

خاطر عبور جریانهای گرم در محل تقاطع دو گسل شرقی-غربی با یک گسل شمال غربی-جنوب شرقی که در نقشه زمینشناسی منطقه مشخص شدهاند، ایجاد شده است. همچنین این منطقه منطبق بر منطقه دگرسانی شناسایی شده توسط مطالعات زمینشناسی است (شکل ۶-۶).



شکل (۶–۱۵): مقاطع مقاومتویژه در طول پروفیلهای PO8 (در سمت چپ) و PO7 (در سمت راست) که از مدل معکوس سهبُعدی آزمایش ۲ با استفاده از طرح پیشنهادی به دست آمدهاند (موقعیت پروفیلها در شکل ۶–۷ نشان داده شده است)

دو منطقه رسانا در غرب و شرق ناحیه مورد مطالعه در مقطع مقاومتویژه با عمق ۱۰۰۰ متری آشکار شدهاند (مناطق نشان داده شده با حروف C و C در شکل ۶–۱۱). با در نظر گرفتن دیگر مقاطع در این شکل مثل مقاطع مربوط به عمقهای ۱۵۰۰، ۲۶۰۰، ۲۶۰۰ و ۴۶۰۰ متر دیده میشود که این دو منطقه رسانا به صورت قائم و V شکل به طور پیوسته ادامه یافته و در عمق حدود ۲۵۰۰ متر به هم رسیده و یکی می شوند. سپس این منطقه به طور قائم تا عمق بیش از ۴۶۰۰ متر ادامه می یابد. مقطع قائم 804 در شکل (۶–۱۵) به طور بهتری گسترش عمقی این منطقه رسانا را نشان میدهد. توده مقاومی که دو منطقه رسانا C و C را بین عمقهای ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متری از هم جدا می کند (مقاطع مقاومی که دو منطقه رسانا C و C را بین عمقهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متری از هم جدا می کند (مقاطع ایستگاه ۲۱ و زیر یک منطقه رسانا کم عمق قرار گرفته است. در بین پروفیلهای دوبُعدی فقط پروفیل ۲03 (شکل ۶–۱۵) بخشی از این ناحیه رسانا را قطع نموده است و لذا بخشی از منطقه رسانا 191

D توسط مدل دوبُعدي مربوط به اين يروفيل ثبت شده است. دو چاه اکتشافي NWS7D و NWS8D به ترتیب در محلهای حفاری D و E (شکل ۶−۷)، نیز در نزدیکی منطقه داغ نشان داده شده در این شکل حفر شدهاند. دادههای در دسترس از این چاهها [EDC, 2010] که معرف مناطق دگرسانی هستند، در شکل (۶–۱۴) نشان داده شدهاند. متأسفانه هیچ کدام از این چاهها به طور کامل در این منطقه داغ حفر نشدهاند و لذا نمی توان با استفاده از دادههای این چاهها این منطقه را به خوبی بررسی نمود. البته مناطق رسانا به دست آمده از مدل سهبُعدي به طور بهتري دادههاي حفاري را نسبت به مدل دوبُعدى در طول پروفيل P01 توجيه مىكنند. لذا با توجه به اين ملاحظات ناحيه زيرين مناطق رسانای C و D در مقطع مقاومتویژه با عمق ۴۶۰۰ متری به احتمال قوی مشخص کننده منبع زمین گرمایی است. این منطقه رسانای عمیق می تواند با جریان سیال، بین مناطق با چگالی خرد-شدگی بالا مرتبط باشد. به عبارت دیگر افزایش رسانایی این ناحیه به خاطر تخلخل بالا (یا خردشدگی و شکستگی بالا) و مقاومتویژه کم سیال موجود در منافذ میباشد. همچنین مناطق با مقاومتویژه بالا در این ناحیه داغ می تواند به خاطر تخلخل کم (درجه شکستگی یا خردشدگی کم) این مناطق باشد. با توجه به وجود گسلهای متعدد در منطقه و تلاقی آنها (نقشه زمینشناسی شکل ۶-۶) این فرضیات که مناطق نسبتاً عمیق با رسانایی بالا مرتبط با ناحیه شکستگی یا خردشدگی است، تأیید مى شود.

بررسی بیشتر مقاطع افقی مقاومتویژه در شکل (۶–۱۱)، دو منطقه رسانا در جنوب و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه در مقطع مربوط به عمق ۱۰۰۰ متری (مناطق E و F) را نشان میدهد که به طور قائم تا عمق بیش از ۱۵۰۰ متر ادامه یافتهاند. این مناطق رسانا میتوانند مناطق دگرسانی باشند که حاصل واکنش جریانهای گرم بوده که از منبع زمین گرمایی در مرکز ناحیه در طول گسلها و شکستگیها پخش شدهاند. این موضوع با توجه به مسیرهای جریان هیدرولوژی نشان داده شده در شکل (۶–۲) که از مطالعات EDC, 2010 [EDC, 2010] به دست آمده است، قابل تأیید است. در کل با توجه به نتایج مدلسازی سه بعدی صورت گرفته در مطالعه حاضر می توان اشاره کرد که موقعیت منبع زمین گرمایی (یعنی منطقه داغ تر) در غرب و جنوب غرب سبلان به طور بهتری نسبت به نتایج مدل سازی های دو بعدی تعیین شده است. به طوری که، پیش بینی می شود این منبع در مرکز ناحیه مورد مطالعه در زیر ایستگاه های ۷ و ۲۱ در منطقه ای بیضی شکل و با مساحت حدود ۷ کیلومتر مربع قرار گرفته باشد (شکل ۶–۱۱ مقطع مربوط به عمق ۴۶۰۰ متر). نتایج مدل سازی سه-بعدی نشان می دهد که مرکز جدید این منطقه داغ تر حدود یک کیلومتر، نسبت به منطقه داغ قبلی که توسط نتایج مدل سازی های دو بعدی تعیین شده است، به طرف جنوب جابجا شده است. همچنین نتایج مدل سازی سه بعدی موقعیت مناطق داغ تر حدود یک کیلومتر، نسبت به منطقه داغ قبلی مشخص می کند. این مناطق دگر سانی مرتبط با منبع زمین گرمایی مذکور را به خوبی شده اند به خوبی مشخص و توجیه شده اند.

#### ۶–۳–۵– معکوسسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک منطقه شمال سبلان

همانند معکوسسازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک منطقه غرب و جنوب غرب سبلان، در اینجا نیز برای اجرای الگوریتم معکوسسازی سه بعدی روی داده های مگنتوتلوریک، ابتدا یک مدل اولیه با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم -متر ساخته شده است. در این مدل ۲۲ بلوک مقاومت ویژه در جهت x (شمال – جنوب)، ۲۶ بلوک در جهت y (شرق –غرب) و ۲۳ لایه در جهت قائم طراحی شده است. ضخامت لایه ها به طرف عمق های بیشتر با ضریب ۲/۱ افزایش یافته است. ضمناً Y لایه هوا نیز در سطح منظور شده است. در اینجا نیز برای داده های مؤلفه های اصلی و کمکی امپدانس به ترتیب ۱۰ و ۲۰ درصد خطای کف در نظر گرفته شده است. به همین جهت برخی از داده های پرت و با خطای بالای ۲۰۰ درصد نیز قبل از ورود به معکوس سازی حذف شده اند. در آزمایش های معکوس سازی در این بخش ۱۵ بنا بر دلایل ذکر شده در خصوص داده های منطقه غرب و جنوب غرب سبلان، در اینجا فقط از داده-بنا بر دلایل ذکر شده در خصوص داده های منطقه غرب و جنوب غرب سبلان، در اینجا فقط از داده-های مربوط به مؤلفه های اصلی اسرازی سه بعدی سازی سه بعدی استان در این بخش ۵۷ در آزمایشهای معکوسسازی دو اجرای مختلف معکوسسازی برای این دادهها انجام شده است. در اجرای اول معکوسسازی سه بعدی، برای انتخاب پارامتر منظمسازی از روش اصل اختلاف استفاده شده است. در اجرای دوم، برای تخمین پارامتر منظمسازی در تکرارهای مختلف معکوسسازی سه-بعدی از طرح پیشنهادی ارائه شده، استفاده گردیده است. جدول (۶–۴) نتایج این دو اجرا را از نظر روند تخمین پارامتر منظمسازی و مقادیر عدم برازش و نرم مدل به دست آمده در هر تکرار نشان می-دهد.

	۴	٣	٢	١	شماره تکرار		
	٣	۴	۴	۴	تعداد λ مورد آزمایش	اجرای اول با استفاده از روش	
• /	• 37	•/•٣٢	• / ١	۰/۳۱۶	مقدار ۵ انتخاب شده		
١	/18	۱/۳۲	1/04	2/41	RMS		
۲	•••	٨٩۵٠	۳۵۷۰	791.	نرم مدل	اصل اختلاق	
	١	١	١	١	تعداد λ مورد آزمایش	1 . 1 1	
•	/9٣	٠/٧٩	•/97	۰/۵۸	مقدار ۵ انتخاب شده	اجرای دوم با	
1	/44	۱/۴۸	۱/۵۹	۲/۴۳	RMS	استفاده از طرح پیشنهادی	
۵	٩/۴	144	586	۲۷۵۰	نرم مدل		

جدول (۶-۴): مقادیر پارامتر منظمسازی، RMS و نرم مدل در تکرارهای مختلف معکوسسازی سه بعدی برای دو اجرای مختلف آزمایش معکوسسازی روی دادههای ۱۵ ایستگاه مگنتوتلوریک در منطقه شمال سبلان

با توجه به این نتایج، در این مثال نیز همانند مثالهای قبل، روش اصل اختلاف با جستجوی مقادیر مختلف پارامتر منظمسازی و در نهایت انتخاب مقادیر نسبتاً کوچک این پارامتر تلاش می کند تا مدلی با کمترین مقدار عدم برازش تولید شود. مثلاً در این اجرا در تکرار سوم مقدار پارامتر منظمسازی با کمترین مقدار عدم برازش تولید شود. مثلاً در این اجرا در تکرار سوم مقدار پارامتر منظمسازی ۲۰۳۳ تخمین زده شده است. اگر چه این مقدار پارامتر منظمسازی باعث کاهش معمول عدم برازش شده ولی افزایش قابل ملاحظه نرم مدل را نیز به همراه دارد. در واقع این افزایش قابل ملاحظه نرم از تکرار دوم به تکرار سوم (از ۳۵۷۰ به ۲۹۵۰) به معنی دور شدن از مدل واقعی و عدم پایداری معکوسسازی است. چنین روندی در تکرار چهارم به پنجم هم برای این اجرا اتفاق افتاده است. با توجه به این موارد به نظر میرسد که معکوسسازی در این اجرا (روش اصل اختلاف) به طور پایدار پیش نرفته است. در مقابل نتایج طرح پیشنهادی پایداری نسبتاً بهتری را در مقادیر عدم برازش و نرم مدل نشان میدهند. به طوری که با پیشرفت معکوسسازی، مقادیر عدم برازش و نرم مدل به طور همزمان کاهش مییابند. همچنین دیده میشود که با استفاده از این طرح پیشنهادی معکوسسازی به مدلی همگرا شده است که ضمن منظور نمودن شرط برازش مناسب برای دادهها به اندازه کافی نیز هموار میباشد که هدف اصلی الگوریتم معکوسسازی است.

علاوه بر موارد فوق از نظر بازدهی محاسباتی نیز این مثال همانند مثالهای قبل نشان میدهد که روش پیشنهادی مؤثرتر از روش اصل اختلاف است. به طوری که اجرای اول معکوسسازی (روش اصل اختلاف) حدود ۳۰۰ دقیقه (روی یک کامپیوتر پنچ هسته با CPU= 2.53 GHz و GAB = 4GB) اختلاف) حدود ۳۰۰ دقیقه (روی یک کامپیوتر پنچ هسته با RAH جای و CPU= 2.53 GHz دقیقه طول کشیده است. در صورتی که اجرای دوم (روش پیشنهادی) با همین کامپیوتر حدود ۴۵۵ دقیقه طول کشیده است. در صورتی که اجرای دوم (روش پیشنهادی) با همین کامپیوتر حدود ۴۵۵ دقیقه طول کشیده است. در صورتی که اجرای دوم (روش پیشنهادی) با همین کامپیوتر حدود ۴۵۵ دقیقه طول کشیده است. در صورتی که اجرای دوم (روش پیشنهادی) با همین کامپیوتر حدود ۴۵۵ دقیقه طول کشیده است. در صورتی که اجرای دوم (روش پیشنهادی در معکوسسازی سه معدی، حدود ۴۵۵ درصد محول کشیده است. یعنی با استفاده از طرح پیشنهادی در معکوسسازی سه معدی، حدود ۴۵۵ درصد محول کشیده است. می معدی می معدی می شود. در واقع علت کاهش قابل ملاحظه سرعت محاسبات در معکوسسازی با استفاده از روش اصل اختلاف فقط ناشی از فرآیند محاسبات پیشرو، محاسبات در معکوسسازی با استفاده از روش اصل اختلاف فقط ناشی از فرآیند محاسبات پیشرو، محاسبات در معکوسسازی با استفاده از روش اصل اختلاف فقط ناشی از فرآیسی محاسبات پیشرو، محاسبات در معکوسسازی با ستفاده از روش اصل اختلاف فقط ناشی از فرآیند محاسبات پیشرو، معادیر نسبتاً کوچک پارامتر منظمسازی توسط این روش باعث کاهش سرعت ساخت ماتریس معادیر نسبتاً کوچک پارامتر منظمسازی توسط این روش علاوه بر بار محاسباتی که به طور مستقیم بر محاسبیت در معکوسسازی می می دند به طور غیر مستقیم هم باعث کاهش سرعت محاسبات می شود. برای بررسی بیشتر نتایج دو روش مذکور، می توان مدل تولید شده در تکرار پنجم با استفاده از روش علاوه بر بار محاسباتی که به طور مستقیم بر معکوسسازی تحمیل می کند به طور مستقیم زمر معکوسسازی تحمیل می کند به طور غیر مستقیم هم باعث کاهش سرعت محاسبات می شود.

مقایسه نمود. متأسفانه در این ناحیه هیچ داده مستقل دیگری (مثل حفاری) وجود ندارد که بتوان از آن برای ارزیابی اعتبار نتایج مدلسازی سه بعدی استفاده کرد. از این رو مقاطع قائم مقاومتویژه در راستای پروفیلهای P04 و P05 (شکل ۶–۵) حاصل از دو روش مدلسازی سه بعدی مذکور با مقاطع متناظر حاصل از مدلسازی معکوس دوبعدی [EDC, 2010] در شکل (۶–۱۶) مقایسه شدهاند.



شکل (۶-۱۶): مقایسه مقاطع قائم حاصل از معکوس سازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک منطقه شمال سبلان برای دو اجرای مختلف (جدول ۶-۴) با مدل های معکوس دو بعدی توسط EDC [EDC, 2010]، در امتداد دو پروفیل نشان داده شده در شکل (۶-۵). مقاطع ردیف فوقانی نشان دهنده مدل های دو بعدی، مقاطع میانی حاصل از مدل سه بعدی با استفاده از روش اصل اختلاف و مقاطع تحتانی حاصل از مدل سه بعدی با استفاده از روش پیشنهادی هستند.

همچنین موقعیت ایستگاههای اندازه گیری مگنتوتلوریک برای مقایسه بهتر آورده شده است. برخی گسل ها نیز با خطوط سفید بریده ضخیم روی مدل های دوبُعدی نشان داده شده است در اینجا نیز همانند نتایج دو روش مدل سازی در جدول (۶–۴)، در مدل های مربوطه در شکل (۶–۱۶) دیده می شود که مدل به دست آمده با استفاده از روش اصل اختلاف دارای اختلاف مقاومت ویژه نسبتاً بیشتر از حد معقول برای یک مدل هموار، بین بخش های مقاوم و رسانا است. در واقع این مدل بخش-های رسانا را رساناتر و بخش های مقاوم را مقاومتر نشان می دهد. این مسئله باعث می شود که مدل از مرانا را رساناتر و بخش های مقاوم را مقاومتر نشان می دهد. این مسئله باعث می شود که مدل از بیشنهادی یک مدل هموار است و احتمال این که در آن ساختارهای غیر واقعی وجود داشته باشد، کمتر است. حال با مقایسه این مقاطع حاصل از مدل سختارهای غیر واقعی وجود داشته باشد، (شکل ۶–۶۱)، دیده می شود که نتایج به دست آمده از طرح پیشنهادی از مراز مقاطع حاصل از مدل دوبُعدی (مکل ۶–۶۱)، دیده می شود که نتایج به دست آمده از طرح پیشنهادی بسیار بهتر از نتایج به دست آمده از روش اصل اختلاف، با نتایج حاصل از مدل سازی دوبُعدی انطباق دارند. به طوری که مقطع به دست آمده از معکوس سازی سه بعدی با استفاده از روش اصل اختلاف در ند. ایم موری که مقطع به زیر ایستگاه ۲۰۹ معطع دوبُعدی نظیر دارد. احتمالاً ساختار با مقاومتویژه کم (حدود ۱۰ هم موری که مقطع به زیر ایستگاه ۲۰۹ حد فاصل عمقهای ۳۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از مدل حاصل از روش اصل اختلاف در طول پروفیل P04 اختلاف

شکل (۶-۱۶) یک ساختار غیر واقعی میباشد.

۶–۳–۶– تفسیر نتایج معکوسسازی سه بعدی دادههای مگنتو تلوریک منطقه شمال سبلان شکل (۶–۱۷) نتایج معکوسسازی سه بعدی با استفاده از طرح پیشنهادی را به صورت مقاطع افقی مقاومت ویژه در عمقهای مختلف نشان می دهد. همچنین شکل (۶–۱۸) مقایسه پاسخهای تئوری و دادههای مشاهده ای متناظر را برای این مدل معکوس (شکل ۶–۱۷) نشان می دهد. با توجه به این شکل در کل پاسخهای مدل، برازش نسبتاً خوبی را با دادههای مشاهده ای نشان می دهند. البته مقداری اختلاف بین دادههای مشاهده ای و پاسخ مربوطه در هر دو مؤلفه ام دانس برای زمانهای تناوب حدود ۱ تا ۱۰۰ ثانیه در ایستگاههای قرار گرفته در طول ۲۴۲ تا ۷۴۴ کیلومتری وجود دارد. این مقدار اختلاف به خاطر عدم وجود داده مشاهدهای در محدوده زمانتناوب ۱ تا ۱۰۰ ثانیه برای ایستگاههای مذکور است. در دیگر زمانهای تناوب برای این ایستگاهها و دیگر ایستگاهها، دادههای مشاهدهای و پاسخ مدل در هر دو مؤلفه امیدانس به خوبی قابل مقایسه هستند.

با توجه به شکل (۶–۱۷) آنومالیهای رسانایی در مقاطع مختلف این شکل دیده می شود که به صورت مناطق مختلف با حروف لاتین مشخص شدهاند. با در نظر گرفتن نقشه زمین شناسی منطقه (شکل ۶– ۶) و همچنین نتایج مدلسازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک برای منطقه غرب و جنوب غرب سبلان و تفسیر این نتایج، مناطق آنومالی مذکور را می توان به صورت ذیل تفسیر نمود.

با بررسی کلی مقاطع افقی مقاومتویژه در شکل (۶–۱۷) و همچنین با توجه به مقاطع قائم ردیف تحتانی در شکل (۶–۱۶) چنین استنباط می شود که بالاآمدگی منطقه مقاوم (با مقاومتویژه حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ اهم-متر) در زیر ایستگاههای ۲۰۳ و ۲۰۵ در عمق حدود ۲۰۰۰ متری که دو ناحیه رسانا را از هم جدا میکند، احتمالاً یک منبع زمینگرمایی باشد. دیگر مناطق آنومالی رسانا را می توان به واسطه عبور سیالات گرم در طول گسلهای مرتبط با این منبع گرمایی تفسیر نمود. این منطقه توسط یک بیضی با خط چین قرمز روی مقطع افقی مربوط به عمق ۲۰۰۰ متری در شکل (۶-۱۷) مشخص شده است. همچنین منطقه داغ تعیین شده توسط مطالعات شرکت EDC, 2010] با یک ناحیه بزرگتر در همین مقطع توسط یک بیضی با خط ممتد سیاه نشان داده شده است. مساحت منطقه داغ تعیین شده در این مطالعه حدود ۶ کیلومتر مربع می باشد که نسبت به ناحیه داغ تعیین شده قبلی حدود ۵۰ درصد کوچکتر شده است. در واقع این منطقه جدید یک ناحیه داغتر می باشد. متأسفانه نقشه گسلهای این منطقه به اندازه نقشه گسلهای منطقه غرب و جنوب غرب سبلان کامل نمی باشد. اما برخی از گسل ها در مقاطع مدل های دوبُعدی (شکل ۶–۱۶) مشخص شدهاند. مناطق G و H در مقطع افقی مقاومتویژه مربوط به عمق ۳۰۰ متری، احتمالاً مناطق دگرسانی کم عمقی هستند که به واسطه عبور سیالات گرم در طول گسل نشان داده شده در مقطع قائم شرقی-غربی مدل دوبُعدی شکل (۶-۱۶) حد فاصل ایستگاههای ۱۷ و ۱۸ ایجاد شدهاند. البته این گسل با یکی از ساختارهای اصلی منطقه (کالدرا) که از نزدیک منبع احتمالی تعیین شده عبور کرده است، برخورد می کند (شکلهای ۶-۵ و ۶-۶).

منطقه K در مقطع افقی مقاومتویژه مربوط به عمق ۱۰۰۰ متری و منطقه L که در واقع ادامه منطقه K میباشد و در مقطع ۱۵۰۰ متری ظاهر شده است، به احتمال قوی مناطق دگرسانی عمیق و ضخیمی هستند که به واسطه گسلهای نشان داده شده در مقطع شرقی-غربی حاصل از مدلسازی دوبُعدی در شکل (۶–۱۶) حد فاصل ایستگاههای ۲۰۳ و ۲۰۴ و همچنین ۲۰۳ و ۲۰۹ ایجاد شدهاند. همچنین منطقه L نیز احتمالاً یک منطقه دگرسانی است که در امتداد گسلی که تقریباً عمود بر قطر بزرگ بیضی نشان دهنده منطقه داغ در این مطالعه (مقطع افقی در ۲۰۰۰ متری در شکل ۶–۱۷) میباشد، ایجاد شده است. این گسل در مقاطع حاصل از مدلسازی دوبُعدی در شکل (۶–۱۶) در حد


شکل (۶–۱۷): مقاطع افقی مقاومتویژه حاصل از معکوسسازی سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک منطقه شمال سبلان، در عمقهای مختلف برای اجرای دوم با استفاده از طرح پیشنهادی. مناطق مشخص شده با حروف لاتین G، H، I، K و L مشخص کننده آنومالیهای رسانا مرتبط با منبع زمین گرمایی مورد مطالعه بوده که در بخش تفسیر نتایج بررسی می شوند. منطقه داغ تعیین شده در این مطالعه توسط یک بیضی با خط چین قرمز و در مطالعات قبلی [EDC, 2010] توسط یک بیضی با خط ممتد سیاه روی مقطع مربوط به عمق ۲۰۰۰ متری مشخص شده است. (نقاط روی مقاطع مشخص کننده موقعیت ایستگاههای اندازه گیری هستند همچنین نام برخی ایستگاههای شاخص نیز در مقطع مربوط به عمق ۱۰۰۰ متری آمده است)



شکل (۶–۱۸): مقایسه شبه مقاطع دادههای مشاهدهای مقاومتویژه برای مؤلفههای اصلی امپدانس با شبه مقاطع پاسخهای متناظر از مدل معکوس سهبُعدی شکل (۶–۱۷). در این مقاطع تمامی ۱۵ ایستگاه روی یک پروفیل شرقی– غربی دلخواه تصویر شدهاند

# فصل هفتم

نتایج و پیشنهادات

#### ۷\_۱\_ مقدمه

در انجام این تحقیق ابتدا اساس تئوری روش مگنتوتلوریک مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس با توجه به اهداف تحقیق، مسئله مدلسازی معکوس دادههای مگنتوتلوریک مد نظر قرار گرفته و تقریباً کلیه الگوریتمهای موجود برای معکوسسازی دادههای این روش، اعم از الگوریتمهای یک بُعدی، دو-بُعدى و سه بُعدى بررسى گرديده است. در مرحله بعد با توجه به اين مطالعات، كليه الگوريتم هاى موجود در چهار دسته طبقهبندی شده و چهار الگوریتم شاخص به عنوان نماینده کلیه الگوریتمها برای مطالعات تکمیلیتر معکوسسازی انتخاب شدهاند. برای تسلط بر روشهای مدلسازی پیشرو و معکوس و بررسی پارامترهای معکوسسازی، آزمایشهای عددی مختلفی با استفاده از مدلهای مصنوعی و دادههای واقعی انجام و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این مرحله از مطالعات عملاً نشان داده شده است که انتخاب پارامتر منظمسازی برای تولید یک مدل مناسب در معکوس-سازی نقشی اساسی داشته و طراحی روشی مناسب برای انتخاب این پارامتر بسیار حائز اهمیت است. لذا در مرحله بعد روشهای مختلف انتخاب پارامتر منظمسازی در مسئله معکوس دوبُعدی مگنتوتلوریک طراحی و با انجام آزمایشهای عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتهاند. پس از این تجزیه و تحلیلها، تعدادی از روشها برای انتخاب پارامتر منظمسازی مناسب، توصیه گردیده است. در مرحله نهایی یکی از روشهای مناسب انتخاب پارامتر منظمسازی برای بهبود مسئله معکوس سه بُعدی مگنتوتلوریک تعمیم داده شده و با آزمایشهای معکوسسازی سهبُعدی برای دادههای مصنوعی و واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. این بهبود در انتخاب پارامتر منظمسازی که عملاً هیچ گونه بار محاسباتی اضافی هم در معکوسسازی ایجاد نمیکند باعث شده که معکوسسازی به طور پایدار پیش رفته و ساختارهای غیر واقعی در مدل ایجاد نشود. همچنین در این مرحله منابع زمین گرمایی سبلان نیز با استفاده از مدلسازی معکوس سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک به خوبی تعبیر و تفسیر شده است.

#### ۲-۷- نتایج

در آزمایشهای معکوسسازی انجام شده در این مطالعه، الگوریتمهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفتهاند و نتایج مهمی در این زمینه حاصل شده است. مثلاً دیده شده است که الگوریتمهایی که در آنها ماتریس حساسیت به طور کامل ساخته می شود مثل روش های اُکام و فضای دادهها نسبت به الگوریتمهایی که در آنها این ماتریس به طور صریح ساخته نمی شود مثل روش گرادیان مزدوج غیر-خطی، در تکرارهای کمتری به مدلی با کمترین مقدار عدم برازش همگرا می شوند. یک نتیجه کلی در آزمایشهای معکوسسازی انجام شده را میتوان به این صورت بیان نمود که انتخاب پارامتر منظم-سازی نقش مهمی در تولید مدل معکوس مناسب دارد. به طوری که در الگوریتمهایی که در آنها این پارامتر در طول فرآیند معکوسسازی ثابت میماند، بایستی معکوسسازی برای مقادیر مختلفی از این پارامتر که به طور تجربی انتخاب میشوند اجرا شود تا مدل مناسب به دست آید. این روش علاوه بر این که از نظر بازدهی محاسباتی مناسب نمیباشد از نظر مقدار مناسب پارامتر منظمسازی باز هم دارای ابهام است. چرا که پارامتر منظمسازی یک مقدار کنترل کننده بین نرم مدل و مقدار عدم برازش است که این مقادیر هم در تکرارهای مختلف معکوسسازی تغییر میکنند. طرح موجود دیگر همان روش اصل اختلاف است که در الگوریتمهای اُکام و فضای دادهها منظور شده است. این روش نسبت به روش قبل ارجحیت دارد. اما نکته مهم در خصوص روش اصل اختلاف این که، این روش وابسته به سطح نوفه دادهها است و با توجه به این که معمولاً در دادههای واقعی سطح نوفه معلوم نیست لذا نمی توان قید عدم برازش هدف را با دقت لازم در فرآیند معکوس سازی با استفاده از این روش وارد نمود و این خود باعث انحراف معکوسسازی به سمت مدلهای غیر واقعی میشود. همچنین، با توجه به این که جستجو و آزمایش هر مقدار پارامتر منظمسازی مستلزم حل معادلات نرمال معکوسسازی، جدید نمودن مدل و همچنین حل پیشرو برای محاسبه عدم برازش میباشد لذا در مسائل معکوس حجیم دوبُعدی و مسائل معکوس سهبُعدی، این روش بازدهی محاسباتی مناسب را ندارد. لازم به ذکر است که تعداد حلهای پیشرو برای آزمایش هر مقدار پارامتر منظمسازی در هر روش که به صورت سعی و خطا انجام میشود در سرعت و دقت معکوسسازی مؤثر است. به طوری که قبلاً اشاره شد در فصل پنجم روشهای مختلف انتخاب پارامتر منظمسازی که به طور عمومی برای مسائل جورنشده توصیه شدهاند با انجام بهبودهای لازم برای مسئله معکوس دوبعدی طراحی شدهاند. سپس با آزمایشهای مختلف معکوسسازی روی دادههای مصنوعی و واقعی مگنتوتلوریک، تجزیه و تحلیلهای لازم در این زمینه انجام شده است. در بخش بحث و نتیجه گیری همین فصل با اشاره به جزئیات آزمایشها، نتایج مختلف مورد بحث قرار گرفتهاند. اما به طور کلی میتوان نتایج مطالعات در این فصل را به صورت ذیل بیان نمود:

اول این که طراحی یک روش مناسب برای تخمین پارامتر منظمسازی در هر تکرار معکوسسازی برای تولید مدل معکوس از نظر دقت و سرعت، ضروری است. نتایج آزمایشها برای روش اصل اختلاف نشان میدهد که این روش به سطح نوفه دادهها وابسته است. در صورتی که سطح نوفه دادهها برای معکوسسازی با استفاده از این روش با دقت تعریف شود، مقادیر تخمینی برای پارامتر منظم-سازی میتواند از دقت لازم برخوردار باشد. نتایج به دست آمده نشان میدهد که روش مربع کای که اخیراً برای تخمین پارامتر منظمسازی در مسائل معکوس غیرخطی پیشنهاد شده است نیز این روش به شدت تحت تأثیر ماتریس کواریانس دادهها بوده که آن هم در واقع به سطح نوفه دادهها بستگی دارد. لذا در صورت عدم تخمین مناسب این ماتریس، تخمین پارامتر منظمسازی نیز توسط این روش این دو روش تخمین پارامتر منظمسازی یعنی روشهای اصل اختلاف و مربع کای، روشهایی هستند که نیازمند اطلاعات اولیه بوده و بدون این اطلاعات نمیتوانند تخمین مناسبی از پارامتر منظمسازی ارائه نمایند.

دیگر روشها که برای تخمین و انتخاب خودکار پارامتر منظمسازی در مسئله معکوس دوبُعدی مگنتوتلوریک طراحی شدهاند نیاز به اطلاعات اولیه ندارند. نتایج مطالعات نشان میدهد که روشهای منحنی L با الگوریتم بیشترین انحناء، GCV و تخمین خطا، در مواردی به خصوص در دادههای واقعی نمی تواند تخمین مناسبی از پارامتر منظمسازی ارائه نمایند. همچنین نتایج نشان میدهند که روش شبه بهینگی یک تخمین متوسط برای این پارامتر به دست میدهد. در مقابل، تخمین این پارامتر توسط روشهای منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی، GCV بهبود یافته، نقطه ثابت، طرحی بر اساس روش مجو و نسبت عدم برازش به نرم مدل علاوه بر روش اصل اختلاف با ملاحظات ذکر شده، نسبتاً مناسب میباشد. نتایج بررسیهای صورت گرفته در این مطالعه نشان میدهد که هر کدام از این روشها با توجه به شرایط مسئله میتواند در اولویت قرار گیرد. مثلاً در خصوص روش نقطه ثابت، با توجه به این که تخمین پارامتر منظمسازی توسط این روش در تکرارهای اولیه معکوسسازی کمتر از حد مناسب است، لذا این روش بایستی به همراه یک طرح کنترلی به کار گرفته شود. اما با توجه به این که این روش از نظر بار محاسباتی بسیار مناسب میباشد بنابراین در مواردی که حجم مسئله بزرگ باشد می تواند در اولویت قرار گیرد. با توجه به نتایج حاصل از معکوس سازی های دو-بُعدى دادههاى مگنتوتلوريک و همچنين با توجه به روش هاى بكار گرفته شده انتخاب پارامتر منظم-سازی در این مطالعه بهتر است از روش های: ۱- GCV بهبود یافته ۲- منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقي ٣- نسبت عدم برازش به نرم مدل ۴- طرحي بر اساس روش مجو ۵- نقطه ثابت، به ترتيب

الویت برای بهبود نتایج و دقت مدلسازی معکوس دوبُعدی دادههای مگنتوتلوریک استفاده نمود. پس از این که مسئله معکوس دوبُعدی مگنتوتلوریک از نظر پارامتر منظمسازی بهبود داده شد توسعه یا تعمیم یکی از روشهای مناسب انتخاب پارامتر منظمسازی برای مسئله معکوس سه ُبعدی مگنتوتلوریک در فصل ششم مد نظر قرار گرفته است. نتایج بررسیهای انجام گرفته نشان میدهد که روش اصل اختلاف که در الگوریتم معکوسسازی سه ُبعدی دادههای مگنتوتلوریک در روش فضای دادهها، برای تخمین پارامتر منظمسازی استفاده می شود، گاهاً باعث انحراف معکوسسازی به سمت مدلهای غیر واقعی میشود. این انحراف به واسطه عدم اطلاع از سطح نوفه دادهها بوده، که در این موارد روش اصل اختلاف با تخمین مقادیر کوچکتر از حد مناسب برای پارامتر منظمسازی تلاش می-کند مدلی با کمترین مقدار عدم برازش تولید نماید.

برای بهبود روش تخمین پارامتر منظمسازی در معکوسسازی سه بعدی از روش نسبت عدم برازش به مجموع عدم برازش و نرم مدل (به عنوان طرح پیشنهادی) به جای روش موجود اصل اختلاف، استفاده شده است. بررسیهای صورت گرفته در این کار تحقیقی نشان میدهد که نتایج این روش در مقایسه با نتایج به دست آمده با استفاده از روش اصل اختلاف بسیار مناسب تر می باشند. به طوری مقایسه با نتایج به دست آمده با استفاده از روش اصل اختلاف بسیار مناسب تر می باشند. به طوری مقایی مقایسه با نتایج به دست آمده با استفاده از روش اصل اختلاف بسیار مناسب تر می باشند. به طوری مقایسه با نتایج به دست آمده با استفاده از روش اصل اختلاف بسیار مناسب تر می باشند. به طوری مقادی یا یک نرخ منطقی از تکرارهای اولیه به سمت تکرارهای نهایی کاهش می بایند. آزمایشهای معکوس سازی سه بعدی برای دو مجموعه از داده های مگنتوتلوریک منطقه زمین گرمایی سبلان نشان می دهد که مدل های به دست آمده با استفاده از طرح موجود (روش اصل اختلاف) به طور بسیار بهتری مقایسه با مدلهای به دست آمده با استفاده از طرح موجود (روش اصل اختلاف) به طور بسیار بهتری با استفاده از زمین شناسی منطقه قابل توجیه و تفسیر می باشند.

نکته دیگر این که طرح پیشنهادی ذکر شده هیچ گونه بار محاسباتی اضافی برای معکوسسازی ایجاد نمی کند. به طوری که آزمایش های مختلف معکوس سازی سه بعدی صورت گرفته نشان می دهند که استفاده از طرح پیشنهادی (برای تخمین پارامتر منظم سازی) باعث می شود تا حدود ۳۰ درصد زمان محاسبات معکوس سازی نسبت به روش اصل اختلاف کاهش یابد.

در این مطالعه به طور مشخص نشان داده شده است که یک الگوریتم توانمند معکوس سازی سه بعدی به واسطه استفاده از روش اصل اختلاف برای تخمین پارامتر منظم سازی ممکن است یک حل ضعیف برای یک مجموعه داده واقعی مگنتوتلوریک ارائه نماید. همچنین نشان داده شده است که با استفاده از طرح پیشنهادی تخمین پارامتر منظم سازی، میتوان یک مدل مناسب توسط همین الگوریتم معکوس سازی سه بعدی برای یک مجموعه داده واقعی مگنتوتلوریک ارائه نمود. نتایج این مطالعه در خصوص پارامتر منظمسازی هر چند به طور خاص برای مسئله معکوس مگنتوتلوریک به دست آمده است ولی به راحتی میتواند برای سایر روشهای ژئوفیزیکی قابل تعمیم باشد.

با توجه به این که هدف اصلی مطالعات تئوری، بهبود نتایج مطالعات عملی است، لذا در انجام این تحقیق علاوه بر نتایج به دست آمده از مطالعات مربوط به تئوری مسئله معکوس، نتایج قابل ملاحظه-ای نیز از مدلسازی دادههای مگنتوتلوریک منطقه زمین گرمایی سبلان به دست آمده است. در ذیل به بخشی از این نتایج اشاره می شود.

با مطالعه دقیق تر دادههای مگنتوتلوریک منطقه سبلان نسبت به مطالعات قبلی و به کار گرفتن روشهای تحلیل مختلف برای این دادهها مثل بررسی بردارهای القایی، نمودارهای قطبی امپدانس، نا-متغیرهای چرخشی امپدانس و چولگی حساس به فاز نشان داده شده است که ساختارهای منطقه به خصوص در پریدهای طولانی دارای ماهیت ژئوالکتریکی سه بعدی هستند. لذا برای تفسیر این ساختار-ها، مدلسازی معکوس سه بعدی دادههای مگنتوتلوریک برداشت شده امری اجتناب ناپذیر است. به همین جهت با تعریف یک شبکه سه بعدی مناسب و تنظیم مناسب پارامترهای معکوس سازی به خصوص در بخش پارامتر منظم سازی، مدل معکوس سه بعدی برای این دادهها به دست آمده است. تفسیر نتایج مدل سه بعدی با استفاده از دادههای زمین شناسی، حفاری و دیگر فعالیتهای اکتشافی انجام شده است. با استفاده از این نتایج موقعیت قرار گیری منابع زمین گرمایی غرب و جنوب غرب و انجام شده است. با سنفاده از این نتایج موقعیت قرار گیری منابع زمین گرمایی غرب و جنوب غرب و انجام شده است. با سنفاده از این نتایج موقعیت قرار گیری منابع زمین گرمایی غرب و جنوب غرب و انجام شده است. با منبع زمین گرمایی از طریق گسلهای منطقه به طور مفصل توجیه و تفسیر این مناطق دگرسانی با منبع زمین گرمایی از طریق گسلهای منطقه به طور مفصل توجیه و تفسیر شده است.

نتایج مدلسازی سه بعدی صورت گرفته در مطالعه حاضر، موقعیت منبع زمین گرمایی (یعنی منطقه داغتر) در غرب و جنوب غرب سبلان را به طور بهتری نسبت به نتایج مدلسازی های دو بعدی در مطالعات قبلی نشان می دهد. به طوری که، پیش بینی می شود این منبع در مرکز ناحیه مورد مطالعه در زیر ایستگاه های ۷ و ۲۱ در منطقه ای بیضی شکل و با مساحت حدود ۷ کیلومتر مربع قرار گرفته باشد (شکل ۶–۱۲). نتایج مدلسازی سه بعدی در این مطالعه با روش پیشنهادی نشان می دهد که مرکز جدید این منطقه داغ تر حدود یک کیلومتر، نسبت به منطقه داغ قبلی که توسط نتایج مدل-سازیهای دو بعدی تعیین شده است، به طرف جنوب جابجا شده است. همچنین نتایج مدلسازی سه-بعدی موقعیت منطقه داغ (به عنوان یک منبع زمین گرمایی) در شمال سبلان را به خوبی نشان می-دهد (شکل ۶–۱۷). منطقه داغ تعیین شده در مطالعات قبلی برای شمال سبلان دارای مساحتی در حدود ۱۰ کیلومتر مربع می باشد در صورتی که منطقه جدید تعیین شده به عنوان منطقه داغ تر تقریباً در مرکز منطقه قبلی قرار گرفته و دارای مساحتی در حدود ۶ کیلومتر مربع می باشد.

۷-۳- پیشنهادات

با توجه به مطالعات انجام شده در این تحقیق پیشنهاداتی برای توسعه نتایج به صورت ذیل ارائه می-گردد:

۱- در خصوص پارامتر پایدار کننده در روش GCV بهبود یافته مقادیر در نظر گرفته شده در این مطالعه برای دادههای مگنتوتلوریک مناسب بوده است. احتمال دارد این مقادیر در خصوص معکوس-سازی سایر دادههای ژئوفیزیکی قدری متفاوت باشد تا جواب بهینه حاصل شود. همچنین به احتمال قوی این پارامتر تا حدودی به سطح نوفه دادهها وابسته است. پیشنهاد میشود در این زمینه مطالعات بیشتری صورت گیرد. ضمناً حدس زده میشود که به توان بین این پارامتر و اولین مقدار ویژه ماتریس حساسیت در تکرار اول رابطهای به دست آورد.

۲- به طور مشخص روش متعادلسازی قید فعال (ACB) نسبت به حالتی که پارامتر منظمسازی در معکوسسازی ثابت میماند برتری دارد. ولی به دلیل این که مقادیر بیشترین و کمترین پارامتر منظم-معکوسسازی ثابت میماند برتری دارد. ولی به دلیل این که مقادیر بیشترین و کمترین پارامتر منظم-سازی برای این روش به صورت تجربی تعیین میشوند و معمولاً بایستی معکوسسازی برای چند زوج از این مقادیر اجرا شود تا جواب مناسب به دست آید، پیشنهاد میشود روشی برای تخمین این مقادیر ارائه شود تا روش ACB کاملاً به صورت خودکار عمل کند. البته میتوان با بهبود روش مجو و طرح مورد استفاده در این مطالعه برای تخمین مقادیر پارامتر منظمسازی اولیه در روش ACB استفاده کرد.

۳- پیشنهاد میشود روشهای GCV بهبود یافته، منحنی L با الگوریتم آرایش تطابقی و طرحی بر اساس روش مجو نیز برای معکوسسازی سه بعدی تعمیم داده شود و تجزیه و تحلیلهای لازم توسط آزمایشهای معکوسسازی با استفاده از این روشها برای دادههای مصنوعی و واقعی صورت گیرد.
8- پیشنهاد میشود روش شبه بهینگی بهبود یافته که توسط باوئر و لوکاس [ Bauer and Lukas, ارائه شده است نیز علاوه بر روش شبه بهینگی معمول که در این مطالعه استفاده شد، برای تخمین پارامتر منظمسازی در مسئله معکوس میزی به بهینگی معمول که در این مطالعه استفاده شده برای معکوس میزی معمول که در این مطالعه استفاده شده برای تخمین پارامتر منظمسازی در مسئله معکوس مگنتوتلوریک مورد آزماش قرار گیرد. همچنین پیشنهاد میشود که روش تخمین پارامتر منظمسازی در مسئله معکوس مگنتوتلوریک مورد آزماش قرار گیرد. همچنین پیشنهاد میشود که روش تخمین پارامتر منظمسازی با استفاده از یک شبکه محاسبات تطابقی میشود که روش می محاسبات مطالعه استفاده در این مطالعه استفاده شده برای میشود که روش محاسبازی در مسئله معکوس مگنتوتلوریک و سایر روشهای ژئوفیزیکی مورد مطالعه قرار گیرد. اگرچه به احتمال قوی این روش دارای بار محاسباتی بالایی است.

۵- برای تکمیل مطالعات مگنتوتلوریک در منطقه زمین گرمایی غرب و جنوب غرب سبلان با توجه به نتایج به دست آمده از مدلسازی سه بعدی پیشنهاد می شود: اندازه گیری های مگنتوتلوریک با پرید طولانی به همراه اندازه گیری های TEM در حد فاصل ایستگاه های موجود، نزدیک ایستگاه ۷ حدوداً در ۵ ایستگاه جدید برای پوشش کامل تر مرکز منطقه داغ جدید (منطقه داغ تر)، انجام شود. همچنین پیشنهاد می شود که یک چاه اکتشافی عمیق در محل حفاری E (شکل ۶–۷) با تمایل به سمت شرق ایستگاه ی پیشنهاد می شود در بای یوشش کامل تر مرکز منطقه داغ جدید (منطقه داغ تر)، انجام شود. همچنین پیشنهاد می شود که یک چاه اکتشافی عمیق در محل حفاری E (شکل ۶–۷) با تمایل به سمت شرق بیشنهاد می شود که یک چاه اکتشافی عمیق در محل حفاری E (شکل ۶–۷) با تمایل به سمت شرق قائم با عمق بیش از ۲۰۰۰ متر در یک محل حفاری جدید در جنوب شرق محل حفاری E در زیر ایستگاههای ۷ و ۲۱ طوری حفاری شود. یا این که در صورت امکان یک چاه اکتشافی غیر ایستگاههای ۷ و ۲۰ طوری حفاری شود که منبع زمین گرمایی تمال سبلان پیشنهاد می شود که قبل طور کامل قطع کند. همچنین در خصوص منطقه زمین گرمایی شمال سبلان پیشنهاد می شود که قبل ایز معلیات می و در این می مود که مین گرمایی شمال سبلان پیشنهاد می شود که قبل اور کامل قطع کند. همچنین در خصوص منطقه زمین گرمایی شمال سبلان پیشنهاد می شود که قبل آز مملیات حفاری در این منطقه به طور کامل تهیه شود و نتایج به دست آرده مازی سه بعدی با توجه به نقشه کامل گسلهای منطقه دوباره تفسیر گردد.

قائدرحمتی، ر، مرادزاده، ع، فتحیان پور، ن، پرخیال، س، (۱۳۹۲)، "مدلسازی وارون و تفسیر دوبُعدی دادههای نیمرخزنی آرایه الکترومغناطیسی (EMAP)"، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۷، شماره ۱، ص۶۴.

- Agostini, A. (1980) "Observations on some geophysical data at Elura" Bulletin of the Australian Society of Exploration Geophysicists, 11, 188–189.
- Akaike, H. (1980) "Likelihood and the Bayes procedure, in, Bayesian Statistics" Proc. 1st Int. Meeting, pp. 143–166, eds Bernardo, J.M., eGroot, M.H., Lindley, D.V. & Smith, A.F.M., University Press, Valencia.
- Anderson, E., Crosby, D., Ussher, G. (2000) "Bulls-eye! simple resistivity imaging to reliably locate the geothermal reservoir" Proc. World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, 909–914.
- Arango, C., Marcuello, A., Ledo, J., Queralt, P. (2009) "3D magnetotelluric characterization of the geothermal anomaly in the Llucmajor aquifer system (Majorca, Spain)" Journal of Applied Geophysics, 68, 479–488.
- Arnason, K., Karlsdottir, R., Eysteinsson, H., Flove0nz, O. G., Gudlaugsson, S. T. (2000) "The resistivity structure of high-temperature geothermal systems in Iceland" Proc. World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, 923\_928.
- Asaue, H., Koike, K., Yoshinaga, T., Takakura, S. (2006) "Magnetotelluric resistivity modeling for 3D characterization of geothermal reservoirs in the Western side of Mt. Aso, SW Japan" Journal of Applied Geophysics, 58, 296–312.
- Avdeev, D., Avdeeva, A. (2009) "3D magnetotelluric inversion using a limited-memory quasi-Newton optimization" **Geophysics**, 74(3), 45-57.
- Avdeeva, A. D., Avdeev, D. B. (2006) "A limited-memory quasi-Newton inversion for 1D magnetotellurics" Geophysics, 71(5), 191–196.
- Backus, G., GIlbert. F. (1970) "Uniqueness in the inversion of inaccurate gross earth data" Trans. Phil. Rov. Sot., A266, 123-192.
- Bahr, K. (1988) "Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion" J. Geophys., 62, 119-127.
- Bahr, K. (1991) "Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types" **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, 66, 24-38.
- Bai, D., Meju, M. A., Liao, Z. (2001) "Magnetotelluric images of deep crustal structure of the Rehai geothermal field near Tengchong, southern China" Geophys. J. Int., 147, 677–687.
- Bauer, F. (2010) "Parameter choice by fast balancing" <u>Arxiv.org</u> arXiv, 1008.0657v1, 1 16.

منابع

- Bauer, F., Kindermann, S. (2008) "Recent results on the quasi-optimality principle" J. Inverse Ill-Posed Prob., 17, 5–18.
- Bauer, F., Lukas, M. A. (2011) "Comparing parameter choice methods for regularization of ill-posed problems" Mathematics and Computers in Simulation, 81(9), 1795-1841.
- Bauer, F., Reiß, M. (2008) "Regularization independent of the noise level: an analysis of quasi-optimality" **Inverse Problems**, 24, 055009.
- Bazan, F. S V., (2008) "Fixed-point iterations in determining the Tikhonov regularization parameter" **Inverse Problems**, 24, 035001.
- Becher. W. D., Sharpe, C. B. (1969) "A synthesis approach to magnetotelluric exploration" Radio Sci., 3, 1089-1094.
- Belge, M., Kilmer, M. E., Miller, E. L. (2002) "Efficient determination of multiple regularization parameters in a generalized L-curve framework" Inverse Problems, 18, 1161–83.
- Berdichevsky, M. N., Dmitriev, V. I. (1976) "Basic principles of interpretation of magnetotelluric sounding curves": in A. Adam, Ed., Geoelectric and Geothermal Studies, Akademai Kaido, Budapest, 165–221.
- Berdichevsky, M. N., Dmitriev, V. I. (2002) "Magnetotellurics in the context of theory of ill-posed problems" SEG, 215 pp.
- Berdichevsky, M. N., Dmitriev, V. I., Pozdnjakova, E. E., (1998) "On two-dimensional interpretation of magnetotelluric soundings" Geophys. J. Int., 133, 585–606.
- Berktold, A., (1983) "Electromagnetic studies in geothermal regions" **Geophys. Surv.**, 6, 173–200.
- Bertrand, E., A. (2010) "Magnetotelluric imaging beneath the Taiwan orogen: An arccontinent collision" PhD Thesis, Alberta University, Edmonton.
- Bostick, F. X. Jr. (1977) "Workshop on electrical methods in geothermal exploration" U.S.G.S, contract no. 14, 08-001-G-359.
- Brezinski, C., Rodriguez, G., Seatzu, S. (2008) "Error estimates for linear systems with applications to regularization" Numer. Algorithms, 49, 85–104.
- Brezinski, C., Rodriguez, G., Seatzu, S. (2009) "Error estimates for the regularization of least squares problems" **Numer. Algorithms**, 51, 61–76.
- Bromley, C., Khosrawi, K., Talebi, B. (2000) "Geophysical exploration of Sabalan geothermal prospects in Iran" World Geothermal Congress, Japan.
- Cagniard, L. (1953) "Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting" Geophysics, 18, 605–635.
- Caldwell, T. G, Bibby, H., Brown, C. (2004) "The magnetotelluric phase tensor" Geophys. J. Int., 158, 457–469.
- Campbell, W. H. (2003) "Introduction to geomagnetic fields" 2nd Edition, Cambridge University Press, 337.
- Coggon, J. H. (1971) "Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method" **Geophysics**, 36, 132-155.
- Constable, S. C., Parker, R. L., Constable, C. G. (1987) "Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data" Geophysics, 52, 289–300.
- Constable, S., Heinson, G., (2004) "Hawaiian hot-spot swell structure from seafloor MT sounding" **Tectonophysics**, 389, 111–124.
- deGroot-Hedlin, C., Constable, S. (1990) "Occam's inversion to generate smooth, twodimensional models from magnetotelluric data" Geophysics, 55, 1613–1624.

- Dobrin, M. B., Savit, C. H. (1988) "Introduction to geophysical prospecting" Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, 867.
- EDC (Energy Development Corporation) (2008) "2007 MT Survey of NW Sabalan Geothermal Project NW Iran" Report submitted to SUNA, 19 p.
- EDC (Energy Development Corporation) (2010) "2009 MT Survey of NW Sabalan Geothermal Project NW Iran" Report submitted to SUNA, 13 p.
- Egbert, G. D., Bennett, A. F., Foreman, M. G. (1994) "TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model" J. Geopphys. Res, 99, 24 821–24 852.
- Egbert, G. D., Booker, J. R. (1986) "Robust estimation of geomagnetic transfer functions" Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 87, 173–194.
- Farquharson, C. G., Oldenburg, D. W. (1996) "Approximate sensitivities for the electromagnetic inverse problem" Geophys. J. Int., 126, 235–252.
- Farquharson, C. G., Oldenburg, D. W. (2004) "A comparison of automatic techniques for estimating the regularization parameter in non-linear inverse problems" Geophys. J. Int., 156, 411–425.
- Flovenz, O., Spangenberg, E., Kulencapff, J., Aranson, K., Karlsdóttir, R., Huenges, E. (2005) "The role of electrical interface conduction in geothermal exploration" Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.
- Fridleifsson, I. B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J. W., Ragnarsson, A., Rybach, L. (2008) "The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change, In: O. Hohmeyer and T. Trittin (Eds.)" IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Proceedings, Luebeck, Germany, 59-80.
- Gamble, T., Goubau, W. M., Clarke, J. (1979) "Magnetotellurics with a remote magnetic reference" Geophysics, 44 (1), 53-68.
- Garcia, X., Jones, A. G. (2002) "Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) sounding" **Geophysics**, 67(2), 448 458.
- Garcia, X., Ledo, J., Queralt, P. (1999) "2D inversion of 3D magnetotelluric data: The Kayabe dataset" Earth Planets Space, 51, 1135–1143.
- Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N. (2011) "Inversion of synthetic MT data related to a conceptual model of geothermal system" International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina (GEOINDO), Khon Kaen, Thailand.
- Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N., Lee, S. K., Porkhial, S. (2013a) "3-D inversion of MT data from the Sabalan geothermal field, Ardabil, Iran" Journal of Applied Geophysics, 93, 12–24.
- Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N., Lee, S.K. (2013b) "Investigating 2-D MT inversion codes using real field data" Arab J. Geosci., DOI 10.1007/s12517-013-0869-6.
- Glasko, V., Kriksin, Y. (1984) "On the quasioptimality principle for linear ill-posed problems in Hilbert space" Vychisl. Mat. Mat. Fiz., 24, 1603–1613.
- Habashy, T. M., Groom, R. W., Spies, B. R. (1993) "Beyond the Born and Rytov approximations: A nonlinear approach to electromagnetic scattering" J. Geophys. Res., 98(B2), 1759-1775.
- Haber, E. (1997) "Numerical strategies for the solution of inverse problems" Ph.D Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Haber, E. (2005) "Quasi-Newton methods for large-scale electromagnetic inverse problems" **Inverse Problems**, 21, 305–323.

- Haber, E., Oldenburg, D. W. (2000) "A GCV based method for nonlinear ill-posed problems" **Computer and Geosciences**. 4, 41–63.
- Hadamard, J. (1923) "Lectures on Cauchy's Problem in Linear Partial Differential Equations" Yale University Press, New Haven.
- Hallof, P. G. (1972) "On I.P. methods" Proceedings of 24<sup>th</sup> International Geological Congress, Montreal, Canada, Geophysics Session, p. 64.
- Han, N., Nam, M. J., Kim, H. J., Lee, T. J., Song, Y., Suh, J. H. (2008) "Efficient threedimensional inversion of magnetotelluric data using approximate sensitivities" Geophys. J. Int., 175, 477–485.
- Hansen, P. C. (1997) "Rank-deficient and discrete ill-posed problems: numerical aspects of linear inversion" SIAM, Philadelphia.
- Hansen, P. C. (2007) "Regularization Tools Version 4.0 for Matlab 7.3" Numer. Algorithms., 46, 189-194.
- Hansen, P. C., Jensen, T. K., Rodriguez, G. (2007) "An adaptive pruning algorithm for the discrete L-curve criterion" J. Comput. Appl. Math., 198, 483–492.
- Hansen, P. C., O'Leary, D. P. (1993) "The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems" SIAM J. Sci. Comput., 14, 1487–1503.
- Harinarayana, T., Abdul Azeez, K. K., Naganjaneyulu, K., Manoj, C., Veeraswamy, K., Murthy, D. N., Eknath Rao, S. P. (2004) "Magnetotelluric studies in Puga valley geothermal field, NW Himalaya, Jammu and Kashmir, India" Journal of Volcanology and Geothermal Research, 138, 405–424.
- Harinarayana, T., Abdul Azeez, K. K., Murthy, D. N., Veeraswamy, K., Eknath Rao, S. P., Manoj, C., Naganjaneyulu, K. (2006) "Exploration of geothermal structure in Puga geothermal field, Ladakh Himalayas, India by magnetotelluric studies" Journal of Applied Geophysics, 58, 280–295.
- Hart, D. L. (1974) "Reconnaissance of the water resources of the Ardmore and Sherman Quadrangles, Southern Oklahoma" Oklahoma Geol. Survey, Map HA-3, Scale 1:250000.
- Heise, W., Caldwell, T. G., Bibby, H. M., Bannister, S. C. (2008) "Three-dimensional modelling of magnetotelluric data from the Rotokawa geothermal field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand" Geophys. J. Int., 173, 740–750.
- Hersir, G. P., Björnsson, A. (1991) "Geophysical exploration for geothermal resources: Principles and application" Tech. rep., National Energy Authority, Geothermal Division.
- Hestenes, M. R., Stiefel, E. (1952) "Methods of conjugate gradients for solving linear systems" J. Res. Nut. Bureau Stand, 49, 409-436.
- Inman, J. R. (1975) "Resistivity inversion with ridge regression" Geophysics, 40, 798-817.
- Ito, K., Jin, B., Jun, Z. (2008) "A New Choice Rule for Regularization Parameters in Tikhonov Regularization" Research Report, CUHK, 362.
- Jagannath, R. P. K., Yalavarthy, P. K. (2012) "Minimal residual method provides optimal regularization parameter for diffuse optical tomography" Journal of Biomedical Optics, 17(10), 106015.
- Jiracek, G. R., Rodi, W. L., Vanyan, L. L., 1987, Implications of magnetotelluric modeling for the deep crustal environment in the Rio Grande rift, Phys. Earth Plan. Int., 45, 179–192.
- Jiracek, G., (1990) "Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction" **Survey in Geophysics**, 11, 163-203.

- Johnston, J. M., Pellerin, L., Hohmann, G. W. (1992) "Evaluation of electromagnetic methods for geothermal reservoir detection" Geothermal Resources Council Transactions, 16, 241-245.
- Johnston, P. R., Gulrajani, R. M. (2000) "Selecting the corner in the L-Curve approach to Tikhonov regularization", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 47, 1293-1296.
- Jones, A. G. (1986) "Parkinson's pointers potential perfidy" Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 87, 1215–1224.
- Jones, A. G., Schultz, A. (1997) "Introduction to MT-DIW2 Special Issue" J. Geomag. Geoelectr., 49,727-737.
- Jupp, D. L. B., Vozoff, K. (1975) "Stable iterative methods for the inversion of geophysical data" Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 42, 957–976.
- Jupp, D. L. B., Vozoff, K. (1977) "Two-dimensional magnetotelluric inversion" Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 50, 333–352.
- Kalberkamp, U., Schaumann, G., Ndonde, P. B., Chiragwile, S. A., Mwano, J. M., GEOTHERM working group (2010) "Surface Exploration of a Viable Geothermal Resource in Mbeya Area, SW Tanzania, Part III: Geophysics" Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.
- Kaltenbacher, B., Kirchner, A., Vexler, B. (2011) "Adaptive discretizations for the choice of a Tikhonov regularization parameter in nonlinear inverse problems" Inverse Problems, 27, 125008 (28pp).
- Kao, D., Orr, D. (1982) "Magnetotelluric studies in the Market Weighton area of eastern England" Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society., 70, 323-337.
- Key, K. W. (2003) "Application of broadband marine magnetotelluric exploration to a 3D salt structure and a fast-spreading ridge" Ph.D Thesis, University of California, San Diego.
- Kingston Morrison (1999) "Sabalan Geothermal Project Stage 2-Preparation for Drilling", Report submitted to SUNA, 17p.
- Laird, E. E., Bostick, F. X. Jr. (1970) "One-dimensional magnetotslluric inversion techniques" Tech. rep. 101, Elec. Eng. Res. Lab., Univ. of Tex., Austin.
- Lee, S. K., Kim, H., J., Song, Y., and Lee, C. (2009a) "MT2DInvMatlab- A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion" Computers and Geosciences, 35, 1722-1735.
- Lee, T. J., Nam, M. J., Lee, S. K., Song, Y., Uchida, T. (2009b) "The Jeju dataset: Three-dimensional interpretation of MT data from mid-mountain area of Jeju Island, Korea" **Journal of Applied Geophysics**, 68, 171–181.
- Li, Y., Oldenburg, D. W. (1999) "3-D inversion of DC resistivity data using an L-curve criterion" 69th Ann. Int. Meeting of the SEG, Expanded Abstracts, 251–254.
- Loke, M. H., R. D. Barker (1996) "Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion" Geophysical Prospecting, 44, 499–523.
- Mackie, R. L., Bennett, B. R., Madden, T. R. (1988) "Long-period magnetotelluric measurements near the central California coast: a land-locked view of the conductivity structure under the Pacific Ocean" Geophys. J., 95, 181-194.
- Mackie, R. L., Madden, T. R. (1993) "Three-dimensional magnetotelluric inversion using conjugate gradients" Geophys. J. Int., 115, 215–229.

- Mackie, R. L., Madden, T. R., Wannamaker, P. E. (1993) "Three dimensional magnetotelluric modeling using difference equations-theory and comparisons to integral equation solutions" Geophysics, 58, 215–226.
- Madden, T. R., Mackie, R. L. (1989) "Three-dimensional magnetotelluric modeling and inversion" Proc. IEEE, 77, 318–333.
- Marquardt, D. W. (1963) "An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters" J. Sot. Ind. Appl. Math., 11, 431-441.
- Marti, A., Queralt, P., Ledo, J. (2009) "WALDIM: A code for the dimensionality analysis of Magnetotelluric data using the rotational invariants of the Magnetotelluric tensor" **Computer and Geosciences**, 35, 2295–2303.
- Maxwell, J. C. (1954) "A treatise on electricity and magnetism" Dover Publ., New York, (unabridged and unaltered republication of the third edition of 1891), 506.
- McGillivray, P. R., Oldenburg, D. W. (1990) "Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem, A comparative study" **Geophysical Prospecting**, 38, 499–524.
- McNeice, G., Jones, A. G. (2001) "Multisite, multifrequency tensor decomposition of Magnetotelluric data" Geophysics, 66, 158–173.
- Mead, J. (2008) "Parameter estimation: A new approach to weighting a priori information" J. Inverse Ill-Posed Prob., 16 (2), 175-194.
- Mead, J., Hammerquist, C. (2013) "<u>Chi-squared tests for choice of regularization</u> parameter in nonlinear inverse problems" **SIMAX**, 34 (3), 1213-1230.
- Meju, M.A. (1994) "Geophysical data analysis: understanding inverse problem, theory and practice" SEG.
- Menke, W. (1989) "Geophysical Data Analysis Discrete Inverse theory" revised ed, Academic Press Inc, San Diego, CA, 289 pp.
- Mitsuhata, Y., Uchida, T., and Amano, H. (2002) "2.5-D inversion of frequency domain electromagnetic data generated by a grounded-wire source" **Geophysics**, 67, 1753–1768.
- Mora, P. R. (1987) "Nonlinear two-dimensional elastic inversion of multioffset seismic data" Geophysics, 52, 1211-1228.
- Moradzadeh, A. (1998) "Electrical imaging of the Adelaide Geosyncline using magnetotelluric (MT)" Ph.D Thesis, Filenders University of South Australia, 334.
- Nabetani, S., Rankin, D. (1969) "An inverse method of magnetotelluric analysis of a multilayed earth" **Geophysics**, 34, 75-86.
- Nabighian, M.N. (Ed)1(994) "Electromagnetic methods in applied geophysics" vol. 1, Theory, Investigations in Geophysics No. 3, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, Oklahoma, 513.
- Newman, G. A., Alumbaugh, D. L. (1997) "Three dimensional massively parallel electromagnetotelluric inversion I. Theory" Geophys. J. Int., 128, 345 354.
- Newman, G. A., Alumbaugh, D. L. (2000) "Three dimensional magnetotelluric inversion using non-linear conjugate gradients" Geophys. J. Int., 140, 410 424.
- Newman, G. A., Boggs, P. T. (2004) "Solution accelerators for large-scale threedimensional electromagnetic inverse problem" **Inverse Problems**, 20, 151–170.
- Newman, G. A., Gasperikova, E., Hoversten, G. M., Wannamaker, P. E. (2008) "Three –dimensional magnetotelluric characterization of the Coso geothermal field" Geothermics, 37, 369-399.
- Ogawa, Y. and Uchida, T. (1996) "A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift" Geophys. J. Int., 126, 69-76.

- Ogawa, Y. (1997) "Two Data Adaptive Inversion of the Oklahoma EMAP Dataset" J. Geomag. Geoelectr., 49, 801-806.
- Oldenburg, D. W. (1979) "One-dimensional inversion of natural source magnetotelluric observation" **Geophysics**, 44 (7), 1218-1244.
- Oldenburg, D. W., Ellis, R. G. (1991) "Inversion of geophysical data using an approximate inverse mapping" Geophys. J. Int., 105, 325–353.
- Oldenburg, D. W., Ellis, R. G. (1993) "Efficient inversion of magnetotelluric data in two dimensions" **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, 81, 177–200.
- Oldenburg, D. W., McGillivray, P. R., Ellis, R. G., (1993) "Generalized subspace methods for large scale inverse problems" Geophys. J. Int., 114, 12–20.
- Osella, A. M., Martinelli, P. (1993) "Magnetotelluric response of anisotropic 2-D structures" Geophys. J. Int., 115, 819-828.
- Oskooi, B. (2006) "1D interpretation of the Magnetotelluric data from Travale Geothermal Field in Italy" Journal of the Earth and Space Physics, 32 (2), 1-16.
- Oskooi, B., Pedersen, L.B., Smirnov, M., Árnason, K., Eysteinsson, H., Manzella, A. (2005) "The deep geothermal structure of the Mid-Atlantic Ridge deduced from MT data in SW Iceland" **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, 150, 183–195.
- Parker, R. L. (1994) "Geophysical Inverse Theory" Princeton University Press, 386.
- Parkinson, W. D. (1962) "The influence of continents and oceans on geomagnetic variations" Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 6, 411-449.
- Patella, D., 1976, Interpretation of magnetotellunc resistivity and phase soundings over horizontal layers, Geophysic, 41, 96-105.
- Pedersen, L. B., Engles, M. (2005) "Routine 2D inversion of magnetotelluric data using the determinant of the impedance tensor" Geophysics, 70 (2), 33-41.
- Pek, J., Verner, T. (1997) "Finite-difference modelling of magnetotelluric fields in twodimensional anisotropic media" **Geophys. J. Int.**, 128, 505-521.
- Pellerin, L., Johnston, J. M., Hohmann, G. W. (1996) "A numerical evaluation of electromagnetic methods in geothermal exploration" Geophysics, 61(1), 121–130.
- Petrick. W. R., Pelton, W. M., Ward, S. H. (1977) "Ridge regression inversion applied to crustal resistivity sounding from South Africa" **Geophysics**, 42, 995-1005.
- Plessix, R. E., Mulder, W. A (2008) "Resistivity imaging with controlled source electromagnetic data, Depth and data weighting" **Inverse Problems**, 24, 1–22.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P. (1992) "Numerical Recipes in FORTRAN: The art of scientific computing" 2nd ed., Cambridge Univ. Press.
- Rao, K. P., Babu G. A. (2006) "EMOD2D- a program in C++ for finite difference modeling of magnetotelluric TM mode responses over 2D earth" Computers and Geosciences, 32, 1499–1511.
- Reddy, I. K., Rankin, D., Phillips, R. J. (1977) "Three-dimensional modeling in magnetotelluric and magnetic variational sounding" Geophysics Journal of the Royal Astronomical Society, 51, 313-325.
- Reichel, L., Rodriguez, G. (2012) "Old and new parameter choice rules for discrete illposed problems" **Numer. Algorithms**, DOI 10.1007/s11075-012-9612-8.
- Reichel, L., Rodriguez, G., Seatzu, S. (2009) "Error estimates for large-scale ill-posed problems" **Numer. Algorithms**, 51, 341–361.

- Rodi, W. L. (1976) "A technique for improving the accuracy of finite element solutions for magnetotelluric data" Geophysics Journal of the Royal Astronomical Society, 44, 483–506.
- Rodi, W. L. (1989) "Regularization and Backus-Gilbert estimation in nonlinear inverse problems: Application to magnetotellurics and surface waves" Ph.D. thesis, Pennsylvania State Univ.
- Rodi, W. L., Mackie, R. L. (2001) "Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion" Geophysics, 66, 174–187.
- Rodriguez, G., Theis, D. (2005) "An algorithm for estimating the optimal regularization parameter by the L-curve" **Rendiconti di Matematica**, 25, 69-84.
- Rosenkjær, G. K. (2011) "Electromagnetic methods in geothermal exploration: 1D and 3D inversion of TEM and MT data from a synthetic geothermal area and the Hengill geothermal area, SW Iceland" M.Sc Thesis, University of Iceland, 129.
- Roy, K. K. (2008) "Potential theory in applied geophysics" Springer, 651.
- Russell. B. (1946) "History of western philosophy" George Allen and Unwin, Ltd.
- Sasaki, Y. (1989) "Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipoledipole resistivity data" **Geophysics**, 54, 254-262.
- Sasaki, Y. (2001) "Full 3D inversion of electromagnetic data on PC" Journal of Applied Geophysics, 46, 45–54.
- Sasaki, Y. (2004) "Three-dimensional inversion of static-shifted magnetotelluric data" Earth Planets Space, 56, 239–248.
- Shoham, Y., Ginzburg, A., Abramoviei, F. (1978) "Crustal Structure in central Palestine from the Inversion of magnetotelluric data" J. Geophys. Res., 83, 4431-4440.
- Simpson, F., Warner, M. (1998) "Coincident magnetotelluric, P-wave and S-wave images of the deep continental crust beneath the Weardale granite, NE England: seismic layering, low conductance and implications against the fluids paradigm" Geophys. J. Int., 133, 419-434.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G. (2000) "An efficient data-sub space inversion method for 2-D magnetotelluric data" **Geophysics**, 65, 791–803.
- Siripunvaraporn, W. (2012) "Three-Dimensional magnetotelluric inversion: an introductory guide for developers and users" **Survey in Geophysics**, 33, 5-27.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G. (2007) "Data space conjugate gradient inversion for 2-D magnetotelluric data" Geophys. J. Int., 170, 986–994.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G. (2009) "WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation" **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, 173, 317–329.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y. (2002) "Numerical accuracy of magnetotelluric modeling: a comparison of finite difference approximations", Earth Planets Space, 54, 721–725.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., Uyeshima, M. (2005) "Threedimensional magnetotelluric inversion: data-space method" Physics of The Earth and Planetary Interiors, 150 (1 – 3), 3 – 14.
- Siripunvaraporn, W., Sarakorn, W. (2011) "An efficient data space conjugate gradient Occam's method for three-dimensional Magnetotelluric inversion" **Geophys J** Int. doi:10.1111/j.1365-246x.2011.05079.x.
- SKM (Sinclair Knight Merz) (2005) "Resource review of the Northwest Sabalan Geothermal Project" Report submitted to SUNA, 61 p.
- Smith, J. T. (1996a) "Conservative modeling of 3-D electromagnetic fields; Part I: properties and error analysis" **Geophysics**, 61, 1308–1318.

- Smith, J. T. (1996b) "Conservative modeling of 3-D electromagnetic fields; Part II: biconjugate gradient solution and an accelerator" **Geophysics**, 61, 1319–1324.
- Smith, J. T., and Booker, J. R., (1991) "Rapid relaxation inversion of two- and threedimensional magnetotelluric data" J. Geophys. Res., 96, 3905–3922.
- Smith, J. T., Booker, J. R. (1988) "Magnetotelluric inversion for minimum structure" Geophysics, 53, 1565–1576.
- Spichak, V. V. (2000) "Construction of three-dimensional geoelectrical models from electromagnetic data" IZVESTIYA, Eearth sciences section, Russian academy of natural sciences, Issue 4, Presented to the 31 st session of the international geology cal congress, Brasil.
- Spichak, V. V. (2002) "Advanced three-dimensional interpretation technologies applied to the MT data in the Minamikayabe thermal area (Hokkaido, Japan)" Expanded abstr, EAGE 64th Conference, Florence, Italy.
- Spichak, V. V., Manzella, A. (2009) "Electromagnetic sounding of geothermal zones" Journal of Applied Geophysics, 68, 459–478.
- Stenberg, B. K., Washburn, J. C., Pellerin, L. (1988) "Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings" Geophysics, 53, 1459-1468.
- Swift, C. M. (1967) "A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States" Ph.D. Thesis, Mass. Inst. of Tech.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1990) "Applied Geophysics" Cambridge University Press, 770.
- Tikhonov, A. N. (1950) "On the determination of electrical characteristics of deep layers of the Earth's crust (in Russian)" **Dokladi Akademii Nauk SSSR**, 73, 295–297.
- Tikhonov, A. N., Arsenin, V. Y. (1977) "Solution of ill-posed problems" V. H. Winston and Sons, 258.
- Torress-Verdin, C., Bostick, F. X. Jr. (1992) "Implications of the Born approximation for the magnetotelluric problem in three-dimensional environments" **Geophysics**, 57 (4), 587-602.
- Torress-Verdin, C., Habashy, T. (1994) "Rapid 2.5-dimensional modeling and inversion via a new nonlinear scattering approximations" **Radio Sci.**, 29, 1051–1071.
- Tseng, H. W., Lee, K. H., Becker, A. (2003) "3D interpretation of electromagnetic data using a modified Born approximation" **Geophysics**, 68, 127–137.
- Tuncer, V., Unsworth, M. J., Siripunvaraporn, W., Craven, J. A. (2006) "Exploration for unconformity-type uranium deposits with audiomagnetotellurics data: a case study from the McArthur River mine, Saskatchewan, Canada" Geophysics, 71, B201–B209.
- Turkoglu, E. (2009) "A Magnetotelluric Investigation of the Arabia-Eurasia Collision in Eastern Anatolia" PhD Thesis, Alberta University, Edmonton.
- Uchida, T. (1993) "Smooth 2-D Inversion for Magnetotelluric data based on statistical Criterion ABIC" J. Geomag. Geoelectr., 45, 841–858.
- Uchida, T. (1997) "Two- Dimensional inversion of Oklahoma data with smoothness regularization" J. Geomag. Geoelectr., 49, 791-800.
- Uchida, T. (2005) "Three-dimensional magnetotelluric investigation in geothermal fields in Japan and Indonesia" Proc. World Geothermal Congress, Antalia, Turkey.

- Uchida, T., Lee, T. J., Honda, M., Andan, A. (2002) "2-D and 3-D interpretation of magnetotelluric data in the Bajawa geothermal field, central Flores, Indonesia" Bull. Geol. Surv. Japan, 53, 265–283.
- Vio, R., Ma, P., Zhong, W., Nagy, J., Tenorio, L., Wamsteker, W. (2004) "Estimation of regularization parameters in multiple-image deblurring" Astron. Astrophys. 423, 1179–1186.
- Vozoff, K. (1972) "The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins" Geophysics, 37 (1), 98-141.
- Vozoff, K. (1991) "The magnetotelluric method" In: Nabighian, M.N. (Ed.), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, vol. 2. SEG, Tulsa, OK, 641– 707.
- Vozoff, K., Jupp, D. L. B. (1975) "Joint inversion of geophysical data" Geophysics Journal of the Royal Astronomical Society, 42, 977-991.
- Wahba, G. (1990) "Spline Models for observational data" SIAM, Philadelphia.
- Walker, S. E. (1999) "Inversion of EM data to recover 1-D conductivity and a geometric survey parameter" MSc thesis, University of British Columbia.
- Wannamaker, P. E., Stodt, J. A., Rijo, L. (1986) "Two-dimensional topographic responses in magnetotellurics modeled using finite elements" Geophysics, 51, 2131–2144.
- Wannamaker, P. E. (1997) "Tensor CSAMT survey over the Sulphur Springs thermal area, Valles Caldera, New Mexico, U.S.A., Part II. Implications for CSAMT methodlogy" Geophysics, 62, 466–476.
- Wannamaker. P. E., Stodt, J. A., Rijo, L. (1987) "A stable finite-element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling" Geophysics Journal of the Royal Astronomical Society, 88, 277-296.
- Weaver, J. T, Agarwal, A. K, Lilley, F. E. M. (2000) "Characterization of the Magnetotelluric impedance tensor" Geophys. J. Int., 129, 133–142.
- Weaver, J. T., Le Quang, B. V., Fischer, G. (1985) "A comparison of analytical and numerical results for a two dimensional control model in electromagnetic induction: I. B-polarization calculations" Geophysics Journal of the Royal Astronomical Society, 82,263-277.
- Weaver, J. T., Le Quang, B. V., Fischer, G. (1986) "A comparison of analytical and numerical results for a two dimensional control model in electromagnetic induction: I. E-polarization calculations" Geophysics Journal of the Royal Astronomical Society, 87, 917-948.
- Weidelt, P. (1995) "Three-dimensional conductivity models: implications of electrical anisotropy" Proc. Int. Sym. 3-D Electromagnetics, 1–12, Schlumberger-Doll Research, Ridgefield, CT.
- Wiese, H. (1962) "Geomagnetische tiefentellurik" **Pure and Applied Geophysics**, 57, 31-46.
- Wu, F. T. (1968) "The inverse problem of magnetotelluric sounding" Geophysics, 33, 972–979.
- Xiao, Q., Cai, X., Xu, X., Liang, G., Zhang, B. (2010) "Application of the 3D magnetotelluric inversion code in a geologically complex area" Geophysical Prospecting, 58 (6), 1177-1192.
- Xiao-Bin, C., Guo-Ze, Z., Ji, T., Yan, Z., Ji-Jun, W. (2005) "The adaptive regularized inversion algorithm (ARIA) for magnetotelluric data" Chinese Journal of Geophysics, 48, 4, 1005\_1016.

- Yamane, K., Takasugi, S., Lee, K. H. (1996) "New magnetotelluric inversion scheme using generalized RRI method" Journal of Applied Geophysics, 35, 209-213.
- Yamane, K., Kim, H. J., Ashida, Y. (2000) "Three-dimensional magnetotelluric inversion using a generalized RRI method and its applications" Butsuri- Tansa (Geophysical Exploration), 53, 234–244.
- Yi, M. J., Kim, J. H., and Chung, S. H. (2003) "Enhancing the resolving power of leastsquares inversion with active constraint balancing" **Geophysics**, 68, 931–941.
- Zhdanov, M. S. (2002) "Geophysical inverse theory and regularization problems" Elsevier, Amsterdam, London, New York, Tokyo, 628.
- Zhdanov, M. S. (2009) "Geophysical Electromagnetic Theory and Methods" First Edition, Elsevier, 848.
- Zhdanov, M. S., Fang, S. (1996) "Quasi-linear approximation in 3D electromagnetic modeling" Geophysics, 61, 46–665.
- Zhdanov, M. S., Fang, S., Hursan, G. (2000) "Electromagnetic inversion using quasilinear approximation" Geophysics, 65, 1501–1513.
- Zhdanov, M. S., Wan, L., Gribenko, A., Čuma, M., Key, K., Constable, S. (2011) "Large-scale 3D inversion of marine magnetotelluric data: Case study from the Gemini prospect, Gulf of Mexico" Geophysics, 76 (1), 77-87.

### پيوست الف

# پردازش دادههای مگنتوتلوریک

در این بخش نحوه پردازش دادههای مگنتوتلوریک شامل تبدیل سریهای زمانی اندازه گیری شده (شکل ۲-۸)، به طیفهای چگالی توان<sup>۱</sup> در حوزه فرکانس و محاسبه توابع انتقال، شامل تانسور امپدانس و توابع انتقال قائم (تیپر) به طور خلاصه شرح داده می شود.

در عمل محاسبه همبستگی خطی بین مؤلفه های میدان مگنتوتلوریک که با تانسور امپدانس یا توابع انتقال قائم مغناطیسی بیان میشود، یک تقریب است. در واقع مؤلفه های تانسور امپدانس و توابع انتقال قائم به طور تقریبی محاسبه میشود و دقیق نمی باشد. در این سیستم های خطی توصیف کننده توزیع رسانایی زمین، انواعی از خطا و نوفه وجود دارد که معمولاً به دو دسته تقسیم می شوند: اول انحراف از میدان واقعی که برای راحتی کار روابط ریاضی این میدان ساده سازی شده است (مثل فرض موج تخت و یا انحراف از رفتار واقعی موج تخت) و دوم خطاهای اندازه گیری که شامل خطاهای فرض موج تخت و یا درازه گیری و نزدیکی به جریان های سر گردان حاصل از محیط های صنعتی یا منابع شیمیائی و یا دیگر منابع هستند. به همین منظور نیاز است که جمله ای برای بیان خطا در محاسبه توابع انتقال منظور شود. برای مثال در روابط تانسور امپدانس این مقدار خطا به صورت زیر منظور می شود [200]

$$E_{x} = Z_{xx}H_{x} + Z_{xy}H_{y} + r_{x}$$
(الف-۱)

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y + r_y$$
(1)

در واقع محاسبه مؤلفههای تانسور امپدانس و توابع انتقال قائم یک مسئله آماری بین پارامترهای اندازه گیری شده (E و H) مختلف حاصل از اندازه گیریهای مکرر در یک محدوه معین فرکانس با در نظر گرفتن خطاها برای تعیین یک تابع انتقال پایدار است که در ادامه روشهای آن شرح داده می-

<sup>1</sup>- Power spectra

شود. در حال حاضر روش های کمترین مربعات<sup>۱</sup>، کمترین مربعات وزن دار<sup>۲</sup> [ Egbert and Booker, ] شود. در حال حاضر روش های کمترین مربعات <sup>۱</sup>، کمترین مربعات و (1986]، مرجع دور<sup>۳</sup> [Gamble et al., 1979]، و روش بهبود یافته (نیرومند) کمترین مربعات و کمترین مربعات و تیپر) کمترین مربعات وزن دار<sup>4</sup> [Bybert and Booker, 1986]، رای تخمین توابع انتقال (امپدانس و تیپر) به کار میروند. هر چند در مواردی ادعا میشود که روش کمترین مربعات توانایی کمتری در مقابل روش بهبود یافته نشان داده است که اختلاف نتایج این روش میهبود یافته میکن است که اختلاف نتایج این دو روش میکن در مواردی ادعا میشود که روش کمترین مربعات توانایی کمتری در مقابل دوش می موجد یافته کمترین مربعات توانایی کمتری در مقابل دوش می در مواردی ادعا میشود که روش کمترین مربعات توانایی کمتری در مقابل دوش می دوش می در موانایی کمتری در مقابل دوش می دوش مربعات توانایی کمتری در مقابل دوش می دوش می دو در موانایی کمتری در مقابل دوش می دوش دو در موادی از دام دوش دوش دوش دو در موادی از دام در موانایی کمتری در مقابل دوش می دوش در مناطق با عرض جغرافیایی متوسط ناچیز بوده و در نواحی نزدیک به قطبین اختلاف این دو روش ممکن است قابل ملاحظه باشد [Moradzadeh, 1998].

روش کمترین مربعات از مهمترین و رایج ترین روشها در تخمین پارامترهای مرتبط خطی بین داده-های مشاهدهای برای محاسبه توابع انتقال است. فرض می شود که در یک سری از اندازه گیریها تعداد N مقدار مستقل از هر مؤلفه میدان الکتریکی و مغناطیسی در یک فرکانس مورد نظر به صورت زیر حاصل شده است [Zhdanov, 2009]:

$$E_j^x, E_j^y, E_j^z, H_j^x, H_j^y, H_j^z, \ j = 1 ... N.$$
  
در عمل این مقادیر از تبدیل فوریه<sup>6</sup> روی دادههای سری زمانی مشاهدهای از هر اندازه گیری حاصل  
میشوند. با توجه به روابط مربوط به تانسور امپدانس می توان نوشت:

$$\mathbf{E}_{\mathbf{x}_{j}} = \mathbf{Z}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}\mathbf{H}_{\mathbf{x}_{j}} + \mathbf{Z}_{\mathbf{x}\mathbf{y}}\mathbf{H}_{\mathbf{y}_{j}} + \mathbf{r}_{\mathbf{x}_{j}} \tag{(T-1)}$$

$$E_{y_j} = Z_{yx}H_{x_j} + Z_{yy}H_{y_j} + r_{y_j}$$
(۴-الف)

بایستی توجه شود که این مرتبط کنندههای خطی توابع برداری، مختلط بوده و شامل جملات خطا هستند. با استفاده از روش کمترین مربعات میتوان نوشت:

$$\varphi_{x}(Z_{xx}, Z_{xy}) = \sum_{j=1}^{N} \left| r_{x_{j}} \right|^{2} = \sum_{j=1}^{N} (E_{x_{j}} - Z_{xx}H_{x_{j}} - Z_{xy}H_{y_{j}})^{2} = \min \qquad (\Delta - \omega)$$

$$\varphi_{y}(Z_{yx}, Z_{yy}) = \sum_{j=1}^{N} \left| r_{y_{j}} \right|^{2} = \sum_{j=1}^{N} (E_{y_{j}} - Z_{yx}H_{x_{j}} - Z_{yy}H_{y_{j}})^{2} = \min \qquad (\mathcal{F} - \mathcal{F})^{N}$$

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>- Least Squares method (LS)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Weighted Least squares method (WLS)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Remote referencing

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Robust Least squares method (RLS)

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>- Fourier transformations

سپس داريم:  $\partial \phi_x / \partial Z_{xx} = \partial \phi_x / \partial Z_{xy} = 0$ (الف-٢)  $\partial \phi_y / \partial Z_{yx} = \partial \phi_y / \partial Z_{yy} = 0$ (الف-٨)
بنابراين از حل كمترين مربعات، تانسور امپدانس به صورت زير به دست مىآيد:

$$\hat{\mathbf{Z}} = \hat{\mathbf{S}}_{\text{EH}} \cdot \hat{\mathbf{S}}_{\text{HH}}^{-1}$$
 (۹-الف)

$$\begin{split} \widehat{Z} &= \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}, \qquad \widehat{S}_{EH} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N} E_{x_j} H_{x_j}^* & \sum_{j=1}^{N} E_{x_j} H_{y_j}^* \\ \sum_{j=1}^{N} E_{y_j} H_{x_j}^* & \sum_{j=1}^{N} E_{y_j} H_{y_j}^* \end{bmatrix}, \\ \widehat{S}_{HH} &= \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N} H_{x_j} H_{x_j}^* & \sum_{j=1}^{N} H_{x_j} H_{y_j}^* \\ \sum_{j=1}^{N} H_{y_j} H_{x_j}^* & \sum_{j=1}^{N} H_{y_j} H_{y_j}^* \end{bmatrix}$$

نماد \* مشخص کننده مزدوج مختلط است.

پيوست ب

## منابع زمین گرمایی

در این بخش منابع زمین گرمایی، مدلهای مفهومی برای این منابع و جایگاه روش مگنتوتلوریک در اکتشاف آنها به طور خلاصه تشریح می شوند.

یکی از منابع قابل توجه انرژی، انرژی زمین گرمایی است. سابقه فنآوری استفاده از انرژی زمین گرمایی برای تولید انرژی الکتریکی به سال ۱۹۱۳ میرسد. امروزه بیش از ۲۴ کشور از انرژی زمین گرمایی برای تولید انرژی الکتریکی استفاده میکنند که در این میان پنج کشور کاستاریکا، سالوادور، ایسلند، کنیا و فیلیپین ۱۵ تا ۲۰ درصد کل انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از انرژی زمین گرمایی تأمین میکنند. همچنین بیش از ۷۲ کشور از این انرژی به طور مستقیم استفاده می کنند [ Fridliefsson]. در کشور ما نیز وزارت نیرو تحقیقاتی را جهت اکتشاف و بهرهبرداری از این انرژی انجام داده است که پروژه زمین گرمایی حوزه سبلان از آن جمله است.

در اکتشاف منابع زمین گرمایی معمولاً پرسش هایی از قبیل این که انرژی زمین گرمایی چیست و مؤلفه های آن کدامند، منابع زمین گرمایی چگونه استفاده می شود، چه روش های ژئوفیزیکی در اکتشاف منابع زمین گرمایی قابل کاربرد هستند و این روش ها چه اهدافی را دنبال می کنند، مطرح می شود. با روشن شدن این موارد، جایگاه روش مگنتوتلوریک و مدل سازی داده های آن در اکتشاف منابع زمین گرمایی مشخص می شود.

انرژی زمین گرمایی، انرژی گرمایی موجود در سنگها و سیالات داغ موجود در منافذ و شکافهای بین پوسته زمین است. این انرژی از انرژی ذخیره شده در پوسته زمین منشاء میشود و می تواند به صورت آب، بخار داغ و یا سنگهای خشک داغ وجود داشته باشد. این انرژی به شکل صنعتی، معمولاً از چاهایی به عمق ۱۰۰ تا ۴۵۰۰ متر قابل استحصال است. امروزه فنآوری استفاده از انرژی زمین گرمایی به خوبی اثبات شده است. این فنآوری آن قدر پیچیده نبوده و با استفاده از چاههای سنتی، پمپها و مبدلهای گرمایی قابل استخراج است. انرژی زمین گرمایی بسته به نوع منبع میتواند به طور مستقیم و غیر مستقیم مورد استفاده قرار گیرد. در یک دستهبندی عمومی منابع زمین گرمایی در سه دسته دمای کم (کمتر از ۹۰ درجه سانتی گراد)، دمای متوسط (۹۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی گراد) و دمای بالا (بیشتر از ۱۵۰ درجه سانتی گراد) طبقهبندی میشوند. منابع انرژی با دمای بالا معمولاً در مناطق آتشفشانی یافت میشوند. منابع انرژی دمای کم و دمای متوسط در اکثر نواحی زمین یافت

می شوند [Fridleifsson et al, 2008].

موارد کاربرد انرژی زمین گرمایی برای تولید انرژی الکتریکی و تولید انرژی گرمایی برای مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی است. منابع زمین گرمایی با دمای بالا معمولاً برای تولید انرژی الکتریکی و منابع با دمای کم و متوسط برای سایر موارد مورد استفاده قرار می گیرند.

در بررسیهای مختلف مشخص شده است که منابع زمینگرمایی با درجه حرارت بالا از نظر ساختار مقاومتویژه دارای مشخصات مشابهی هستند. در این منابع معمولاً یک لایه پوششی رسانا، محدوده اطراف و سقف یک هسته مقاومتر (مخزن زمینگرمایی) در ناحیه مرکزی را میپوشاند. در این منابع، دگرسانی<sup>۱</sup> عمدتاً از نوع هیدروترمال<sup>۲</sup> است. همبستگی بین مقاومتویژه و دگرسانی هیدروترمال سنگها در این نوع از منابع زمینگرمایی توسط محققین مختلفی بررسی شده است [ Aranson et سنگها در این نوع از منابع زمینگرمایی توسط محققین مختلفی بررسی شده است از transon et مدرجه حرارت را برای پوسته بازالتی در کشور ایسلند نشان میدهد. این همبستگی کلی مقاومتویژه، دگرسانی و دادههای آزمایشگاهی و همچنین دادههای صحرایی به دست آمده است [Rosenkjær, 2011]. در ادامه با تشریح مدل های مفهومی علت تغییرات عمقی مقاومتویژه در این شکل بیان می شود.

<sup>1</sup>- Alteration

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Hydrothermal



شکل (ب-۱): همبستگی بین مقاومتویژه، دگرسانی و درجه حرارت برای منابع زمین گرمایی در پوسته بازالتی ایسلند [Rosenkjær, 2011]

منابع زمین گرمایی اغلب به وسیله سیستمهای هیدروترمال، مغشوش میشوند. یک سیستم هیدروترمال شامل سه مؤلفه است: یک منبع گرما (توده ماگمایی)، یک مخزن متشکل از سنگهای میزبان و سیالات موجود در شکافها و منافذ آنها و یک سنگ پوشش که شامل یک لایه با نفوذپذیری کم که از جریان سیال در عمق جلوگیری کرده و همچنین مانع از سرد شدن این سیالات توسط ترکیب با آبهای سطحی میشود [Spichak and Manzella, 2009]. شناسایی سنگ میزبان (سنگ مخزن) حاوی گازها و سیالات داغ و همچنین سنگهای پوششی و دگرسانی مرتبط با آنها یکی از مسائل مهم در اکتشاف منابع زمین گرمایی است. مدلهای مختلف منابع زمین گرمایی با توجه پارامتر درجه حرارت است که تهیه نقشه آن به همراه تعیین مسیرهای عبور سیال در منابع زمین-پارامتر درجه حرارت است که تهیه نقشه آن به همراه تعیین مسیرهای عبور سیال در منابع زمین-گرمایی از اهداف نهایی اکتشاف یک منبع زمین گرمایی است. تمامی این جنبهها یک اثر مستقیم روی توزیع مقاومتویژه در عمق دارد. اکتشافات زمین گرمایی به طور عمده در سیستمهای هیدروترمال انجام شده است. یک روش اکتشاف زمین گرمایی پیشرفته قادر است انواع مختلف موقعیتها را در این خصوص تشخیص دهد. تفاوت اصلی بین سیستمهای هیدروترمال و دیگر منابع زمین گرمایی در نرخ دگرسانی سنگ است. به طوری که سیستمهای هیدروترمال با اثر طولانی مدت بین سنگ و آب مشخص می شوند [Spichak and Manzella, 2009].

مدلهای مفهومی مختلف برای منابع زمین گرمایی ارائه شده است. شکل (ب-۲) یک مدل مفهومی برای منابع زمین گرمایی که دارای سنگ پوشش با دگرسانی وسیع و مقاومتویژه پایین هستند را نشان میدهد. مثال منابع زمین گرمایی از این نوع شامل منابع زمین گرمایی ژاپن، اندونزی، نیوزیلند، سالوادور و ایسلند است [Spichak and Manzella, 2009]. در بسیاری از مطالعات این مدل به عنوان یک مدل عمومی برای تشریح یک منبع زمین گرمایی استفاده شده است [Spichak and Manzella, 2009]. یک مدل عمومی برای تشریح یک منبع زمین گرمایی استفاده شده است [Spichak and et al., 1992].



شکل (ب-۲): مدل مقاومتویژه مفهومی برای سیستم زمین گرمایی با دگرسانی وسیع [Pellerin et al., 1996]

همچنان که قبلاً اشاره شد در منابع زمین گرمایی که حاوی سیال با درجه حرارت بالای ۲۰۰ درجه سانتی گراد هستند، دگرسانی غالب از نوع هیدروترمال است بنابراین تولید محصولات دگرسانی عمدتاً به درجه حرارت بستگی دارد. در بخش بالایی این نوع از منابع یک منطقه با توسعه کانیهای رسی اسمکتیت و زئولیت <sup>۲</sup> ظاهر می شود که معمولاً دارای مقاومتویژه کمتر از ۱۰ اهم - متر و کمتر از مقاومتویژه لایههای رویین (لایه های زیر سطحی) است (شکل ب-۲). محدوده درجه حرارت این منطقه از ۱۰۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی گراد است. در محدوده درجه حرارت این اساطه از ۱۰۰ تا درجه سانتیگراد زئولیت دمای پایین تقریباً حذف شده و اسمکتیت به طور جزئی به کانیهای رسی غیر قابل انبساط با

رسانایی کمتر در یک منطقه میانی تبدیل میشود، که به لایه رسی مخلوط معروف است. هر دو این مناطق به پوشش دگرسانی رسی معروف هستند و مقاومتویژه کم آنها به واسطه کانیهای اسمکتیت و زئولیت است. در زیر این پوشش رسی یک هسته با مقاومتویژه الکتریکی بیشتر که معرف مخزن زمین گرمایی است، ظاهر میشود. فرآیندهای دگرسانی دمای بالا در داخل این مخزن نیز ادامه داشته و منجر به افزایش مقاومتویژه به دلیل تشکیل کانیهای ایلیت<sup>7</sup> در سنگهای اسیدی یا ادامه داشته و میرون<sup>3</sup> در منطقه معرف دگرسانی یا که معرف مغزن زمین گرمایی است. قریران می می معروف هستند و مقاومتویژه کم آنها به واسطه کانیهای اسمکتیت و زئولیت است. در زیر این پوشش رسی یک هسته با مقاومتویژه الکتریکی بیشتر که معرف مخزن زمین گرمایی است. فاهر میشود. فرآیندهای دگرسانی دمای بالا در داخل این مخزن نیز ادامه داشته و منجر به افزایش مقاومتویژه به دلیل تشکیل کانیهای ایلیت<sup>7</sup> در سنگهای اسیدی یا کلریت<sup>4</sup> در سنگهای بازالتی و یا اپیدوت<sup>6</sup> در منطقه معرف دگرسانی پروپیلیتی<sup>2</sup> میشود. [Kalberkamp et al., 2010]

یک مدل مفهومی برای منابعی که در موقعیت توپوگرافی شدید و شیب هیدرولیکی قابل ملاحظه هستند، به صورت شکل (ب-۳) است. این سیستم دارای یک ساختار کلی پیچیده است. برخی از سیستمهای زمینگرمایی درجه حرارت بالا نیز در موقعیتهایی ظاهر می شوند که ماگما تا عمق کمتر از ۱۰ کیلومتر نفوذ کرده و یک سیستم هیدروترمال روی توده ماگمایی قرار می گیرد. شکل (ب-۴) بیان کننده مدل مفهومی مربوط به این سیستمها است [Spichak and Manzella, 2009].

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

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>- Zeolite

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>- Ilite

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>- Cholorite

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>- Epidote

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>- Propilitic alteration

بررسیهای مختلفی برای اکتشاف منابع زمین گرمایی انجام گرفته و مشخص شده است که روشهای ژئوفیزیکی نقش اصلی را در بین دیگر روشها دارند [Asaue et al., 2006]. یک بازنگری از اساس تئوری و کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در اکتشاف منابع زمین گرمایی توسط هرسیر و بیجورنسون [Pilerin et al., 1996]، ارائه شده است. پلرین و همکاران [Pilerin et al., 1996]، روی تخمین تئوری و عددی روشهای الکترومغناطیس در اکتشاف منابع زمین گرمایی تمرکز کردهاند. آن-ها بیان نمودهاند گذشته از ملاحظات عملی از قبیل نوفه و هزینه، آن دسته از روشهای مگنتوتلوریک)، نسبت به روشهایی که در آنها فقط از میدان مغناطیسی استفاده میشود، در اکتشاف منابع زمین گرمایی ارجحیت دارند. همچنین آنها تفسیر چند بعدی این روشها را نیز توصیه کردهاند.

با توجه به این که منابع زمین گرمایی تغییرات قابل ملاحظهای در مقاومت ویژه الکتریکی ساختارهای مرتبط ایجاد می کنند، بنابراین این منابع هدف های اکتشافی خوبی برای روش های الکترومغناطیس محسوب می شوند [Oskooi, 2006]. در بین روش های الکترومغناطیس، روش مگنتوتلوریک به خاطر عمق نفوذ بالا و حساسیت نسبت به ثبت لایه های رسانا مرتبط با منابع زمین گرمایی از اهمیت بالایی بر خوردار است. به همین جهت امروزه این روش در اکتشاف منابع زمین گرمایی کاربرد وسیعی یافته و garcia et al., 1999, Spichak, امی رود [ کتشاف منابع به کار می رود [ مین گرمایی کاربرد وسیعی یافته و به عنوان یک روش استاندارد برای اکتشاف این منابع به کار می رود [ Aprice et al., 2001; Bai et al., 2005; Oskooi, 2006; Harinarayana et al., 2004; Uchida, 2005; Oskooi, 2006; Harinarayana et al., 2006; Arango et al., 2009; Heise et al., 2008; Newman et al., 2008; Lee et al., 2009b; Arango et al., 2009; Bai et al., 2008; Newman et al., 2008; Lee et al., 2009b; Arango et al., 2009;



شکل (ب-۳): یک مدل مفهومی برای سیستم زمین گرمایی در موقعیت توپوگرافی شدید [Anderson et al., 2000]



شکل (ب-۴): مدل مفهومی برای میدان زمین گرمایی درجه حرارت بالا [Berktold, 1983]

پيوست ج

دادههای تولید شده برای مدلهای مصنوعی

در این پیوست دادههای تولید شده توسط مدلسازیهای پیشرو برای مدلهای مصنوعی مختلف در این مطالعه به ترتیب ارائه میشوند:

Station	Frequency	TM-Res.	TM-Phase	TE-Res.	TE-Phase
1	(EC) 1.00E-03	(UIIII-III) 1384 71	(uey.)	(Onn-m) 202.40	(ueg.)
1	1.00E-03	1383 /1	44.76	202.40	45.23
1	1.50E-05	1383.41	44.70	203.15	45.23
1	2.51E-03	1381.72	44.07	204.08	45.20
1	3.98E-03	1379.56	44.53	205.26	45.10
1	6.31E-03	1376.77	44.32	206.73	44.89
1	1.00E-02	1373.00	44.00	208.46	44.48
1	1.58E-02	1367.70	43.53	210.44	43.76
1	2.51E-02	1359.69	42.82	212.26	42.50
1	3.98E-02	1346.36	41.73	212.72	40.39
1	6.31E-02	1322.15	40.10	209.01	37.01
1	1.00E-01	1275.26	37.72	194.74	32.02
1	1.58E-01	1185.36	34.49	162.78	25.92
1	2.51E-01	1032.79	30.83	116.52	21.18
1	3.98E-01	834.05	28.14	75.95	21.60
1	6.31E-01	655.03	27.82	53.72	28.04
1	1.00E+00	539.39	29.21	46.42	36.65
1	1.00E+01	240.06	31.94	66.70	57.06
1	1.58E+01	208.06	34.39	78.57	59.87
1	2.51E+01	186.61	37.40	97.24	61.63
1	3.98E+01	176.02	40.74	122.89	61.64
1	6.31E+01	175.30	43.69	152.59	59.81
1	1.00E+02	181.28	45.65	180.33	56.73
1	1.58E+02	190.09	46.48	200.59	53.26
1	2.51E+02	198.08	46.39	211.73	50.10
1	3.98E+02	202.64	45.80	215.06	47.53
1	6.31E+02	203.10	45.16	212.43	45.68
1	1.00E+03	201.16	44.85	206.31	44.69
1	1.58E+03	199.48	44.87	200.69	44.56
1	2.51E+03	199.16	44.98	198.63	44.86
1	3.98E+03	199.45	45.02	199.13	45.03
1	6.31E+03	199.56	45.00	199.60	45.01
2	1.00E-03	233.65	44.90	200.34	44.86
2	1.58E-03	233.57	44.85	200.54	44.86

ج-۱- دادههای مصنوعی حاصل از مدل نشان داده شده در شکل (۴-۱-الف)

ج	ست	ييو
<u> </u>		

2	2.51E-03	233.47	44.78	200.79	44.73
2	3.98E-03	233.34	44.67	201.07	44.51
2	6.31E-03	233.16	44.49	201.38	44.15
2	1.00E-02	232.88	44.23	201.64	43.56
2	1.58E-02	232.42	43.81	201.65	42.61
2	2.51E-02	231.60	43.17	200.89	41.09
2	3.98E-02	229.99	42.18	198.05	38.70
2	6.31E-02	226.62	40.68	190.41	35.07
2	1.00E-01	219.45	38.48	172.81	29.97
2	1.58E-01	204.94	35.51	140.83	24.00
2	2.51E-01	179.66	32.26	99.32	19.51
2	3.98E-01	146.53	30.16	64.48	19.88
2	6.31E-01	117.15	30.64	45.34	25.78
2	1.00E+00	99.17	32.96	38.42	33.47
2	1.00E+01	62.26	44.55	39.47	52.33
2	1.58E+01	63.21	49.02	43.41	56.80
2	2.51E+01	68.50	53.32	51.58	60.94
2	3.98E+01	78.86	56.84	65.00	63.77
2	6.31E+01	94.43	59.09	83.98	64.92
2	1.00E+02	115.06	60.09	108.13	64.63
2	1.58E+02	141.22	59.89	137.42	63.25
2	2.51E+02	172.09	58.23	171.41	60.66
2	3.98E+02	202.26	55.06	204.91	56.69
2	6.31E+02	222.18	50.93	226.98	51.80
2	1.00E+03	224.81	47.02	229.12	47.29
2	1.58E+03	214.16	44.65	216.41	44.60
2	2.51E+03	202.55	44.21	203.08	44.10
2	3.98E+03	198.18	44.74	198.06	44.70
2	6.31E+03	199.00	45.04	198.91	45.05
3	1.00E-03	36.52	45.11	198.71	44.70
3	1.58E-03	36.58	45.11	198.49	44.57
3	2.51E-03	36.65	45.11	198.19	44.36
3	3.98E-03	36.74	45.08	197.79	44.05
3	6.31E-03	36.84	45.01	197.23	43.57
3	1.00E-02	36.97	44.87	196.36	42.84
3	1.58E-02	37.11	44.63	194.94	41.72
3	2.51E-02	37.24	44.20	192.33	40.01
3	3.98E-02	37.30	43.48	187.24	37.42
3	6.31E-02	37.13	42.34	177.11	33.63
3	1.00E-01	36.40	40.62	157.68	28.47
3	1.58E-01	34.51	38.34	126.24	22.60
3	2.51E-01	30.87	36.12	88.10	18.26

ج	ست	ييو
<u> </u>		

3	3.98E-01	26.03	35.50	56.96	18.57
3	6.31E-01	22.06	37.79	39.76	24.07
3	1.00E+00	20.32	41.86	33.05	31.14
3	1.00E+01	26.69	60.57	27.71	52.67
3	1.58E+01	32.95	64.36	30.98	59.23
3	2.51E+01	42.50	67.09	39.03	65.05
3	3.98E+01	56.21	68.59	53.21	68.50
3	6.31E+01	74.78	68.97	73.62	69.34
3	1.00E+02	99.52	68.43	99.54	68.51
3	1.58E+02	132.31	66.72	132.02	66.61
3	2.51E+02	172.21	63.36	171.19	63.28
3	3.98E+02	211.27	58.31	209.78	58.32
3	6.31E+02	235.21	52.36	233.84	52.47
3	1.00E+03	234.39	47.12	233.82	47.29
3	1.58E+03	217.30	44.26	217.70	44.40
3	2.51E+03	202.21	43.99	202.83	44.01
3	3.98E+03	197.71	44.74	197.88	44.71
3	6.31E+03	199.01	45.06	198.92	45.05
4	1.00E-03	32.31	45.16	198.07	44.61
4	1.58E-03	32.38	45.18	197.68	44.45
4	2.51E-03	32.46	45.19	197.18	44.22
4	3.98E-03	32.57	45.18	196.51	43.87
4	6.31E-03	32.69	45.14	195.62	43.35
4	1.00E-02	32.85	45.03	194.32	42.56
4	1.58E-02	33.02	44.82	192.33	41.38
4	2.51E-02	33.20	44.44	189.05	39.59
4	3.98E-02	33.33	43.78	183.15	36.93
4	6.31E-02	33.27	42.71	172.15	33.08
4	1.00E-01	32.72	41.08	152.18	27.90
4	1.58E-01	31.13	38.93	121.02	22.08
4	2.51E-01	28.00	36.89	84.12	17.80
4	3.98E-01	23.82	36.50	54.28	18.07
4	6.31E-01	20.48	39.01	37.74	23.43
4	1.00E+00	19.22	43.15	31.10	30.33
4	1.00E+01	26.28	60.64	25.36	54.64
4	1.58E+01	32.30	64.46	29.72	61.55
4	2.51E+01	41.63	67.31	39.08	66.80
4	3.98E+01	55.24	68.97	54.04	69.26
4	6.31E+01	74.10	69.43	74.08	69.54
4	1.00E+02	99.43	68.81	99.45	68.67
4	1.58E+02	132.72	66.95	132.11	66.79
4	2.51E+02	172.89	63.46	171.59	63.38

7	ست	يبو
~		<b>.</b>

4	3.98E+02	211.96	58.32	210.26	58.35
4	6.31E+02	235.47	52.32	234.12	52.46
4	1.00E+03	234.26	47.10	233.85	47.27
4	1.58E+03	217.25	44.27	217.67	44.39
4	2.51E+03	202.24	44.00	202.83	44.01
4	3.98E+03	197.71	44.74	197.87	44.70
4	6.31E+03	199.01	45.06	198.92	45.05
5	1.00E-03	28.84	45.26	197.38	44.51
5	1.58E-03	28.77	45.30	196.82	44.33
5	2.51E-03	28.88	45.34	196.09	44.06
5	3.98E-03	29.01	45.37	195.14	43.68
5	6.31E-03	29.18	45.37	193.89	43.11
5	1.00E-02	29.38	45.32	192.15	42.27
5	1.58E-02	29.62	45.18	189.61	41.02
5	2.51E-02	29.88	44.87	185.61	39.16
5	3.98E-02	30.11	44.31	178.88	36.43
5	6.31E-02	30.21	43.35	167.02	32.52
5	1.00E-01	29.88	41.87	146.55	27.33
5	1.58E-01	28.64	39.92	115.77	21.56
5	2.51E-01	26.01	38.15	80.13	17.34
5	3.98E-01	22.48	38.11	51.60	17.60
5	6.31E-01	19.82	40.88	35.72	22.84
5	1.00E+00	19.17	44.97	29.16	29.60
5	1.00E+01	26.45	59.76	24.28	57.33
5	1.58E+01	31.95	63.93	30.09	63.55
5	2.51E+01	41.10	67.20	40.21	67.52
5	3.98E+01	54.85	69.08	54.78	69.24
5	6.31E+01	74.02	69.55	74.07	69.49
5	1.00E+02	99.53	68.86	99.32	68.74
5	1.58E+02	132.82	66.97	132.18	66.85
5	2.51E+02	172.99	63.46	171.75	63.41
5	3.98E+02	212.01	58.31	210.40	58.36
5	6.31E+02	235.45	52.32	234.18	52.45
5	1.00E+03	234.25	47.10	233.84	47.27
5	1.58E+03	217.25	44.27	217.67	44.40
5	2.51E+03	202.24	43.99	202.84	44.01
5	3.98E+03	197.71	44.74	197.87	44.70
5	6.31E+03	199.01	45.06	198.92	45.05
6	1.00E-03	27.63	45.30	197.11	44.47
6	1.58E-03	27.73	45.36	196.47	44.28
6	2.51E-03	27.84	45.41	195.65	44.00
6	3.98E-03	27.99	45.46	194.61	43.60
-					
---	----	-----			
~	سب	ىبە			
Ŀ		T			

					1
6	6.31E-03	28.17	45.48	193.20	43.01
6	1.00E-02	28.40	45.46	191.28	42.15
6	1.58E-02	28.67	45.34	188.53	40.88
6	2.51E-02	28.96	45.07	184.27	38.99
6	3.98E-02	29.25	44.55	177.19	36.23
6	6.31E-02	29.41	43.65	165.04	32.30
6	1.00E-01	29.18	42.23	144.38	27.11
6	1.58E-01	28.06	40.37	113.74	21.36
6	2.51E-01	25.60	38.71	78.64	17.17
6	3.98E-01	22.29	38.80	50.58	17.43
6	6.31E-01	19.87	41.65	34.98	22.63
6	1.00E+00	19.48	45.66	28.45	29.34
6	1.00E+01	26.42	59.13	24.24	58.45
6	1.58E+01	31.63	63.66	30.58	64.03
6	2.51E+01	40.81	67.23	40.60	67.49
6	3.98E+01	54.78	69.16	54.84	69.17
6	6.31E+01	74.06	69.58	74.02	69.49
6	1.00E+02	99.55	68.86	99.30	68.76
6	1.58E+02	132.82	66.96	132.21	66.86
6	2.51E+02	172.99	63.46	171.78	63.41
6	3.98E+02	212.01	58.31	210.43	58.36
6	6.31E+02	235.45	52.32	234.19	52.45
6	1.00E+03	234.25	47.10	233.84	47.27
6	1.58E+03	217.25	44.27	217.68	44.40
6	2.51E+03	202.24	43.99	202.84	44.01
6	3.98E+03	197.71	44.74	197.87	44.70
6	6.31E+03	199.01	45.06	198.92	45.05
7	1.00E-03	26.96	45.33	196.26	44.25
7	1.58E-03	27.06	45.40	195.40	43.97
7	2.51E-03	27.18	45.46	194.28	43.56
7	3.98E-03	27.34	45.52	192.79	42.96
7	6.31E-03	27.53	45.55	190.77	42.08
7	1.00E-02	27.77	45.55	187.88	40.79
7	1.58E-02	28.06	45.45	183.44	38.89
7	2.51E-02	28.38	45.21	176.21	36.12
7	3.98E-02	28.70	44.72	163.88	32.18
7	6.31E-02	28.90	43.85	143.12	26.99
7	1.00E-01	28.72	42.48	112.61	21.26
7	1.58E-01	27.69	40.67	77.78	17.10
7	2.51E-01	25.34	39.08	50.03	17.38
7	3.98E-01	22.17	39.27	34.60	22.57
7	6.31E-01	19.92	42.17	28.12	29.24

7	ست	يبو
~		<b>.</b>

-	4 9 9 5 9 9	10 70	10.10		
7	1.00E+00	19.70	46.13	24.31	59.11
7	1.00E+01	26.35	58.66	30.94	64.21
7	1.58E+01	31.35	63.50	40.78	67.41
7	2.51E+01	40.62	67.29	54.80	69.13
7	3.98E+01	54.79	69.21	73.98	69.50
7	6.31E+01	74.11	69.58	99.31	68.77
7	1.00E+02	99.55	68.86	132.21	66.86
7	1.58E+02	132.82	66.96	171.79	63.41
7	2.51E+02	172.99	63.46	210.44	58.36
7	3.98E+02	212.01	58.31	234.19	52.45
7	6.31E+02	235.45	52.32	233.84	47.27
7	1.00E+03	234.25	47.10	217.68	44.40
7	1.58E+03	217.25	44.27	202.84	44.01
7	2.51E+03	202.24	43.99	197.87	44.70
7	3.98E+03	197.71	44.74	198.92	45.05
7	6.31E+03	199.01	45.06	196.94	44.45
8	1.00E-03	26.65	45.33	196.98	44.46
8	1.58E-03	26.75	45.40	196.31	44.26
8	2.51E-03	26.87	45.46	195.46	43.98
8	3.98E-03	27.03	45.52	194.34	43.57
8	6.31E-03	27.22	45.55	192.89	42.97
8	1.00E-02	27.45	45.55	190.89	42.10
8	1.58E-02	27.74	45.45	188.03	40.82
8	2.51E-02	28.05	45.21	183.63	38.92
8	3.98E-02	28.37	44.72	176.47	36.16
8	6.31E-02	28.57	43.85	164.17	32.23
8	1.00E-01	28.39	42.49	143.46	27.04
8	1.58E-01	27.37	40.69	112.94	21.32
8	2.51E-01	25.05	39.12	78.02	17.17
8	3.98E-01	21.92	39.32	50.23	17.47
8	6.31E-01	19.70	42.25	34.78	22.68
8	1.00E+00	19.50	46.25	28.34	29.36
8	1.00E+01	26.42	58.73	24.20	58.95
8	1.58E+01	31.41	63.50	30.84	64.21
8	2.51E+01	40.64	67.27	40.76	67.43
8	3.98E+01	54.78	69.21	54.81	69.13
8	6.31E+01	74.10	69.58	73.98	69.50
8	1.00E+02	99.55	68.86	99.30	68.76
8	1.58E+02	132.82	66.96	132.21	66.86
8	2.51E+02	172.99	63.46	171.79	63.41
8	3.98E+02	212.01	58.31	210.43	58.36
8	6.31E+02	235.45	52.32	234.19	52.45

7	ست	يبو
~		<b>.</b>

8	1.00E+03	234.25	47.10	233.84	47.27
8	1.58E+03	217.25	44.27	217.68	44.40
8	2.51E+03	202.24	43.99	202.84	44.01
8	3.98E+03	197.71	44.74	197.87	44.70
8	6.31E+03	199.01	45.06	198.92	45.05
9	1.00E-03	26.52	45.30	197.27	44.50
9	1.58E-03	26.61	45.35	196.68	44.31
9	2.51E-03	26.72	45.40	195.93	44.04
9	3.98E-03	26.86	45.45	194.94	43.65
9	6.31E-03	27.04	45.47	193.62	43.08
9	1.00E-02	27.25	45.44	191.82	42.23
9	1.58E-02	27.50	45.33	189.20	40.98
9	2.51E-02	27.78	45.07	185.10	39.12
9	3.98E-02	28.05	44.55	178.27	36.39
9	6.31E-02	28.20	43.65	166.31	32.49
9	1.00E-01	27.96	42.26	145.80	27.32
9	1.58E-01	26.89	40.42	115.11	21.60
9	2.51E-01	24.53	38.81	79.71	17.45
9	3.98E-01	21.36	38.97	51.44	17.79
9	6.31E-01	19.06	41.92	35.78	23.08
9	1.00E+00	18.73	46.08	29.39	29.80
9	1.00E+01	26.64	59.44	23.97	57.69
9	1.58E+01	31.86	63.70	30.17	63.88
9	2.51E+01	40.92	67.17	40.44	67.56
9	3.98E+01	54.78	69.12	54.85	69.19
9	6.31E+01	74.04	69.57	74.03	69.48
9	1.00E+02	99.54	68.86	99.30	68.75
9	1.58E+02	132.82	66.96	132.19	66.86
9	2.51E+02	172.99	63.46	171.76	63.41
9	3.98E+02	212.01	58.31	210.42	58.36
9	6.31E+02	235.45	52.32	234.18	52.45
9	1.00E+03	234.25	47.10	233.84	47.27
9	1.58E+03	217.25	44.27	217.67	44.39
9	2.51E+03	202.24	43.99	202.84	44.01
9	3.98E+03	197.71	44.74	197.87	44.70
9	6.31E+03	199.01	45.06	198.92	45.05
10	1.00E-03	27.27	45.25	197.65	44.55
10	1.58E-03	27.35	45.29	197.16	44.38
10	2.51E-03	27.45	45.32	196.52	44.13
10	3.98E-03	27.57	45.35	195.68	43.76
10	6.31E-03	27.72	45.35	194.57	43.21
10	1.00E-02	27.90	45.29	193.00	42.40

7	ست	يبو
~		<b>.</b>

10	1.58E-02	28.12	45.15	190.69	41.18
10	2.51E-02	28.35	44.84	186.97	39.36
10	3.98E-02	28.57	44.28	180.60	36.68
10	6.31E-02	28.64	43.33	169.09	32.81
10	1.00E-01	28.31	41.87	148.85	27.67
10	1.58E-01	27.12	39.95	118.00	21.93
10	2.51E-01	24.62	38.23	81.94	17.77
10	3.98E-01	21.27	38.27	52.99	18.16
10	6.31E-01	18.75	41.17	37.02	23.54
10	1.00E+00	18.18	45.48	30.66	30.32
10	1.00E+01	26.72	60.20	24.15	55.99
10	1.58E+01	32.25	64.04	29.54	63.01
10	2.51E+01	41.28	67.16	39.79	67.49
10	3.98E+01	54.91	69.03	54.68	69.28
10	6.31E+01	74.00	69.53	74.10	69.48
10	1.00E+02	99.51	68.86	99.32	68.72
10	1.58E+02	132.81	66.97	132.15	66.84
10	2.51E+02	172.98	63.46	171.71	63.40
10	3.98E+02	212.01	58.31	210.37	58.36
10	6.31E+02	235.46	52.32	234.17	52.45
10	1.00E+03	234.24	47.10	233.84	47.27
10	1.58E+03	217.25	44.27	217.67	44.39
10	2.51E+03	202.24	43.99	202.84	44.01
10	3.98E+03	197.71	44.74	197.87	44.70
10	6.31E+03	199.01	45.06	198.92	45.05
11	1.00E-03	30.00	45.16	198.50	44.68
11	1.58E-03	30.06	45.17	198.23	44.53
11	2.51E-03	30.13	45.18	197.88	44.32
11	3.98E-03	30.23	45.17	197.40	44.00
11	6.31E-03	30.34	45.13	196.73	43.52
11	1.00E-02	30.48	45.03	195.74	42.78
11	1.58E-02	30.64	44.82	194.15	41.65
11	2.51E-02	30.80	44.45	191.33	39.93
11	3.98E-02	30.91	43.80	186.03	37.34
11	6.31E-02	30.85	42.75	175.65	33.57
11	1.00E-01	30.33	41.16	156.16	28.46
11	1.58E-01	28.86	39.07	124.88	22.69
11	2.51E-01	25.97	37.12	87.21	18.50
11	3.98E-01	22.12	36.87	56.67	18.97
11	6.31E-01	19.07	39.58	39.93	24.57
11	1.00E+00	18.00	44.00	33.65	31.55
11	1.00E+01	26.72	61.11	26.29	52.43

7	ىيەست	د
Ŀ		÷

11	1.58E+01	32.78	64.56	29.67	59.85
11	2.51E+01	42.03	67.24	38.41	66.00
11	3.98E+01	55.54	68.84	53.43	69.08
11	6.31E+01	74.26	69.30	73.92	69.50
11	1.00E+02	99.41	68.71	99.46	68.59
11	1.58E+02	132.58	66.90	132.02	66.72
11	2.51E+02	172.71	63.44	171.42	63.35
11	3.98E+02	211.81	58.32	210.10	58.35
11	6.31E+02	235.45	52.33	234.03	52.46
11	1.00E+03	234.30	47.10	233.84	47.28
11	1.58E+03	217.25	44.27	217.68	44.39
11	2.51E+03	202.24	44.00	202.83	44.01
11	3.98E+03	197.71	44.74	197.88	44.71
11	6.31E+03	199.01	45.06	198.92	45.05
12	1.00E-03	38.11	45.09	199.31	44.79
12	1.58E-03	38.16	45.09	199.25	44.68
12	2.51E-03	38.23	45.08	199.15	44.50
12	3.98E-03	38.31	45.04	199.01	44.23
12	6.31E-03	38.41	44.97	198.77	43.80
12	1.00E-02	38.52	44.83	198.33	43.13
12	1.58E-02	38.65	44.57	197.43	42.09
12	2.51E-02	38.76	44.14	195.51	40.47
12	3.98E-02	38.79	43.42	191.28	37.99
12	6.31E-02	38.58	42.27	182.06	34.30
12	1.00E-01	37.79	40.56	163.38	29.23
12	1.58E-01	35.78	38.30	131.83	23.44
12	2.51E-01	31.97	36.10	92.60	19.21
12	3.98E-01	26.93	35.53	60.37	19.76
12	6.31E-01	22.80	37.91	42.84	25.59
12	1.00E+00	21.01	42.16	36.62	32.85
12	1.00E+01	28.65	60.00	30.63	50.34
12	1.58E+01	34.85	63.48	32.82	56.76
12	2.51E+01	44.26	66.12	39.79	63.04
12	3.98E+01	57.75	67.67	53.19	67.23
12	6.31E+01	76.02	68.14	73.33	68.65
12	1.00E+02	100.17	67.71	99.29	68.10
12	1.58E+02	132.11	66.20	131.70	66.34
12	2.51E+02	171.21	63.04	170.64	63.11
12	3.98E+02	209.82	58.20	209.07	58.25
12	6.31E+02	234.13	52.39	233.27	52.47
12	1.00E+03	234.22	47.19	233.66	47.32
12	1.58E+03	217.53	44.28	217.77	44.41

ج	ست	ييو
<u> </u>		

12 2.51E+03 202.26 43.98 202.84 4   12 3.98E+03 197.67 44.74 197.87 4   12 6.31E+03 199.02 45.06 198.92 4   13 1.00E-03 550.48 44.86 201.55 4   13 1.58E-03 550.09 44.80 202.08 4   13 2.51E-03 549.58 44.71 202.74 4   13 3.98E-03 548.91 44.58 203.54 4   13 3.98E-03 548.91 44.58 203.54 4   13 6.31E-03 548.04 44.39 204.53 4   13 1.00E-02 546.85 44.10 205.67 4   13 1.58E-02 545.12 43.65 206.82 4   13 2.51E-02 542.39 42.98 207.57 4   13 3.98E-02 537.64 41.95 206.72 3   13 1.00E-01 510.66 38.12 185.72 3   13	4.01 4.71 5.05 5.11 5.08 5.01 4.87 4.61 4.14 3.33 1.99
123.98E+03197.6744.74197.874126.31E+03199.0245.06198.924131.00E-03550.4844.86201.554131.58E-03550.0944.80202.084132.51E-03549.5844.71202.744133.98E-03548.9144.58203.544136.31E-03548.0444.39204.534136.31E-03548.0444.39204.534131.00E-02546.8544.10205.674131.58E-02545.1243.65206.824132.51E-02542.3942.98207.574133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	4.71 5.05 5.11 5.08 5.01 4.87 4.61 4.14 3.33 1.99
126.31E+03199.0245.06198.924131.00E-03550.4844.86201.554131.58E-03550.0944.80202.084132.51E-03549.5844.71202.744133.98E-03548.9144.58203.544136.31E-03548.0444.39204.534131.00E-02546.8544.10205.674131.58E-02545.1243.65206.824132.51E-02542.3942.98207.574133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842131.00E+01267.0929.3772.112131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	5.05 5.11 5.08 5.01 4.87 4.61 4.14 3.33 1.99
131.00E-03550.4844.86201.554131.58E-03550.0944.80202.084132.51E-03549.5844.71202.744133.98E-03548.9144.58203.544136.31E-03548.0444.39204.534131.00E-02546.8544.10205.674131.58E-02545.1243.65206.824132.51E-02545.1243.65206.824133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	5.11 5.08 5.01 4.87 4.61 4.14 3.33 1.99
131.58E-03550.0944.80202.084132.51E-03549.5844.71202.744133.98E-03548.9144.58203.544136.31E-03548.0444.39204.534131.00E-02546.8544.10205.674131.58E-02545.1243.65206.824132.51E-02542.3942.98207.574133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112131.00E+01223.4331.7545.633131.00E+00223.4331.7545.633131.58E+01112.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	5.08 5.01 4.87 4.61 4.14 3.33 1.99
132.51E-03549.5844.71202.7444133.98E-03548.9144.58203.544136.31E-03548.0444.39204.534131.00E-02546.8544.10205.674131.58E-02545.1243.65206.824132.51E-02542.3942.98207.574133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	5.01 4.87 4.61 4.14 3.33 1.99
133.98E-03548.9144.58203.544136.31E-03548.0444.39204.534131.00E-02546.8544.10205.674131.58E-02545.1243.65206.824132.51E-02542.3942.98207.574133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01267.0929.3772.112131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	4.87 4.61 4.14 3.33 1.99
136.31E-03548.0444.39204.534131.00E-02546.8544.10205.674131.58E-02545.1243.65206.824132.51E-02542.3942.98207.574133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	4.61 4.14 3.33 1.99
131.00E-02546.8544.10205.674131.58E-02545.1243.65206.824132.51E-02542.3942.98207.574133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	4.14 3.33 1.99
131.58E-02545.1243.65206.824132.51E-02542.3942.98207.574133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	3.33 1.99
132.51E-02542.3942.98207.574133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	1.99
133.98E-02537.6441.95206.723136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245132.51E+011122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	
136.31E-02528.6440.39201.323131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	9.81
131.00E-01510.6638.12185.723131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	6.39
131.58E-01475.5535.06153.872132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	1.46
132.51E-01415.4331.67109.842133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	5.57
133.98E-01337.0529.3772.112136.31E-01267.0929.6151.812131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	1.17
13   6.31E-01   267.09   29.61   51.81   2     13   1.00E+00   223.43   31.75   45.63   3     13   1.00E+01   130.31   38.85   54.24   5     13   1.58E+01   122.41   41.61   59.12   5     13   2.51E+01   119.54   44.69   68.44   5	1.89
131.00E+00223.4331.7545.633131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	8.40
131.00E+01130.3138.8554.245131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	6.66
131.58E+01122.4141.6159.125132.51E+01119.5444.6968.445	2.02
13 2.51E+01 119.54 44.69 68.44 5	5.41
	8.58
13 3.98E+01 122.35 47.74 83.07 6	0.73
13 6.31E+01 130.69 50.28 102.86 6	1.48
13 1.00E+02 144.00 52.03 126.83 6	0.98
13 1.58E+02 161.97 52.78 154.11 5	9.49
13 2.51E+02 182.91 52.27 182.89 5	6.99
13 3.98E+02 201.94 50.53 207.83 5	3.54
13 6.31E+02 212.93 48.09 221.52 4	9.68
13 1.00E+03 213.14 45.88 220.62 4	6.40
13 1.58E+03 206.57 44.69 210.71 4	4.62
13 2.51E+03 200.56 44.59 201.65 4	4.39
13 3.98E+03 198.78 44.90 198.55 4	4.81
13 6.31E+03 199.33 45.02 199.14 4	5.03
14 1.00E-03 1102.43 44.83 203.17 4	5.34
14 1.58E-03 1101.39 44.77 204.13 4	5.38
14 2.51E-03 1100.07 44.67 205.33 4	5.38
14 3.98E-03 1098.35 44.53 206.84 4	
14 6.31E-03 1096.12 44.33 208.74 4	5.33
14 1.00E-02 1093.13 44.02 211.08 4	5.33 5.19
14 1.58E-02 1088.93 43.56 213.81 4	-5.33 -5.19 4.88
14 2.51E-02 1082.56 42.85 216.68 4	5.33 5.19 4.88 4.26

14	3.98E-02	1071.99	41.79	218.60	41.20
14	6.31E-02	1052.76	40.19	216.62	38.01
14	1.00E-01	1015.52	37.86	204.17	33.21
14	1.58E-01	944.10	34.71	172.81	27.27
14	2.51E-01	822.94	31.19	125.01	22.72
14	3.98E-01	665.30	28.69	82.47	23.55
14	6.31E-01	523.84	28.67	59.69	30.61
14	1.00E+00	433.91	30.52	53.65	39.73
14	1.00E+01	229.33	35.14	87.69	55.86
14	1.58E+01	206.78	37.11	101.12	57.38
14	2.51E+01	191.62	39.40	119.68	58.03
14	3.98E+01	184.12	41.78	142.01	57.46
14	6.31E+01	183.16	43.81	164.85	55.84
14	1.00E+02	186.64	45.22	184.99	53.67
14	1.58E+02	192.55	45.93	200.74	51.30
14	2.51E+02	198.50	45.94	210.74	48.90
14	3.98E+02	201.84	45.50	213.36	46.70
14	6.31E+02	201.79	45.05	209.42	45.18
14	1.00E+03	200.27	44.89	203.26	44.61
14	1.58E+03	199.37	44.94	199.46	44.73
14	2.51E+03	199.37	45.00	198.93	44.97
14	3.98E+03	199.54	45.01	199.47	45.02
14	6.31E+03	199.54	45.00	199.57	45.00

ج-۲- دادههای مصنوعی حاصل از مدل نشان داده شده در شکل (۴-۲-الف)

				• •	
Station	Frequency	TM-Res.	TM-Phase	TE-Res.	TE-Phase
Station	(Hz)	(Ohm-m)	(deg.)	(Ohm-m)	(deg.)
1	6.31E+03	1125.59	39.74	797.08	47.95
1	3.98E+03	1179.99	39.38	793.29	48.66
1	2.51E+03	1221.18	38.19	761.64	50.30
1	1.58E+03	1308.73	35.18	688.26	51.70
1	1.00E+03	1514.40	33.48	592.98	51.36
1	6.31E+02	1829.57	33.37	507.24	48.21
1	3.98E+02	2136.53	35.38	458.07	41.49
1	2.51E+02	2342.83	38.01	487.28	31.51
1	1.58E+02	2453.58	40.22	683.74	22.46
1	1.00E+02	2508.59	41.80	1152.47	21.74
1	6.31E+01	2536.71	42.87	1662.26	30.32
1	3.98E+01	2552.47	43.57	1777.67	39.84
1	2.51E+01	2562.30	44.04	1645.32	45.55
1	1.58E+01	2569.03	44.34	1488.06	48.11
1	1.00E+01	2574.01	44.54	1364.24	48.96

ج	ست	ييو
<u> </u>		

1	1.00E+00	2586.19	44.91	1097.72	47.27
1	6.31E-01	2587.32	44.93	1076.61	46.87
1	3.98E-01	2588.21	44.95	1060.28	46.52
1	2.51E-01	2588.93	44.96	1047.54	46.24
1	1.58E-01	2589.52	44.97	1037.53	46.00
1	1.00E-01	2589.94	44.98	1029.70	45.80
2	6.31E+03	29.17	34.82	388.56	33.83
2	3.98E+03	31.92	35.65	456.78	36.52
2	2.51E+03	33.94	35.46	497.54	40.70
2	1.58E+03	37.01	33.83	490.17	44.78
2	1.00E+03	43.27	32.19	443.52	47.01
2	6.31E+02	52.52	32.55	385.01	46.07
2	3.98E+02	61.44	34.90	342.96	40.95
2	2.51E+02	67.36	37.74	354.05	31.75
2	1.58E+02	70.49	40.09	479.44	22.67
2	1.00E+02	72.00	41.75	778.91	20.77
2	6.31E+01	72.74	42.86	1142.56	26.90
2	3.98E+01	73.14	43.58	1329.35	34.96
2	2.51E+01	73.37	44.06	1338.07	40.77
2	1.58E+01	73.53	44.37	1284.01	44.08
2	1.00E+01	73.64	44.57	1224.50	45.74
2	1.00E+00	73.91	44.92	1064.85	46.34
2	6.31E-01	73.94	44.94	1051.02	46.14
2	3.98E-01	73.96	44.96	1040.26	45.95
2	2.51E-01	73.97	44.97	1031.81	45.78
2	1.58E-01	73.99	44.98	1025.16	45.64
2	1.00E-01	74.00	44.98	1019.93	45.52
3	6.31E+03	152.16	34.28	199.39	26.26
3	3.98E+03	167.50	35.77	258.91	30.56
3	2.51E+03	176.70	36.18	300.30	36.66
3	1.58E+03	189.33	34.94	306.30	42.73
3	1.00E+03	216.89	33.38	279.47	47.00
3	6.31E+02	259.19	33.64	236.31	48.04
3	3.98E+02	299.83	35.86	196.91	44.22
3	2.51E+02	325.72	38.61	187.13	34.77
3	1.58E+02	337.96	40.86	238.05	24.25
3	1.00E+02	342.62	42.43	370.26	19.82
3	6.31E+01	343.94	43.44	556.87	22.12
3	3.98E+01	343.99	44.08	727.61	27.33
3	2.51E+01	343.62	44.47	841.67	32.46
3	1.58E+01	343.17	44.71	906.46	36.43
3	1.00E+01	342.74	44.85	941.54	39.24
3	1.00E+00	341.49	45.02	987.62	44.17
3	6.31E-01	341.37	45.02	990.28	44.41
3	3.98E-01	341.27	45.02	992.34	44.59
3	2.51E-01	341.19	45.02	993.92	44.70

3	1.58E-01	341.13	45.02	995.20	44.78
3	1.00E-01	341.08	45.01	996.19	44.84
4	6.31E+03	163.37	33.34	182.04	31.76
4	3.98E+03	180.99	35.44	220.35	36.50
4	2.51E+03	190.35	36.37	237.04	42.69
4	1.58E+03	201.89	35.50	225.59	48.44
4	1.00E+03	228.23	34.10	194.61	52.36
4	6.31E+02	269.71	34.35	155.32	53.35
4	3.98E+02	309.42	36.53	119.65	49.17
4	2.51E+02	333.75	39.23	105.53	38.09
4	1.58E+02	344.03	41.43	130.61	25.40
4	1.00E+02	346.74	42.94	202.35	19.01
4	6.31E+01	346.35	43.89	311.31	19.10
4	3.98E+01	344.98	44.46	433.50	22.42
4	2.51E+01	343.46	44.78	547.07	26.62
4	1.58E+01	342.09	44.97	641.74	30.54
4	1.00E+01	340.94	45.06	716.94	33.82
4	1.00E+00	337.77	45.09	909.08	41.96
4	6.31E-01	337.47	45.08	927.34	42.64
4	3.98E-01	337.23	45.07	942.04	43.16
4	2.51E-01	337.04	45.05	953.74	43.56
4	1.58E-01	336.88	45.04	963.12	43.87
4	1.00E-01	336.76	45.04	970.62	44.11
5	6.31E+03	160.14	35.42	172.87	39.46
5	3.98E+03	173.24	38.02	184.43	45.08
5	2.51E+03	176.33	39.48	175.54	50.94
5	1.58E+03	178.94	38.97	151.73	55.54
5	1.00E+03	192.69	37.49	122.86	58.31
5	6.31E+02	218.93	37.31	92.73	58.71
5	3.98E+02	244.33	39.03	66.06	53.69
5	2.51E+02	257.85	41.39	54.85	40.21
5	1.58E+02	260.75	43.31	68.53	25.19
5	1.00E+02	258.40	44.55	108.52	17.46
5	6.31E+01	254.43	45.26	171.23	16.15
5	3.98E+01	250.41	45.60	250.06	18.11
5	2.51E+01	246.90	45.74	337.48	21.38
5	1.58E+01	243.99	45.75	426.48	24.95
5	1.00E+01	241.65	45.70	511.62	28.34
5	1.00E+00	235.41	45.31	812.70	39.24
5	6.31E-01	234.82	45.25	848.24	40.39
5	3.98E-01	234.35	45.20	877.55	41.32
5	2.51E-01	233.99	45.16	901.49	42.07
5	1.58E-01	233.69	45.13	920.96	42.67
5	1.00E-01	233.46	45.11	936.68	43.14
6	6.31E+03	161.75	34.40	172.55	38.22

3.98E+03

6

177.39

36.85

188.08

43.46

~	·** · · · ·	
Ŀ		<b>7</b> ,

6	2.51E+03	183.31	38.21	183.69	49.20
6	1.58E+03	189.21	37.67	162.54	53.93
6	1.00E+03	207.14	36.30	133.87	56.91
6	6.31E+02	238.33	36.31	102.58	57.46
6	3.98E+02	268.27	38.21	74.48	52.71
6	2.51E+02	285.00	40.70	62.57	39.88
6	1.58E+02	289.86	42.72	77.63	25.40
6	1.00E+02	288.71	44.05	121.93	17.87
6	6.31E+01	285.50	44.83	191.24	16.74
6	3.98E+01	282.01	45.25	277.04	18.89
6	2.51E+01	278.87	45.45	369.70	22.30
6	1.58E+01	276.24	45.51	461.36	25.94
6	1.00E+01	274.10	45.50	546.64	29.34
6	1.00E+00	268.39	45.24	831.50	39.77
6	6.31E-01	267.85	45.20	863.87	40.84
6	3.98E-01	267.42	45.16	890.37	41.69
6	2.51E-01	267.08	45.13	911.97	42.37
6	1.58E-01	266.81	45.11	929.44	42.91
6	1.00E-01	266.59	45.09	943.56	43.34
7	6.31E+03	164.53	31.98	182.60	29.04
7	3.98E+03	186.17	33.86	230.60	33.06
7	2.51E+03	200.29	34.72	260.97	38.89
7	1.58E+03	217.20	33.96	261.16	44.70
7	1.00E+03	249.96	32.81	234.87	48.88
7	6.31E+02	298.82	33.34	195.03	50.05
7	3.98E+02	345.30	35.74	157.76	46.29
7	2.51E+02	374.52	38.58	144.82	36.46
7	1.58E+02	387.94	40.90	180.11	25.16
7	1.00E+02	392.65	42.50	276.77	19.73
7	6.31E+01	393.62	43.52	419.10	20.77
7	3.98E+01	393.22	44.15	565.41	24.92
7	2.51E+01	392.44	44.54	684.24	29.56
7	1.58E+01	391.62	44.77	769.73	33.53
7	1.00E+01	390.90	44.90	828.46	36.60
7	1.00E+00	388.86	45.04	950.65	43.13
7	6.31E-01	388.66	45.04	960.82	43.59
7	3.98E-01	388.50	45.03	968.86	43.92
7	2.51E-01	388.37	45.03	975.24	44.17
7	1.58E-01	388.28	45.02	980.30	44.36
7	1.00E-01	388.20	45.02	984.33	44.50
8	6.31E+03	151.68	33.61	196.25	24.90
8	3.98E+03	169.11	34.91	259.69	28.46
8	2.51E+03	180.96	35.28	310.73	33.89
8	1.58E+03	196.35	34.15	330.13	39.57
8	1.00E+03	226.79	32.78	314.07	43.73
8	6.31E+02	272.17	33.20	277.12	44.81

5	ست	پيو
---	----	-----

8	3.98E+02	315.61	35.53	242.18	41.33
8	2.51E+02	343.55	38.34	239.65	32.87
8	1.58E+02	357.17	40.64	309.39	23.57
8	1.00E+02	362.73	42.24	481.96	20.22
8	6.31E+01	364.68	43.29	714.61	23.70
8	3.98E+01	365.18	43.95	899.97	29.81
8	2.51E+01	365.15	44.37	995.41	35.23
8	1.58E+01	364.96	44.62	1030.91	39.06
8	1.00E+01	364.74	44.78	1038.29	41.52
8	1.00E+00	364.01	45.00	1016.01	44.97
8	6.31E-01	363.94	45.00	1012.74	45.05
8	3.98E-01	363.88	45.01	1010.14	45.09
8	2.51E-01	363.83	45.01	1008.02	45.11
8	1.58E-01	363.80	45.01	1006.38	45.10
8	1.00E-01	363.76	45.01	1005.06	45.10
9	6.31E+03	2905.23	34.55	381.27	33.53
9	3.98E+03	3198.82	35.26	448.48	35.58
9	2.51E+03	3428.15	35.07	496.40	39.04
9	1.58E+03	3759.93	33.55	503.60	42.64
9	1.00E+03	4402.51	32.05	470.92	44.71
9	6.31E+02	5341.71	32.48	422.33	43.84
9	3.98E+02	6244.53	34.86	388.54	39.06
9	2.51E+02	6845.89	37.70	411.29	30.54
9	1.58E+02	7165.06	40.05	562.11	22.28
9	1.00E+02	7320.66	41.72	915.04	21.15
9	6.31E+01	7398.10	42.83	1325.41	28.22
9	3.98E+01	7440.12	43.56	1491.90	36.85
9	2.51E+01	7465.52	44.04	1452.48	42.64
9	1.58E+01	7482.56	44.35	1361.32	45.67
9	1.00E+01	7494.97	44.56	1277.53	47.01
9	1.00E+00	7524.89	44.92	1077.36	46.70
9	6.31E-01	7527.66	44.94	1060.82	46.42
9	3.98E-01	7529.91	44.96	1047.92	46.17
9	2.51E-01	7531.65	44.97	1037.79	45.96
9	1.58E-01	7533.04	44.98	1029.91	45.78
9	1.00E-01	7534.25	44.98	1023.67	45.63
10	6.31E+03	1122.10	39.66	785.22	47.89
10	3.98E+03	1179.56	39.18	777.93	48.04
10	2.51E+03	1227.02	37.98	755.96	48.99
10	1.58E+03	1319.90	35.64	701.21	49.96
10	1.00E+03	1527.25	33.48	621.47	49.56
10	6.31E+02	1841.49	33.42	545.76	46.55
10	3.98E+02	2147.14	35.43	504.68	40.20
10	2.51E+02	2352.61	38.05	545.46	30.86
10	1.58E+02	2462.97	40.25	766.51	22.48
10	1.00E+02	2517.85	41.82	1286.41	22.30

10	6.31E+01	2545.95	42.88	1829.57	31.50
10	3.98E+01	2561.65	43.58	1904.98	41.31
10	2.51E+01	2571.46	44.04	1722.78	46.87
10	1.58E+01	2578.10	44.35	1535.22	49.15
10	1.00E+01	2583.03	44.55	1394.83	49.75
10	1.00E+00	2595.08	44.91	1104.26	47.47
10	6.31E-01	2596.21	44.94	1081.73	47.02
10	3.98E-01	2597.11	44.95	1064.29	46.64
10	2.51E-01	2597.77	44.96	1050.63	46.33
10	1.58E-01	2598.36	44.97	1039.99	46.07
10	1.00E-01	2660.11	44.98	1031.62	45.86

ج-۳- دادههای مصنوعی حاصل از مدل نشان داده شده در شکل (۴-۳-الف)

Station	Frequency	TM-Res.	TM-Phase	TE-Res.	TE-Phase
Station	(Hz)	(Ohm-m)	(deg.)	(Ohm-m)	(deg.)
1	6.31E+03	892.05	47.29	1127.46	47.02
1	3.98E+03	860.30	47.19	1127.02	50.16
1	2.51E+03	824.69	46.54	1033.93	54.29
1	1.58E+03	803.56	45.00	852.43	57.16
1	1.00E+03	818.45	43.17	666.30	56.74
1	6.31E+02	864.35	42.18	531.90	52.57
1	3.98E+02	912.26	42.24	462.98	44.77
1	2.51E+02	945.28	42.77	483.15	34.13
1	1.58E+02	964.89	43.32	663.51	24.84
1	1.00E+02	976.65	43.76	1080.26	23.74
1	6.31E+01	984.19	44.09	1518.52	31.23
1	3.98E+01	989.42	44.32	1635.57	39.69
1	2.51E+01	993.25	44.49	1543.23	44.91
1	1.58E+01	996.14	44.62	1418.86	47.36
1	1.00E+01	998.39	44.71	1316.44	48.26
1	1.00E+00	1004.18	44.92	1086.55	46.99
1	6.31E-01	1004.73	44.94	1067.95	46.65
1	3.98E-01	1005.17	44.95	1053.51	46.35
1	2.51E-01	1005.52	44.96	1042.22	46.09
1	1.58E-01	1005.77	44.97	1033.36	45.88
1	1.00E-01	1006.00	44.98	1026.41	45.71
2	6.31E+03	4813.82	48.72	1204.54	52.39
2	3.98E+03	4622.85	47.82	1130.81	55.20
2	2.51E+03	4455.23	46.54	982.47	58.68
2	1.58E+03	4389.04	44.65	779.47	60.83
2	1.00E+03	4523.14	42.70	592.79	59.97
2	6.31E+02	4820.14	41.74	459.81	55.65
2	3.98E+02	5114.93	41.89	385.76	47.67
2	2.51E+02	5316.80	42.51	386.97	36.53
2	1.58E+02	5437.63	43.12	513.65	26.40

~	ست	ىيە
Ŀ		7

2	1.00E+02	5511.25	43.61	812.61	23.89
2	6.31E+01	5559.68	43.96	1157.31	29.29
2	3.98E+01	5593.97	44.23	1324.04	36.50
2	2.51E+01	5619.40	44.42	1326.78	41.66
2	1.58E+01	5638.84	44.56	1273.83	44.56
2	1.00E+01	5653.92	44.66	1216.52	46.00
2	1.00E+00	5693.38	44.90	1062.89	46.32
2	6.31E-01	5697.05	44.92	1049.49	46.12
2	3.98E-01	5700.07	44.94	1039.08	45.93
2	2.51E-01	5702.43	44.95	1030.86	45.77
2	1.58E-01	5704.27	44.96	1024.42	45.63
2	1.00E-01	5705.71	44.97	1019.34	45.51
3	6.31E+03	1278.70	51.59	1146.99	62.28
3	3.98E+03	1200.80	49.59	954.53	64.27
3	2.51E+03	1152.29	47.38	754.50	66.30
3	1.58E+03	1142.38	44.91	564.70	67.10
3	1.00E+03	1187.57	42.72	412.53	65.66
3	6.31E+02	1273.03	41.75	303.75	61.45
3	3.98E+02	1353.04	41.97	234.82	53.44
3	2.51E+02	1404.72	42.63	215.20	41.08
3	1.58E+02	1433.64	43.27	268.40	28.77
3	1.00E+02	1450.14	43.75	409.92	23.31
3	6.31E+01	1460.46	44.09	603.60	24.94
3	3.98E+01	1467.51	44.33	772.61	29.58
3	2.51E+01	1472.65	44.51	879.20	34.19
3	1.58E+01	1476.59	44.63	935.88	37.74
3	1.00E+01	1479.65	44.72	964.30	40.21
3	1.00E+00	1487.61	44.92	994.40	44.40
3	6.31E-01	1488.33	44.94	995.63	44.59
3	3.98E-01	1488.95	44.95	996.60	44.72
3	2.51E-01	1489.43	44.96	997.31	44.81
3	1.58E-01	1489.81	44.97	997.88	44.87
3	1.00E-01	1490.12	44.98	998.32	44.91
4	6.31E+03	1081.36	55.47	885.87	69.01
4	3.98E+03	971.87	53.01	677.58	70.07
4	2.51E+03	902.21	50.28	506.71	70.76
4	1.58E+03	871.97	47.35	370.25	70.49
4	1.00E+03	887.95	44.79	267.50	68.80
4	6.31E+02	935.69	43.52	191.51	65.07
4	3.98E+02	979.47	43.51	138.68	57.31
4	2.51E+02	1002.86	43.97	118.24	43.71
4	1.58E+02	1011.16	44.41	143.41	29.36
4	1.00E+02	1012.58	44.70	218.91	21.91
4	6.31E+01	1011.63	44.87	332.24	21.32
4	3.98E+01	1010.09	44.97	456.70	24.17
4	2.51E+01	1008.56	45.02	569.73	27.99

ې ج	پيوست
-----	-------

4	1.58E+01	1007.26	45.05	662.09	31.61
4	1.00E+01	1006.19	45.05	734.36	34.65
4	1.00E+00	1003.30	45.03	915.50	42.19
4	6.31E-01	1003.04	45.03	932.55	42.81
4	3.98E-01	1002.84	45.02	946.22	43.29
4	2.51E-01	1002.65	45.02	957.11	43.67
4	1.58E-01	1002.51	45.01	965.81	43.95
4	1.00E-01	1002.42	45.01	972.77	44.18
5	6.31E+03	661.23	71.04	624.67	76.12
5	3.98E+03	494.22	69.37	438.99	76.09
5	2.51E+03	380.14	66.95	309.73	75.30
5	1.58E+03	303.93	63.89	220.57	73.71
5	1.00E+03	256.94	60.61	158.45	71.48
5	6.31E+02	228.89	58.10	111.21	68.14
5	3.98E+02	207.01	56.73	75.55	60.50
5	2.51E+02	186.06	55.84	60.52	45.14
5	1.58E+02	167.14	54.87	73.80	28.65
5	1.00E+02	151.58	53.75	115.29	19.89
5	6.31E+01	139.45	52.56	180.24	17.94
5	3.98E+01	130.16	51.40	261.00	19.48
5	2.51E+01	123.08	50.34	349.53	22.45
5	1.58E+01	117.67	49.40	438.68	25.79
5	1.00E+01	113.51	48.60	523.28	29.00
5	1.00E+00	103.16	46.23	818.50	39.45
5	6.31E-01	102.23	45.98	853.00	40.56
5	3.98E-01	101.49	45.78	881.48	41.45
5	2.51E-01	100.91	45.63	904.71	42.17
5	1.58E-01	100.45	45.50	923.55	42.75
5	1.00E-01	100.09	45.40	938.77	43.21
6	6.31E+03	741.75	66.65	662.83	74.78
6	3.98E+03	583.54	64.45	473.45	74.86
6	2.51E+03	475.43	61.59	338.68	74.26
6	1.58E+03	404.86	58.24	243.27	72.91
6	1.00E+03	365.76	54.89	175.46	70.81
6	6.31E+02	347.45	52.54	123.89	67.44
6	3.98E+02	333.53	51.44	85.40	59.85
6	2.51E+02	316.98	50.88	69.19	44.99
6	1.58E+02	299.84	50.34	83.87	28.97
6	1.00E+02	284.70	49.71	129.93	20.39
6	6.31E+01	272.38	49.04	201.77	18.61
6	3.98E+01	262.65	48.40	289.64	20.32
6	2.51E+01	255.06	47.82	383.31	23.42
6	1.58E+01	249.17	47.32	474.91	26.83
6	1.00E+01	244.57	46.89	559.33	30.03
6	1.00E+00	232.80	45.64	837.43	39.99
6	6.31E-01	231.71	45.51	868.74	41.01

6	3.98E-01	230.85	45.41	894.36	41.82
6	2.51E-01	230.17	45.32	915.21	42.47
6	1.58E-01	229.64	45.26	932.05	42.99
6	1.00E-01	229.20	45.21	945.67	43.40
7	6.31E+03	1192.81	53.14	1036.05	65.71
7	3.98E+03	1100.83	50.86	823.10	67.24
7	2.51E+03	1045.85	48.37	632.00	68.53
7	1.58E+03	1029.96	45.74	467.88	68.76
7	1.00E+03	1063.53	43.45	340.33	67.17
7	6.31E+02	1132.58	42.39	247.60	63.20
7	3.98E+02	1196.66	42.53	186.07	55.39
7	2.51E+02	1235.98	43.12	164.49	42.69
7	1.58E+02	1256.00	43.67	200.36	29.55
7	1.00E+02	1266.05	44.08	302.91	23.01
7	6.31E+01	1271.54	44.36	450.92	23.34
7	3.98E+01	1275.00	44.55	598.62	26.95
7	2.51E+01	1277.35	44.68	714.27	31.14
7	1.58E+01	1279.09	44.77	794.90	34.74
7	1.00E+01	1280.38	44.83	848.97	37.51
7	1.00E+00	1283.84	44.96	957.37	43.37
7	6.31E-01	1284.13	44.97	966.21	43.77
7	3.98E-01	1284.40	44.98	973.15	44.06
7	2.51E-01	1284.61	44.98	978.68	44.28
7	1.58E-01	1284.75	44.99	983.04	44.44
7	1.00E-01	1284.90	44.99	986.51	44.57
8	6.31E+03	1303.74	51.22	1230.18	59.70
8	3.98E+03	1229.82	49.37	1058.45	61.70
8	2.51E+03	1181.98	47.34	861.99	63.94
8	1.58E+03	1169.28	45.03	659.05	65.00
8	1.00E+03	1209.48	42.92	489.42	63.62
8	6.31E+02	1290.80	41.91	368.71	59.28
8	3.98E+02	1369.27	42.05	295.60	51.34
8	2.51E+02	1421.51	42.65	280.70	39.74
8	1.58E+02	1451.81	43.25	354.63	28.53
8	1.00E+02	1469.77	43.71	540.80	24.14
8	6.31E+01	1481.36	44.05	780.94	26.93
8	3.98E+01	1489.46	44.29	958.76	32.37
8	2.51E+01	1495.41	44.47	1040.52	37.17
8	1.58E+01	1500.00	44.60	1064.27	40.49
8	1.00E+01	1503.59	44.69	1063.11	42.56
8	1.00E+00	1512.86	44.91	1022.94	45.21
8	6.31E-01	1513.74	44.93	1018.22	45.24
8	3.98E-01	1514.43	44.95	1014.45	45.23
8	2.51E-01	1514.99	44.96	1011.46	45.21
8	1.58E-01	1515.44	44.97	1009.09	45.19
8	1.00E-01	1515.79	44.97	1007.21	45.16

ج	ست	ييو
<u> </u>		

9	6.31E+03	48.35	48.86	1211.30	51.18
9	3.98E+03	46.53	48.00	1157.23	53.63
9	2.51E+03	44.82	46.86	1029.27	56.92
9	1.58E+03	43.92	45.13	835.26	59.08
9	1.00E+03	44.87	43.23	647.55	58.26
9	6.31E+02	47.43	42.21	513.07	53.96
9	3.98E+02	50.08	42.24	441.65	46.19
9	2.51E+02	51.92	42.75	452.96	35.63
9	1.58E+02	53.03	43.29	606.05	26.27
9	1.00E+02	53.71	43.72	957.94	24.52
9	6.31E+01	54.16	44.05	1342.05	30.81
9	3.98E+01	54.48	44.28	1483.37	38.48
9	2.51E+01	54.71	44.46	1438.50	43.56
9	1.58E+01	54.89	44.59	1349.37	46.17
9	1.00E+01	55.03	44.68	1268.70	47.27
9	1.00E+00	55.39	44.91	1075.38	46.69
9	6.31E-01	55.42	44.93	1059.28	46.40
9	3.98E-01	55.45	44.94	1046.72	46.16
9	2.51E-01	55.47	44.96	1036.86	45.94
9	1.58E-01	55.49	44.97	1029.18	45.76
9	1.00E-01	55.50	44.97	1023.08	45.62
10	6.31E+03	894.15	47.25	1118.87	46.37
10	3.98E+03	864.73	47.23	1129.22	49.09
10	2.51E+03	829.51	46.74	1055.29	52.92
10	1.58E+03	804.71	45.41	888.22	55.72
10	1.00E+03	812.59	43.68	706.98	55.35
10	6.31E+02	851.06	42.64	574.86	51.27
10	3.98E+02	893.37	42.60	510.38	43.72
10	2.51E+02	923.02	43.03	540.26	33.64
10	1.58E+02	940.68	43.51	742.71	24.99
10	1.00E+02	951.22	43.89	1201.85	24.40
10	6.31E+01	957.97	44.18	1664.18	32.43
10	3.98E+01	962.61	44.39	1748.12	41.11
10	2.51E+01	966.01	44.54	1613.80	46.18
10	1.58E+01	968.57	44.66	1463.09	48.38
10	1.00E+01	970.53	44.74	1345.77	49.03
10	1.00E+00	975.64	44.93	1093.08	47.19
10	6.31E-01	976.11	44.94	1073.05	46.80
10	3.98E-01	976.49	44.96	1057.50	46.47
10	2.51E-01	976.79	44.96	1045.32	46.19
10	1.58E-01	977.03	44.97	1035.81	45.96
10	1.00E-01	974.99	44.98	1028.35	45.77

ج-۴- دادههای مصنوعی حاصل از مدل نشان داده شده در شکل (۵-۴-الف)

Station Frequency TM-Res. TM-Phase TE-Res. TE-Phase		•	-	• • •	01	•
	Station	Frequency	TM-Res.	TM-Phase	TE-Res.	TE-Phase

7	ست	يبو
~		<b>.</b>

	(Hz)	(Ohm-m)	(deg.)	(Ohm-m)	(deg.)
1	1.00E-01	18.83	38.80	19.29	37.83
1	2.20E-01	16.35	44.63	16.39	44.03
1	5.00E-01	17.28	54.17	17.33	54.10
1	1.00E+00	22.91	61.17	23.11	61.04
1	2.20E+00	36.77	62.56	36.87	62.30
1	5.00E+00	53.85	55.55	53.65	55.38
1	1.00E+01	57.76	47.98	57.51	47.93
1	2.20E+01	52.24	44.21	52.28	44.12
1	5.00E+01	49.65	45.05	49.70	44.65
2	1.00E-01	16.41	39.29	19.43	37.82
2	2.20E-01	14.41	45.24	16.46	43.94
2	5.00E-01	15.41	54.80	17.31	54.16
2	1.00E+00	20.54	61.92	23.18	61.35
2	2.20E+00	33.36	63.78	37.29	62.71
2	5.00E+00	50.56	57.37	55.00	55.89
2	1.00E+01	56.72	49.73	59.94	48.11
2	2.20E+01	52.93	45.00	54.14	43.45
2	5.00E+01	50.13	45.13	49.82	43.94
3	1.00E-01	24.85	39.12	19.93	38.13
3	2.20E-01	21.74	44.91	16.90	44.24
3	5.00E-01	22.92	54.33	17.62	54.90
3	1.00E+00	29.93	61.78	23.66	63.30
3	2.20E+00	48.09	64.92	39.47	66.68
3	5.00E+00	75.51	60.59	63.96	62.82
3	1.00E+01	92.15	54.42	81.70	57.09
3	2.20E+01	97.40	49.51	92.03	52.02
1	5.00E+01	100.21	47.97	99.46	49.42
4	1.00E-01	22.38	37.90	20.13	37.66
4	2.20E-01	19.18	42.72	17.01	42.99
4	5.00E-01	19.25	50.75	17.20	52.34
4	1.00E+00	23.47	57.06	21.99	59.77
4	2.20E+00	34.04	59.24	34.44	61.92
4	5.00E+00	46.97	54.57	49.72	56.34
4	1.00E+01	51.24	49.15	55.88	50.31
4	2.20E+01	49.60	46.17	55.29	45.81
4	5.00E+01	49.43	46.35	52.95	44.28
5	1.00E-01	21.03	32.94	20.11	36.23
5	2.20E-01	16.35	34.85	16.87	39.72
5	5.00E-01	13.65	39.56	16.26	45.24
5	1.00E+00	13.43	44.03	18.42	47.80
5	2.20E+00	15.04	45.39	21.80	43.68
5	5.00E+00	15.67	40.41	19.47	33.93
5	1.00E+01	13.10	36.06	13.58	29.88
5	2.20E+01	9.85	37.98	9.23	35.04
5	5.00E+01	9.08	44.38	8.90	42.93

6	1.00E-01	48.53	29.36	21.29	36.05
6	2.20E-01	35.35	28.97	17.84	38.56
6	5.00E-01	25.72	30.60	16.54	42.62
6	1.00E+00	20.91	33.09	17.36	44.58
6	2.20E+00	17.99	34.89	18.71	41.98
6	5.00E+00	15.18	34.10	16.66	35.73
6	1.00E+01	12.18	34.20	12.81	33.37
6	2.20E+01	9.67	37.99	9.65	36.65
6	5.00E+01	9.02	44.51	9.02	42.56
7	1.00E-01	28.39	34.01	19.03	33.77
7	2.20E-01	22.39	36.49	14.94	35.79
7	5.00E-01	19.00	42.36	12.28	41.12
7	1.00E+00	19.03	48.96	11.67	48.33
7	2.20E+00	22.83	55.43	13.83	57.81
7	5.00E+00	31.26	58.32	21.23	63.06
7	1.00E+01	40.99	57.30	30.58	61.91
7	2.20E+01	52.04	53.12	42.15	57.71
1	5.00E+01	56.12	47.16	50.72	51.36
8	1.00E-01	15.42	34.98	18.33	32.86
8	2.20E-01	12.32	38.03	13.92	34.84
8	5.00E-01	10.68	45.06	10.95	41.51
8	1.00E+00	11.17	53.39	10.63	51.52
8	2.20E+00	15.02	62.02	14.54	62.21
8	5.00E+00	24.40	65.23	24.16	65.27
8	1.00E+01	35.91	63.08	35.54	63.08
8	2.20E+01	50.42	57.30	49.96	57.24
8	5.00E+01	57.75	48.88	57.45	48.73
9	1.00E-01	16.34	34.25	18.06	32.47
9	2.20E-01	12.81	36.93	13.50	34.59
9	5.00E-01	10.75	43.93	10.57	42.12
9	1.00E+00	10.99	52.85	10.65	52.56
9	2.20E+00	14.88	62.16	14.80	62.23
9	5.00E+00	24.42	65.30	24.27	65.23
9	1.00E+01	35.92	63.09	35.72	63.02
9	2.20E+01	50.43	57.30	50.08	57.15
9	5.00E+01	57.74	48.87	57.43	48.68
10	1.00E-01	16.87	33.74	17.91	32.28
10	2.20E-01	13.05	36.23	13.28	34.58
10	5.00E-01	10.72	43.35	10.48	42.57
10	1.00E+00	10.89	52.71	10.75	52.79
10	2.20E+00	14.86	62.23	14.82	62.17
10	5.00E+00	24.42	65.30	24.29	65.23
10	1.00E+01	35.92	63.09	35.74	63.01
10	2.20E+01	50.43	57.30	50.09	57.13
10	5.00E+01	57.74	48.87	57.43	48.67

Period:	1.43E-02							
	Re(Zxx)	lm(Zxx)	Re(Zxy)	lm(Zxy)	Re(Zyx)	lm(Zyx)	Re(Zyy)	lm(Zyy)
1	6.40E-03	9.12E-03	2.25E-01	-2.34E-01	-2.31E-01	2.28E-01	-6.65E-03	-1.24E-02
2	8.21E-05	1.08E-04	5.31E-02	-1.56E-01	-5.32E-02	1.55E-01	-4.95E-05	-4.67E-05
3	4.15E-06	1.55E-05	5.28E-02	-1.56E-01	-5.30E-02	1.55E-01	-4.28E-06	-1.86E-06
4	-2.30E-05	-5.14E-05	5.29E-02	-1.56E-01	-5.31E-02	1.55E-01	1.55E-05	9.17E-06
5	-1.31E-03	-1.52E-03	6.99E-02	-1.61E-01	-6.75E-02	1.62E-01	5.16E-04	2.31E-04
6	-3.13E-03	-3.91E-03	1.32E-01	-2.04E-01	-2.27E-01	2.11E-01	2.60E-02	2.03E-02
7	-3.39E-05	8.08E-05	1.86E-01	-2.48E-01	-2.30E-01	2.25E-01	4.80E-04	-1.42E-03
8	3.29E-05	-8.48E-06	6.69E-02	-1.63E-01	-6.82E-02	1.61E-01	-3.81E-05	-2.36E-04
9	3.03E-06	2.63E-07	5.14E-02	-1.55E-01	-5.14E-02	1.55E-01	-1.16E-06	-6.50E-07
10	7.37E-08	4.69E-08	5.13E-02	-1.55E-01	-5.14E-02	1.55E-01	-2.04E-07	-3.88E-07
11	-5.13E-06	1.66E-07	5.14E-02	-1.55E-01	-5.14E-02	1.55E-01	2.26E-06	6.45E-08
12	2.75E-02	1.97E-02	2.28E-01	-2.12E-01	-1.32E-01	2.04E-01	-2.68E-03	-4.17E-03
13	-1.32E-04	1.68E-05	6.71E-02	-1.63E-01	-6.83E-02	1.61E-01	2.81E-04	7.89E-04
14	1.01E-04	-3.83E-04	1.86E-01	-2.47E-01	-2.30E-01	2.25E-01	-7.48E-04	4.86E-03
15	-7.33E-05	-2.54E-04	1.15E-01	-2.04E-01	-2.20E-01	2.14E-01	8.44E-04	6.55E-03
16	-6.15E-05	-1.60E-05	5.37E-02	-1.56E-01	-5.30E-02	1.56E-01	5.79E-05	1.13E-04
17	-1.25E-05	-4.51E-06	5.15E-02	-1.55E-01	-5.16E-02	1.55E-01	5.74E-06	1.88E-06
18	-4.19E-06	-4.57E-07	5.14E-02	-1.55E-01	-5.16E-02	1.55E-01	2.63E-06	-6.29E-07
19	6.89E-06	9.88E-07	5.17E-02	-1.55E-01	-5.15E-02	1.55E-01	-1.89E-06	-5.59E-06
20	1.47E-05	8.33E-07	5.36E-02	-1.56E-01	-5.28E-02	1.56E-01	-1.15E-05	-3.50E-05
21	-3.39E-05	8.08E-05	1.86E-01	-2.48E-01	-2.30E-01	2.25E-01	4.82E-04	-1.42E-03
22	-3.13E-03	-3.91E-03	1.32E-01	-2.04E-01	-2.27E-01	2.11E-01	2.60E-02	2.03E-02
23	-1.02E-03	5.25E-03	2.30E-01	-2.25E-01	-1.88E-01	2.48E-01	1.00E-04	-3.91E-04
24	-1.31E-03	-1.52E-03	6.99E-02	-1.61E-01	-6.75E-02	1.62E-01	5.16E-04	2.30E-04
25	-2.01E-05	-4.07E-04	6.84E-02	-1.61E-01	-6.58E-02	1.62E-01	6.01E-05	1.90E-05
26	4.76E-06	1.59E-05	5.28E-02	-1.56E-01	-5.30E-02	1.55E-01	-4.33E-06	-1.90E-06
27	8.25E-05	1.08E-04	5.31E-02	-1.56E-01	-5.32E-02	1.55E-01	-4.94E-05	-4.66E-05
28	3.46E-03	2.26E-03	8.21E-02	-1.68E-01	-8.13E-02	1.67E-01	-3.18E-03	-2.47E-03
29	4.02E-04	8.97E-04	1.18E-01	-2.04E-01	-2.22E-01	2.12E-01	-7.31E-03	-1.33E-02
30	-7.40E-03	-1.24E-02	2.32E-01	-2.28E-01	-2.25E-01	2.34E-01	5.78E-03	9.22E-03
31	-1.61E-03	-9.81E-03	2.31E-01	-2.24E-01	-1.91E-01	2.46E-01	-9.38E-05	1.25E-03
32	1.21E-03	-2.28E-03	2.30E-01	-2.26E-01	-1.88E-01	2.50E-01	-3.97E-05	1.23E-04
33	-3.79E-04	8.28E-04	2.22E-01	-2.16E-01	-1.14E-01	2.05E-01	-9.33E-06	-3.50E-05
34	-4.71E-04	6.10E-04	2.31E-01	-2.26E-01	-1.88E-01	2.50E-01	6.79E-06	-2.82E-05
35	6.92E-04	7.01E-03	2.21E-01	-2.14E-01	-1.15E-01	2.05E-01	-1.04E-04	-3.36E-04
36	2.75E-02	1.97E-02	2.28E-01	-2.12E-01	-1.32E-01	2.04E-01	-2.68E-03	-4.18E-03
37	2.63E-02	1.78E-02	2.26E-01	-2.21E-01	-2.26E-01	2.21E-01	-2.48E-02	-1.85E-02
38	1.21E-03	-2.28E-03	2.30E-01	-2.26E-01	-1.88E-01	2.50E-01	-3.92E-05	1.22E-04
39	-1.61E-03	-9.81E-03	2.31E-01	-2.24E-01	-1.91E-01	2.46E-01	-9.48E-05	1.25E-03
40	-2.63E-02	-1.78E-02	2.26E-01	-2.21E-01	-2.26E-01	2.21E-01	2.48E-02	1.85E-02
41	-2.12E-05	1.26E-03	1.89E-01	-2.45E-01	-2.30E-01	2.24E-01	-1.37E-03	-9.57E-03

ج -۵- دادههای مصنوعی حاصل از مدل نشان داده شده در شکل (۶-۱-الف)

	1	1	1	1			1	
42	5.16E-04	1.45E-04	6.84E-02	-1.63E-01	-6.94E-02	1.61E-01	-1.17E-03	-1.54E-03
Period:	4.59E-02							
1	1.57E-02	7.32E-03	1.26E-01	-1.23E-01	-1.37E-01	1.20E-01	-2.04E-02	-9.66E-03
2	2.26E-04	-9.77E-06	2.43E-02	-6.03E-02	-2.46E-02	5.90E-02	-2.28E-04	2.79E-04
3	5.55E-05	5.91E-06	2.42E-02	-6.04E-02	-2.42E-02	5.85E-02	-5.17E-05	2.03E-05
4	-1.57E-04	-5.37E-06	2.42E-02	-6.04E-02	-2.43E-02	5.86E-02	1.59E-04	-1.04E-04
5	-2.52E-03	-1.23E-03	3.53E-02	-6.54E-02	-3.36E-02	6.50E-02	2.36E-04	-2.03E-04
6	-6.77E-03	-3.73E-03	6.83E-02	-9.21E-02	-1.50E-01	1.09E-01	4.16E-02	9.10E-03
7	1.18E-04	2.42E-04	8.59E-02	-1.19E-01	-1.41E-01	1.15E-01	-2.25E-03	-2.22E-03
8	-2.63E-05	-7.72E-05	3.38E-02	-6.39E-02	-3.39E-02	6.53E-02	-3.39E-04	-1.99E-04
9	2.19E-05	3.23E-06	2.27E-02	-5.92E-02	-2.28E-02	5.93E-02	-3.88E-05	-9.34E-07
10	7.57E-06	2.47E-06	2.27E-02	-5.92E-02	-2.27E-02	5.92E-02	-1.06E-05	-3.25E-06
11	-2.16E-05	-3.08E-06	2.27E-02	-5.92E-02	-2.28E-02	5.93E-02	3.86E-05	7.83E-07
12	4.22E-02	1.03E-02	1.50E-01	-1.10E-01	-6.80E-02	9.19E-02	-6.65E-03	-3.56E-03
13	8.96E-05	1.67E-04	3.37E-02	-6.44E-02	-3.40E-02	6.52E-02	1.15E-03	5.95E-04
14	-5.57E-04	-9.04E-04	8.71E-02	-1.19E-01	-1.41E-01	1.15E-01	7.51E-03	6.42E-03
15	-1.98E-04	-2.46E-04	5.63E-02	-8.77E-02	-1.43E-01	1.08E-01	9.60E-03	6.32E-03
16	-7.54E-05	9.45E-05	2.48E-02	-5.90E-02	-2.41E-02	6.04E-02	2.35E-04	-1.24E-04
17	-7.27E-05	1.87E-06	2.31E-02	-5.94E-02	-2.29E-02	5.91E-02	1.12E-04	-1.76E-05
18	-2.57E-05	-3.42E-06	2.31E-02	-5.94E-02	-2.27E-02	5.90E-02	3.24E-05	4.18E-06
19	3.25E-05	-7.42E-06	2.29E-02	-5.90E-02	-2.32E-02	5.96E-02	-7.28E-05	2.95E-05
20	2.75E-05	-3.38E-05	2.46E-02	-5.87E-02	-2.40E-02	6.06E-02	-8.47E-05	3.84E-05
21	1.18E-04	2.42E-04	8.59E-02	-1.19E-01	-1.41E-01	1.15E-01	-2.25E-03	-2.21E-03
22	-6.77E-03	-3.73E-03	6.83E-02	-9.21E-02	-1.50E-01	1.09E-01	4.16E-02	9.10E-03
23	8.04E-03	8.81E-03	1.41E-01	-1.17E-01	-8.72E-02	1.21E-01	-5.25E-04	-7.52E-04
24	-2.52E-03	-1.23E-03	3.53E-02	-6.54E-02	-3.36E-02	6.50E-02	2.35E-04	-2.04E-04
25	-6.23E-04	-4.69E-04	3.40E-02	-6.58E-02	-3.33E-02	6.32E-02	8.49E-05	-3.17E-04
26	5.52E-05	5.95E-06	2.42E-02	-6.04E-02	-2.42E-02	5.85E-02	-5.17E-05	2.04E-05
27	2.26E-04	-9.64E-06	2.43E-02	-6.03E-02	-2.46E-02	5.90E-02	-2.28E-04	2.79E-04
28	4.91E-03	1.99E-03	4.26E-02	-6.99E-02	-4.22E-02	6.93E-02	-4.80E-03	-1.78E-03
29	1.08E-03	1.12E-03	5.82E-02	-8.88E-02	-1.46E-01	1.07E-01	-2.13E-02	-9.50E-03
30	-2.05E-02	-1.04E-02	1.38E-01	-1.21E-01	-1.26E-01	1.23E-01	1.56E-02	6.96E-03
31	-1.50E-02	-1.15E-02	1.43E-01	-1.17E-01	-9.08E-02	1.20E-01	1.82E-03	1.98E-03
32	-3.69E-03	-5.34E-03	1.40E-01	-1.17E-01	-8.58E-02	1.21E-01	1.46E-04	2.31E-04
33	1.25E-03	1.66E-03	1.41E-01	-1.12E-01	-5.51E-02	8.66E-02	-5.00E-05	7.36E-05
34	1.04E-03	1.77E-03	1.40E-01	-1.18E-01	-8.54E-02	1.21E-01	-3.02E-05	-4.61E-05
35	1.03E-02	8.55E-03	1.43E-01	-1.10E-01	-5.59E-02	8.76E-02	-2.95E-04	9.91E-05
36	4.22E-02	1.03E-02	1.50E-01	-1.10E-01	-6.80E-02	9.19E-02	-6.65E-03	-3.56E-03
37	3.92E-02	8.47E-03	1.40E-01	-1.16E-01	-1.40E-01	1.14E-01	-3.88E-02	-7.84E-03
38	-3.69E-03	-5.34E-03	1.40E-01	-1.17E-01	-8.58E-02	1.21E-01	1.46E-04	2.32E-04
39	-1.50E-02	-1.15E-02	1.43E-01	-1.17E-01	-9.08E-02	1.20E-01	1.82E-03	1.98E-03
40	-3.92E-02	-8.47E-03	1.40E-01	-1.16E-01	-1.40E-01	1.14E-01	3.88E-02	7.84E-03
41	1.88E-03	2.16E-03	9.07E-02	-1.19E-01	-1.42E-01	1.15E-01	-1.47E-02	-9.67E-03
42	2.01E-04	1.54E-04	3.40E-02	-6.55E-02	-3.51E-02	6.50E-02	-2.44E-03	-1.02E-03
Period:	1.48E-01							
1	1.96E-02	1.26E-03	7.66E-02	-6.71E-02	-8.95E-02	6.57E-02	-2.43E-02	-7.73E-05

، ج	پيوست
-----	-------

_								
2	-1.24E-05	3.40E-04	1.28E-02	-2.39E-02	-1.49E-02	2.33E-02	6.70E-04	-9.29E-05
3	-3.31E-05	3.00E-05	1.17E-02	-2.44E-02	-1.59E-02	2.26E-02	1.53E-04	4.12E-05
4	7.28E-05	-1.29E-04	1.20E-02	-2.42E-02	-1.55E-02	2.29E-02	-4.61E-04	-6.44E-05
5	-3.55E-03	-1.04E-03	2.06E-02	-2.79E-02	-1.91E-02	2.81E-02	2.35E-04	1.07E-03
6	-9.68E-03	-1.67E-03	3.98E-02	-4.44E-02	-1.06E-01	6.36E-02	4.20E-02	-3.96E-03
7	3.96E-04	2.99E-04	4.51E-02	-5.83E-02	-9.70E-02	6.30E-02	-3.68E-03	-5.79E-04
8	-1.41E-04	1.92E-04	2.04E-02	-2.84E-02	-1.89E-02	2.70E-02	-4.29E-04	-1.26E-04
9	-5.52E-05	5.46E-06	1.30E-02	-2.29E-02	-1.25E-02	2.25E-02	8.96E-05	4.03E-05
10	-1.88E-05	-7.48E-07	1.27E-02	-2.31E-02	-1.28E-02	2.22E-02	2.79E-05	1.64E-05
11	5.51E-05	-5.32E-06	1.30E-02	-2.29E-02	-1.25E-02	2.25E-02	-8.95E-05	-4.07E-05
12	4.54E-02	-1.11E-03	1.03E-01	-6.72E-02	-4.01E-02	4.34E-02	-8.99E-03	-1.15E-03
13	2.05E-04	-6.71E-04	1.99E-02	-2.86E-02	-1.93E-02	2.69E-02	1.44E-03	3.75E-04
14	-1.53E-03	-9.16E-04	4.61E-02	-5.83E-02	-9.74E-02	6.33E-02	1.13E-02	1.41E-03
15	-5.62E-04	-8.98E-04	3.11E-02	-4.19E-02	-1.01E-01	6.15E-02	1.30E-02	1.49E-03
16	2.31E-04	-3.32E-04	1.54E-02	-2.37E-02	-1.25E-02	2.34E-02	-1.99E-04	1.61E-04
17	1.40E-04	-3.92E-05	1.25E-02	-2.33E-02	-1.34E-02	2.23E-02	-2.71E-04	-9.38E-05
18	4.89E-05	-4.84E-06	1.23E-02	-2.35E-02	-1.37E-02	2.20E-02	-8.59E-05	-4.15E-05
19	-8.80E-05	3.26E-05	1.39E-02	-2.26E-02	-1.19E-02	2.30E-02	1.46E-04	3.28E-05
20	-1.16E-04	8.82E-05	1.59E-02	-2.34E-02	-1.18E-02	2.35E-02	8.02E-05	-3.51E-05
21	3.96E-04	2.99E-04	4.51E-02	-5.83E-02	-9.70E-02	6.30E-02	-3.68E-03	-5.80E-04
22	-9.68E-03	-1.68E-03	3.98E-02	-4.44E-02	-1.06E-01	6.36E-02	4.20E-02	-3.96E-03
23	1.53E-02	4.08E-03	9.47E-02	-6.58E-02	-4.59E-02	5.83E-02	-1.28E-03	-1.02E-03
24	-3.55E-03	-1.04E-03	2.06E-02	-2.79E-02	-1.91E-02	2.81E-02	2.35E-04	1.07E-03
25	-8.98E-04	-4.28E-04	1.83E-02	-2.77E-02	-2.04E-02	2.78E-02	-6.69E-04	1.23E-04
26	-3.31E-05	3.00E-05	1.17E-02	-2.44E-02	-1.59E-02	2.26E-02	1.53E-04	4.13E-05
27	-1.24E-05	3.40E-04	1.28E-02	-2.39E-02	-1.49E-02	2.33E-02	6.70E-04	-9.28E-05
28	6.78E-03	1.28E-03	2.49E-02	-3.14E-02	-2.51E-02	3.05E-02	-6.17E-03	-8.18E-04
29	2.50E-03	1.62E-03	3.21E-02	-4.21E-02	-1.03E-01	6.22E-02	-2.52E-02	-6.23E-04
30	-2.64E-02	-2.05E-03	8.81E-02	-6.80E-02	-7.75E-02	6.55E-02	1.84E-02	1.01E-04
31	-2.30E-02	-3.99E-03	9.56E-02	-6.66E-02	-4.90E-02	5.84E-02	3.55E-03	1.42E-03
32	-8.56E-03	-2.92E-03	9.36E-02	-6.53E-02	-4.47E-02	5.85E-02	3.78E-04	5.73E-04
33	2.72E-03	1.07E-03	9.52E-02	-6.39E-02	-3.14E-02	4.14E-02	1.44E-04	-9.67E-05
34	2.74E-03	1.05E-03	9.31E-02	-6.51E-02	-4.44E-02	5.86E-02	-7.02E-05	-1.81E-04
35	1.68E-02	4.19E-03	9.80E-02	-6.44E-02	-3.11E-02	4.14E-02	-2.92E-05	-8.45E-04
36	4.54E-02	-1.11E-03	1.03E-01	-6.72E-02	-4.01E-02	4.34E-02	-8.99E-03	-1.15E-03
37	4.09E-02	-2.18E-03	9.26E-02	-6.69E-02	-9.45E-02	6.41E-02	-3.83E-02	4.33E-03
38	-8.56E-03	-2.92E-03	9.36E-02	-6.53E-02	-4.47E-02	5.85E-02	3.78E-04	5.73E-04
39	-2.30E-02	-3.99E-03	9.56E-02	-6.66E-02	-4.90E-02	5.84E-02	3.55E-03	1.42E-03
40	-4.09E-02	2.18E-03	9.26E-02	-6.69E-02	-9.45E-02	6.41E-02	3.83E-02	-4.33E-03
41	3.91E-03	1.52E-03	4.91E-02	-5.87E-02	-9.78E-02	6.39E-02	-1.96E-02	-1.28E-03
42	7.92E-04	1.28E-03	1.92E-02	-2.88E-02	-2.08E-02	2.72E-02	-3.07E-03	-6.17E-04
Period:	4.74E-01							
1	1.74E-02	-4.45E-03	4.69E-02	-3.95E-02	-6.00E-02	4.19E-02	-1.98E-02	6.10E-03
2	7.76E-04	3.90E-04	7.48E-03	-1.07E-02	-9.23E-03	1.11E-02	-3.50E-04	-6.54E-04
3	1.06E-04	8.16E-05	6.73E-03	-1.02E-02	-1.01E-02	1.14E-02	-3.06E-05	-1.46E-04
4	-3.67E-04	-2.43E-04	6.97E-03	-1.03E-02	-9.79E-03	1.13E-02	1.26E-04	4.30E-04
			1					

ج	ست	پيو
Ċ		1

5	-4.27E-03	2.84E-04	1.26E-02	-1.37E-02	-1.08E-02	1.34E-02	1.96E-03	6.86E-04
6	-9.63E-03	1.71E-03	2.36E-02	-2.33E-02	-7.41E-02	4.49E-02	3.31E-02	-1.15E-02
7	6.46E-04	3.67E-05	2.37E-02	-2.90E-02	-6.82E-02	4.26E-02	-3.24E-03	7.67E-04
8	2.98E-04	2.11E-04	1.05E-02	-1.45E-02	-1.27E-02	1.26E-02	-5.34E-04	7.57E-06
9	5.40E-05	7.06E-05	7.98E-03	-1.05E-02	-8.65E-03	9.96E-03	-7.62E-06	-8.46E-05
10	1.59E-05	2.33E-05	7.73E-03	-1.04E-02	-9.01E-03	1.00E-02	-1.98E-06	-2.85E-05
11	-5.39E-05	-7.06E-05	7.98E-03	-1.05E-02	-8.65E-03	9.96E-03	7.58E-06	8.47E-05
12	3.90E-02	-1.13E-02	6.83E-02	-4.59E-02	-2.51E-02	2.29E-02	-8.49E-03	1.73E-03
13	-1.04E-03	-5.48E-04	1.02E-02	-1.42E-02	-1.29E-02	1.28E-02	1.73E-03	-7.43E-05
14	-2.17E-03	-9.41E-06	2.46E-02	-2.92E-02	-6.82E-02	4.29E-02	9.81E-03	-2.47E-03
15	-1.70E-03	-3.54E-04	1.59E-02	-2.08E-02	-7.16E-02	4.33E-02	1.18E-02	-2.66E-03
16	-6.38E-04	-4.48E-04	8.83E-03	-1.17E-02	-8.21E-03	1.01E-02	4.47E-04	3.76E-04
17	-1.72E-04	-1.94E-04	7.50E-03	-1.04E-02	-9.02E-03	1.03E-02	4.15E-05	2.56E-04
18	-4.95E-05	-6.39E-05	7.25E-03	-1.03E-02	-9.37E-03	1.04E-02	1.03E-05	8.64E-05
19	1.10E-04	1.19E-04	8.48E-03	-1.09E-02	-8.04E-03	9.81E-03	-2.62E-05	-1.31E-04
20	1.88E-04	1.68E-04	9.24E-03	-1.18E-02	-7.86E-03	9.84E-03	-1.24E-04	-1.27E-04
21	6.46E-04	3.67E-05	2.37E-02	-2.90E-02	-6.82E-02	4.26E-02	-3.24E-03	7.67E-04
22	-9.63E-03	1.71E-03	2.36E-02	-2.33E-02	-7.41E-02	4.49E-02	3.32E-02	-1.15E-02
23	1.52E-02	-2.68E-03	6.34E-02	-4.33E-02	-2.50E-02	2.90E-02	-2.27E-03	-2.05E-04
24	-4.27E-03	2.84E-04	1.26E-02	-1.37E-02	-1.08E-02	1.34E-02	1.96E-03	6.86E-04
25	-1.34E-03	-7.71E-05	1.14E-02	-1.28E-02	-1.12E-02	1.41E-02	2.94E-04	5.95E-04
26	1.06E-04	8.16E-05	6.73E-03	-1.02E-02	-1.01E-02	1.14E-02	-3.06E-05	-1.46E-04
27	7.76E-04	3.90E-04	7.48E-03	-1.07E-02	-9.23E-03	1.11E-02	-3.50E-04	-6.54E-04
28	7.16E-03	-1.07E-03	1.49E-02	-1.57E-02	-1.61E-02	1.53E-02	-6.15E-03	1.09E-03
29	3.87E-03	1.07E-04	1.73E-02	-2.09E-02	-7.27E-02	4.40E-02	-2.14E-02	5.91E-03
30	-2.35E-02	5.99E-03	5.64E-02	-4.25E-02	-4.96E-02	3.90E-02	1.52E-02	-4.52E-03
31	-2.16E-02	4.65E-03	6.34E-02	-4.38E-02	-2.80E-02	2.98E-02	4.26E-03	-2.71E-04
32	-8.95E-03	1.31E-03	6.32E-02	-4.28E-02	-2.36E-02	2.89E-02	1.11E-03	2.49E-04
33	3.14E-03	-2.74E-04	6.45E-02	-4.28E-02	-1.60E-02	2.09E-02	-2.01E-04	-1.84E-04
34	2.95E-03	-3.86E-04	6.31E-02	-4.25E-02	-2.31E-02	2.89E-02	-3.33E-04	-1.01E-04
35	1.74E-02	-2.63E-03	6.57E-02	-4.38E-02	-1.65E-02	2.05E-02	-1.59E-03	-6.53E-04
36	3.90E-02	-1.13E-02	6.83E-02	-4.59E-02	-2.51E-02	2.29E-02	-8.49E-03	1.73E-03
37	3.42E-02	-1.06E-02	5.98E-02	-4.33E-02	-6.45E-02	4.26E-02	-2.98E-02	1.07E-02
38	-8.95E-03	1.31E-03	6.32E-02	-4.28E-02	-2.36E-02	2.89E-02	1.11E-03	2.49E-04
39	-2.16E-02	4.65E-03	6.34E-02	-4.38E-02	-2.80E-02	2.98E-02	4.26E-03	-2.71E-04
40	-3.42E-02	1.06E-02	5.98E-02	-4.33E-02	-6.45E-02	4.26E-02	2.98E-02	-1.07E-02
41	4.56E-03	-3.79E-04	2.72E-02	-3.00E-02	-6.80E-02	4.32E-02	-1.64E-02	4.60E-03
42	2.40E-03	5.05E-04	1.01E-02	-1.39E-02	-1.37E-02	1.33E-02	-3.41E-03	3.39E-04
Period:	1.52E+00							
1	1.14E-02	-6.20E-03	2.76E-02	-2.43E-02	-3.65E-02	2.88E-02	-1.27E-02	7.27E-03
2	7.87E-04	-1.43E-04	4.18E-03	-5.22E-03	-5.31E-03	5.80E-03	-6.34E-04	-3.17E-05
3	1.30E-04	-1.21E-05	3.85E-03	-4.95E-03	-5.67E-03	6.16E-03	-1.16E-04	-2.02E-05
4	-4.17E-04	5.19E-05	3.95E-03	-5.03E-03	-5.54E-03	6.03E-03	3.58E-04	4.98E-05
5	-3.12E-03	1.32E-03	7.48E-03	-7.46E-03	-6.25E-03	6.83E-03	1.74E-03	-4.49E-04
6	-6.56E-03	3.24E-03	1.39E-02	-1.32E-02	-4.61E-02	3.35E-02	2.14E-02	-1.25E-02
7	4.81E-04	-1.86E-04	1.32E-02	-1.48E-02	-4.23E-02	3.14E-02	-2.11E-03	1.13E-03

8   3.03E-04   5.10E-05   5.48E-03   5.48E-03   7.72E-03   7.72E-03   4.16E-04   1.58E-04     9   8.30E-05   7.82E-00   4.28E-03   5.38E-03   5.58E-03   5.25E-03									
9   8.30E-05   5.88E-08   4.40E-03   5.38E-03   5.48E-03   4.48E-02   3.28E-04   4.48E-03   4.46E-04   4.48E-03   5.48E-03   4.48E-03   5.46E-03   5.48E-03   4.48E-02   4.28E-02   1.48E-02   4.28E-02   1.48E-03   5.28E-03   4.88E-03   5.28E-03   5.48E-03   5.28E-03   5.48E-03   5.28E-03   5.48E-03   5.28E-04   3.48E-02   5.28E-03   5.48E-03   5.	8	3.03E-04	-5.10E-05	5.43E-03	-6.98E-03	-7.82E-03	7.27E-03	-4.16E-04	1.58E-04
10   2.63E-05   7.83E-07   4.29E-03   5.30E-03   5.34E-03   5.28E-03   6.24E-03   5.48E-03   6.47E-05   1.85E-05     12   2.54E-02   1.42E-02   4.18E-02   3.20E-02   1.51E-03   1.38E-03   5.23E-04     14   -1.58E-03   6.48E-04   1.38E-02   4.25E-02   3.15E-02   6.36E-03   3.46E-04     15   -1.33E-03   4.45E-04   8.09E-03   -1.01E-02   4.25E-02   3.5E-02   7.85E-03   4.06E-03     16   -6.89E-04   9.95E-05   4.71E-03   5.21E-03   5.24E-03   5.58E-04   4.30E-05     18   -7.67E-05   2.02E-07   4.05E-03   5.45E-03   5.47E-03   5.28E-04   4.30E-05     2.24E-04   4.27E-05   4.88E-03   -5.88E-03   4.47E-02   1.18E-02   1.18E-02   1.18E-02   1.18E-02   1.18E-02   1.18E-02   1.18E-02   1.25E-02   1.77E-03   8.38E-03   6.98E-03   6.38E-03   1.37E-03   1.32E-02   1.18E-02   1.25E-02   1.78E-03   1.25E-02	9	8.30E-05	5.86E-08	4.40E-03	-5.38E-03	-5.16E-03	5.45E-03	-6.48E-05	-1.67E-05
111   8.31E-05   1.84E-08   4.40E-03   5.38E-03   5.4E-03   5.4E-04   5.3E-03   5.4E-04   5.3E-03   7.3E-03   5.3E-03   5.3E-03 <t< td=""><td>10</td><td>2.63E-05</td><td>7.63E-07</td><td>4.29E-03</td><td>-5.30E-03</td><td>-5.34E-03</td><td>5.58E-03</td><td>-2.20E-05</td><td>-5.84E-06</td></t<>	10	2.63E-05	7.63E-07	4.29E-03	-5.30E-03	-5.34E-03	5.58E-03	-2.20E-05	-5.84E-06
12   2.54E-02   -1.42E-02   4.18E-02   -3.20E-02   -1.51E-02   1.36E-02   -5.77E-03   1.32E-03   -5.28E-04     13   -9.67E-04   2.08E-04   5.37E-03   -1.51E-02   4.23E-03   -5.38E-03   -6.86E-03   -5.28E-03   -5.28E-03   5.28E-03   5.28E-03   -5.28E-03   -5.28E-03   5.28E-03   2.03E-04   4.30E-05     16   -6.89E-04   9.95E-05   4.71E-03   -5.28E-03   5.28E-03   5.28E-03   2.03E-04   4.30E-05     18   -7.67E-05   2.02E-07   4.05E-03   -5.48E-03   4.47E-03   5.74E-03   5.74E-03   1.78E-04   -1.78E-05     20   2.24E-04   -2.27E-05   4.88E-03   -5.98E-03   4.48E-02   2.14E-02   1.178E-03   1.37E-03   1.37E-03   1.37E-03   6.32E-04   2.17E-05   1.32E-02   1.44E-02   3.48E-03   5.98E-03   4.98E-03   2.34E-02   2.14E-02   1.178E-03   5.32E-04   2.17E-05     21   4.81E-03   1.32E-03   7.48E-03   3.68E-02   3.68E-03	11	-8.31E-05	1.84E-08	4.40E-03	-5.38E-03	-5.16E-03	5.45E-03	6.47E-05	1.65E-05
13   -9.67E-04   2.08E-04   5.37E-03   -6.84E-03   7.37E-03   1.32E-03   -5.23E-04     14   -1.58E-03   6.48E-04   1.38E-02   -1.51E-02   4.28E-02   3.25E-02   7.8EE-03   -0.46E-03     15   -1.36E-03   4.45E-04   8.69E-03   -5.22E-03   5.22E-03   5.26E-03   2.03E-04   4.36E-05     17   -2.44E-04   6.90E-06   4.16E-03   -5.21E-03   5.22E-03   5.62E-03   2.03E-04   4.36E-05     18   -7.67E-05   -2.02E-07   4.05E-03   -5.38E-03   4.47E-03   5.23E-03   -1.06E-04   -2.17E-05     20   2.24E-04   -2.27E-05   4.88E-03   -5.38E-03   5.17E-03   1.17E-03   1.13E-03     21   4.55E-03   3.24E-03   1.32E-02   -1.48E-02   4.23E-02   2.14E-03   1.25E-02     22   -6.56E-03   3.24E-03   1.32E-03   5.31E-03   5.62E-03   6.33E-04   2.12E-03   1.22E-04   2.12E-05     23   9.99E-03   -5.14E-03   3.64E-0	12	2.54E-02	-1.42E-02	4.18E-02	-3.20E-02	-1.51E-02	1.36E-02	-5.77E-03	2.90E-03
14   -1.58E-03   6.48E-04   1.38E-02   -1.51E-02   4.23E-02   3.15E-02   6.36E-03   -3.46E-03     15   -1.30E-03   4.45E-04   8.69E-03   -1.03E-02   4.45E-02   3.25E-02   7.85E-03   4.48E-05     16   -6.89E-04   9.95E-05   4.71E-03   5.21E-03   5.21E-03   5.21E-03   5.23E-03   5.20E-04   5.20E-04   5.20E-04   5.20E-04   5.20E-04   5.20E-04   5.20E-04   5.20E-04   1.42E-04   4.30E-05     19   1.49E-04   -6.91E-06   4.59E-03   -5.58E-03   4.47E-03   5.20E-03   5.17E-00   1.73E-04   7.12E-02     21   4.61E-04   1.30E-04   1.32E-02   -1.42E-02   3.5E-02   2.14E-02   1.22E-02     23   9.99E-03   -5.14E-03   3.88E-02   -3.01E-03   6.25E-03   6.32E-03   6.32E-03   6.32E-03   6.32E-03   6.32E-04   2.12E-02   1.42E-02   1.42E-02   1.42E-02   1.42E-02   1.42E-02   1.42E-02   1.42E-02   1.42E-02   1.42E-03   1.49	13	-9.67E-04	2.08E-04	5.37E-03	-6.84E-03	-7.96E-03	7.37E-03	1.32E-03	-5.23E-04
15   -1.36E-03   4.45E-04   8.69E-03   -1.03E-02   4.45E-02   3.25E-02   7.85E-03   4.60E-03     16   -6.89E-04   8.95E-05   4.71E-03   -5.21E-03   5.25E-03   5.20E-03   5.20E-03   5.20E-03   5.74E-03   5.45E-03   1.77E-05   1.54E-05     19   1.49E-04   6.91E-06   4.59E-03   5.45E-03   5.17E-03   1.73E-04   7.80E-06     20   2.24E-04   2.27E-05   4.88E-03   -5.98E-03   4.83E-03   5.17E-03   1.73E-04   7.80E-06     21   4.81E-04   -1.66E-04   1.32E-02   -1.44E-02   4.23E-02   3.14E-02   -2.11E-03   1.32E-03     22   -6.56E-03   3.24E-03   3.82E-02   -3.01E-03   6.25E-03   6.83E-03   1.74E-03   6.42E-04     23   -1.06E-03   3.73E-04   6.38E-03   -5.67E-03   6.16E-03   -1.16E-04   -2.02E-05     24   -1.30E-04   -1.26E-02   3.86E-03   -5.44E-03   -6.84E-03   -6.84E-03   -6.84E-03   -6.84E-03	14	-1.58E-03	6.48E-04	1.38E-02	-1.51E-02	-4.23E-02	3.15E-02	6.36E-03	-3.46E-03
16   6.88E-04   9.95E-05   4.71E-03   5.82E-03   4.97E-03   5.31E-03   5.28E-03   1.08E-04   4.30E-05     19   4.81E-04   2.24E-04   2.27E-05   4.88E-03   5.98E-03   4.88E-03   5.17E-03   1.07E-04   7.17E-05     21   4.81E-04   1.86E-04   1.32E-02   4.48E-02   4.23E-02   3.14E-02   2.14E-02   1.25E-02     23   9.99E-03   5.14E-03   3.88E-03   -6.96E-03   6.38E-04   -1.12E-02   1.56E-03   6.38E-04     25   -1.06E-03   3.73E-04   6.83E-03   4.96E-03   5.57E-03   6.18E-03   -1.74E-03   2.02E-05     27   7.87E-04   -1.42E-03   3.86E-03   -5.2E-03   5.51E-03   5.80E-03   -4.34E-04   -3.17E-03     2.86E-03   1.48E-03   -5.2E-03   5.51E-03   5.80E-03	15	-1.36E-03	4.45E-04	8.69E-03	-1.03E-02	-4.45E-02	3.25E-02	7.85E-03	-4.06E-03
17   2.44E-04   6.90E-06   4.16E-03   5.21E-03   5.62E-03   2.03E-04   4.30E-05     18   -7.67E-05   2.02E-07   4.05E-03   -5.58E-03   5.48E-03   5.74E-03   6.77E-04   7.27E-05     20   2.24E-04   2.27E-05   4.88E-03   5.58E-03   4.89E-03   5.17E-03   1.73E-04   7.80E-06     21   4.56E-03   3.24E-03   1.39E-02   -4.42E-02   3.14E-02   -2.11E-03   1.13E-03     22   -6.56E-03   3.24E-03   1.39E-02   -1.42E-02   1.42E-02   1.52E-02   -1.75E-03   6.35E-04     23   9.99E-03   5.14E-03   3.88E-02   3.01E-02   -1.42E-02   1.52E-02   -1.75E-03   6.35E-03     25   -1.06E-03   3.73E-04   6.83E-03   -5.67E-03   6.16E-03   -1.17E-04   -2.02E-05     27   7.87E-04   -1.43E-04   4.18E-03   -5.22E-03   5.81E-03   8.68E-03   -6.6E-03   -6.2E-02   3.66E-03   -6.2E-02   3.66E-03   -6.2E-03   3.66E-03 <td< td=""><td>16</td><td>-6.89E-04</td><td>9.95E-05</td><td>4.71E-03</td><td>-5.82E-03</td><td>-4.97E-03</td><td>5.31E-03</td><td>5.58E-04</td><td>-4.84E-05</td></td<>	16	-6.89E-04	9.95E-05	4.71E-03	-5.82E-03	-4.97E-03	5.31E-03	5.58E-04	-4.84E-05
18   -7.67E-05   -2.02E-07   4.05E-03   -5.13E-03   -5.45E-03   5.74E-03   6.77E-05   1.54E-05     19   1.49E-04   -6.91E-06   4.59E-03   -5.58E-03   -4.87E-03   5.23E-03   -1.06E-04   -2.17E-05     20   2.24E-04   -2.27E-05   4.88E-03   -5.99E-03   -4.83E-02   3.14E-02   -1.17E-04   7.80E-06     21   4.81E-04   -1.82E-03   1.32E-02   -1.42E-02   1.52E-02   -1.17E-03   6.35E-04     22   -5.65E-03   3.24E-03   7.84E-03   -6.05E-03   6.16E-03   1.74E-04   4.49E-04     25   -1.06E-03   3.73E-04   6.33E-03   -6.57E-03   6.16E-03   -1.16E-04   -2.02E-05     26   1.30E-04   -1.20E-05   3.85E-03   -5.22E-03   -5.31E-03   6.80E-03   -6.34E-04   3.17E-05     28   9.98E-03   -1.42E-03   3.86E-02   -5.22E-03   -5.34E-03   3.86E-03   -5.34E-03   3.86E-03   -6.34E-04   -2.02E-05     28   9.86E-03	17	-2.44E-04	6.90E-06	4.16E-03	-5.21E-03	-5.29E-03	5.62E-03	2.03E-04	4.30E-05
19   1.49E-04   6.91E-06   4.59E-03   5.58E-03   4.87E-03   5.23E-03   1.06E-04   2.17E-05     20   2.24E-04   -2.27E-05   4.88E-03   5.59E-03   4.83E-03   5.17E-03   1.73E-04   7.80E-06     21   4.81E-04   1.36E-04   1.32E-02   1.44E-02   4.52E-02   3.14E-02   2.14E-02   1.52E-03   1.75E-03   6.66E-03     22   -6.56E-03   3.24E-03   3.88E-02   -7.04E-03   6.82E-03   6.35E-03   6.35E-03   1.75E-03   1.42E-04     24   -3.12E-03   1.74E-04   4.89E-03   -6.65E-03   6.36E-03   1.16E-04   2.02E-05     25   -1.06E-03   3.73E-04   6.83E-03   -6.65E-03   5.01E-03   6.16E-03   -1.16E-04   2.02E-05     26   1.30E-04   -1.20E-05   3.88E-02   -3.01E-02   3.68E-03   8.64E-03   8.68E-03   8.64E-03   8.69E-03   4.27E-03   2.66E-03     30   -1.52E-02   8.36E-03   3.08E-02   -3.02E-02   1.62E-02   1.	18	-7.67E-05	-2.02E-07	4.05E-03	-5.13E-03	-5.45E-03	5.74E-03	6.77E-05	1.54E-05
20   2.24E-04   -2.27E-05   4.88E-03   -5.98E-03   4.83E-03   5.17E-03   -1.73E-04   7.80E-06     21   4.81E-04   -1.86E-04   1.32E-02   -1.48E-02   3.24E-02   3.14E-02   -2.11E-03   1.32E-02     23   9.99E-03   -5.14E-03   3.88E-02   -3.01E-02   -1.42E-02   1.52E-02   -1.75E-03   6.35E-03     24   -1.06E-03   3.74E-04   -6.59E-03   6.83E-03   -7.48E-03   6.25E-03   6.38E-03   -1.75E-04   2.18E-04     26   1.30E-04   -1.20E-05   3.85E-03   -6.58E-03   5.67E-03   6.16E-03   -1.16E-04   2.02E-03     27   7.87E-04   -1.43E-04   4.18E-03   -5.2E-03   5.31E-03   8.64E-03   9.84E-03   8.69E-03   -4.27E-03   2.06E-03     30   -1.52E-02   3.38E-02   -3.00E-02   -1.62E-02   1.63E-02   3.05E-03   3.38E-02   -3.00E-02   1.47E-02   9.44E-04   -2.82E-04     31   -1.40E-02   7.48E-03   3.88E-02   -3.00E-02	19	1.49E-04	-6.91E-06	4.59E-03	-5.58E-03	-4.87E-03	5.23E-03	-1.06E-04	-2.17E-05
2114.81E-041.38E-041.32E-024.48E-024.23E-023.44E-022.14E-021.12E-022239.99E-035.14E-033.98E-023.01E-021.42E-023.55E-022.14E-023.5E2343.12E-031.32E-037.48E-036.25E-036.35E-031.75E-035.75E-032443.12E-033.73E-046.38E-036.95E-036.67E-036.16E-031.16E-042.02E-052551.05C-041.20E-053.85E-036.31E-035.67E-036.81E-031.61E-033.61E-032767.87E-041.43E-048.48E-036.31E-036.31E-038.42E-036.31E-033.62E-033.14E-032.08E-03284.98E-03-1.41E-039.74E-031.07E-024.52E-033.62E-031.41E-037.68E-03301-1.52E-028.36E-033.03E-022.02E-021.02E-023.65E-033.02E-021.62E-033.65E-03311-1.40E-027.48E-033.88E-023.02E-021.62E-031.63E-034.28E-04312-1.48E-039.91E-043.88E-023.02E-021.62E-031.46E-032.94E-04314-1.48E-033.88E-023.03E-021.62E-031.46E-032.94E-042.92E-03315-1.48E-039.91E-043.88E-023.03E-021.62E-031.46E-032.94E-042.92E-03315-1.48E-039.91E-043.88E-033.03E-021.62E-031.46E-032.94E-042.92E-03316<	20	2.24E-04	-2.27E-05	4.88E-03	-5.98E-03	-4.83E-03	5.17E-03	-1.73E-04	7.80E-06
22   6.56E-03   3.24E-03   1.39E-02   -1.32E-02   4.61E-02   3.35E-02   2.14E-02   1.25E-03     23   9.99E-03   5.14E-03   3.88E-02   3.01E-02   -1.42E-02   1.52E-02   -1.75E-03   6.35E-04     24   3.12E-03   1.32E-03   7.48E-03   -6.66E-03   7.11E-03   5.22E-04   2.19E-05     26   1.30E-04   1.20E-05   3.85E-03   4.95E-03   -6.66E-03   7.11E-03   5.22E-04   2.16E-03   -1.16E-04   -2.02E-05     27   7.87E-04   -1.43E-04   4.86E-03   -5.3EE-03   5.80E-03   -4.27E-03   2.06E-03     28   4.98E-03   -2.36E-03   8.84E-03   -8.84E-03   -8.84E-03   8.89E-03   -4.27E-03   2.06E-03     300   -1.52E-02   8.36E-03   3.38E-02   -2.78E-02   -2.96E-02   1.62E-02   1.63E-03   -1.61E-03   -1.31E-03   -3.54E-03     311   -1.40E-02   7.48E-03   3.86E-02   -3.02E-02   -1.62E-02   1.47E-02   9.14E-04   -2.82E-04	21	4.81E-04	-1.86E-04	1.32E-02	-1.48E-02	-4.23E-02	3.14E-02	-2.11E-03	1.13E-03
239.99E-035.14E-033.88E-02.0.14E-021.42E-021.52E-02.1.75E-03.6.35E-0424-3.12E-031.32E-037.48E-03-6.95E-036.08E-037.11E-035.22E-04.2.19E-05261.00E-033.73E-046.38E-034.95E-035.67E-036.16E-03.1.1E-04.2.02E-077.87E-041.43E-033.84E-03-5.22E-035.31E-035.80E-03.4.27E-03.2.0EE-03284.98E-03-1.41E-039.74E-03-8.4E-03.8.39E-03.3.29E-021.41E-03.2.0EE-03301.52E-028.36E-033.38E-02-1.07E-024.52E-021.29E-02.4.51E-03.5.54E-0331-1.40E-027.48E-033.88E-02-3.02E-02-1.02E-021.63E-02.9.3EE-03.3.3EE-0232-5.92E-032.96E-033.88E-02-3.02E-02-1.02E-021.63E-02.9.4E-04.2.2EE-04332.18E-03-9.91E-043.96E-02-3.02E-02-1.22E-021.41E-02.2.3EE-04.2.3EE-04341.96E-03-9.61E-033.08E-02-3.02E-021.02E-021.41E-02.2.3EE-04.2.3EE-04351.18E-03-9.61E-033.02E-02-1.2EE-021.41E-02.2.3EE-04.2.3EE-04.2.3EE-04351.96E-033.68E-03-3.02E-02-1.3EE-021.41E-02.2.3EE-04.3.3EE-03.3.2EE-03.3.1E-03.3.1E-03361.96E-033.68E-02-3.02E-021.3EE-021.3EE-02 </td <td>22</td> <td>-6.56E-03</td> <td>3.24E-03</td> <td>1.39E-02</td> <td>-1.32E-02</td> <td>-4.61E-02</td> <td>3.35E-02</td> <td>2.14E-02</td> <td>-1.25E-02</td>	22	-6.56E-03	3.24E-03	1.39E-02	-1.32E-02	-4.61E-02	3.35E-02	2.14E-02	-1.25E-02
24   -3.12E-03   1.32E-03   7.48E-03   -7.46E-03   -6.25E-03   6.83E-03   1.74E-03   4.49E-04     25   -1.06E-03   3.73E-04   6.83E-03   -6.95E-03   -6.06E-03   7.11E-03   5.22E-04   2.19E-05     26   1.30E-04   -1.20E-05   3.85E-03   -4.95E-03   -5.67E-03   6.16E-03   -1.16E-04   -2.02E-05     27   7.87E-04   -1.44E-03   4.18E-03   -5.22E-03   -5.31E-03   5.80E-03   -6.34E-04   -3.17E-05     28   4.96E-03   -2.36E-03   8.84E-03   -6.64E-03   -9.84E-03   8.89E-03   -5.22E-03   -6.62E-03   1.41E-02   7.66E-03     30   -1.52E-02   8.36E-03   3.38E-02   -3.02E-02   -1.62E-02   1.41E-04   -2.82E-04     32   -5.92E-03   2.96E-03   3.88E-02   -3.00E-02   -1.32E-02   1.47E-02   9.14E-04   -2.82E-04     33   2.18E-03   -9.91E-04   3.86E-02   -3.02E-02   1.42E-02   1.45E-03   3.54E-04     34	23	9.99E-03	-5.14E-03	3.88E-02	-3.01E-02	-1.42E-02	1.52E-02	-1.75E-03	6.35E-04
25   -1.06E-03   3.73E-04   6.83E-03   -6.96E-03   7.11E-03   5.22E-04   2.19E-05     26   1.30E-04   -1.20E-05   3.85E-03   -4.95E-03   -5.67E-03   6.16E-03   -1.16E-04   -2.02E-05     27   7.87E-04   -1.43E-04   4.18E-03   -5.22E-03   -5.31E-03   5.80E-03   -6.4E-04   -3.17E-05     28   4.98E-03   -2.36E-03   8.84E-03   -9.84E-03   9.84E-03   2.96E-02   2.50E-02   9.86E-03   -5.54E-03     30   -1.52E-02   8.36E-03   3.86E-02   -3.02E-02   1.63E-02   1.41E-02   7.66E-03     31   -1.40E-02   7.48E-03   3.86E-02   -3.02E-02   1.62E-02   1.63E-02   9.46E-04   -2.82E-04     33   2.18E-03   -9.91E-04   3.86E-02   -3.02E-02   1.42E-02   1.46E-02   -2.48E-04   2.77E-05     34   1.96E-03   -9.63E-04   3.87E-02   -3.02E-02   1.28E-02   1.46E-02   -4.58E-03   3.54E-04     35   1.18E-02   -1	24	-3.12E-03	1.32E-03	7.48E-03	-7.46E-03	-6.25E-03	6.83E-03	1.74E-03	-4.49E-04
26   1.30E-04   -1.20E-05   3.85E-03   -4.95E-03   -5.67E-03   6.16E-03   -1.16E-04   -2.02E-05     27   7.87E-04   -1.43E-04   4.18E-03   -5.22E-03   -5.31E-03   5.80E-03   -4.27E-03   2.06E-03     28   4.98E-03   -2.36E-03   3.84E-03   -1.07E-02   4.52E-02   3.29E-02   -1.41E-02   7.66E-03     30   -1.52E-02   8.36E-03   3.38E-02   -2.78E-02   2.96E-02   1.63E-02   9.66E-03   -1.33E-03     31   -1.40E-02   7.48E-03   3.86E-02   -3.02E-02   1.62E-02   1.63E-02   9.6E-03   -2.32E-04     32   -5.92E-03   2.96E-03   3.88E-02   -3.03E-02   -1.32E-02   1.47E-02   9.14E-04   -2.82E-04     33   2.18E-03   -9.91E-04   3.96E-02   -3.08E-02   -1.28E-02   1.04E-02   -2.48E-04   7.99E-05     34   1.96E-03   -9.61E-04   4.01E-02   3.28E-02   -3.28E-02   1.04E-02   2.4E-03   3.56E-03     35   1	25	-1.06E-03	3.73E-04	6.83E-03	-6.95E-03	-6.06E-03	7.11E-03	5.22E-04	2.19E-05
27 7.87E-04 -1.43E-04 4.18E-03 -5.22E-03 -5.31E-03 5.80E-03 -4.27E-03 2.06E-03   28 4.98E-03 -1.14E-03 9.74E-03 -1.07E-02 4.52E-02 3.29E-02 -1.41E-02 7.66E-03   30 -1.52E-02 8.36E-03 3.38E-02 -2.78E-02 2.96E-02 2.50E-02 9.86E-03 -1.33E-03   31 -1.40E-02 7.48E-03 3.86E-02 -3.02E-02 -1.62E-02 1.63E-02 3.05E-03 -1.33E-03   32 -5.92E-03 2.96E-03 3.88E-02 -3.00E-02 -1.2EE-02 1.47E-02 9.14E-04 2.82E-04   33 2.18E-03 -9.91E-04 3.96E-02 -3.08E-02 -9.23E-03 1.04E-02 -2.3EE-04 7.99E-05   34 1.96E-03 -9.3E-04 3.87E-02 -3.0E-02 -1.2EE-02 1.46E-02 -2.8E-04 7.99E-05   35 1.18E-02 -5.74E-03 4.01E-02 -3.0E-02 -1.51E-02 1.04E-02 -1.4E-03 3.84E-04   36 -5.92E-03 2.96E-03 3.88E-02 -3.00E-02 -1.62E-02 1.62E-02	26	1.30E-04	-1.20E-05	3.85E-03	-4.95E-03	-5.67E-03	6.16E-03	-1.16E-04	-2.02E-05
28   4.98E-03   -2.36E-03   8.84E-03   -8.64E-03   -9.84E-03   8.89E-03   -4.27E-03   2.06E-03     29   2.85E-03   -1.14E-03   9.74E-03   -1.07E-02   4.52E-02   3.29E-02   -1.41E-02   7.66E-03     30   -1.52E-02   8.36E-03   3.38E-02   -2.78E-02   2.96E-02   2.50E-02   9.86E-03   -1.33E-03     31   -1.40E-02   7.48E-03   3.88E-02   -3.02E-02   1.62E-02   1.63E-02   3.05E-03   -1.33E-03     32   -5.92E-03   2.96E-03   3.88E-02   -3.02E-02   1.28E-02   1.47E-02   9.14E-04   -2.82E-04     33   2.18E-03   -9.91E-04   3.87E-02   -2.99E-02   1.28E-02   1.46E-02   -2.48E-04   7.99E-05     34   1.96E-03   9.63E-04   3.87E-02   -2.99E-02   1.28E-02   1.42E-02   4.18E-02   -2.99E-03   1.04E-02   -4.45E-03   3.54E-04     36   2.54E-02   1.42E-02   4.18E-02   -3.02E-02   1.58E-02   1.15E-02   1.16E-02	27	7.87E-04	-1.43E-04	4.18E-03	-5.22E-03	-5.31E-03	5.80E-03	-6.34E-04	-3.17E-05
292.85E-03-1.14E-039.74E-03-1.07E-024.52E-023.29E-02-1.41E-027.66E-0330-1.52E-028.36E-033.38E-02-2.78E-022.96E-022.50E-029.86E-03-1.33E-0331-1.40E-027.48E-033.86E-02-3.02E-021.62E-021.63E-029.14E-04-2.82E-0432-5.92E-032.96E-033.88E-02-3.03E-024.52E-031.03E-022.34E-042.77E-05341.96E-03-9.91E-043.96E-02-2.99E-021.28E-021.04E-022.34E-047.99E-05351.18E-02-5.74E-034.01E-02-3.08E-029.23E-031.04E-021.45E-033.54E-04362.54E-021.42E-024.18E-02-3.02E-021.51E-021.36E-025.77E-032.90E-03372.22E-021.26E-023.61E-02-3.02E-021.32E-021.04E-021.91E-021.33E-0338-5.92E-032.96E-033.88E-02-3.02E-021.32E-021.91E-021.33E-0340-2.22E-021.26E-023.61E-02-3.02E-021.62E-021.62E-021.91E-021.91E-02413.0E-031.44E-031.55E-02-1.61E-024.90E+001.91E-025.90E-03421.94E-036.20E-045.54E-036.73E-033.89E-033.85E-031.06E-033.85E-03413.0E-031.44E-031.55E-021.61E-023.95E-031.06E-035.90E-03411.94E-036.20E	28	4.98E-03	-2.36E-03	8.84E-03	-8.64E-03	-9.84E-03	8.89E-03	-4.27E-03	2.06E-03
30   -1.52E-02   8.36E-03   3.38E-02   -2.78E-02   -2.96E-02   2.50E-02   9.86E-03   -5.54E-03     31   -1.40E-02   7.48E-03   3.86E-02   -3.02E-02   -1.62E-02   1.63E-02   3.05E-03   -1.33E-03     32   -5.92E-03   2.96E-03   3.88E-02   -3.00E-02   -1.32E-02   1.47E-02   9.14E-04   -2.82E-04     33   2.18E-03   -9.91E-04   3.96E-02   -2.99E-02   -1.28E-02   1.46E-02   -2.34E-04   2.77E-05     34   1.96E-03   -9.63E-04   3.87E-02   -2.99E-02   -1.28E-02   1.46E-02   -2.88E-04   7.99E-05     35   1.18E-02   -5.74E-03   4.01E-02   -3.08E-02   -9.28E-03   1.04E-02   -1.45E-03   3.54E-04     36   2.54E-02   -1.42E-02   4.18E-02   -3.02E-02   1.51E-02   1.91E-02   1.13E-02     37   2.22E-02   1.26E-02   3.61E-02   -3.02E-02   1.62E-02   1.68E-03   -0.5E-03   -1.33E-03     40   -2.22E-02 <t< td=""><td>29</td><td>2.85E-03</td><td>-1.14E-03</td><td>9.74E-03</td><td>-1.07E-02</td><td>-4.52E-02</td><td>3.29E-02</td><td>-1.41E-02</td><td>7.66E-03</td></t<>	29	2.85E-03	-1.14E-03	9.74E-03	-1.07E-02	-4.52E-02	3.29E-02	-1.41E-02	7.66E-03
31   -1.40E-02   7.48E-03   3.86E-02   -3.02E-02   -1.62E-02   1.63E-02   3.05E-03   -2.82E-04     32   -5.92E-03   2.96E-03   3.88E-02   -3.00E-02   -1.32E-02   1.47E-02   9.14E-04   -2.82E-04     33   2.18E-03   -9.91E-04   3.96E-02   -2.99E-02   -1.28E-02   1.46E-02   -2.34E-04   2.77E-05     34   1.96E-03   -9.63E-04   3.87E-02   -2.99E-02   -1.28E-02   1.46E-02   -2.88E-04   7.99E-05     35   1.18E-02   -5.74E-03   4.01E-02   -3.08E-02   -9.28E-03   1.04E-02   -1.45E-03   3.54E-04     36   2.54E-02   -1.42E-02   4.18E-02   -3.20E-02   -1.51E-02   1.36E-02   1.91E-04   -2.82E-04     37   2.22E-02   1.26E-02   3.68E-02   -3.02E-02   -1.62E-02   3.05E-03   -1.63E-02   3.05E-03   -1.33E-03     39   -1.40E-03   -5.48E-03   -6.73E-03   -8.39E-03   3.02E-02   1.91E-02   -1.13E-02     41	30	-1.52E-02	8.36E-03	3.38E-02	-2.78E-02	-2.96E-02	2.50E-02	9.86E-03	-5.54E-03
325.92E-032.96E-033.88E-02-3.00E-02-1.32E-021.47E-029.14E-04-2.82E-04332.18E-03-9.91E-043.96E-02-3.03E-02-8.62E-031.03E-02-2.34E-042.77E-05341.96E-03-9.63E-043.87E-02-2.99E-02-1.28E-021.46E-02-2.85E-047.99E-05351.18E-02-5.74E-034.01E-02-3.08E-02-9.23E-031.04E-02-1.45E-033.54E-04362.54E-021.42E-024.18E-02-3.20E-021.51E-021.36E-02-5.77E-032.90E-03372.22E-02-1.26E-023.61E-02-3.02E-02-3.95E-023.02E-02-1.91E-021.13E-0238-5.92E-032.96E-033.88E-02-3.02E-02-1.62E-021.47E-029.14E-04-2.82E-0439-1.40E-027.48E-033.86E-02-3.02E-02-1.62E-021.63E-023.05E-03-1.33E-0340-2.22E-021.26E-023.61E-02-3.02E-023.02E-023.02E-021.91E-025.90E-03413.20E-03-1.44E-031.55E-02-1.61E-024.20E-023.15E-03-2.50E-031.08E-03421.94E-03-6.20E-045.54E-03-6.73E-03-2.35E-033.15E-03-7.24E-035.55E-0344.90E+0016.48E-031.48E-031.54E-03-2.52E-03-3.07E-033.51E-033.51E-033.15E-031.03E-03 <td>31</td> <td>-1.40E-02</td> <td>7.48E-03</td> <td>3.86E-02</td> <td>-3.02E-02</td> <td>-1.62E-02</td> <td>1.63E-02</td> <td>3.05E-03</td> <td>-1.33E-03</td>	31	-1.40E-02	7.48E-03	3.86E-02	-3.02E-02	-1.62E-02	1.63E-02	3.05E-03	-1.33E-03
33   2.18E-03   -9.91E-04   3.96E-02   -3.03E-02   -8.62E-03   1.03E-02   -2.34E-04   2.77E-05     34   1.96E-03   -9.63E-04   3.87E-02   -2.99E-02   -1.28E-02   1.46E-02   -2.85E-04   7.99E-05     35   1.18E-02   -5.74E-03   4.01E-02   -3.08E-02   -9.23E-03   1.04E-02   -1.45E-03   3.54E-04     36   2.54E-02   -1.42E-02   4.18E-02   -3.20E-02   -1.51E-02   3.02E-02   -1.91E-02   1.13E-02     37   2.22E-02   -1.26E-03   3.88E-02   -3.02E-02   -1.32E-02   1.62E-02   3.05E-03   1.33E-03     39   -1.40E-02   7.48E-03   3.86E-02   -3.02E-02   1.62E-02   1.63E-02   1.13E-02     40   -2.22E-02   1.26E-02   3.61E-02   -2.89E-02   -3.95E-02   3.02E-02   1.91E-02   -1.13E-02     41   3.20E-03   -1.44E-03   1.55E-02   -1.61E-02   4.20E-02   3.15E-03   -2.50E-03   1.08E-03   -2.50E-03   1.08E-03   -2.50E-03 </td <td>32</td> <td>-5.92E-03</td> <td>2.96E-03</td> <td>3.88E-02</td> <td>-3.00E-02</td> <td>-1.32E-02</td> <td>1.47E-02</td> <td>9.14E-04</td> <td>-2.82E-04</td>	32	-5.92E-03	2.96E-03	3.88E-02	-3.00E-02	-1.32E-02	1.47E-02	9.14E-04	-2.82E-04
34   1.96E-03   -9.63E-04   3.87E-02   -2.99E-02   1.28E-02   1.46E-02   -2.85E-04   7.99E-05     35   1.18E-02   -5.74E-03   4.01E-02   -3.08E-02   -9.23E-03   1.04E-02   1.45E-03   3.54E-04     36   2.54E-02   -1.42E-02   4.18E-02   -3.20E-02   -1.51E-02   3.02E-02   -1.91E-02   1.13E-02     37   2.22E-02   1.26E-03   3.88E-02   -3.00E-02   -1.32E-02   3.02E-02   -1.91E-02   1.13E-02     38   -5.92E-03   2.96E-03   3.88E-02   -3.02E-02   1.62E-02   1.62E-02   3.05E-03   -1.33E-03     40   -2.22E-02   1.26E-02   3.61E-02   -2.89E-02   -3.95E-02   3.02E-02   1.91E-02   -1.13E-02     41   3.20E-03   -1.44E-03   1.55E-02   -1.61E-02   4.20E-02   3.15E-03   -2.50E-03   1.08E-03   -2.50E-03   1.08E-03   -2.50E-03   1.08E-03   -2.50E-03   1.08E-03   -2.50E-03   1.62E-03   -2.50E-03   3.15E-03   -3.16E-03 <t< td=""><td>33</td><td>2.18E-03</td><td>-9.91E-04</td><td>3.96E-02</td><td>-3.03E-02</td><td>-8.62E-03</td><td>1.03E-02</td><td>-2.34E-04</td><td>2.77E-05</td></t<>	33	2.18E-03	-9.91E-04	3.96E-02	-3.03E-02	-8.62E-03	1.03E-02	-2.34E-04	2.77E-05
35   1.18E-02   -5.74E-03   4.01E-02   -3.08E-02   -9.23E-03   1.04E-02   -1.45E-03   3.54E-04     36   2.54E-02   -1.42E-02   4.18E-02   -3.20E-02   -1.51E-02   3.02E-02   -1.91E-02   3.09E-03     37   2.22E-02   -1.26E-02   3.61E-02   -2.89E-02   -3.95E-02   3.02E-02   -1.91E-02   1.13E-02     38   -5.92E-03   2.96E-03   3.88E-02   -3.00E-02   -1.62E-02   1.63E-02   3.05E-03   -1.33E-03     40   -2.22E-02   1.26E-02   3.61E-02   -3.09E-02   -3.09E-02   3.09E-02   1.03E-02   1.13E-02     40   -2.22E-02   1.26E-02   3.61E-02   -2.89E-02   -3.09E-02   3.02E-02   1.91E-02   -1.13E-02     41   3.20E-03   -1.44E-03   1.55E-02   -1.61E-02   4.20E-02   3.15E-03   -2.50E-03   1.08E-03   1.08E-03     4.90E+00   -   -   -   -   -   -   -   -   -   -   -   -	34	1.96E-03	-9.63E-04	3.87E-02	-2.99E-02	-1.28E-02	1.46E-02	-2.85E-04	7.99E-05
36   2.54E-02   -1.42E-02   4.18E-02   -3.20E-02   -1.51E-02   3.08E-02   -5.77E-03   2.90E-03     37   2.22E-02   -1.26E-02   3.61E-02   -2.89E-02   -3.95E-02   3.02E-02   -1.91E-02   1.13E-02     38   -5.92E-03   2.96E-03   3.88E-02   -3.00E-02   -1.32E-02   1.47E-02   9.14E-04   -2.82E-04     39   -1.40E-02   7.48E-03   3.86E-02   -3.02E-02   1.63E-02   3.05E-03   -1.33E-03     40   -2.22E-02   1.26E-02   3.61E-02   -2.89E-02   -3.95E-02   3.02E-02   1.91E-02   -1.13E-02     41   3.20E-03   -1.44E-03   1.55E-02   -1.61E-02   -4.20E-02   3.15E-02   -1.06E-02   5.90E-03     42   1.94E-03   -6.20E-04   5.54E-03   -6.73E-03   -8.39E-03   7.68E-03   -2.50E-03   1.08E-03     4.90E+00    -1.45E-02   -2.05E-02   1.82E-02   -7.24E-03   5.55E-03     1   6.48E-03   -4.88E-03   1.54E-03 <td< td=""><td>35</td><td>1.18E-02</td><td>-5.74E-03</td><td>4.01E-02</td><td>-3.08E-02</td><td>-9.23E-03</td><td>1.04E-02</td><td>-1.45E-03</td><td>3.54E-04</td></td<>	35	1.18E-02	-5.74E-03	4.01E-02	-3.08E-02	-9.23E-03	1.04E-02	-1.45E-03	3.54E-04
37   2.22E-02   -1.26E-02   3.61E-02   -2.89E-02   -3.95E-02   3.02E-02   -1.91E-02   1.13E-02     38   -5.92E-03   2.96E-03   3.86E-02   -3.00E-02   -1.32E-02   1.47E-02   9.14E-04   -2.82E-04     39   -1.40E-02   7.48E-03   3.86E-02   -3.02E-02   -1.62E-02   1.63E-02   3.05E-03   -1.33E-03     40   -2.22E-02   1.26E-02   3.61E-02   -2.89E-02   -3.95E-02   3.02E-02   1.91E-02   -1.13E-02     41   3.20E-03   -1.44E-03   1.55E-02   -1.61E-02   4.20E-02   3.15E-02   -1.06E-02   5.90E-03     42   1.94E-03   -6.20E-04   5.54E-03   -6.73E-03   -8.39E-03   7.68E-03   -2.50E-03   1.08E-03     7   4.90E+00   - <t< td=""><td>36</td><td>2.54E-02</td><td>-1.42E-02</td><td>4.18E-02</td><td>-3.20E-02</td><td>-1.51E-02</td><td>1.36E-02</td><td>-5.77E-03</td><td>2.90E-03</td></t<>	36	2.54E-02	-1.42E-02	4.18E-02	-3.20E-02	-1.51E-02	1.36E-02	-5.77E-03	2.90E-03
38   -5.92E-03   2.96E-03   3.88E-02   -3.00E-02   -1.32E-02   1.47E-02   9.14E-04   -2.82E-04     39   -1.40E-02   7.48E-03   3.86E-02   -3.02E-02   -1.62E-02   1.63E-02   3.05E-03   -1.33E-03     40   -2.22E-02   1.26E-02   3.61E-02   -2.89E-02   -3.95E-02   3.02E-02   1.91E-02   -1.13E-02     41   3.20E-03   -1.44E-03   1.55E-02   -1.61E-02   -4.20E-02   3.15E-02   -1.06E-02   5.90E-03     42   1.94E-03   -6.20E-04   5.54E-03   -6.73E-03   -8.39E-03   7.68E-03   -2.50E-03   1.08E-03     4.90E+00     - </td <td>37</td> <td>2.22E-02</td> <td>-1.26E-02</td> <td>3.61E-02</td> <td>-2.89E-02</td> <td>-3.95E-02</td> <td>3.02E-02</td> <td>-1.91E-02</td> <td>1.13E-02</td>	37	2.22E-02	-1.26E-02	3.61E-02	-2.89E-02	-3.95E-02	3.02E-02	-1.91E-02	1.13E-02
39   -1.40E-02   7.48E-03   3.86E-02   -3.02E-02   -1.62E-02   1.63E-02   3.05E-03   -1.33E-03     40   -2.22E-02   1.26E-02   3.61E-02   -2.89E-02   -3.95E-02   3.02E-02   1.91E-02   -1.13E-02     41   3.20E-03   -1.44E-03   1.55E-02   -1.61E-02   4.20E-02   3.15E-02   -1.06E-02   5.90E-03     42   1.94E-03   -6.20E-04   5.54E-03   -6.73E-03   -8.39E-03   7.68E-03   -2.50E-03   1.08E-03     42   1.94E-03   -6.20E-04   5.54E-03   -6.73E-03   -8.39E-03   7.68E-03   -2.50E-03   1.08E-03   -2.55E-03     1   6.48E-03   -4.88E-03   1.54E-02   -2.05E-02   1.82E-02   -7.24E-03   5.55E-03     2   4.87E-04   -2.63E-04   2.07E-03   -2.68E-03   3.05E-03   -3.05E-03   3.05E-03   -7.76E-05   2.93E-03     4   -2.65E-04   1.34E-04   2.13E-03   -2.57E-03   -3.02E-03   3.28E-03   2.37E-04   -9.26E-05	38	-5.92E-03	2.96E-03	3.88E-02	-3.00E-02	-1.32E-02	1.47E-02	9.14E-04	-2.82E-04
40-2.22E-021.26E-023.61E-02-2.89E-02-3.95E-023.02E-021.91E-02-1.13E-02413.20E-03-1.44E-031.55E-02-1.61E-024.20E-023.15E-02-1.06E-025.90E-03421.94E-03-6.20E-045.54E-03-6.73E-03-8.39E-037.68E-03-2.50E-031.08E-03Period:4.90E+0016.48E-03-4.88E-031.54E-02-1.45E-02-2.05E-021.82E-02-7.24E-035.55E-0324.87E-04-2.63E-042.27E-03-2.68E-03-2.93E-033.15E-03-4.10E-041.77E-0438.35E-05-4.05E-052.07E-03-2.52E-03-3.07E-033.35E-03-7.76E-052.93E-054-2.65E-041.34E-042.13E-03-2.57E-03-3.02E-033.28E-032.37E-04-9.26E-055-1.83E-031.24E-034.18E-03-4.23E-03-3.51E-033.71E-031.03E-03-6.14E-046-3.78E-032.72E-037.82E-03-7.64E-03-2.61E-022.23E-021.20E-038.98E-0472.78E-04-1.86E-047.32E-03-7.68E-03-2.38E-022.06E-02-1.20E-038.98E-0481.79E-04-9.99E-052.95E-03-3.51E-034.39E-033.02E-03-4.49E-031.61E-0495.45E-05-2.42E-052.32E-03-2.74E-03-2.80E-033.02E-033.02E-031.50E-055.08E-05	39	-1.40E-02	7.48E-03	3.86E-02	-3.02E-02	-1.62E-02	1.63E-02	3.05E-03	-1.33E-03
413.20E-03-1.44E-031.55E-02-1.61E-02-4.20E-023.15E-02-1.06E-025.90E-03421.94E-03-6.20E-045.54E-03-6.73E-03-8.39E-037.68E-03-2.50E-031.08E-03Period:4.90E+00 </td <td>40</td> <td>-2.22E-02</td> <td>1.26E-02</td> <td>3.61E-02</td> <td>-2.89E-02</td> <td>-3.95E-02</td> <td>3.02E-02</td> <td>1.91E-02</td> <td>-1.13E-02</td>	40	-2.22E-02	1.26E-02	3.61E-02	-2.89E-02	-3.95E-02	3.02E-02	1.91E-02	-1.13E-02
421.94E-03-6.20E-045.54E-03-6.73E-03-8.39E-037.68E-03-2.50E-031.08E-03Period:4.90E+0016.48E-03-4.88E-031.54E-02-1.45E-02-2.05E-021.82E-02-7.24E-035.55E-0324.87E-04-2.63E-042.27E-03-2.68E-03-2.93E-033.15E-03-4.10E-041.77E-0438.35E-05-4.05E-052.07E-03-2.52E-03-3.07E-033.35E-03-7.76E-052.93E-054-2.65E-041.34E-042.13E-03-2.57E-03-3.02E-033.28E-032.37E-04-9.26E-055-1.83E-031.24E-034.18E-03-4.23E-03-3.51E-033.71E-031.03E-03-6.14E-046-3.78E-032.72E-037.82E-03-7.88E-03-2.38E-022.06E-021.20E-038.98E-0472.78E-04-1.86E-047.32E-03-3.51E-033.02E-03-2.48E-041.61E-0495.45E-05-2.42E-052.32E-03-2.79E-03-2.80E-033.02E-03-4.59E-051.50E-05101.76E-05-7.50E-062.25E-03-2.74E-03-2.88E-033.10E-03-1.56E-055.08E-06	41	3.20E-03	-1.44E-03	1.55E-02	-1.61E-02	-4.20E-02	3.15E-02	-1.06E-02	5.90E-03
Period:4.90E+00ImageImageImageImageImageImageImage16.48E-034.88E-031.54E-02-1.45E-02-2.05E-021.82E-02-7.24E-035.55E-0324.87E-04-2.63E-042.27E-03-2.68E-03-2.93E-033.15E-03-4.10E-041.77E-0438.35E-05-4.05E-052.07E-03-2.52E-03-3.07E-033.35E-03-7.76E-052.93E-054-2.65E-041.34E-042.13E-03-2.57E-03-3.02E-033.28E-032.37E-04-9.26E-055-1.83E-031.24E-034.18E-03-4.23E-03-3.51E-033.71E-031.03E-03-6.14E-046-3.78E-032.72E-037.82E-03-7.64E-03-2.61E-022.23E-021.23E-02-9.42E-0372.78E-04-1.86E-047.32E-03-7.88E-03-2.38E-022.06E-02-1.20E-038.98E-0481.79E-04-9.99E-052.95E-03-3.51E-034.28E-033.02E-03-2.48E-041.61E-0495.45E-05-2.42E-052.32E-03-2.79E-03-2.80E-033.02E-03-4.59E-051.50E-05101.76E-05-7.50E-062.25E-03-2.74E-03-2.88E-033.10E-03-1.56E-055.08E-06	42	1.94E-03	-6.20E-04	5.54E-03	-6.73E-03	-8.39E-03	7.68E-03	-2.50E-03	1.08E-03
16.48E-03-4.88E-031.54E-02-1.45E-02-2.05E-021.82E-02-7.24E-035.55E-0324.87E-04-2.63E-042.27E-03-2.68E-03-2.93E-033.15E-03-4.10E-041.77E-0438.35E-05-4.05E-052.07E-03-2.52E-03-3.07E-033.35E-03-7.76E-052.93E-054-2.65E-041.34E-042.13E-03-2.57E-03-3.02E-033.28E-032.37E-04-9.26E-055-1.83E-031.24E-034.18E-03-4.23E-03-3.51E-033.71E-031.03E-03-6.14E-046-3.78E-032.72E-037.82E-03-7.64E-03-2.661E-022.23E-021.23E-02-9.42E-0372.78E-04-1.86E-047.32E-03-7.88E-03-2.38E-022.06E-02-1.20E-038.98E-0481.79E-04-9.99E-052.95E-03-3.51E-033.02E-03-2.48E-041.61E-0495.45E-05-2.42E-052.32E-03-2.79E-03-2.80E-033.02E-03-4.59E-051.50E-05101.76E-05-7.50E-062.25E-03-2.74E-032.88E-033.10E-03-1.56E-055.08E-06	Period:	4.90E+00							
2 4.87E-04 -2.63E-04 2.27E-03 -2.68E-03 -2.93E-03 3.15E-03 -4.10E-04 1.77E-04   3 8.35E-05 -4.05E-05 2.07E-03 -2.52E-03 -3.07E-03 3.35E-03 -7.76E-05 2.93E-05   4 -2.65E-04 1.34E-04 2.13E-03 -2.57E-03 -3.02E-03 3.28E-03 2.37E-04 -9.26E-05   5 -1.83E-03 1.24E-03 4.18E-03 -4.23E-03 -3.51E-03 3.71E-03 1.03E-03 -6.14E-04   6 -3.78E-03 2.72E-03 7.82E-03 -7.88E-03 -2.38E-02 2.06E-02 1.23E-02 -9.42E-03   7 2.78E-04 -1.86E-04 7.32E-03 -7.88E-03 -2.38E-02 2.06E-02 -1.20E-03 8.98E-04   8 1.79E-04 -9.99E-05 2.95E-03 -3.51E-03 4.28E-03 4.28E-03 -2.48E-04 1.61E-04   9 5.45E-05 -2.42E-05 2.32E-03 -2.79E-03 -2.80E-03 3.02E-03 -4.59E-05 1.50E-05   10 1.76E-05 -7.50E-06 2.25E-03 -2.74E-03 -2.88E-03 3.10E-03	1	6.48E-03	-4.88E-03	1.54E-02	-1.45E-02	-2.05E-02	1.82E-02	-7.24E-03	5.55E-03
3 8.35E-05 -4.05E-05 2.07E-03 -2.52E-03 -3.07E-03 3.35E-03 -7.76E-05 2.93E-05   4 -2.65E-04 1.34E-04 2.13E-03 -2.57E-03 -3.02E-03 3.28E-03 2.37E-04 -9.26E-05   5 -1.83E-03 1.24E-03 4.18E-03 -4.23E-03 -3.51E-03 3.71E-03 1.03E-03 -6.14E-04   6 -3.78E-03 2.72E-03 7.82E-03 -7.64E-03 -2.61E-02 2.23E-02 1.23E-02 -9.42E-03   7 2.78E-04 -1.86E-04 7.32E-03 -7.88E-03 -2.38E-02 2.06E-02 -1.20E-03 8.98E-04   8 1.79E-04 -9.99E-05 2.95E-03 -3.51E-03 4.39E-03 4.28E-03 -2.48E-04 1.61E-04   9 5.45E-05 -2.42E-05 2.32E-03 -2.79E-03 -2.80E-03 3.02E-03 -4.59E-05 1.50E-05   10 1.76E-05 -7.50E-06 2.25E-03 -2.74E-03 -2.88E-03 3.10E-03 -1.56E-05 5.08E-06	2	4.87E-04	-2.63E-04	2.27E-03	-2.68E-03	-2.93E-03	3.15E-03	-4.10E-04	1.77E-04
4 -2.65E-04 1.34E-04 2.13E-03 -2.57E-03 -3.02E-03 3.28E-03 2.37E-04 -9.26E-05   5 -1.83E-03 1.24E-03 4.18E-03 -4.23E-03 -3.51E-03 3.71E-03 1.03E-03 -6.14E-04   6 -3.78E-03 2.72E-03 7.82E-03 -7.64E-03 -2.61E-02 2.23E-02 1.23E-02 -9.42E-03   7 2.78E-04 -1.86E-04 7.32E-03 -7.88E-03 -2.38E-02 2.06E-02 -1.20E-03 8.98E-04   8 1.79E-04 -9.99E-05 2.95E-03 -3.51E-03 4.39E-03 4.28E-03 -2.48E-04 1.61E-04   9 5.45E-05 -2.42E-05 2.32E-03 -2.79E-03 -2.80E-03 3.02E-03 -4.59E-05 1.50E-05   10 1.76E-05 -7.50E-06 2.25E-03 -2.74E-03 -2.88E-03 3.10E-03 -1.56E-05 5.08E-06	3	8.35E-05	-4.05E-05	2.07E-03	-2.52E-03	-3.07E-03	3.35E-03	-7.76E-05	2.93E-05
5 -1.83E-03 1.24E-03 4.18E-03 -4.23E-03 -3.51E-03 3.71E-03 1.03E-03 -6.14E-04   6 -3.78E-03 2.72E-03 7.82E-03 -7.64E-03 -2.61E-02 2.23E-02 1.23E-02 -9.42E-03   7 2.78E-04 -1.86E-04 7.32E-03 -7.88E-03 -2.38E-02 2.06E-02 -1.20E-03 8.98E-04   8 1.79E-04 -9.99E-05 2.95E-03 -3.51E-03 -4.39E-03 4.28E-03 -2.48E-04 1.61E-04   9 5.45E-05 -2.42E-05 2.32E-03 -2.79E-03 -2.80E-03 3.02E-03 -4.59E-05 1.50E-05   10 1.76E-05 -7.50E-06 2.25E-03 -2.74E-03 -2.88E-03 3.10E-03 -1.56E-05 5.08E-06	4	-2.65E-04	1.34E-04	2.13E-03	-2.57E-03	-3.02E-03	3.28E-03	2.37E-04	-9.26E-05
6 -3.78E-03 2.72E-03 7.82E-03 -7.64E-03 -2.61E-02 2.23E-02 1.23E-02 -9.42E-03   7 2.78E-04 -1.86E-04 7.32E-03 -7.88E-03 -2.38E-02 2.06E-02 -1.20E-03 8.98E-04   8 1.79E-04 -9.99E-05 2.95E-03 -3.51E-03 -4.39E-03 4.28E-03 -2.48E-04 1.61E-04   9 5.45E-05 -2.42E-05 2.32E-03 -2.79E-03 -2.80E-03 3.02E-03 -4.59E-05 1.50E-05   10 1.76E-05 -7.50E-06 2.25E-03 -2.74E-03 -2.88E-03 3.10E-03 -1.56E-05 5.08E-06	5	-1.83E-03	1.24E-03	4.18E-03	-4.23E-03	-3.51E-03	3.71E-03	1.03E-03	-6.14E-04
7 2.78E-04 -1.86E-04 7.32E-03 -7.88E-03 -2.38E-02 2.06E-02 -1.20E-03 8.98E-04   8 1.79E-04 -9.99E-05 2.95E-03 -3.51E-03 -4.39E-03 4.28E-03 -2.48E-04 1.61E-04   9 5.45E-05 -2.42E-05 2.32E-03 -2.79E-03 -2.80E-03 3.02E-03 -4.59E-05 1.50E-05   10 1.76E-05 -7.50E-06 2.25E-03 -2.74E-03 -2.88E-03 3.10E-03 -1.56E-05 5.08E-06	6	-3.78E-03	2.72E-03	7.82E-03	-7.64E-03	-2.61E-02	2.23E-02	1.23E-02	-9.42E-03
8   1.79E-04   -9.99E-05   2.95E-03   -3.51E-03   -4.39E-03   4.28E-03   -2.48E-04   1.61E-04     9   5.45E-05   -2.42E-05   2.32E-03   -2.79E-03   -2.80E-03   3.02E-03   -4.59E-05   1.50E-05     10   1.76E-05   -7.50E-06   2.25E-03   -2.74E-03   -2.88E-03   3.10E-03   -1.56E-05   5.08E-06	7	2.78E-04	-1.86E-04	7.32E-03	-7.88E-03	-2.38E-02	2.06E-02	-1.20E-03	8.98E-04
9   5.45E-05   -2.42E-05   2.32E-03   -2.79E-03   -2.80E-03   3.02E-03   -4.59E-05   1.50E-05     10   1.76E-05   -7.50E-06   2.25E-03   -2.74E-03   -2.88E-03   3.10E-03   -1.56E-05   5.08E-06	8	1.79E-04	-9.99E-05	2.95E-03	-3.51E-03	-4.39E-03	4.28E-03	-2.48E-04	1.61E-04
10 1.76E-05 -7.50E-06 2.25E-03 -2.74E-03 -2.88E-03 3.10E-03 -1.56E-05 5.08E-06	9	5.45E-05	-2.42E-05	2.32E-03	-2.79E-03	-2.80E-03	3.02E-03	-4.59E-05	1.50E-05
	10	1.76E-05	-7.50E-06	2.25E-03	-2.74E-03	-2.88E-03	3.10E-03	-1.56E-05	5.08E-06

11	-5.45E-05	2.42E-05	2.32E-03	-2.79E-03	-2.80E-03	3.02E-03	4.59E-05	-1.50E-05
12	1.45E-02	-1.10E-02	2.35E-02	-2.07E-02	-8.51E-03	8.06E-03	-3.33E-03	2.41E-03
13	-5.68E-04	3.30E-04	2.94E-03	-3.46E-03	-4.47E-03	4.34E-03	7.84E-04	-5.16E-04
14	-9.11E-04	6.20E-04	7.68E-03	-8.16E-03	-2.37E-02	2.06E-02	3.62E-03	-2.72E-03
15	-7.87E-04	5.04E-04	4.83E-03	-5.36E-03	-2.51E-02	2.16E-02	4.51E-03	-3.31E-03
16	-4.21E-04	2.24E-04	2.54E-03	-2.99E-03	-2.76E-03	2.93E-03	3.55E-04	-1.74E-04
17	-1.59E-04	7.24E-05	2.20E-03	-2.67E-03	-2.87E-03	3.10E-03	1.40E-04	-4.90E-05
18	-5.07E-05	2.22E-05	2.14E-03	-2.62E-03	-2.95E-03	3.18E-03	4.71E-05	-1.62E-05
19	9.50E-05	-4.50E-05	2.43E-03	-2.89E-03	-2.67E-03	2.88E-03	-7.40E-05	2.57E-05
20	1.38E-04	-7.05E-05	2.61E-03	-3.08E-03	-2.68E-03	2.85E-03	-1.12E-04	5.22E-05
21	2.78E-04	-1.86E-04	7.32E-03	-7.88E-03	-2.38E-02	2.06E-02	-1.20E-03	8.98E-04
22	-3.78E-03	2.72E-03	7.82E-03	-7.64E-03	-2.61E-02	2.23E-02	1.23E-02	-9.42E-03
23	5.66E-03	-4.18E-03	2.17E-02	-1.93E-02	-7.90E-03	8.27E-03	-1.01E-03	6.66E-04
24	-1.83E-03	1.24E-03	4.18E-03	-4.23E-03	-3.51E-03	3.71E-03	1.03E-03	-6.14E-04
25	-6.34E-04	4.00E-04	3.79E-03	-3.92E-03	-3.32E-03	3.72E-03	3.24E-04	-1.46E-04
26	8.36E-05	-4.05E-05	2.07E-03	-2.52E-03	-3.07E-03	3.35E-03	-7.76E-05	2.93E-05
27	4.87E-04	-2.63E-04	2.27E-03	-2.68E-03	-2.93E-03	3.15E-03	-4.10E-04	1.76E-04
28	2.88E-03	-2.04E-03	4.98E-03	-4.94E-03	-5.58E-03	5.28E-03	-2.48E-03	1.76E-03
29	1.64E-03	-1.11E-03	5.44E-03	-5.78E-03	-2.55E-02	2.19E-02	-8.08E-03	6.04E-03
30	-8.65E-03	6.53E-03	1.89E-02	-1.73E-02	-1.65E-02	1.53E-02	5.61E-03	-4.28E-03
31	-7.95E-03	5.95E-03	2.16E-02	-1.93E-02	-9.04E-03	9.14E-03	1.76E-03	-1.22E-03
32	-3.36E-03	2.45E-03	2.17E-02	-1.93E-02	-7.36E-03	7.88E-03	5.34E-04	-3.36E-04
33	1.25E-03	-8.78E-04	2.21E-02	-1.96E-02	-4.77E-03	5.34E-03	-1.40E-04	7.47E-05
34	1.11E-03	-8.07E-04	2.17E-02	-1.93E-02	-7.13E-03	7.73E-03	-1.67E-04	1.03E-04
35	6.75E-03	-4.86E-03	2.25E-02	-1.99E-02	-5.15E-03	5.53E-03	-8.53E-04	5.07E-04
36	1.45E-02	-1.10E-02	2.35E-02	-2.07E-02	-8.51E-03	8.06E-03	-3.33E-03	2.41E-03
37	1.27E-02	-9.67E-03	2.03E-02	-1.82E-02	-2.23E-02	1.95E-02	-1.09E-02	8.46E-03
38	-3.36E-03	2.45E-03	2.17E-02	-1.93E-02	-7.36E-03	7.88E-03	5.34E-04	-3.36E-04
39	-7.95E-03	5.95E-03	2.16E-02	-1.93E-02	-9.04E-03	9.14E-03	1.76E-03	-1.22E-03
40	-1.27E-02	9.67E-03	2.03E-02	-1.82E-02	-2.23E-02	1.95E-02	1.09E-02	-8.46E-03
41	1.84E-03	-1.29E-03	8.63E-03	-8.89E-03	-2.36E-02	2.06E-02	-6.00E-03	4.56E-03
42	1.13E-03	-7.12E-04	3.07E-03	-3.48E-03	-4.74E-03	4.54E-03	-1.47E-03	9.99E-04
Period:	1.58E+01							
1	3.57E-03	-3.14E-03	8.48E-03	-8.35E-03	-1.13E-02	1.08E-02	-3.99E-03	3.53E-03
2	2.72E-04	-2.06E-04	1.22E-03	-1.40E-03	-1.59E-03	1.71E-03	-2.29E-04	1.60E-04
3	4.71E-05	-3.40E-05	1.11E-03	-1.30E-03	-1.66E-03	1.80E-03	-4.34E-05	2.91E-05
4	-1.49E-04	1.09E-04	1.14E-03	-1.33E-03	-1.63E-03	1.77E-03	1.32E-04	-8.98E-05
5	-1.01E-03	8.45E-04	2.28E-03	-2.36E-03	-1.93E-03	2.03E-03	5.67E-04	-4.51E-04
6	-2.08E-03	1.79E-03	4.30E-03	-4.33E-03	-1.44E-02	1.34E-02	6.75E-03	-5.99E-03
7	1.52E-04	-1.27E-04	4.03E-03	-4.27E-03	-1.30E-02	1.23E-02	-6.61E-04	5.79E-04
8	9.77E-05	-7.61E-05	1.61E-03	-1.83E-03	-2.40E-03	2.42E-03	-1.38E-04	1.13E-04
9	3.07E-05	-2.16E-05	1.23E-03	-1.44E-03	-1.50E-03	1.63E-03	-2.61E-05	1.66E-05
10	9.94E-06	-6.87E-06	1.19E-03	-1.41E-03	-1.54E-03	1.68E-03	-8.88E-06	5.66E-06
11	-3.07E-05	2.16E-05	1.23E-03	-1.44E-03	-1.50E-03	1.63E-03	2.61E-05	-1.66E-05
12	8.01E-03	-7.05E-03	1.29E-02	-1.23E-02	-4.69E-03	4.63E-03	-1.83E-03	1.58E-03
13	-3.11E-04	2.46E-04	1.60E-03	-1.81E-03	-2.45E-03	2.47E-03	4.34E-04	-3.59E-04

ج	ست	پيو
Ċ		1

14	-5.00E-04	4.22E-04	4.23E-03	-4.44E-03	-1.30E-02	1.23E-02	1.99E-03	-1.75E-03
15	-4.31E-04	3.54E-04	2.65E-03	-2.87E-03	-1.37E-02	1.30E-02	2.49E-03	-2.16E-03
16	-2.33E-04	1.77E-04	1.37E-03	-1.56E-03	-1.50E-03	1.60E-03	1.99E-04	-1.45E-04
17	-8.93E-05	6.33E-05	1.17E-03	-1.38E-03	-1.55E-03	1.68E-03	7.94E-05	-5.17E-05
18	-2.87E-05	2.00E-05	1.13E-03	-1.34E-03	-1.58E-03	1.72E-03	2.66E-05	-1.73E-05
19	5.30E-05	-3.84E-05	1.30E-03	-1.50E-03	-1.44E-03	1.56E-03	-4.22E-05	2.72E-05
20	7.61E-05	-5.69E-05	1.40E-03	-1.60E-03	-1.45E-03	1.55E-03	-6.29E-05	4.49E-05
21	1.52E-04	-1.27E-04	4.03E-03	-4.27E-03	-1.30E-02	1.23E-02	-6.61E-04	5.78E-04
22	-2.08E-03	1.79E-03	4.30E-03	-4.33E-03	-1.44E-02	1.34E-02	6.75E-03	-5.99E-03
23	3.11E-03	-2.71E-03	1.18E-02	-1.14E-02	-4.36E-03	4.54E-03	-5.55E-04	4.62E-04
24	-1.01E-03	8.45E-04	2.28E-03	-2.36E-03	-1.93E-03	2.03E-03	5.67E-04	-4.51E-04
25	-3.53E-04	2.85E-04	2.06E-03	-2.16E-03	-1.81E-03	1.98E-03	1.78E-04	-1.28E-04
26	4.72E-05	-3.41E-05	1.11E-03	-1.30E-03	-1.66E-03	1.80E-03	-4.34E-05	2.91E-05
27	2.72E-04	-2.06E-04	1.22E-03	-1.40E-03	-1.59E-03	1.71E-03	-2.29E-04	1.60E-04
28	1.59E-03	-1.36E-03	2.73E-03	-2.78E-03	-3.07E-03	3.04E-03	-1.37E-03	1.17E-03
29	9.03E-04	-7.57E-04	2.99E-03	-3.15E-03	-1.40E-02	1.32E-02	-4.45E-03	3.90E-03
30	-4.77E-03	4.19E-03	1.04E-02	-1.01E-02	-9.11E-03	8.85E-03	3.09E-03	-2.73E-03
31	-4.37E-03	3.83E-03	1.18E-02	-1.14E-02	-4.99E-03	5.09E-03	9.64E-04	-8.21E-04
32	-1.85E-03	1.60E-03	1.18E-02	-1.14E-02	-4.06E-03	4.28E-03	2.92E-04	-2.39E-04
33	6.88E-04	-5.86E-04	1.20E-02	-1.16E-02	-2.62E-03	2.84E-03	-7.65E-05	5.86E-05
34	6.10E-04	-5.28E-04	1.18E-02	-1.14E-02	-3.93E-03	4.17E-03	-9.14E-05	7.40E-05
35	3.72E-03	-3.20E-03	1.23E-02	-1.18E-02	-2.84E-03	3.00E-03	-4.67E-04	3.73E-04
36	8.01E-03	-7.05E-03	1.29E-02	-1.23E-02	-4.69E-03	4.63E-03	-1.83E-03	1.58E-03
37	6.97E-03	-6.16E-03	1.11E-02	-1.07E-02	-1.23E-02	1.16E-02	-6.00E-03	5.36E-03
38	-1.85E-03	1.60E-03	1.18E-02	-1.14E-02	-4.06E-03	4.28E-03	2.92E-04	-2.39E-04
39	-4.37E-03	3.83E-03	1.18E-02	-1.14E-02	-4.99E-03	5.09E-03	9.64E-04	-8.21E-04
40	-6.97E-03	6.16E-03	1.11E-02	-1.07E-02	-1.23E-02	1.16E-02	6.00E-03	-5.36E-03
41	1.01E-03	-8.61E-04	4.75E-03	-4.91E-03	-1.30E-02	1.23E-02	-3.31E-03	2.92E-03
42	6.20E-04	-5.05E-04	1.68E-03	-1.85E-03	-2.60E-03	2.60E-03	-8.13E-04	6.81E-04
Period:	5.06E+01							
1	1.96E-03	-1.85E-03	4.68E-03	-4.68E-03	-6.20E-03	6.12E-03	-2.20E-03	2.08E-03
2	1.50E-04	-1.31E-04	6.63E-04	-7.33E-04	-8.70E-04	9.22E-04	-1.26E-04	1.06E-04
3	2.60E-05	-2.23E-05	5.99E-04	-6.74E-04	-9.04E-04	9.67E-04	-2.38E-05	1.97E-05
4	-8.20E-05	7.08E-05	6.18E-04	-6.92E-04	-8.91E-04	9.50E-04	7.26E-05	-6.06E-05
5	-5.57E-04	5.13E-04	1.25E-03	-1.30E-03	-1.06E-03	1.11E-03	3.10E-04	-2.79E-04
6	-1.14E-03	1.07E-03	2.36E-03	-2.40E-03	-7.89E-03	7.71E-03	3.71E-03	-3.52E-03
7	8.32E-05	-7.70E-05	2.22E-03	-2.32E-03	-7.12E-03	7.03E-03	-3.64E-04	3.42E-04
8	5.33E-05	-4.77E-05	8.79E-04	-9.62E-04	-1.31E-03	1.34E-03	-7.55E-05	6.89E-05
9	1.69E-05	-1.43E-05	6.63E-04	-7.47E-04	-8.16E-04	8.76E-04	-1.44E-05	1.16E-05
10	5.47E-06	-4.61E-06	6.42E-04	-7.28E-04	-8.38E-04	9.00E-04	-4.88E-06	3.95E-06
11	-1.69E-05	1.43E-05	6.63E-04	-7.47E-04	-8.16E-04	8.76E-04	1.44E-05	-1.16E-05
12	4.41E-03	-4.17E-03	7.08E-03	-7.00E-03	-2.59E-03	2.59E-03	-1.00E-03	9.43E-04
13	-1.70E-04	1.53E-04	8.77E-04	-9.56E-04	-1.34E-03	1.37E-03	2.38E-04	-2.19E-04
14	-2.74E-04	2.54E-04	2.33E-03	-2.42E-03	-7.13E-03	7.03E-03	1.10E-03	-1.03E-03
15	-2.36E-04	2.16E-04	1.46E-03	-1.55E-03	-7.53E-03	7.40E-03	1.37E-03	-1.28E-03
16	-1.28E-04	1.12E-04	7.45E-04	-8.20E-04	-8.21E-04	8.66E-04	1.10E-04	-9.43E-05

17	-4.91E-05	4.18E-05	6.33E-04	-7.14E-04	-8.41E-04	9.00E-04	4.36E-05	-3.57E-05
18	-1.58E-05	1.33E-05	6.12E-04	-6.95E-04	-8.60E-04	9.22E-04	1.46E-05	-1.20E-05
19	2.91E-05	-2.50E-05	7.03E-04	-7.84E-04	-7.83E-04	8.37E-04	-2.33E-05	1.90E-05
20	4.16E-05	-3.64E-05	7.64E-04	-8.43E-04	-7.93E-04	8.39E-04	-3.47E-05	2.96E-05
21	8.32E-05	-7.70E-05	2.22E-03	-2.32E-03	-7.12E-03	7.03E-03	-3.64E-04	3.43E-04
22	-1.14E-03	1.07E-03	2.36E-03	-2.40E-03	-7.89E-03	7.71E-03	3.71E-03	-3.53E-03
23	1.71E-03	-1.61E-03	6.45E-03	-6.45E-03	-2.41E-03	2.48E-03	-3.03E-04	2.80E-04
24	-5.57E-04	5.13E-04	1.25E-03	-1.30E-03	-1.06E-03	1.11E-03	3.10E-04	-2.79E-04
25	-1.94E-04	1.76E-04	1.12E-03	-1.18E-03	-9.93E-04	1.06E-03	9.73E-05	-8.34E-05
26	2.60E-05	-2.22E-05	5.99E-04	-6.74E-04	-9.04E-04	9.67E-04	-2.38E-05	1.98E-05
27	1.50E-04	-1.31E-04	6.63E-04	-7.33E-04	-8.70E-04	9.22E-04	-1.26E-04	1.06E-04
28	8.75E-04	-8.14E-04	1.50E-03	-1.54E-03	-1.69E-03	1.70E-03	-7.49E-04	7.00E-04
29	4.95E-04	-4.57E-04	1.65E-03	-1.72E-03	-7.69E-03	7.54E-03	-2.45E-03	2.31E-03
30	-2.63E-03	2.48E-03	5.71E-03	-5.68E-03	-5.03E-03	4.99E-03	1.70E-03	-1.61E-03
31	-2.41E-03	2.27E-03	6.45E-03	-6.44E-03	-2.75E-03	2.81E-03	5.28E-04	-4.92E-04
32	-1.02E-03	9.51E-04	6.44E-03	-6.44E-03	-2.24E-03	2.33E-03	1.59E-04	-1.46E-04
33	3.78E-04	-3.52E-04	6.55E-03	-6.56E-03	-1.44E-03	1.53E-03	-4.17E-05	3.70E-05
34	3.36E-04	-3.14E-04	6.42E-03	-6.44E-03	-2.17E-03	2.27E-03	-4.98E-05	4.54E-05
35	2.04E-03	-1.91E-03	6.69E-03	-6.68E-03	-1.56E-03	1.63E-03	-2.55E-04	2.31E-04
36	4.41E-03	-4.16E-03	7.08E-03	-7.00E-03	-2.59E-03	2.59E-03	-1.00E-03	9.43E-04
37	3.84E-03	-3.63E-03	6.12E-03	-6.07E-03	-6.75E-03	6.62E-03	-3.30E-03	3.14E-03
38	-1.02E-03	9.51E-04	6.44E-03	-6.44E-03	-2.24E-03	2.33E-03	1.59E-04	-1.46E-04
39	-2.41E-03	2.27E-03	6.45E-03	-6.44E-03	-2.75E-03	2.81E-03	5.28E-04	-4.92E-04
40	-3.84E-03	3.63E-03	6.12E-03	-6.07E-03	-6.75E-03	6.62E-03	3.30E-03	-3.14E-03
41	5.54E-04	-5.16E-04	2.62E-03	-2.69E-03	-7.11E-03	7.00E-03	-1.82E-03	1.72E-03
42	3.40E-04	-3.10E-04	9.20E-04	-9.88E-04	-1.43E-03	1.45E-03	-4.46E-04	4.12E-04

ج-۶- دادههای مصنوعی حاصل از مدل نشان داده شده در شکل (۶-۳-الف)

Period:	1.00E-02							
	Re(Zxx)	lm(Zxx)	Re(Zxy)	lm(Zxy)	Re(Zyx)	lm(Zyx)	Re(Zyy)	lm(Zyy)
1	1.15E-03	-7.30E-04	4.43E-01	-4.45E-01	-4.43E-01	4.45E-01	-1.14E-03	5.99E-04
2	-2.53E-03	-2.60E-02	4.14E-01	-4.28E-01	-3.23E-01	4.98E-01	-2.49E-04	5.05E-03
3	-8.62E-04	3.03E-03	4.11E-01	-4.32E-01	-3.14E-01	5.11E-01	1.50E-04	-3.23E-04
4	2.53E-03	2.60E-02	4.14E-01	-4.28E-01	-3.23E-01	4.98E-01	2.48E-04	-5.05E-03
5	7.33E-03	2.41E-02	4.27E-01	-4.45E-01	-4.27E-01	4.45E-01	-5.67E-03	-2.37E-02
6	-1.42E-03	2.47E-03	4.43E-01	-4.49E-01	-4.41E-01	4.44E-01	2.88E-03	-3.66E-03
7	7.88E-04	-1.06E-03	4.41E-01	-4.59E-01	-4.39E-01	4.43E-01	-3.10E-03	3.44E-03
8	-9.61E-05	-5.11E-03	3.20E-01	-4.96E-01	-4.13E-01	4.28E-01	1.26E-03	2.52E-02
9	-6.47E-04	-2.42E-03	1.24E-01	-4.43E-01	-1.22E-01	4.43E-01	4.71E-04	2.47E-03
10	9.59E-06	2.87E-04	1.19E-01	-4.43E-01	-1.08E-01	4.48E-01	-1.54E-05	-1.02E-04
11	6.46E-04	2.42E-03	1.24E-01	-4.43E-01	-1.22E-01	4.43E-01	-4.71E-04	-2.47E-03
12	2.72E-03	-4.02E-03	4.41E-01	-4.44E-01	-4.43E-01	4.48E-01	-1.53E-03	2.25E-03
13	9.65E-05	5.11E-03	3.20E-01	-4.96E-01	-4.13E-01	4.28E-01	-1.26E-03	-2.52E-02
14	-7.88E-04	1.06E-03	4.41E-01	-4.59E-01	-4.39E-01	4.43E-01	3.10E-03	-3.44E-03
15	-1.10E-04	9.81E-05	4.42E-01	-4.62E-01	-4.39E-01	4.43E-01	5.69E-04	-4.61E-04

16	-1.26E-04	3.30E-04	3.11E-01	-5.09E-01	-4.11E-01	4.32E-01	9.66E-04	-2.88E-03
17	2.86E-05	9.61E-05	1.09E-01	-4.48E-01	-1.19E-01	4.43E-01	1.49E-05	-2.87E-04
18	-2.97E-06	-1.08E-05	1.05E-01	-4.48E-01	-1.04E-01	4.48E-01	9.76E-07	1.10E-05
19	-2.83E-05	-9.64E-05	1.09E-01	-4.48E-01	-1.19E-01	4.43E-01	-1.45E-05	2.87E-04
20	1.26E-04	-3.30E-04	3.11E-01	-5.09E-01	-4.11E-01	4.32E-01	-9.66E-04	2.88E-03
21	1.10E-04	-9.82E-05	4.42E-01	-4.62E-01	-4.39E-01	4.43E-01	-5.69E-04	4.61E-04
22	-7.88E-04	1.06E-03	4.41E-01	-4.59E-01	-4.39E-01	4.43E-01	3.10E-03	-3.44E-03
23	2.99E-03	-3.78E-03	4.39E-01	-4.43E-01	-4.42E-01	4.58E-01	-8.31E-04	9.40E-04
24	9.66E-05	5.11E-03	3.20E-01	-4.96E-01	-4.13E-01	4.28E-01	-1.26E-03	-2.52E-02
25	6.46E-04	2.42E-03	1.24E-01	-4.43E-01	-1.22E-01	4.43E-01	-4.71E-04	-2.47E-03
26	-9.87E-06	-2.87E-04	1.19E-01	-4.43E-01	-1.08E-01	4.48E-01	1.53E-05	1.02E-04
27	-6.47E-04	-2.42E-03	1.24E-01	-4.43E-01	-1.22E-01	4.43E-01	4.71E-04	2.47E-03
28	-9.61E-05	-5.11E-03	3.20E-01	-4.96E-01	-4.13E-01	4.28E-01	1.26E-03	2.52E-02
29	7.88E-04	-1.06E-03	4.41E-01	-4.59E-01	-4.39E-01	4.43E-01	-3.10E-03	3.44E-03
30	-1.42E-03	2.47E-03	4.43E-01	-4.49E-01	-4.41E-01	4.44E-01	2.88E-03	-3.66E-03
31	7.33E-03	2.41E-02	4.27E-01	-4.45E-01	-4.27E-01	4.45E-01	-5.67E-03	-2.37E-02
32	2.53E-03	2.60E-02	4.14E-01	-4.28E-01	-3.23E-01	4.98E-01	2.48E-04	-5.05E-03
33	8.62E-04	-3.03E-03	4.11E-01	-4.32E-01	-3.14E-01	5.11E-01	-1.49E-04	3.23E-04
34	-5.59E-04	5.17E-04	4.39E-01	-4.43E-01	-4.43E-01	4.61E-01	1.13E-04	-8.28E-05
35	-2.53E-03	-2.60E-02	4.14E-01	-4.28E-01	-3.23E-01	4.98E-01	-2.49E-04	5.05E-03
36	-7.33E-03	-2.41E-02	4.27E-01	-4.45E-01	-4.27E-01	4.45E-01	5.67E-03	2.37E-02
37	1.42E-03	-2.47E-03	4.43E-01	-4.49E-01	-4.41E-01	4.44E-01	-2.88E-03	3.66E-03
38	-1.15E-03	7.31E-04	4.43E-01	-4.45E-01	-4.43E-01	4.45E-01	1.14E-03	-6.00E-04
39	-2.72E-03	4.02E-03	4.41E-01	-4.44E-01	-4.43E-01	4.48E-01	1.53E-03	-2.25E-03
40	-2.99E-03	3.78E-03	4.39E-01	-4.43E-01	-4.42E-01	4.58E-01	8.32E-04	-9.40E-04
41	5.59E-04	-5.16E-04	4.39E-01	-4.43E-01	-4.43E-01	4.61E-01	-1.13E-04	8.31E-05
42	2.99E-03	-3.78E-03	4.39E-01	-4.43E-01	-4.42E-01	4.58E-01	-8.32E-04	9.40E-04
43	2.72E-03	-4.02E-03	4.41E-01	-4.44E-01	-4.43E-01	4.48E-01	-1.53E-03	2.25E-03
44	1.15E-03	-7.32E-04	4.43E-01	-4.45E-01	-4.43E-01	4.45E-01	-1.14E-03	6.00E-04
45	-2.99E-03	3.78E-03	4.39E-01	-4.43E-01	-4.42E-01	4.58E-01	8.31E-04	-9.40E-04
46	-2.73E-03	4.02E-03	4.41E-01	-4.44E-01	-4.43E-01	4.48E-01	1.53E-03	-2.25E-03
47	-1.15E-03	7.32E-04	4.43E-01	-4.45E-01	-4.43E-01	4.45E-01	1.14E-03	-5.98E-04
48	1.42E-03	-2.47E-03	4.43E-01	-4.49E-01	-4.41E-01	4.44E-01	-2.88E-03	3.67E-03
49	-7.33E-03	-2.41E-02	4.27E-01	-4.45E-01	-4.27E-01	4.45E-01	5.67E-03	2.37E-02
Period:	1.00E-01							
1	-7.05E-03	-3.18E-03	1.40E-01	-1.39E-01	-1.40E-01	1.39E-01	6.85E-03	3.54E-03
2	-4.39E-02	2.06E-03	1.76E-01	-1.29E-01	-6.67E-02	1.01E-01	9.68E-03	-1.77E-04
3	5.83E-03	3.90E-05	1.72E-01	-1.28E-01	-5.26E-02	9.63E-02	-8.28E-04	-2.02E-05
4	4.39E-02	-2.06E-03	1.76E-01	-1.29E-01	-6.67E-02	1.01E-01	-9.68E-03	1.76E-04
5	4.40E-02	-1.54E-03	1.52E-01	-1.32E-01	-1.52E-01	1.32E-01	-4.33E-02	7.97E-04
6	1.02E-02	2.68E-03	1.35E-01	-1.38E-01	-1.48E-01	1.36E-01	-1.58E-02	-4.15E-03
7	-5.16E-03	-1.38E-03	1.19E-01	-1.37E-01	-1.55E-01	1.34E-01	1.43E-02	2.89E-03
8	-9.75E-03	3.07E-04	6.65E-02	-9.98E-02	-1.75E-01	1.29E-01	4.29E-02	-1.41E-03
9	-3.44E-03	5.59E-04	1.96E-02	-5.77E-02	-1.95E-02	5.75E-02	3.44E-03	-5.28E-04
10	4.45E-04	-5.38E-05	1.80E-02	-5.67E-02	-1.04E-02	5.37E-02	-1.53E-04	2.58E-05
11	3.44E-03	-5.59E-04	1.96E-02	-5.77E-02	-1.95E-02	5.75E-02	-3.44E-03	5.28E-04

12	-1.62E-02	-3.78E-03	1.48E-01	-1.36E-01	-1.35E-01	1.39E-01	1.00E-02	3.00E-03
13	9.75E-03	-3.07E-04	6.65E-02	-9.98E-02	-1.75E-01	1.29E-01	-4.29E-02	1.41E-03
14	5.16E-03	1.38E-03	1.19E-01	-1.37E-01	-1.55E-01	1.34E-01	-1.43E-02	-2.89E-03
15	6.67E-04	2.02E-04	1.13E-01	-1.37E-01	-1.56E-01	1.33E-01	-2.29E-03	-4.87E-04
16	8.35E-04	9.17E-06	5.25E-02	-9.56E-02	-1.71E-01	1.28E-01	-5.67E-03	-1.14E-04
17	1.51E-04	-2.73E-05	1.05E-02	-5.39E-02	-1.80E-02	5.67E-02	-4.44E-04	4.88E-05
18	-1.85E-05	1.69E-06	8.92E-03	-5.30E-02	-8.88E-03	5.29E-02	1.83E-05	-1.39E-06
19	-1.51E-04	2.73E-05	1.05E-02	-5.39E-02	-1.80E-02	5.67E-02	4.44E-04	-4.89E-05
20	-8.35E-04	-9.15E-06	5.25E-02	-9.56E-02	-1.71E-01	1.28E-01	5.67E-03	1.13E-04
21	-6.67E-04	-2.02E-04	1.13E-01	-1.37E-01	-1.56E-01	1.33E-01	2.29E-03	4.85E-04
22	5.16E-03	1.38E-03	1.19E-01	-1.37E-01	-1.55E-01	1.34E-01	-1.43E-02	-2.89E-03
23	-1.47E-02	-2.65E-03	1.56E-01	-1.34E-01	-1.19E-01	1.38E-01	5.05E-03	1.55E-03
24	9.75E-03	-3.07E-04	6.65E-02	-9.98E-02	-1.75E-01	1.29E-01	-4.29E-02	1.41E-03
25	3.44E-03	-5.59E-04	1.96E-02	-5.77E-02	-1.95E-02	5.75E-02	-3.44E-03	5.28E-04
26	-4.45E-04	5.38E-05	1.80E-02	-5.67E-02	-1.04E-02	5.37E-02	1.52E-04	-2.57E-05
27	-3.44E-03	5.59E-04	1.96E-02	-5.77E-02	-1.95E-02	5.75E-02	3.44E-03	-5.28E-04
28	-9.75E-03	3.07E-04	6.65E-02	-9.98E-02	-1.75E-01	1.29E-01	4.29E-02	-1.41E-03
29	-5.16E-03	-1.38E-03	1.19E-01	-1.37E-01	-1.55E-01	1.34E-01	1.43E-02	2.89E-03
30	1.02E-02	2.68E-03	1.35E-01	-1.38E-01	-1.48E-01	1.36E-01	-1.58E-02	-4.15E-03
31	4.40E-02	-1.54E-03	1.52E-01	-1.32E-01	-1.52E-01	1.32E-01	-4.33E-02	7.97E-04
32	4.39E-02	-2.06E-03	1.76E-01	-1.29E-01	-6.67E-02	1.01E-01	-9.68E-03	1.76E-04
33	-5.83E-03	-3.84E-05	1.72E-01	-1.28E-01	-5.26E-02	9.63E-02	8.28E-04	2.02E-05
34	2.37E-03	4.50E-04	1.57E-01	-1.33E-01	-1.13E-01	1.38E-01	-6.51E-04	-2.27E-04
35	-4.39E-02	2.06E-03	1.76E-01	-1.29E-01	-6.67E-02	1.01E-01	9.68E-03	-1.76E-04
36	-4.40E-02	1.54E-03	1.52E-01	-1.32E-01	-1.52E-01	1.32E-01	4.33E-02	-7.96E-04
37	-1.02E-02	-2.68E-03	1.35E-01	-1.38E-01	-1.48E-01	1.36E-01	1.58E-02	4.15E-03
38	7.05E-03	3.18E-03	1.40E-01	-1.39E-01	-1.40E-01	1.39E-01	-6.85E-03	-3.54E-03
39	1.62E-02	3.78E-03	1.48E-01	-1.36E-01	-1.35E-01	1.39E-01	-1.00E-02	-3.00E-03
40	1.47E-02	2.65E-03	1.56E-01	-1.34E-01	-1.19E-01	1.38E-01	-5.05E-03	-1.55E-03
41	-2.37E-03	-4.50E-04	1.57E-01	-1.33E-01	-1.13E-01	1.38E-01	6.52E-04	2.27E-04
42	-1.47E-02	-2.65E-03	1.56E-01	-1.34E-01	-1.19E-01	1.38E-01	5.05E-03	1.55E-03
43	-1.62E-02	-3.78E-03	1.48E-01	-1.36E-01	-1.35E-01	1.39E-01	1.00E-02	3.00E-03
44	-7.05E-03	-3.18E-03	1.40E-01	-1.39E-01	-1.40E-01	1.39E-01	6.85E-03	3.54E-03
45	1.47E-02	2.65E-03	1.56E-01	-1.34E-01	-1.19E-01	1.38E-01	-5.05E-03	-1.55E-03
46	1.62E-02	3.78E-03	1.48E-01	-1.36E-01	-1.35E-01	1.39E-01	-1.00E-02	-3.00E-03
47	7.05E-03	3.18E-03	1.40E-01	-1.39E-01	-1.40E-01	1.39E-01	-6.85E-03	-3.54E-03
48	-1.02E-02	-2.68E-03	1.35E-01	-1.38E-01	-1.48E-01	1.36E-01	1.58E-02	4.15E-03
49	-4.40E-02	1.54E-03	1.52E-01	-1.32E-01	-1.52E-01	1.32E-01	4.33E-02	-7.96E-04
Period:	1.00E+00							
1	-5.32E-03	2.68E-03	4.55E-02	-4.60E-02	-4.55E-02	4.61E-02	5.59E-03	-2.75E-03
2	-2.07E-02	1.35E-02	6.43E-02	-5.84E-02	-2.01E-02	2.55E-02	4.90E-03	-2.83E-03
3	2.90E-03	-1.79E-03	6.27E-02	-5.74E-02	-1.46E-02	2.15E-02	-4.45E-04	2.29E-04
4	2.07E-02	-1.35E-02	6.43E-02	-5.84E-02	-2.01E-02	2.55E-02	-4.90E-03	2.83E-03
5	2.10E-02	-1.36E-02	5.23E-02	-5.07E-02	-5.22E-02	5.08E-02	-2.10E-02	1.35E-02
6	6.45E-03	-3.53E-03	4.24E-02	-4.45E-02	-5.03E-02	4.94E-02	-9.79E-03	5.40E-03
7	-3.34E-03	1.77E-03	3.51E-02	-3.98E-02	-5.50E-02	5.24E-02	8.11E-03	-4.66E-03

8	-4.86E-03	2.85E-03	2.02E-02	-2.54E-02	-6.42E-02	5.84E-02	2.07E-02	-1.32E-02
9	-1.33E-03	7.81E-04	5.70E-03	-1.03E-02	-5.70E-03	1.03E-02	1.33E-03	-7.75E-04
10	1.58E-04	-9.06E-05	4.89E-03	-9.70E-03	-2.74E-03	7.83E-03	-3.26E-05	9.94E-06
11	1.33E-03	-7.81E-04	5.70E-03	-1.03E-02	-5.70E-03	1.03E-02	-1.33E-03	7.75E-04
12	-9.66E-03	5.44E-03	5.03E-02	-4.93E-02	-4.22E-02	4.45E-02	6.61E-03	-3.54E-03
13	4.86E-03	-2.85E-03	2.02E-02	-2.54E-02	-6.42E-02	5.84E-02	-2.07E-02	1.32E-02
14	3.34E-03	-1.77E-03	3.51E-02	-3.98E-02	-5.50E-02	5.24E-02	-8.11E-03	4.66E-03
15	4.52E-04	-2.30E-04	3.23E-02	-3.81E-02	-5.59E-02	5.29E-02	-1.30E-03	7.44E-04
16	4.40E-04	-2.30E-04	1.47E-02	-2.14E-02	-6.27E-02	5.74E-02	-2.90E-03	1.75E-03
17	3.34E-05	-1.02E-05	2.74E-03	-7.87E-03	-4.88E-03	9.68E-03	-1.58E-04	8.96E-05
18	-1.44E-06	2.71E-07	2.17E-03	-7.29E-03	-2.16E-03	7.28E-03	1.35E-06	-1.88E-07
19	-3.34E-05	1.02E-05	2.74E-03	-7.87E-03	-4.88E-03	9.68E-03	1.58E-04	-8.95E-05
20	-4.40E-04	2.30E-04	1.47E-02	-2.14E-02	-6.27E-02	5.74E-02	2.90E-03	-1.75E-03
21	-4.52E-04	2.30E-04	3.23E-02	-3.81E-02	-5.59E-02	5.29E-02	1.30E-03	-7.44E-04
22	3.34E-03	-1.77E-03	3.51E-02	-3.98E-02	-5.50E-02	5.24E-02	-8.11E-03	4.66E-03
23	-8.08E-03	4.75E-03	5.50E-02	-5.23E-02	-3.49E-02	3.99E-02	3.42E-03	-1.77E-03
24	4.86E-03	-2.85E-03	2.02E-02	-2.54E-02	-6.42E-02	5.84E-02	-2.07E-02	1.32E-02
25	1.33E-03	-7.81E-04	5.70E-03	-1.03E-02	-5.70E-03	1.03E-02	-1.33E-03	7.75E-04
26	-1.58E-04	9.05E-05	4.89E-03	-9.70E-03	-2.74E-03	7.83E-03	3.26E-05	-9.92E-06
27	-1.33E-03	7.81E-04	5.70E-03	-1.03E-02	-5.70E-03	1.03E-02	1.33E-03	-7.75E-04
28	-4.86E-03	2.85E-03	2.02E-02	-2.54E-02	-6.42E-02	5.84E-02	2.07E-02	-1.32E-02
29	-3.34E-03	1.77E-03	3.51E-02	-3.98E-02	-5.50E-02	5.24E-02	8.11E-03	-4.66E-03
30	6.45E-03	-3.53E-03	4.24E-02	-4.45E-02	-5.03E-02	4.94E-02	-9.79E-03	5.40E-03
31	2.10E-02	-1.36E-02	5.23E-02	-5.07E-02	-5.22E-02	5.08E-02	-2.10E-02	1.35E-02
32	2.07E-02	-1.35E-02	6.43E-02	-5.84E-02	-2.01E-02	2.55E-02	-4.90E-03	2.83E-03
33	-2.90E-03	1.79E-03	6.27E-02	-5.74E-02	-1.46E-02	2.15E-02	4.45E-04	-2.29E-04
34	1.30E-03	-7.61E-04	5.58E-02	-5.28E-02	-3.21E-02	3.82E-02	-4.64E-04	2.32E-04
35	-2.07E-02	1.35E-02	6.43E-02	-5.84E-02	-2.01E-02	2.55E-02	4.90E-03	-2.83E-03
36	-2.10E-02	1.36E-02	5.23E-02	-5.07E-02	-5.22E-02	5.08E-02	2.10E-02	-1.35E-02
37	-6.45E-03	3.53E-03	4.24E-02	-4.45E-02	-5.03E-02	4.94E-02	9.79E-03	-5.40E-03
38	5.32E-03	-2.68E-03	4.55E-02	-4.60E-02	-4.55E-02	4.61E-02	-5.59E-03	2.75E-03
39	9.66E-03	-5.44E-03	5.03E-02	-4.93E-02	-4.22E-02	4.45E-02	-6.61E-03	3.54E-03
40	8.08E-03	-4.75E-03	5.50E-02	-5.23E-02	-3.49E-02	3.99E-02	-3.42E-03	1.77E-03
41	-1.30E-03	7.61E-04	5.58E-02	-5.28E-02	-3.21E-02	3.82E-02	4.64E-04	-2.32E-04
42	-8.08E-03	4.75E-03	5.50E-02	-5.23E-02	-3.49E-02	3.99E-02	3.42E-03	-1.77E-03
43	-9.66E-03	5.44E-03	5.03E-02	-4.93E-02	-4.22E-02	4.45E-02	6.61E-03	-3.54E-03
44	-5.32E-03	2.68E-03	4.55E-02	-4.60E-02	-4.55E-02	4.61E-02	5.59E-03	-2.75E-03
45	8.08E-03	-4.75E-03	5.50E-02	-5.23E-02	-3.49E-02	3.99E-02	-3.42E-03	1.77E-03
46	9.66E-03	-5.44E-03	5.03E-02	-4.93E-02	-4.22E-02	4.45E-02	-6.61E-03	3.54E-03
47	5.32E-03	-2.68E-03	4.55E-02	-4.60E-02	-4.55E-02	4.61E-02	-5.59E-03	2.75E-03
48	-6.45E-03	3.53E-03	4.24E-02	-4.45E-02	-5.03E-02	4.94E-02	9.79E-03	-5.40E-03
49	-2.10E-02	1.36E-02	5.23E-02	-5.07E-02	-5.22E-02	5.08E-02	2.10E-02	-1.35E-02
Period:	1.00E+01							
1	-1.02E-03	1.56E-03	1.20E-02	-1.48E-02	-1.18E-02	1.48E-02	1.01E-03	-1.65E-03
2	-4.56E-03	6.06E-03	1.42E-02	-2.02E-02	-4.58E-03	6.96E-03	1.08E-03	-1.45E-03
3	6.33E-04	-8.41E-04	1.36E-02	-1.97E-02	-3.30E-03	5.30E-03	-9.79E-05	1.33E-04

4	4.56E-03	-6.06E-03	1.42E-02	-2.02E-02	-4.58E-03	6.96E-03	-1.08E-03	1.45E-03
5	4.59E-03	-6.15E-03	1.22E-02	-1.67E-02	-1.20E-02	1.67E-02	-4.65E-03	6.17E-03
6	1.29E-03	-1.88E-03	1.10E-02	-1.39E-02	-1.19E-02	1.62E-02	-2.08E-03	2.84E-03
7	-6.56E-04	9.69E-04	9.08E-03	-1.17E-02	-1.23E-02	1.76E-02	1.80E-03	-2.34E-03
8	-1.06E-03	1.44E-03	4.68E-03	-6.98E-03	-1.39E-02	2.02E-02	4.62E-03	-6.06E-03
9	-3.39E-04	4.34E-04	1.16E-03	-2.25E-03	-1.14E-03	2.24E-03	3.45E-04	-4.35E-04
10	4.40E-05	-5.41E-05	9.73E-04	-2.02E-03	-4.17E-04	1.28E-03	-1.48E-05	1.61E-05
11	3.39E-04	-4.34E-04	1.16E-03	-2.25E-03	-1.14E-03	2.24E-03	-3.45E-04	4.35E-04
12	-2.09E-03	2.80E-03	1.21E-02	-1.62E-02	-1.08E-02	1.39E-02	1.29E-03	-1.93E-03
13	1.06E-03	-1.44E-03	4.68E-03	-6.98E-03	-1.39E-02	2.02E-02	-4.62E-03	6.06E-03
14	6.56E-04	-9.68E-04	9.08E-03	-1.17E-02	-1.23E-02	1.76E-02	-1.80E-03	2.34E-03
15	8.78E-05	-1.31E-04	8.36E-03	-1.09E-02	-1.23E-02	1.78E-02	-2.90E-04	3.73E-04
16	9.59E-05	-1.31E-04	3.38E-03	-5.31E-03	-1.34E-02	1.97E-02	-6.42E-04	8.40E-04
17	1.45E-05	-1.61E-05	4.25E-04	-1.28E-03	-9.56E-04	2.01E-03	-4.47E-05	5.42E-05
18	-1.74E-06	1.62E-06	2.92E-04	-1.12E-03	-2.87E-04	1.11E-03	1.77E-06	-1.62E-06
19	-1.45E-05	1.61E-05	4.25E-04	-1.28E-03	-9.56E-04	2.01E-03	4.47E-05	-5.42E-05
20	-9.59E-05	1.31E-04	3.37E-03	-5.31E-03	-1.34E-02	1.97E-02	6.42E-04	-8.40E-04
21	-8.77E-05	1.31E-04	8.36E-03	-1.09E-02	-1.23E-02	1.78E-02	2.90E-04	-3.73E-04
22	6.56E-04	-9.68E-04	9.08E-03	-1.17E-02	-1.23E-02	1.75E-02	-1.80E-03	2.34E-03
23	-1.81E-03	2.33E-03	1.25E-02	-1.76E-02	-8.87E-03	1.17E-02	6.63E-04	-9.92E-04
24	1.06E-03	-1.44E-03	4.68E-03	-6.98E-03	-1.39E-02	2.02E-02	-4.62E-03	6.06E-03
25	3.39E-04	-4.34E-04	1.16E-03	-2.25E-03	-1.14E-03	2.24E-03	-3.45E-04	4.35E-04
26	-4.40E-05	5.41E-05	9.73E-04	-2.02E-03	-4.17E-04	1.28E-03	1.48E-05	-1.61E-05
27	-3.39E-04	4.34E-04	1.16E-03	-2.25E-03	-1.14E-03	2.24E-03	3.45E-04	-4.35E-04
28	-1.06E-03	1.44E-03	4.68E-03	-6.98E-03	-1.39E-02	2.02E-02	4.62E-03	-6.06E-03
29	-6.56E-04	9.68E-04	9.08E-03	-1.17E-02	-1.23E-02	1.76E-02	1.80E-03	-2.34E-03
30	1.29E-03	-1.88E-03	1.10E-02	-1.39E-02	-1.19E-02	1.62E-02	-2.08E-03	2.84E-03
31	4.59E-03	-6.15E-03	1.22E-02	-1.67E-02	-1.20E-02	1.67E-02	-4.65E-03	6.17E-03
32	4.56E-03	-6.06E-03	1.42E-02	-2.02E-02	-4.58E-03	6.96E-03	-1.08E-03	1.45E-03
33	-6.33E-04	8.41E-04	1.36E-02	-1.97E-02	-3.30E-03	5.30E-03	9.79E-05	-1.33E-04
34	2.90E-04	-3.72E-04	1.25E-02	-1.78E-02	-8.16E-03	1.09E-02	-8.90E-05	1.34E-04
35	-4.56E-03	6.06E-03	1.42E-02	-2.02E-02	-4.58E-03	6.96E-03	1.08E-03	-1.45E-03
36	-4.59E-03	6.15E-03	1.22E-02	-1.67E-02	-1.20E-02	1.67E-02	4.65E-03	-6.17E-03
37	-1.29E-03	1.88E-03	1.10E-02	-1.39E-02	-1.19E-02	1.62E-02	2.08E-03	-2.84E-03
38	1.02E-03	-1.56E-03	1.20E-02	-1.48E-02	-1.18E-02	1.48E-02	-1.01E-03	1.65E-03
39	2.09E-03	-2.80E-03	1.21E-02	-1.62E-02	-1.08E-02	1.39E-02	-1.29E-03	1.93E-03
40	1.81E-03	-2.33E-03	1.25E-02	-1.76E-02	-8.87E-03	1.17E-02	-6.63E-04	9.92E-04
41	-2.90E-04	3.72E-04	1.25E-02	-1.78E-02	-8.16E-03	1.09E-02	8.91E-05	-1.34E-04
42	-1.81E-03	2.33E-03	1.25E-02	-1.76E-02	-8.87E-03	1.17E-02	6.63E-04	-9.92E-04
43	-2.09E-03	2.80E-03	1.21E-02	-1.62E-02	-1.08E-02	1.39E-02	1.29E-03	-1.93E-03
44	-1.02E-03	1.56E-03	1.20E-02	-1.48E-02	-1.18E-02	1.48E-02	1.01E-03	-1.65E-03
45	1.81E-03	-2.33E-03	1.25E-02	-1.76E-02	-8.87E-03	1.17E-02	-6.63E-04	9.92E-04
46	2.09E-03	-2.80E-03	1.21E-02	-1.62E-02	-1.08E-02	1.39E-02	-1.29E-03	1.93E-03
47	1.02E-03	-1.56E-03	1.20E-02	-1.48E-02	-1.18E-02	1.48E-02	-1.01E-03	1.65E-03
48	-1.29E-03	1.88E-03	1.10E-02	-1.39E-02	-1.19E-02	1.62E-02	2.08E-03	-2.84E-03
49	-4.59E-03	6.15E-03	1.22E-02	-1.67E-02	-1.20E-02	1.67E-02	4.65E-03	-6.17E-03

Period:	1.00E+02							
1	-5.01E-05	3.12E-04	2.63E-03	-3.98E-03	-2.49E-03	3.90E-03	7.05E-06	-3.06E-04
2	-7.59E-04	1.44E-03	2.40E-03	-4.65E-03	-8.21E-04	1.57E-03	1.63E-04	-3.33E-04
3	1.05E-04	-1.99E-04	2.27E-03	-4.47E-03	-5.91E-04	1.16E-03	-1.44E-05	3.00E-05
4	7.59E-04	-1.44E-03	2.40E-03	-4.65E-03	-8.21E-04	1.57E-03	-1.63E-04	3.33E-04
5	7.40E-04	-1.45E-03	2.24E-03	-4.03E-03	-2.16E-03	3.97E-03	-7.51E-04	1.46E-03
6	1.37E-04	-3.96E-04	2.38E-03	-3.67E-03	-2.19E-03	3.92E-03	-2.77E-04	6.43E-04
7	-7.25E-05	2.01E-04	1.94E-03	-3.05E-03	-2.09E-03	4.04E-03	2.94E-04	-5.62E-04
8	-1.59E-04	3.28E-04	8.54E-04	-1.60E-03	-2.31E-03	4.57E-03	7.77E-04	-1.46E-03
9	-5.38E-05	1.04E-04	1.90E-04	-4.36E-04	-1.83E-04	4.29E-04	5.55E-05	-1.05E-04
10	6.97E-06	-1.32E-05	1.56E-04	-3.75E-04	-6.25E-05	2.00E-04	-2.43E-06	4.20E-06
11	5.38E-05	-1.04E-04	1.90E-04	-4.36E-04	-1.83E-04	4.29E-04	-5.55E-05	1.05E-04
12	-2.96E-04	6.47E-04	2.29E-03	-4.00E-03	-2.26E-03	3.59E-03	1.17E-04	-3.94E-04
13	1.59E-04	-3.28E-04	8.54E-04	-1.60E-03	-2.31E-03	4.57E-03	-7.77E-04	1.46E-03
14	7.25E-05	-2.00E-04	1.94E-03	-3.05E-03	-2.09E-03	4.04E-03	-2.94E-04	5.62E-04
15	9.45E-06	-2.67E-05	1.79E-03	-2.82E-03	-2.06E-03	4.04E-03	-4.84E-05	9.04E-05
16	1.40E-05	-2.94E-05	6.17E-04	-1.19E-03	-2.18E-03	4.39E-03	-1.07E-04	2.01E-04
17	2.36E-06	-4.14E-06	6.50E-05	-2.02E-04	-1.51E-04	3.70E-04	-7.19E-06	1.35E-05
18	-2.90E-07	4.73E-07	4.22E-05	-1.59E-04	-4.06E-05	1.57E-04	2.98E-07	-4.81E-07
19	-2.36E-06	4.14E-06	6.50E-05	-2.02E-04	-1.51E-04	3.70E-04	7.19E-06	-1.35E-05
20	-1.40E-05	2.94E-05	6.17E-04	-1.19E-03	-2.18E-03	4.39E-03	1.07E-04	-2.01E-04
21	-9.45E-06	2.67E-05	1.79E-03	-2.82E-03	-2.06E-03	4.04E-03	4.84E-05	-9.04E-05
22	7.25E-05	-2.01E-04	1.94E-03	-3.05E-03	-2.09E-03	4.04E-03	-2.94E-04	5.62E-04
23	-2.99E-04	5.64E-04	2.19E-03	-4.12E-03	-1.85E-03	2.99E-03	6.71E-05	-2.02E-04
24	1.59E-04	-3.28E-04	8.54E-04	-1.60E-03	-2.31E-03	4.57E-03	-7.77E-04	1.46E-03
25	5.38E-05	-1.04E-04	1.90E-04	-4.36E-04	-1.83E-04	4.29E-04	-5.55E-05	1.05E-04
26	-6.97E-06	1.32E-05	1.56E-04	-3.75E-04	-6.25E-05	2.00E-04	2.43E-06	-4.20E-06
27	-5.38E-05	1.04E-04	1.90E-04	-4.36E-04	-1.83E-04	4.29E-04	5.55E-05	-1.05E-04
28	-1.59E-04	3.28E-04	8.54E-04	-1.60E-03	-2.31E-03	4.57E-03	7.77E-04	-1.46E-03
29	-7.25E-05	2.00E-04	1.94E-03	-3.05E-03	-2.09E-03	4.04E-03	2.94E-04	-5.62E-04
30	1.37E-04	-3.96E-04	2.38E-03	-3.67E-03	-2.19E-03	3.92E-03	-2.76E-04	6.43E-04
31	7.40E-04	-1.45E-03	2.24E-03	-4.03E-03	-2.16E-03	3.97E-03	-7.51E-04	1.46E-03
32	7.59E-04	-1.44E-03	2.40E-03	-4.65E-03	-8.21E-04	1.57E-03	-1.63E-04	3.33E-04
33	-1.05E-04	1.99E-04	2.27E-03	-4.47E-03	-5.91E-04	1.16E-03	1.44E-05	-2.99E-05
34	4.89E-05	-9.07E-05	2.15E-03	-4.12E-03	-1.70E-03	2.76E-03	-8.83E-06	2.70E-05
35	-7.59E-04	1.44E-03	2.40E-03	-4.65E-03	-8.21E-04	1.57E-03	1.63E-04	-3.33E-04
36	-7.40E-04	1.45E-03	2.24E-03	-4.03E-03	-2.16E-03	3.97E-03	7.51E-04	-1.46E-03
37	-1.37E-04	3.96E-04	2.38E-03	-3.67E-03	-2.19E-03	3.92E-03	2.76E-04	-6.43E-04
38	5.00E-05	-3.12E-04	2.63E-03	-3.98E-03	-2.49E-03	3.90E-03	-7.03E-06	3.06E-04
39	2.96E-04	-6.47E-04	2.29E-03	-4.00E-03	-2.26E-03	3.59E-03	-1.17E-04	3.94E-04
40	2.99E-04	-5.64E-04	2.19E-03	-4.12E-03	-1.85E-03	2.99E-03	-6.71E-05	2.02E-04
41	-4.89E-05	9.07E-05	2.15E-03	-4.12E-03	-1.70E-03	2.76E-03	8.83E-06	-2.70E-05
42	-2.99E-04	5.64E-04	2.19E-03	-4.12E-03	-1.85E-03	2.99E-03	6.71E-05	-2.02E-04
43	-2.96E-04	6.47E-04	2.29E-03	-4.00E-03	-2.26E-03	3.59E-03	1.17E-04	-3.94E-04
44	-5.00E-05	3.12E-04	2.63E-03	-3.98E-03	-2.49E-03	3.90E-03	7.04E-06	-3.06E-04
45	2.99E-04	-5.64E-04	2.19E-03	-4.12E-03	-1.85E-03	2.99E-03	-6.71E-05	2.02E-04

46	2.96E-04	-6.47E-04	2.29E-03	-4.00E-03	-2.26E-03	3.59E-03	-1.17E-04	3.94E-04
47	5.00E-05	-3.12E-04	2.63E-03	-3.98E-03	-2.49E-03	3.90E-03	-7.09E-06	3.06E-04
48	-1.37E-04	3.96E-04	2.38E-03	-3.67E-03	-2.19E-03	3.92E-03	2.77E-04	-6.43E-04
49	-7.40E-04	1.45E-03	2.24E-03	-4.03E-03	-2.16E-03	3.97E-03	7.51E-04	-1.46E-03

## پيوست د

در این بخش تحلیلهای ابعادی برای دادههای مگنتوتلوریک دو منطقه غرب و جنوب غرب، و شمال سبلان انجام شده است.

## د-۱- تحلیل ابعادی دادههای مگنتوتلوریک منطقه غرب و جنوب غرب سبلان

از میان اندازه گیریهای مگنتوتلوریک مربوط به سالهای ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ در منطقه سبلان [ EDC, از میان اندازه گیریهای مگنتوتلوریک مربوط به سالهای ۲۰۰۷ و مستعد در منطقه غرب و جنوب غرب 2010]، ۴۱ ایستگاه اندازه گیری پوشش دهنده مناطق آنومالی و مستعد در منطقه غرب و جنوب غرب سبلان هستند [EDC, 2010]. موقعیت این ایستگاهها در شکل (۶–۶) نشان داده شده است. دادههای مورد نظر که پردازشهای اولیه روی آنها صورت گرفته بود برای ویرایش و بررسیهای تکمیلی در نرم افزار WinGlink مورد مطالعه قرار گرفتهاند. پس از محاسبه تانسور امپدانس مگنتوتلوریک، داده-های مقاومتویژه ظاهری و فاز در محدوده زمان تناوب ۲۰۰۳۱ تا ۳۵۷ ثانیه محاسبه شدهاند.

منحنیهای مقاومتویژه ظاهری و فاز برای یک تانسور کامل امپدانس شامل مؤلفههای  $X_{xx}$   $Z_{xx}$   $Z_{xy}$   $Z_{yy}$   $Z_{xy}$   $Z_{yy}$   $Z_{xy}$   $Z_{xy}$   $Z_{xy}$   $Z_{xy}$   $Z_{yy}$   $Z_{xy}$   $Z_{xy}$   $Z_{yy}$   $Z_{xy}$   $Z_{xy}$ 



شکل (د-۱): منحنیهای مقاومتویژه ظاهری و فاز برای هر چهار مؤلفه امپدانس از ایستگاه اندازه گیری ۲ در منطقه مورد مطالعه سبلان



شکل (د-۲): منحنیهای مقاومتویژه ظاهری و فاز برای هر چهار مؤلفه امپدانس از ایستگاه اندازه گیری ۱۰ در منطقه مورد مطالعه سبلان

بردارهای القایی یا بردارهای وایز و پارکینسون [Jones, 1986; Parkinson, 1962] معرفهایی برای تشخیص امتداد ژئوالکتریکی و تحلیل ابعادی دادههای مگنتوتلوریک هستند. برای این منظور بردار-های القایی ۴۱ ایستگاه اندازه گیری مگنتوتلوریک در منطقه مورد مطالعه در چهار محدوده زمان تناوب (۲۹۶۸-۰-۲۰۳۱)، ۲۹۲۴-۲۰/۱۹۰۲-۲۰/۱۹۲۴- ۲۹۲۴/ و ۱۰۰-۱ ثانیه) محاسبه و ترسیم شدهاند (شکل د-۳). با توجه به این شکل دیده میشود که بردارها برای ایستگاههای قرار گرفته در نیمه شمالی منطقه از زمانهای تناوب کوتاه به سمت زمانهای تناوب بلند از نظر جهت و بزرگی تغییر میکنند. با این وجود برای ایستگاههای قرار گرفته در نیمه جنوبی منطقه جهت و بزرگی این بردارها تغییر قابل ملاحظهای را در محدودههای مختلف زمان تناوب نشان نمیدهند. تغییر در جهت بردارهای القایی در زمانهای تناوب مختلف ممکن است ناشی از پیچیدگی ساختارهای ژئوالکتریکی زیر سطحی باشد. مقادیر کم برای بزرگی این بردارها و تغییر ناچیز جهت و بزرگی این بردارها ی باشد. مقادیر کم برای بزرگی این بردارها و تغییر ناچیز جهت و بزرگی این بردارها میتواند حاکی از

شکل (د-۴) نمودارهای قطبی امپدانس را برای تمامی ۴۱ ایستگاه اندازه گیری مگنتوتلوریک در ۴ محدوده زمان تناوب (۲۰۱۶–۲۰۲۱، ۲۱۶۴–۲۰۳۱۶، ۲۰۲۳–۲۱۶۴ و ۱۰۰–۱ ثانیه) نشان میدهد. همچنان که در فصل دوم تشریح گردید، شکل و جهت گیری نمودارهای قطبی میتواند بیان کننده ابعاد و نحوه جهت گیری ساختارهای ژئوالکتریکی باشد. با توجه به این شکل در زمانهای تناوب کوتاه مقدار |<sub>xx</sub>Z| به طور معمول از مقدار |<sub>xx</sub>Z| بزرگتر بوده ولی در برخی ایستگاهها بزرگی و شکل متقارن |<sub>xx</sub>Z| تحت تأثیر ساختارهای سه بُعدی و یا اثرات نوفه قرار گرفته است. با توجه به این نمودارها دیده میشود که مقدار بزرگی |<sub>xx</sub>Z| از زمانهای تناوب کوتاه به سمت زمانهای تناوب بلند در تمامی ایستگاهها افزایش یافته است. این موضوع به این معنی است که با افزایش عمق پیچیدگی و ماهیت سه بُعدی ساختارها بیشتر میشود.




یک تحلیل ابعادی دیگر برای بررسی ابعاد ساختارهای زیر سطحی در منطقه با استفاده از روش باهر [Bahr, 1991] انجام شده است. شکل (د-۵) مقادیر چولگی حساس به فاز را در زمانهای تناوب ۱۰/۰ تا ۱۰۰ ثانیه برای ۱۲ ایستگاه مگنتوتلوریک که پوشش دهنده کل منطقه مورد مطالعه هستند، نشان میدهد. با توجه به این شکل دیده میشود که تقریباً در زمانهای تناوب بیشتر از ۳ ثانیه، مقایر پارامتر باهر برای تمامی ایستگاهها بیشتر از ۳/۰ بوده که ممکن است ناشی از اثرات سه بعدی باشد. از آنجا که با افزایش زمانتناوب عمق نفوذ افزایش مییابد یعنی این که پاسخها در زمانهای تناوب



طولانی تر مربوط به عمقهای بالاتر هستند، لذا این نتایج نشان میدهد که با افزایش عمق، پیچیدگی

ساختار و میل به سهبُعدی بودن بیشتر میشود.

شکل (د-۴): نمودارهای قطبی امپدانس برای چهار محدوده زمان تناوب در ۴۱ ایستگاه اندازه گیری مگنتوتلوریک در منطقه غرب و جنوب غرب میدان زمین گرمایی سبلان (نمودار قطبی مربوط به مؤلفههای |Z<sub>xx</sub>| و |Z<sub>xy</sub>| به ترتیب با خطوط قرمز و سیاه نشان داده شده است)

برای بررسی بیشتر پیچیدگی ساختارهای ژئوالکتریکی زیر سطحی در منطقه، از برنامه تحلیل ابعادی والدیم [Marti et al., 2009]، که اصول تئوری آن در فصل دوم بیان گردید، استفاده شده است. تحلیل ابعادی توسط این برنامه برای دادههای مگنتوتلوریک در کلیه ایستگاهها صورت گرفته است. نتایج این بررسیها برای ۸ ایستگاه اندازه گیری مگنتوتلوریک که پوشش دهنده کل منطقه مورد مطالعه میباشند در جدول (د-۱) به عنوان ایستگاههای معرف نشان داده شده است. این تحلیلها برای ۶ محدوده زمانتناوب در هر ایستگاه انجام شده است. نتایج به دست آمده از این بررسیها نشان میدهد که ساختارهای زیر سطحی از نظر ابعادی غالباً برای زمانهای تناوب بلندتر از ۱/۱۶۲۸ ثانیه، سهبُعدی بوده و برای زمانهای تناوب کوتاهتر از ۰/۰۸۹۳ ثانیه، یک بُعدی یا یک بُعدی متأثر از اثرات سهبُعدی سطحی هستند.

اگر چه نتایج بررسی بردارهای القایی و تحلیل ابعادی باهر و والدیم بیان کننده پیچیدگی ساختارهای زیر سطحی منطقه به خصوص برای زمانهای تناوب بلند است اما نمودارهای قطبی امپدانس و مقادیر کم امپدانسهای قطری از نظر قدر مطلق (شکلهای د-۱ و د-۲ به عنوان مثال)، بیان کننده وجود یک امتداد ناحیهای تقریبی در جهت شمال-جنوب هستند. در بخش مدلسازی دادهها در فصل ششم، نشان داده میشود که با به کار گرفتن این امتداد ناحیهای تقریبی و حذف دادههای حاوی نوفه مؤلفههای قطری امپدانس در مدلسازی معکوس سه بعدی، بازدهی کار بسیار بهتر از مدلسازی معکوس سه بعدی دادههای تانسور کامل امپدانس می باشد.



شکل (د-۵): مقادیر چولگی حساس به فاز (چولگی باهر) در زمانهای تناوب ۰/۰۱ تا ۱۰۰ ثانیه، برای ۱۲ ایستگاه مگنتوتلوریک که پوشش دهنده کل محدوده مورد مطالعه غرب و جنوب غرب میباشند

جدول (د-۱): نتایج تحلیل ابعادی ۸ ایستگاه مگنتوتلوریک معرف در منطقه مورد مطالعه توسط برنامه والدیم. شاخص-های 1D، 2D و 2D به ترتیب مشخص کننده ساختارهای ژئوالکتریکی یک، دو و سه بُعدی هستند. شاخص 3D/1D2D مشخص کننده آشفتگیهای گالوانیک روی یک ساختار یک یا دو بُعدی است و دلالت بر عدم به دست آوردن امتدادی برای این ساختارها است. همچنین 3D/2D نشان دهنده یک حالت عمومی از آشفتگیهای گالوانیک سه بُعدی روی

			- ·, ·,			
امتداد	ابعاد	تعداد زمان تناوب	بیشترین زمان-	كمترين زمان-	محدوده زمان-	ایستگاه
		در محدوده	تناوب (ثانيه)	تناوب (ثانيه)	تناوب	مگنتوتلوريک
-	1D	٧	•/•• AY	•/••٣١	١	
۴۱/۳۷	1D	١٣	٠/٠٨٩٣	•/• 1 • ٣	٢	
-	3D/2D	14	٠/٩٨٠۴	•/1•۶۴	٣	۲
_	3D	١٣	٩/٣۴۵٨	١/١۶٢٨	۴	١
-	3D	٣	٩ • / ٩ • ٩ ١	11/8888	۵	
_	3D	۶	FTF/FX17	۱۰۸/۶۹۵۷	۶	
-	3D	٧	•/•• AV	۰/۰۰۳۱	١	
۳۷/۱۵	3D/2D	١٣	٠/٠٨٩٣	•/• ١•٣	٢	
۶۲/۶ <b>۸</b>	3D/2D	14	•/9. • ۴	۰/۱۰۶۴	٣	c
-	3D	١٣	٩/٣۴۵٨	١/١۶٢٨	۴	7
-	3D	٣	٩ • / ٩ • ٩ ١	11/8888	۵	
-	3D	۵	KAK/11V8	۱۰۸/۶۹۵۷	۶	1
-	3D	٢	•/•• AV	•/•• **	١	
-	3D	١٠	٠/•٨٩٣	۰/۰ ۱ ۰ ۳	٢	
-	3D	٩	•/9. • ۴	۰/۱۰۶۴	٣	۲۸
-	3D	17	٩/٣۴۵٨	١/١۶٢٨	۴	
-	3D	٨	٩ • / ٩ • ٩ ١	11/8888	۵	
_	3D/1D2D	١٣	٠/٠٨٩٣	•/• ١•٣	٢	
-	3D/1D2D	14	•/91.•4	۰/۱۰۶۴	٣	
-	3D	١٣	٩/٣۴۵٨	١/١۶٢٨	۴	۲۵
-	3D	۴	٩ • / ٩ • ٩ ١	11/8888	۵	
-	3D	٢	149/2027	۱۰۸/۶۹۵۷	۶	
-	1D	۵	•/•• AV	• / • • ٣ ١	١	
-	1D	۵	٠/•٨٩٣	۰/۰۱۰۳	۲	
-	3D	۵	•/91.•4	•/1•۶۴	٣	T 1 T
-	3D	١٠	۵/۶۸۱۸	1/1888	۴	
-	3D	٣	۲۱۷/۳۹۱۳	۱۰۸/۶۹۵۷	۶	
-	1D	Y	•/•• • • • • • • • • • • • • • • • • •	۰/۰۰۳۱	١	
۴۲/۸۱	3D/2D	٦٢	•/• ٨٩٣	•/• ١•٣	٢	
-	3D	٦٢	•/91.•4	•/1•۶۴	٣	١٠
-	3D	٦٢	٩/٣۴۵٨	١/١۶٢٨	۴	
-	3D	۴	٩ • / ٩ • ٩ ١	11/3838	۵	

ساختار دوبُعدي است

امتداد	ابعاد	تعداد زمان تناوب در محدوده	بیشترین زمان- تناوب (ثانیه)	كمترين زمان تناوب (ثانيه)	محدوده زمان- تناوب	ایستگاه مگنتوتلوریک
-	3D	Y	•/• • AY	•/••٣١	١	
-	3D	١٣	•/• ٨٩٣	•/• ١•٣	٢	767
-	3D	١٢	•/91.•4	•/1•۶۴	٣	110
-	3D	۵	۵/۶۸۱۸	١/١۶٢٨	۴	
१/९९	3D/2D	Y	•/• • AY	•/••٣١	١	
۱/۴۷	3D/2D	١٣	٠/٠٨٩٣	•/• \ • ٣	٢	
۴۸/۸۰	2D	١۴	•/91.•4	•/1•۶۴	٣	<b>4</b> <del>6</del> V
-	3D	١٢	٩/٣۴۵٨	١/١۶٢٨	۴	117
-	3D	٢	9 • /9 • 9 1	11/8888	۵	
-	3D	٢	438/8812	۱۰۸/۶۹۵۷	۶	

ادامه جدول (د-۱)

## د-۲- تحلیل ابعادی دادههای مگنتوتلوریک منطقه شمال سبلان

منطقه شمال سبلان شامل ۱۵ ایستگاه مگنتوتلوریک بوده که در شکل (۶–۵) موقعیت آنها مشخص شده است. همانند بخش قبل تحلیل ابعادی برای دادههای این منطقه نیز انجام می شود. البته در اینجا فقط از روشهای چولگی حساس به فاز باهر و تحلیل والدیم استفاده می شود. شکل (د-۶) نتایج تحلیل باهر را برای ۵ ایستگاه مگنتوتلوریک که معرف منطقه مورد مطالعه هستند، نشان می دهد. این نتایج تقریباً مشابه نتایج نشان داده شده در شکل (د-۵) هستند. با توجه به این نتایج (شکل د-۶) دیده می شود که تقریباً در زمانهای تناوب بیشتر از ۳ ثانیه، مقایر پارامتر باهر برای تمامی ایستگاهها بیشتر از ۳/۰ بوده که ممکن است ناشی از اثرات سه بعدی باشد. این نتایج نشان می دهد که با افزایش

نتایج تحلیل ابعادی والدیم برای ۵ ایستگاه اندازه گیری مگنتوتلوریک، به عنوان ایستگاههای معرف منطقه مورد مطالعه، در جدول (د-۲) نشان داده شده است. همانند بخش قبل این تحلیلها برای ۶ محدوده زمان تناوب در هر ایستگاه انجام شده است. نتایج به دست آمده از این بررسیها نیز نشان میدهد که ساختارهای زیر سطحی از نظر ابعادی غالباً سه بعدی بوده مگر برای برخی زمانهای تناوب کوتاه، که در این آنها ساختارها یک بعدی، یک بعدی متأثر از اثرات سه بعدی یا دوب عدی هستند.



شکل (د-۴): مقادیر چولگی حساس به فاز (چولگی باهر) در زمانهای تناوب ۲۰۱۰ تا ۱۰۰ ثانیه، برای ۵ ایستکاه مگنتوتلوریک که پوشش دهنده کل محدوده مورد مطالعه شمال سبلان میباشند

جدول (د-۲): نتایج تحلیل ابعادی ۵ ایستگاه مگنتوتلوریک معرف در منطقه شمال سبلان توسط برنامه والدیم. شاخصهای 1D، 2D و 3D به ترتیب مشخص کننده ساختارهای ژئوالکتریکی یک، دو و سه بُعدی هستند. شاخص 3D/1D2D مشخص کننده آشفتگیهای گالوانیک روی یک ساختار یک یا دو بُعدی است و دلالت بر عدم به دست آوردن امتدادی برای این ساختارها است. همچنین 3D/2D نشان دهنده یک حالت عمومی از آشفتگیهای گالوانیک

امتداد	ابعاد	تعداد زمان تناوب	بيشترين زمان-	كمترين زمان-	محدوده زمان-	ایستگاه
		در محدوده	تناوب (ثانيه)	تناوب (ثانيه)	تناوب	مگنتوتلوریک
۵1/9۲	2D	٢	•/••AY	•/••٧۶	١	
-	3D	١١	٠/٠٨٩٣	•/• ١•٣	٢	
49/47	2D	١٣	٠/٩٨٠۴	•/1•۶۴	٣	11
-	3D	١١	٩/٣۴۵٨	1/1888	۴	
-	3D	۷	•/•• AY	•/••٣١	١	
-	3D	۱۳	٠/٠٨٩٣	•/•١•٣	٢	
-	3D	١۴	•/٩٨•۴	•/1•۶۴	٣	۲۰۲
-	3D	١١	۹/۳۴۵۸	1/1888	۴	
۲۸/۲۱	3D/2D	۴	۲۱۷/۳۹۱۳	۱۰۸/۶۹۵۷	۶	
-	3D	۴	•/•• AY	•/••۴۴	١	
-	1D	11	٠/٠٨٩٣	•/•١•٣	٢	
22/92	3D/2D	١۴	٠/٩٨٠۴	•/1•۶۴	٣	204
-	3D	٨	۹/۳۴۵۸	1/1888	۴	
-	3D	11	۵۹۵/۲۳۸۱	۱۰۸/۶۹۵۷	۶	
-	1D	٧	•/•• AY	•/••٣١	١	
-	1D	۱۳	٠/٠٨٩٣	•/•١•٣	٢	۲۰۸
-	3D	٩	٠/٩٨٠۴	•/1•۶۴	٣	
-	3D/1D2D	۶	•/••AY	•/••٣١	١	
-	3D/1D2D	۱۳	٠/٠٨٩٣	•/•١•٣	٢	
-	3D	١۴	•/٩٨٠۴	•/1•۶۴	٣	۲۱.
-	3D	Y	٩/٣۴۵٨	1/1888	۴	
-	3D	۴	$(\Delta \cdot \Delta) \cdot \Delta \cdot \Delta$	۱۰۸/۶۹۵۷	۶	

سه بعدى روى ساختار دوبعدى است

## Abstract

Magnetotelluric (MT) is an electromagnetic (EM) method that uses natural EM fields for mapping the variations of electrical resistivity within the earth. High penetration depth of EM fields in MT method has made its wide application in deep target exploration such as geothermal and hydrocarbon resources. For this reason MT method has special status among the geophysical methods. Similar to other geophysical methods, modeling of the MT data is necessary for interpreting of subsurface geological structures.

The MT inverse modeling is known as a non-linear and highly ill-posed problem, so to prevent the dilemma of none unique solution and to obtain meaningful results, it is normally solved using Tikhonov's regularization method. In solving this regularized inverse problem, a regularization parameter is required to control the weight given to minimization of the model norm relative to minimization of the data misfit. Clearly, a large amount of regularization parameter favors a small solution model norm at the cost of a large data misfit, while a small amount of regularization parameter has the opposite effect. In the case of small regularization value the non-real structures may be produced in the model. Thus, the regularization parameter is an important quantity which controls the properties of the regularized solution, hence it must be chosen carefully. In the available MT data inversion algorithms, this parameter is estimated using the trial and error or by the discrepancy principle method. In this study, it is attempted to develop one or several techniques to choose the optimal value of the regularization parameter automatically for two and three-dimensional (2-D & 3-D) inversion of the MT data so that the speed, accuracy and the computational efficiency of inversion are enhanced.

To achieve the goals, a comprehensive study was done to find out how this regularization parameter is selected in the general ill-posed problems and 12 suitable schemes have been selected. Once the necessary improvement has been done on some of them, they were programmed within the Matlab software to be used as a part of the main 2-D inversion program of MT data. These methods are including discrepancy principle, Generalized Cross Validation (GCV), modified GCV, L-curve with maximum curvature algorithm, L-curve with adaptive pruning algorithm, error estimation from Brezineski et al. and Reichel et al., fixed point, quasi-optimality, Chi-square, a scheme based on Meju approach and ratio of misfit to model norm methods. These methods have been coded in the Matlab software and then inserted in an available

magnetotelluric (MT2DInvMatlab) 2-D inversion source code. Subsequently inversion of two synthetic and two real data sets have been implemented by the modified 2-D inversion algorithm and the necessary analysis have been done. The results indicate that, the modified GCV, L-curve with adaptive pruning algorithm, ratio of misfit to model norm and a scheme based on Meju approach operate better than to the other methods for selecting the regularization parameter, considering to accuracy, automaticity, and computational efficiency of 2-D inversion.

In the next step, ratio of misfit to model norm method was modified to the ratio of misfit to sum of misfit and model norm and coded in the Matlab as a proposed method for choosing regularization parameter automatically in an available source code (WSINV3DMT) for efficient 3-D inversion of MT data. Once the required modification of the main 3-D inversion program was made by implementation of the proposed method for optimally selecting of regularization parameter, then the necessary investigations have been done by performing 3-D inversions on two synthetic and two real MT data sets of Sabalan geothermal field. The obtained results of the 3-D inversion using the proposed method were compared for the accuracy and computational efficiency to the inversion results of the original 3-D inversion program in which the discrepancy principle method is used to select the regularization parameter of the inversion. The results show that the proposed method considerably increases the accuracy of the modeling and in addition reduces computational time of 3-D inversion at least 30 percent compared to the original available method of inversion that both of them and particularly the latter one is very important in 3-D inversion. Using the results of the 3-D inversion obtained by the proposed method and integrating them with other exploration data, the locations of the geothermal sources (i.e. the hot zones) were determined in the north and west part of mount Sabalan. Moreover the locations of relevant alteration zones were identified by low resistivity anomalies wherein they are spread out along the faults and main structures in the area.

**Keywords:** Magnetotelluric, modeling, 2-D inversion, 3-D inversion, regularization parameter, Sabalan geothermal field.



Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering (Mining Exploration Dept.)

## Optimal estimation of the regularization parameter for improving 2-D and 3-D inversion of Magnetotelluric (MT) data

Reza Ghaedrahmati

## Supervisor(s): Prof. Ali Moradzadeh Associated Prof. Nader Fathianpour

Advisors: Dr. Seong Kon Lee Dr. Sohail Porkhial

Sep. 2013