

## ارزیابی عملکرد روش نوفه خالص در حذف نوفه الکترومغناطیسی از داده‌های لرزه‌نگاری: با استفاده از مدل مصنوعی مارموزی ۲

محمد رضا گریوانی<sup>۱</sup>، محمدعلی ریاحی<sup>۲\*</sup>، ایرج عبدالهی<sup>۳</sup> فرد<sup>۳</sup> و زهره سادات ریاضی‌راد<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دکترای زمینی‌شناسی، مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> دانشیار، گروه زمینی‌شناسی، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰)

### چکیده

نوفه‌زدائی از داده‌های لرزه‌نگاری همواره یکی از مهمترین دغدغه‌های پردازشگران این داده‌ها بوده است. در نوفه‌زدائی با روش نوفه خالص با استفاده از راهکار هیبرید سخت‌افزار و نرم‌افزاری، پس از برداشت نوفه الکترومغناطیسی خالص توسط گیرنده EM که به صورت هم‌زمان با داده‌های لرزه‌نگاری برداشت شده و پس از انجام اصلاح دامنه و اصلاح فاز بر روی نویز، و کم کردن آن از داده‌های رد لرزه‌نگاری، داده نوفه‌زدائی شده بدست می‌آیند. این رویکرد با تمرکز بر عوامل متغیر در گیرنده EM مثل دامنه، فاز و فرکانس امکان حذف نوفه بدون آسیب به سیگنال‌های لرزه‌ای ارزشمند را فراهم می‌کند. در این پژوهش، اثربخشی روش "نوفه خالص" برای حذف نوفه الکترومغناطیسی از داده‌های لرزه‌نگاری با استفاده از مدل مصنوعی مارموزی ۲ بررسی شده است. این مطالعه با استفاده از داده‌های مدل مصنوعی سعی کرده تا نتایج دقیق‌تر و کنترل‌پذیرتری به دست آورد، بطوریکه، نتایج حاصل به راحتی قابل ارزیابی و راستی‌آزمایی باشند. در این تحقیق، بجای اضافه کردن نوفه EM مصنوعی به داده‌های لرزه‌نگاری از نوفه EM واقعی برداشت‌شده استفاده شده است. مدل مصنوعی مارموزی ۲ به دلیل ساختار پیچیده و چندلایه، محیطی مناسب برای ارزیابی کارایی این روش فراهم کرده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانسته است با دقت بالایی نوفه EM را از داده‌های لرزه‌نگاری حذف کند، بدون اینکه به سیگنال‌های اصلی سازندهای هدف مخصوصاً وقتی که با فرکانس نوفه یکسان هستند آسیب برساند. نتایج بر اساس تحلیل خطا برای تعداد نمونه بهینه بازه ۱-۵۰، ضریب کاهش اصلاح دامنه گیرنده EM، موقعیت قرارگیری گیرنده EM5 و نسبت سیگنال به نوفه ۳ به عنوان مقادیر بهینه بدست آمدند. با استفاده از پارامترهای تعیین شده مقدار خطای ناچیز از ۰.۰۰۹٪ تا ۰.۰۰۶٪ بدست آمد که روش نوفه خالص به‌گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای لرزه‌نگاری در محیط‌هایی با نوفه شدید برق فشارقوی تبدیل شود.

**کلمه‌های کلیدی:** شبکه برق فشارقوی، نوفه الکترومغناطیسی، نوفه خالص، مدل مارموزی ۲، مدل مصنوعی

## ۱ مقدمه

در مطالعات لرزه‌نگاری، کاهش اثر نویزهای مزاحم یکی از چالش‌های اصلی است که مستقیماً بر کیفیت و دقت داده‌های جمع‌آوری شده تأثیر می‌گذارد. نویزهای همدوس، به ویژه نوفه الکترومغناطیسی (EM) ناشی از شبکه‌های برق (هاووس، ۲۰۱۲)، یکی از مهم‌ترین عوامل مزاحم در پروژه‌های لرزه‌نگاری محسوب می‌شوند. این نویزها، به ویژه در مناطق نزدیک به خطوط انتقال برق، به‌طور گسترده‌ای بر روی داده‌های لرزه‌نگاری مشاهده می‌شوند و می‌توانند کیفیت داده‌های برداشت شده را متاثر کنند (هانساگر و هارگریوز، ۲۰۰۷). در روش‌های مرسوم، برای حذف این نوع نویزها از فیلترهای آنالوگ و دیجیتال استفاده می‌شوند (پرواکیس، ۲۰۰۷) که اغلب باعث حذف یا تغییر ویژگی‌های سیگنال‌های با ارزش در محدوده فرکانسی غالب این نوفه می‌شوند. این تغییرات ممکن است در نهایت به کاهش دقت در تفسیر داده‌های زیرسطحی منجر شود مخصوصاً در مواردی که هدف مطالعه اهداف کم عمق باشند.

به منظور بهبود این وضعیت، در پژوهشی با رویکردی نوین به نام "نوفه خالص" به‌جای تکیه بر فیلترها و روشهای حذف نوفه سنتی، بر اساس ثبت هم‌زمان نویزهای الکترومغناطیسی و داده‌های لرزه‌نگاری استفاده شده‌است. در این مطالعه به‌طور خاص از مدل مصنوعی مارموزی ۲ به عنوان بستر ارزیابی کارایی روش "نوفه خالص" استفاده شده‌است. مدل‌های مصنوعی به‌دلیل قابلیت کنترل و راستی‌آزمایی، محیطی ایده‌آل برای بررسی کارایی روش‌های حذف نوفه فراهم می‌کنند. این پژوهش، بجای اضافه کردن نوفه EM مصنوعی به مدل، از نوفه EM واقعی برداشت شده در یک محیط عملیاتی استفاده کرده‌است. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق و عینی روش را فراهم کرده و نتایج حاصل از آن می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کاربردی و مؤثر در پروژه‌های

لرزه‌نگاری مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب، انتظار می‌رود که استفاده از مدل مصنوعی برای روش "نوفه خالص" کمک کند تا حذف دقیق‌تر نویزها انجام و سیگنال‌های با ارزش حفظ شوند و نتیجتاً حذف نویزهای الکترومغناطیسی از داده‌های لرزه‌نگاری بهبود قابل توجهی پیدا کنند.

## ۲ روش پژوهش

از اولین روش‌های حذف نوفه الکترومغناطیسی می‌توان به استفاده از فیلترهای میان‌گذر سخت‌افزاری اشاره کرد. این فیلترها در زمانی که پهنای بانده دریافت داده‌های لرزه‌نگاری بسیار کم بود جزو راه حل‌های قابل قبول برای مهندسين ثبت داده محسوب می‌شد. با گذشت زمان و افزایش پهنای بانده دریافت داده‌های لرزه‌نگاری، روش‌های نرم‌افزاری جایگزین روشهای سخت‌افزاری شدند (گاردنر و نوپوف، ۱۹۷۴). نقطه ضعف بزرگ استفاده از فیلترهای سخت‌افزاری تأثیر غیر قابل بازگشت استفاده از این نوع فیلترها و از بین رفتن داده‌های هم‌فرکانس با نوفه بود. روشهای نرم‌افزاری (پردازشی) حذف نویز، صدمه غیر قابل بازگشت به اصل داده‌ها نمی‌زنند و می‌توان بارها انواع مختلف مراحل حذف نوفه را با هدف یافتن بهترین و کارآمدترین روش، تکرار کرد. مطالعات زیادی در زمینه معرفی روش‌های نرم‌افزاری حذف این نوفه انجام شده‌است که تعدادی از آنها به شرح زیر می‌باشند:

- حذف نوفه هارمونیک در داده‌های ژئوفیزیکی با استفاده از روش تطبیقی (نیمن و گایزر، ۱۹۸۳).
- استفاده الگوریتم فیلترسازی دیجیتال مبتنی بر کمترین مربعات (Least-Squares) (لینویل و میک، ۱۹۹۲).
- استفاده فیلتر هوم (Hum Filter) برای حذف نوفه حاصل از شبکه برق (شیا و میلر، ۲۰۰۰).
- حذف نویزهای هارمونیک چندگانه از سیگنال‌های

شده‌است. یکی از الزامات این روش ثبت داده‌های لرزه‌نگاری به‌همراه داده‌های گیرنده EM به‌صورت هم‌زمان (synchronized) است. پس از برداشت داده‌ها مراحل پردازش بر روی داده‌ها انجام می‌شود. اگرچه به نظر می‌رسد که بهترین راه حل برای اجرایی شدن این روش چیدمان تعداد برابری از گیرنده EM به‌همراه گیرنده‌های لرزه‌نگاری لازم باشد اما با توجه به اینکه چیدمان، برداشت و ثبت داده‌های گیرنده EM مستلزم هزینه زیاد است و از آنجائیکه خصوصیات امواج الکترومغناطیسی مورد استفاده در این پژوهش شامل فرکانس و فاز، در هر شبکه برق در محدوده به بزرگی پروژه لرزه‌نگاری در یک منطقه ثابت است. بنابراین حتی اگر یک شبکه برق برای صدها گیرنده لرزه‌نگاری هم نوفه ایجاد کند برداشت فقط یک گیرنده EM که در هر کجای شبکه قرار داشته باشد می‌تواند برای نوفه‌زدایی تمامی گیرنده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. فاز و فرکانس نوفه دریافت شده جزو خصوصیات مهم این روش می‌باشند اما تنها خصوصیات مهم برای حذف نوفه نیستند و نیاز است تا دامنه نوفه در تمام این گیرنده‌ها را نیز داشته باشیم. دامنه و فاز نوفه دریافتی به‌عوامل زیادی بستگی دارد و در هر کانال گیرنده نسبت به کانال‌های دیگر متفاوت است حتی در زمانهای مختلف نیز تغییرات در کانالها ممکن است با هم رابطه خطی نداشته باشند (گریوانی و همکاران، ۲۰۲۵).

تخمین و یا پیشبینی دامنه و فاز نوفه دریافتی در هر کانال گیرنده لرزه‌نگاری به‌عوامل بسیار زیادی بستگی دارد که در عمل استفاده از روش‌های محاسباتی را برای بدست آوردن آنها بسیار سخت و یا غیر ممکن می‌کند. در این مطالعه سعی شده است به‌جای تخمین و یا پیشبینی دامنه و فاز نوفه دریافتی، نوفه الکترومغناطیسی خالص را ثبت کرده و سپس میزان مورد نیاز برای اصلاح دامنه و فاز در موقعیت هر گیرنده لرزه‌نگاری محاسبه شود. به

سیسموالکتریک (باتلر و راسل، ۲۰۰۳).

- فیلتر مبتنی بر میانگین (mean-based filter) (کارسلی و دوندورور، ۲۰۱۸).

- حذف نوفه EM در برداشت‌های VLF-EM (حسین و همکاران، ۲۰۲۰).

- حذف نویزهای هارمونیک در داده‌های sNMR با استفاده از تحلیل طیفی (لارسن و همکاران، ۲۰۲۲).

- استفاده از شبکه عصبی DARE U-Net برای کاهش نوفه تصادفی از داده‌های لرزه‌ای (بنجید و همکاران، ۲۰۲۴).

### ۳ روش نوفه خالص

روشهای مرسوم حال حاضر حذف/تضعیف نوفه الکترومغناطیسی حاصل از شبکه‌های برق، بر مبنای تکنیکهای پردازشی غیرفعال (Passive) پایه‌گذاری شده‌اند. در تمامی این روشها به‌دلیل استفاده از الگوریتم‌های ریاضی، تخمین و یا شبیه‌سازی از نوفه انجام می‌شود. از طرفی تخمین نوفه که از داده لرزه‌نگاری نویزی بدست می‌آید نیز به‌دلیل اینکه عوامل بسیار زیادی مثل وجود سیگنال و یا نویزهای هم‌فرکانس با نوفه دیگری که در داده وجود دارد از دقت کمی برخوردار خواهد بود و شبیه‌سازی نوفه به‌صورت دقیق قابل انجام نمی‌باشد. آسیب به داده‌های هم‌فرکانس با نوفه به‌ویژه زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که هدف برداشت، شناسایی اهداف کم‌عمق (با عمق کمتر از ۲۰۰۰ متر) با فرکانس هدف برابر با نوفه باشد (ایفچور و جرویس، ۲۰۰۲).

روش نوفه خالص یک روش ترکیبی (Hybrid) سخت‌افزاری و نرم‌افزاری را برای حل مشکلات روش‌های مرسوم ارائه نموده است. بخش سخت‌افزار شامل یک گیرنده امواج الکترومغناطیسی خالص می‌باشد که به نام گیرنده نوفه خالص (گیرنده EM) نامگذاری

عبارت دیگر استفاده از اصلاح دامنه و فاز کمک خواهد کرد تا نیازی به قرار دادن یک گیرنده EM در کنار هر کانال نویزی گیرنده لرزه‌نگاری نباشد.

در مراحل مختلف پردازش این روش از فیلتر میانگذر استفاده می‌شود که لازم است تاثیر مخرب استفاده از فیلتر نیز مد نظر قرار گیرد (ماتی، چپیر، ۲۰۲۴). با انجام مراحل پردازشی با پارامترهای کاملاً مشابه بر روی داده‌های لرزه‌نگاری و گیرنده EM باعث می‌شود تا تاثیر مراحل پردازشی به صورت یکسان اعمال و از ایجاد اغتشاش یا خطای ناشی از تفاوت در پردازش جلوگیری شود و نتایج بدست آمده را متاثر نکند.

#### ۴ مدل مصنوعی

مدل‌های مصنوعی در پژوهش‌های ژئوفیزیکی به عنوان ابزاری قدرتمند که امکان ایجاد محیط‌های کنترل شده برای شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده زمین‌شناسی را فراهم می‌کنند مورد استفاده قرار می‌گیرند. موفقیت در انجام مدل سازی وابستگی مستقیم به شناخت کلیه عوامل در آن مدل سازی دارد. در مدل‌سازی‌های انجام شده در حیطه لرزه‌نگاری که به بررسی و حذف اثر نویزها می‌پردازد ۲ عامل اصلی وجود دارد که باید توجه خاصی به شناخت آنها شود (شوستر، ۲۰۱۷). این عوامل عبارتند از داده لرزه‌نگاری یا همان مدل مصنوعی، و نویزی که قرار است به این داده اضافه شود. هر دو این عوامل می‌توانند تاثیر به سزایی در نتایج نهایی تحقیق بگذارند (ایلماز، ۲۰۰۱).

مدل مصنوعی Marmousi برای تحلیل داده‌های لرزه‌ای برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ معرفی شد (ورستیج، ۱۹۹۴). این مدل نقش مهمی در کاهش عدم قطعیت و توسعه روش‌های جدید در ژئوفیزیک داشته و به عنوان ابزاری استاندارد برای آزمایش و ارزیابی الگوریتم‌های پردازش داده‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده قرار

گرفته‌است. در سال ۲۰۰۶، نسخه به روز شده‌ای از مدل مارموزی با نام Marmousi 2 معرفی شد که شامل ویژگی‌های الاستیک و داده‌های چندمولفه‌ای است. مدل مارموزی ۲ یک مدل سرعتی پیچیده و مصنوعی است که در زمینه‌ی لرزه‌نگاری و پردازش داده‌های لرزه‌ای برای ارزیابی و آزمایش الگوریتم‌های تصویربرداری لرزه‌نگاری استفاده می‌شود. این مدل برای شبیه‌سازی یک محیط زیرسطحی پیچیده طراحی شده‌است و بر پایه‌ی مدل اصلی مارموزی توسعه یافته که دارای جزئیات و پیچیدگی‌های بیشتری است (مارتین و همکاران، ۲۰۰۶). پس از بررسی‌های لازم، مدل مارموزی ۲ به عنوان مدل مصنوعی مورد استفاده در این پژوهش انتخاب شد. نکته قابل توجه برای انتخاب این مدل، وجود سیگنال‌های قابل توجه در محدوده فرکانس ۵۰ هرتز تا ۵۰۰ هرتز تا تاثیر وجود سیگنال قوی ۵۰ هرتز کمک خواهد کرد تا تاثیر این روش علاوه بر حذف و یا کاهش نوفه ۵۰ هرتز، بر فرکانس‌های هدف نزدیک به این فرکانس بهتر مورد بررسی قرار گیرند.

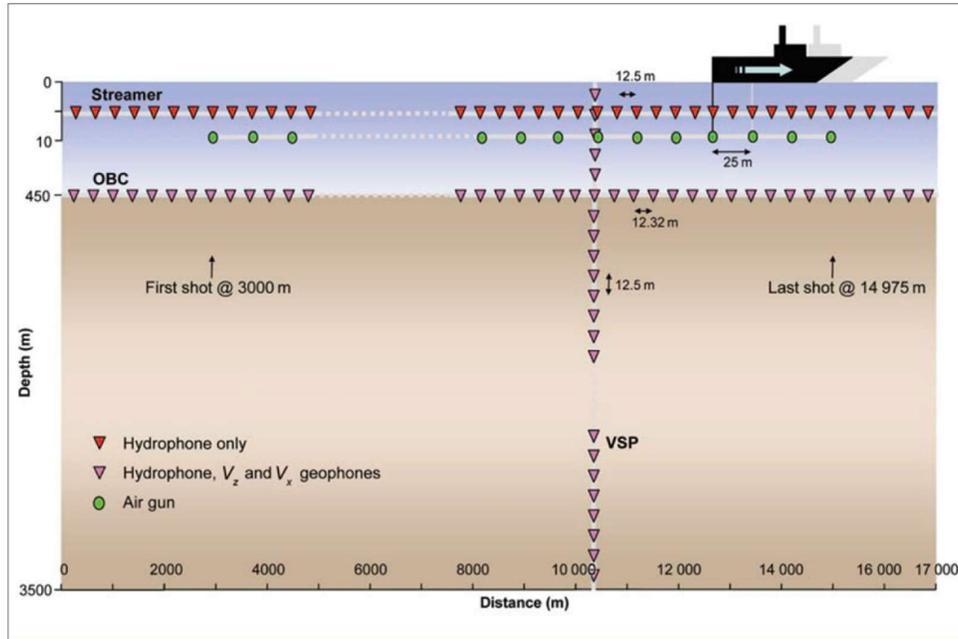
#### ۵ مدل مارموزی ۲

مارموزی ۲ دارای تغییرات پیچیده سرعت موج P و S است که ساختارهای زیرسطحی واقع بینانه مانند لایه‌های پیچیده، شکستگی‌ها و ناهمواری‌های جغرافیایی را در نظر می‌گیرد و برای شبیه‌سازی محیط‌های زیرسطحی که ممکن است شامل مخازن نفت و گاز باشد، استفاده می‌شود. مدل به گونه‌ای طراحی شده که چالش‌های واقعی را در پردازش داده‌های لرزه‌ای، مانند تداخل امواج و پیچیدگی‌های ناشی از مسیرهای چندگانه امواج را به خوبی نشان دهد. این مدل دارای ۱۹۹ افق می‌باشد که لیتولوژی آن شامل ماسه‌سنگ‌ها، شیل‌ها، سنگ آهک‌ها و مارل‌ها هستند.

در نمای خط لرزه‌نگاری مدل مارموزی ۲ در شکل (۱)

قرار خواهند گرفت (هرچند که استفاده از دریافتهای مولفه S نتایج یکسانی را ارائه خواهند کرد). منبع انرژی مورد استفاده Air Gun در عمق ۱۰ متری مورد استفاده قرار گرفته است.

سه نوع برداشت همزمان، دریائی با تک گیرنده هیدروفون در عمق ۵ متری، OBC در کف آب با عمق ۴۵۰ متر با گیرنده ۳ مولفه ای و VSP مشاهده می‌شوند. در تحقیق حاضر تنها دریافتهای مولفه VP مورد استفاده



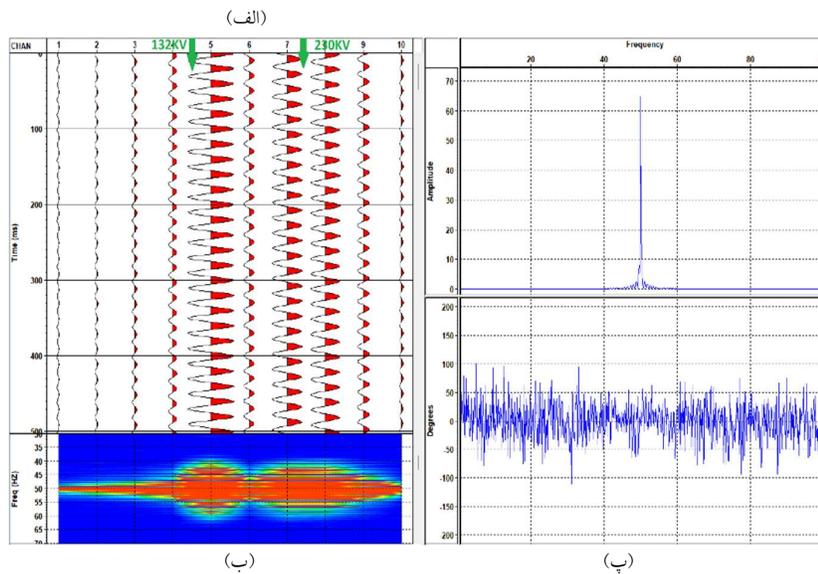
شکل ۱. نمای خط لرزه‌نگاری مدل مارموزی ۲. مقیاس‌های محورهای افقی و عمودی یکسان نیست. برخی دیگر از مشخصات برداشت در شکل (۱) **Error! Reference source not found.** به این شرح می‌باشند: نرخ نمونه برداری 2 ms، طول زمان برداشت 5 s، طول استریمر ۱۷ کیلومتر به تعداد ۱۳۶۱ گیرنده که در تمام برداشتهای فعال بوده، تعداد ۴۸۰ برداشت وجود دارد و نرم‌افزار Madagascar برای مدل‌سازی با روش اختلاف محدود (finite difference) بر روی میدان موج (wavefield) مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۶ ساختن انتخاب نویز

محتوی فرکانس و دامنه متناسب (دامنه نوفه نسبت به دامنه سیگنال هم فرکانس خودش در داده‌های لرزه‌نگاری) می‌باشد. برای ساختن نوفه لازم است تا ماهیت نوفه به خوبی شناخته شده و سپس نویزی با بیشترین انطباق مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه داده‌های نوفه برداشت شده در عملیات واقعی لرزه‌نگاری در دسترس است ابتدا این داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل (۲) موقعیت عبور کابل‌های فشارقوی با ولتاژ ۱۳۲ و ۲۳۰ کیلوولت که عمود بر گیرنده‌های لرزه‌نگاری قرار دارند مشاهده می‌شوند و با بررسی طیف فرکانس هر

شناخت عمومی از نوفه الکترومغناطیسی برق (نوفه ۵۰ هرتز) ما آن را به صورت تک فرکانس و باثبات شناخته می‌شود. در حالی که فرکانس این نوفه مطابق شکل (۲) دارای تغییرات (تلرانس) است و همچنین در طی زمان تغییرات دامنه هم دارد. این مسائل با پیش فرض مطالعات انجام شده تا امروز مغایرت دارد که در این مطالعات به همین دلیل به انتخاب نوفه اهمیت زیادی داده شده است. لازم است نویزی با بیشترین انطباق با نوفه حاصل از نوفه برق برای مدل‌سازی استفاده شود. این تطابق شامل



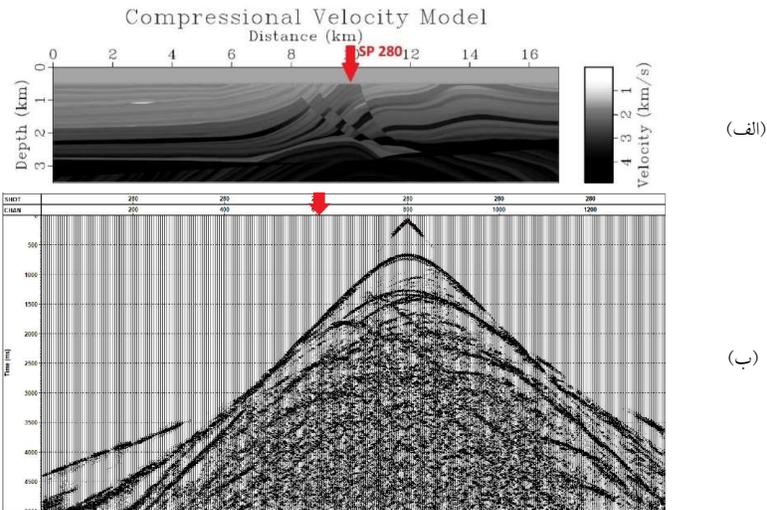
شکل (۱). الف) ۵۰۰ میلی‌ثانیه اول از شکل موج‌های نوفه خالص ۱۰ گیرنده EM و موقعیت عبور خط ۱۳۲ و ۲۳۰ کیلوولت با فلش سبز، ب) طیف فرکانس گیرنده‌ها، پ) آنالیز فرکانس متوسط تمام گیرنده‌ها.

به کانال‌هایی که بهترین شاخص برای انجام این پژوهش هستند اضافه کرد. مطابق **Error! Reference source not found.** شکل (۳-الف)، موقعیت برداشت شماره ۲۸۰ که در برگیرنده بیشترین تعداد پدیده‌های زیر سطحی پیچیده با حضور گسل و تعداد زیادی لایه بندی را به نمایش گذاشته است انتخاب شد. در شکل (۳-الف) تصویر مقطع لایه‌بندی زمین‌شناسی موج P که موقعیت برداشت ۲۸۰ با فلش قرمز مشخص شده است و در تصویر برداشت شماره ۲۸۰ که موقعیت تریس‌های شماره ۶۰۰ تا ۶۰۹ با فلش قرمز مشخص شده‌اند. شرایط همچون فاصله از نقطه منبع انرژی، تعداد بیشتر لایه‌بندی، پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و ... برای انتخاب این نقطه در نظر گرفته شده تا نوفه حاصل از گیرنده‌های EM در شکل (۲) به آنها اضافه شود. داده‌های گیرنده EM شکل (۲) به ترتیب به داده‌های تریس‌های ۶۰۰ تا ۶۰۹ اضافه می‌شوند. در شکل‌های زیر تریس‌ها قبل و بعد از اضافه کردن نوفه به‌نمایش در آمده‌اند.

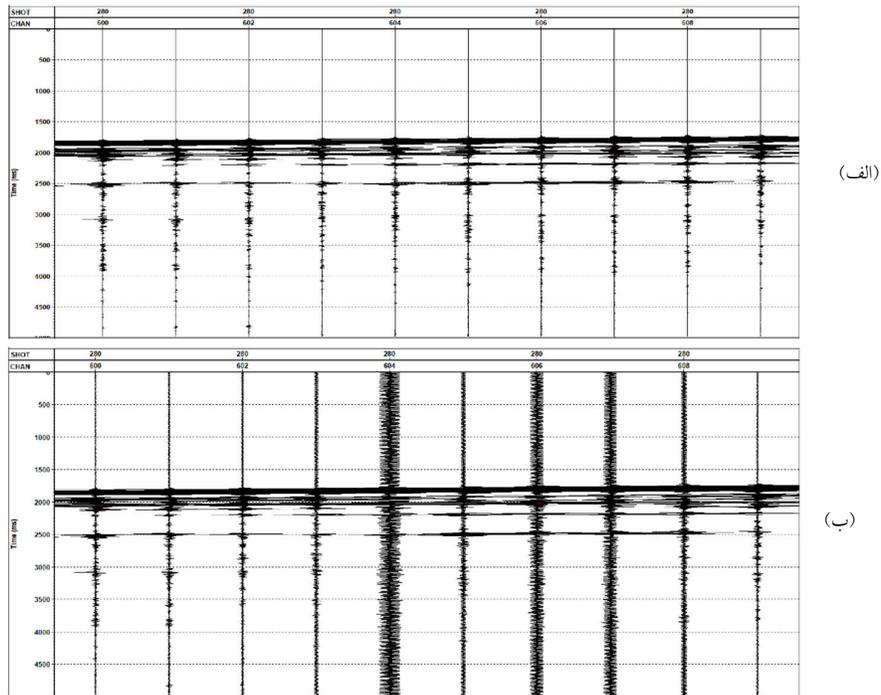
گیرنده مشاهده می‌شود که فرکانس نوفه برق تک‌فرکانس نبوده و دامنه دریافت شده در ایستگاه‌های گیرنده نیز با فاصله از کابل‌های برق فشارقوی تغییر می‌کند. با توجه به در اختیار داشتن نمونه واقعی نوفه خالص، که توسط گیرنده EM طی مراحل انجام تست برداشت شده‌است بهترین انتخاب برای نویز، استفاده از نوفه خالص واقعی می‌باشد. این شکل بخوبی نشان‌دهنده خالص بودن نوفه ثبت شده نیز می‌باشد همچنین نشان‌دهنده اینست که ساختن نویزی با این خصوصیات کار بسیار سختی خواهد بود. علاوه بر این به دلیل استفاده از ۱۰ گیرنده با فاصله ۱۵ از هم و عمود بر منبع تولید نویز، بهترین و کامل‌ترین شرایط نوفه مورد نیاز را ایجاد کرده است. در نتیجه بجای ساختن نوفه مصنوعی، از نوفه واقعی برداشت شده‌است استفاده خواهد شد.

## ۷ اضافه کردن نوفه به مدل مصنوعی

برای انجام این پژوهش سعی شده داده‌هایی که در بهترین موقعیت برداشت قرار دارند انتخاب شود تا به توان نوفه را



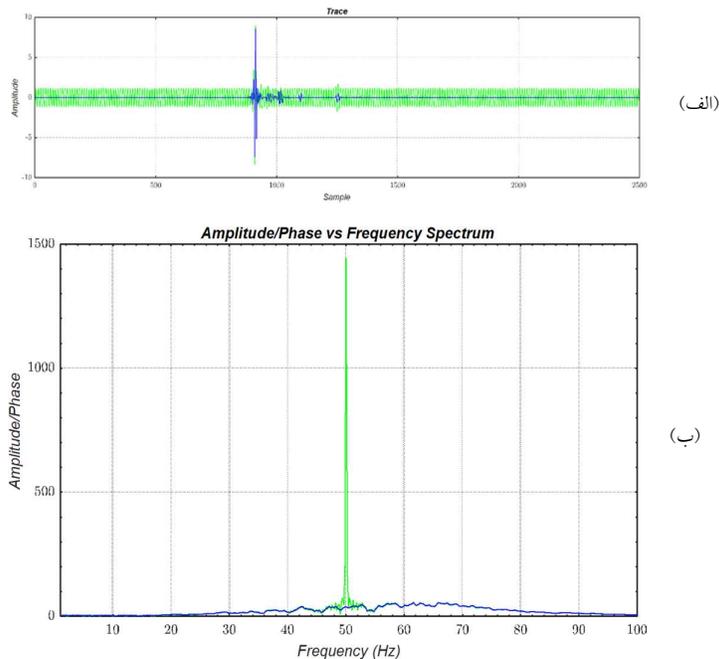
شکل ۳. الف) مدل زمین‌شناسی مارموزی ۲ و ب) برداشت شماره ۲۸۰ و موقعیت اضافه کردن نوفه با فلش قرمز.



شکل ۴. الف) گیرنده‌های شماره ۶۰۰ تا ۶۰۹ قبل و ب) بعد از اضافه کردن نوفه گیرنده EM.

است تا گیرنده‌های EM شماره ۱ تا ۱۰ به ترتیب به تریسهای شماره ۶۰۰ تا ۶۰۹ اضافه شوند. با توجه به نرخ نمونه برداری ۲ میلی‌ثانیه برای نوفه و تریس، داده‌ها به این صورت که برای هر شماره تریس و نویز، هر یک از نمونه‌های تریس و نوفه با هم جمع می‌شوند و این مرحله

قبل از اضافه کردن نوفه به تریس و برای اینکه بیشترین تطابق با آنچه در عمل اتفاق می‌افتد لازم است نسبت سیگنال به نوفه را مشخص کرده و دامنه مورد نیاز با استفاده از ضریب Coeff اصلاح شود. پس از آن برای اضافه کردن نوفه EM به تریسهای مصنوعی Syn لازم



شکل ۵. الف) شکل موج تریس شماره ۶۰۴ قبل از افزایش نوفه آبی و بعد از افزایش نوفه سبز و ب) آنالیز فرکانس تریس قبل از افزایش نوفه آبی و بعد از افزایش نوفه سبز.

می‌شود و داده‌های تریس بدون هرگونه تغییری باقی می‌مانند و در انتها با کم کردن داده‌های گیرنده EM اصلاح شده از تریس، نوفه‌زدائی انجام می‌شود.

#### ۷-۱ تعداد نمونه بهینه

اصلاح فاز یکی از دو مرحله بسیار مهم در این پژوهش است که تاثیر زیادی در نتایج بدست آمده خواهد گذاشت. برای انجام این مهم لازم است تا فاز تریس و نوفه مشخص شده و سپس این دو هم فاز شوند. پیدا کردن و اصلاح فاز در قلمرو زمان تبدیل به جابجایی زمان می‌شود و کافی است زمان تقاطع موج با محور زمان را اندازه‌گیری کرده و هم زمانی برای این دو ایجاد شود. از آنجائیکه در بازه زمانی برداشت داده لرزه‌نگاری که نوفه ۵۰ هرتز دارند وجود امواج الکترومغناطیسی دیگر و همچنین دریافت‌های حاصل از بازتاب کننده با فرکانس ۵۰ هرتز در تریس لرزه‌نگاری باعث ایجاد خطا در تعیین فاز به دلیل تغییر در زمان تلاقی نمودار با محور زمان

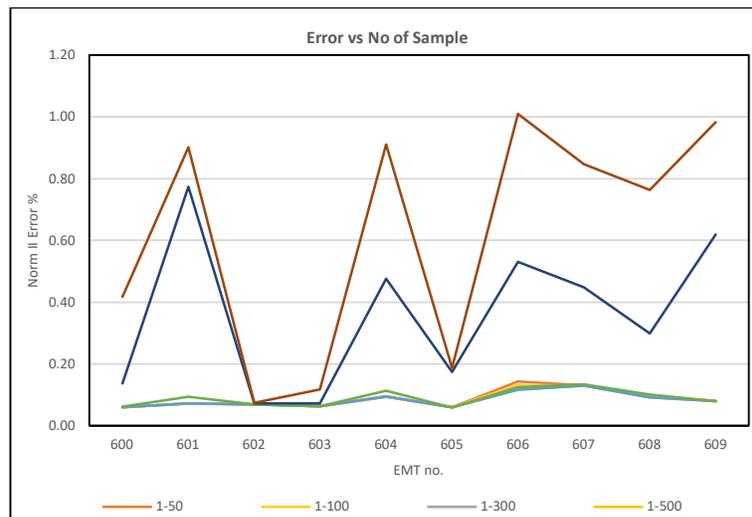
تا آخرین نمونه داده‌های نوفه و تریس ادامه پیدا می‌کند. مراحل اضافه کردن نوفه به تریس با فرمول  $Syn + EMT * Coeff$  برای هر ۱۰ تریس انجام شود. شکل (۴-ب) داده‌های تریس بعد از اضافه کردن نوفه را نمایش می‌دهد. در شکل (۵-ب) نوفه با ضریب ۱۰ به تریس شماره ۶۰۴ اضافه شده است.

#### ۷ مشاهده، محاسبه و بحث

قبل از انجام نوفه‌زدائی با روش پیشنهادی لازم است تا پارامترهای مورد نیاز برای نوفه‌زدائی انتخاب شوند. انتخاب صحیح این پارامترها کمک خواهند کرد تا میزان خطای روش به حداقل برسد. پارامترهایی که مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت عبارتند از تعداد نمونه بهینه برای اصلاح فاز، ضریب اصلاح دامنه، موقعیت قرار گیری گیرنده EM از کابل‌های فشارقوی و نسبت سیگنال به نویزهای مختلف می‌باشند. در این پژوهش ضرایب اصلاح فاز و دامنه بر روی داده‌های گیرنده EM اعمال

یک نمونه نشان‌دهنده ۲ میلی ثانیه زمانی است. رابطه تعداد نمونه انتخاب شده به تعداد سیکل فرکانس ۵۰ هرتز به این شکل محاسبه می‌شود که در هر سیکل برای فرکانس ۵۰ هرتز تعداد ۲۰ نمونه وجود دارد. مثلاً با ۵۰ نمونه ۲.۵ سیکل که ۵ تقاطع با محور زمان دارد وجود خواهد داشت.

می‌شود. برای به حداقل رسانیدن این خطا در این پژوهش از متوسط زمانهای تقاطع استفاده شده است. به این منظور با انتخاب تعداد نمونه و بازه انتخاب نمونه، از اولین نمونه تا آخرین نمونه می‌توان بررسی نمود تا بهترین بازه و بهترین تعداد که کمترین خطا را در داده‌های نوفه‌زدائی شده تولید می‌کند را بدست آورده و مورد استفاده قرار داد. فاصله زمانی نمونه برداری ۲ میلی ثانیه است یعنی هر



شکل ۶. خطا در مقابل تعداد نمونه. محور عمودی میزان خطای نرم ۲ و محور افقی شماره تریسهای نویزی.

لرزه‌نگاری است در بازه نمونه‌های انتخابی مثل بازه ۸۵۰-۱۱۵۰ و ۹۰۰-۹۵۰ می‌تواند خطا را زیاد کند و از طرفی تعداد نمونه بیشتر نیز کمک چندانی به کاهش خطا نمی‌کند به همین دلیل برای بررسی روش پیشنهادی با استفاده از مدل مصنوعی تعداد ۵۰۰ نمونه در بازه ۱-۵۰۰ که کمترین خطای متوسط در ۱۰ گیرنده به مقدار ۰.۰۸۳۸٪ دارد مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

## ۲-۷ ضریب اصلاح دامنه

یکی از دو مرحله اصلی در نوفه زدائی پیدا کردن ضریب اصلاح دامنه و نهایتاً اصلاح دامنه است. در این مرحله دامنه سیگنال گیرنده EM با دامنه نوفه موجود در تریس

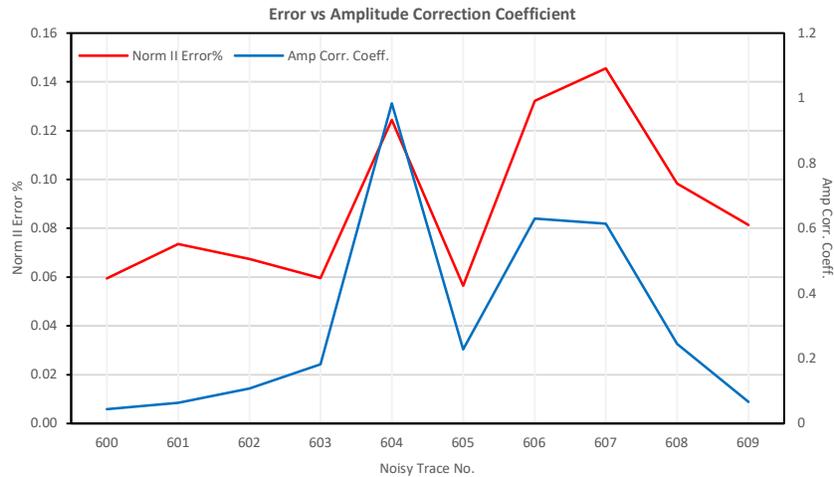
همانطوریکه در **Error! Reference source not**

**found.** مشاهده می‌شود انتخاب بازه با ۵۰ نمونه، ۱۰۰ نمونه، ۳۰۰ نمونه، ۸۵۰ نمونه و ۲۵۰۰ نمونه (تمام طول ۵ ثانیه‌ای رکورد) دارای خطای تقریبی ۰.۰۶٪ تا ۰.۱۳٪ در تریس‌های مختلف را نشان می‌دهد. وقتی بازه ۲۰۰ نمونه ای ۸۵۰-۱۱۵۰ که در تریس دارای بازتاب کننده قوی است مورد استفاده قرار گیرد خطای تقریبی ۰.۰۷۵٪ تا ۰.۷۷٪ می‌شود. با محدودتر کردن بازه در محدوده نزدیکتر به بازتاب کننده یعنی ۹۵۰-۹۰۰ این خطا حتی بیشتر شده و به ۰.۷۵٪ تا ۱٪ نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج بدست آمده بخوبی مشاهده می‌شود وجود بازتاب کننده که هدف نهایی برداشت داده‌های

سیگنال وارد می‌شود. که در هر دو صورت خطای نوفه زدائی زیاد خواهد شد. در اینجا تاثیر ضریب اصلاح دامنه بر میزان خطای بدست آمده بررسی می‌شود.

برابر می‌شوند. پس از آن در صورتیکه دامنه نوفه خالص کمتر باشد، بخشی از نوفه در سیگنال باقی می‌ماند و در صورت بیشتر بودن دامنه نوفه خالص نوفه اضافی به



شکل ۷. خطا در مقابل ضریب اصلاح دامنه. منحنی قرمز میزان خطا در هر تریس و منحنی آبی ضریب اصلاح دامنه.

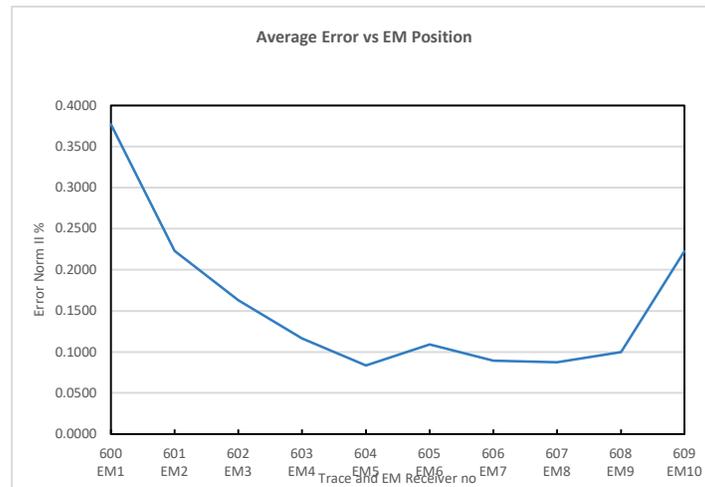
لرزه‌نگاری شماره ۶۰۴ یکی می‌باشد انتظار داریم ضریب برای این گیرنده ۱ باشد که در عمل مقدار ۰.۹۸۳۷ معادل ۱.۶۳٪ خطای نقطه‌ای مربوط به فرکانس ۵۰ هرتز را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تمام خطاهای دیگر مورد بحث، متوسط خطای در تمام نمونه‌ها می‌باشند.

### ۷-۳ موقعیت قرار گیری گیرنده EM

در شکل (۲) مشاهده می‌شود که فاصله گیرنده EM نسبت به کابل‌های فشارقوی می‌تواند ارتباط مستقیمی با میزان نوفه دریافتی داشته باشد مثل گیرنده شماره ۵. این موضوع به این معنی نیست که الزاماً نزدیکترین فاصله به منبع نوفه می‌تواند بیشترین میزان نوفه دریافتی را در اختیار قرار دهد. در فصل‌های سرد سال که مصرف برق کمتر و پایداری شبکه برق بیشتر است مطابق این شکل حتی در نزدیکترین فاصله از کابلها میزان دریافت نوفه می‌تواند کمترین مقدار باشد مثل گیرنده شماره ۴. با توجه به اینکه گیرنده EM باید برای نوفه‌زدائی از تمام گیرنده‌های

در شکل (۷) مقایسه خطای بدست آمده حاصل از نوفه‌زدائی در ۱۰ گیرنده نویزی، نسبت به ضریب اصلاح دامنه را نشان می‌دهد. این شکل دارای دو محور عمودی است که محور سمت راست مقادیر ضریب اصلاح دامنه و محور سمت چپ مقادیر خطا را نمایش می‌دهد. این مقایسه هم‌نوائی بسیار خوب بین خطای بدست آمده و ضریب اصلاح دامنه برای هر یک از گیرنده‌ها را نمایش می‌دهد به این ترتیب که با کاهش ضریب اصلاح دامنه خطا هم کاهش می‌یابد. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اگر بیشترین میزان نوفه در یک تریس از بیشترین میزان نوفه دریافتی در گیرنده EM کمتر باشد بجای استفاده از ضریب برای افزایش دامنه در اصل از ضریب کاهش دامنه مطابق شکل (۷) استفاده خواهد شد که باعث کاهش خطای نوفه‌زدائی می‌شود. به عبارتی زیاد بودن دامنه نوفه دریافتی توسط گیرنده EM باعث کاهش خطا در حذف نوفه می‌شود.

از آنجائیکه موقعیت گیرنده EM5 با گیرنده



شکل ۸. خطا در مقابل موقعیت گیرنده EM. متوسط خطای بدست آمده گیرنده‌های EM1 تا EM10 بر روی تریسهای نویزی ۶۰۰-۶۰۹.

شده و قابل تغییر نیست. اما تغییر در دامنه نوفه به سختی سیگنال نیست و با افزایش تعداد گیرنده های EM به صورت ارایه سری و یا با تغییر در تعداد دور سیم پیچ مورد استفاده در این گیرنده قابل ساخت است. اما در زمان استفاده از مدل مصنوعی تغییر نسبت سیگنال به نوفه تنها با تغییر دامنه یکی از دو عامل امکان پذیر است. در اینجا تاثیر تغییر نسبت سیگنال به نوفه در مقابل خطای نوفه زدائی بررسی خواهد شد. در این مدل سازی با توجه به اینکه برای داده‌های نوفه مورد استفاده، از داده‌های ثبت شده واقعی استفاده شده است لذا برای تغییر نسبت سیگنال به نویز، می توان دامنه نوفه را با استفاده از ضریب تغییر داد.

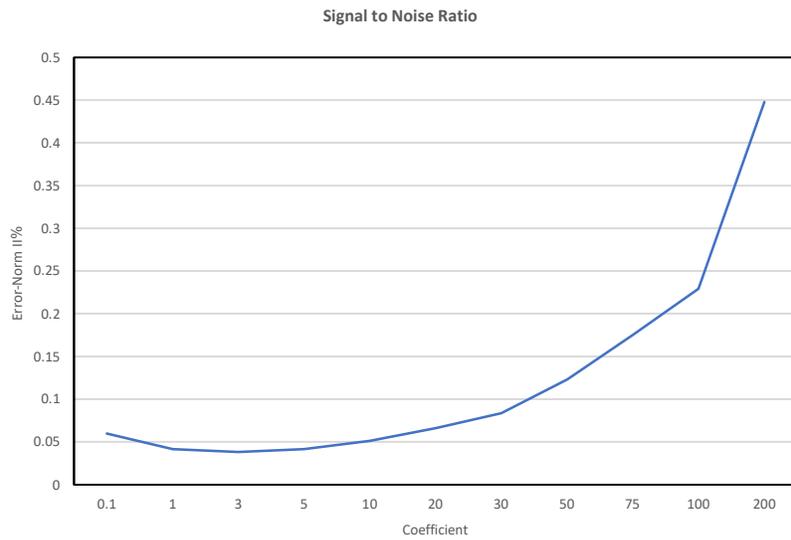
با توجه به اینکه خطای نوفه زدائی در تمام گیرنده‌های نویزی اهمیت دارد لذا از تحلیل خطا با استفاده از متوسط خطای تمام ۱۰ گیرنده نویزی برای هر ضریب استفاده می شود. همانطوریکه در شکل (۹) مشاهده می شود ضرایب ۰.۱ تا ۲۰۰ مورد آزمایش قرار گرفتند. خطای متوسط بدست آمده برای ضرایب ۰.۱ تا ۳۰ کمتر از ۰.۱٪ بدست آمده است که مقادیر قابل قبولی است. مقدار ضریب ۳ که کمترین خطا به مقدار ۰.۰۳۸٪ برای این مطالعه مورد استفاده قرار می گیرد.

نویزی که متاثر از آن شبکه برق هستند مورد استفاده قرار گیرد، لذا لازم است بهترین فاصله برای قرارگیری این گیرنده انتخاب شود. برای تعیین بهترین موقعیت گیرنده EM لازم است تا هر یک از ۱۰ گیرنده EM برای نوفه زدائی تریسهای نویزی شماره‌های ۶۰۰ تا ۶۰۹ مورد استفاده قرار گیرد سپس بهترین موقعیت قرارگیری گیرنده بر اساس کمترین میزان خطا انتخاب شود.

همانطوریکه در شکل (۸) مشاهده می شود در زمان استفاده از گیرنده EM5 کمترین خطای متوسط بر روی ۱۰ گیرنده نویزی به مقدار ۰.۰۸۳٪ مشاهده می شود و بیشترین خطای متوسط مربوط به گیرنده EM1 به مقدار ۰.۳۷٪ می باشد. به عبارت دیگر نوفه زدائی با استفاده از گیرنده EM5 دارای کمترین خطا و در نتیجه بیشترین دقت است به همین دلیل در این پژوهش گیرنده EM5 جهت نوفه زدائی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

#### ۷-۴ نسبت سیگنال به نویز

برای تغییر در نسبت سیگنال به نویز، می توان دامنه سیگنال و یا نوفه را کاهش و یا افزایش داد. تغییر در دامنه سیگنال دریافتی تابع نوع و تعداد گیرنده‌های مورد استفاده در هر کانال گیرنده است که در مرحله طراحی عملیات تعیین



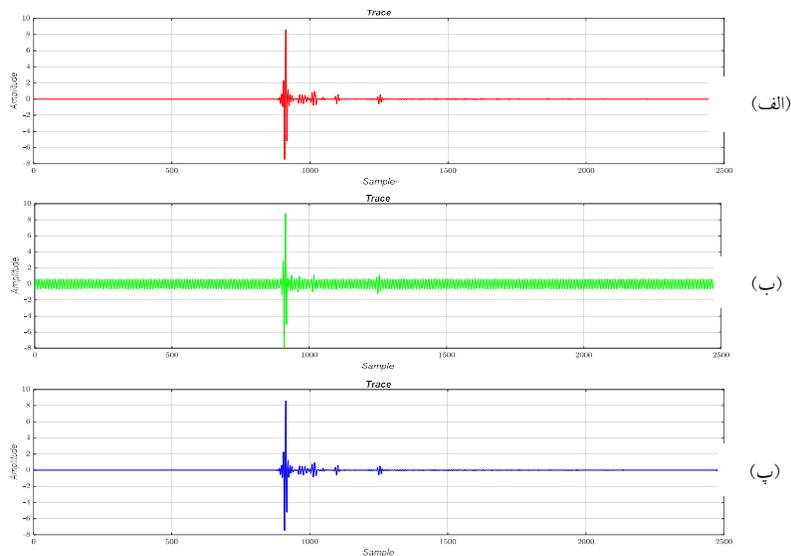
شکل ۹. متوسط خطا در مقابل نسبت سیگنال به نویز.

۷-۵ نوفه زدائی

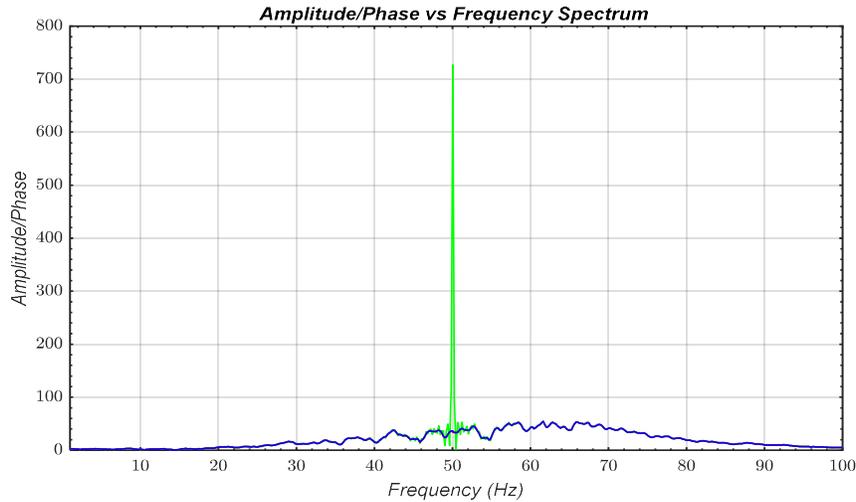
حال پس از تعیین پارامترهای تاثیرگذار در میزان خطای این روش یعنی انتخاب گیرنده EM5 به عنوان گیرنده EM و بازه ۱-۵۰۰ برای انتخاب نمونه جهت اصلاح فاز و ضریب ۳ برابر برای گیرنده EM در نوفه زدائی مدل مصنوعی مورد استفاده قرار خواهد گرفت و نوفه زدائی را بر اساس دستورالعمل فلوجارت (گریوانی و همکاران،

۲۰۲۵) انجام و نتایج آن بررسی خواهد شد.

در شکل (۱۰) مراحل اضافه کردن نوفه و نوفه زدائی تریس شماره ۶۰۴ را نمایش می دهند الف) تریس شماره ۶۰۴ خام قبل از اضافه کردن نویز، ب) تریس بعد از اضافه کردن نوفه گیرنده EM5 و پ) تریس بعد از نوفه زدائی با ملاحظیات پیش گفته را نمایش می دهند.



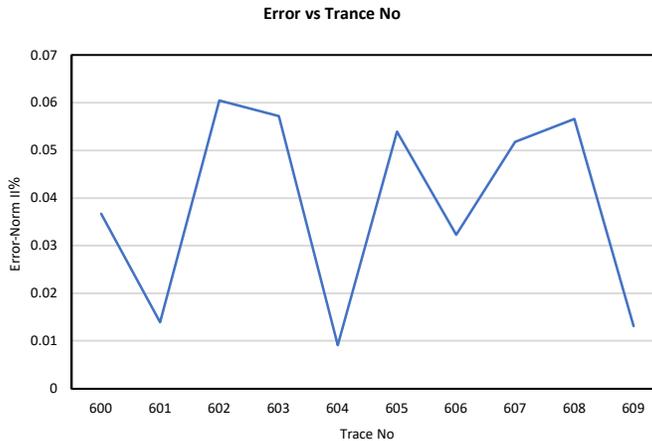
شکل ۱۰. نوفه زدائی تریس شماره ۶۰۴. الف) قبل از اضافه کردن نویز، ب) بعد از اضافه کردن نویز، پ) بعد از نوفه زدائی.



شکل ۱۱. آنالیز فرکانس تریس شماره ۶۰۴. منحنی سبز تریس نویزی و آبی تریس نوفه‌زدائی شده.

منحنی تریس قبل از اضافه کردن نوفه و بعد از نوفه‌زدائی بر روی هم می‌افتاد، امکان نمایش تریس خام وجود ندارد.

شکل (۱۱) منحنی آنالیز فرکانس تریس نویزی قبل از نوفه‌زدائی به رنگ سبز و بعد از نوفه‌زدائی به رنگ آبی را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که بدلیل اینکه



شکل ۱۲. خطای نوفه زدائی در گیرنده‌های ۶۰۰ تا ۶۰۹.

خطای ناچیز به دلیل اینکه نوفه اضافه شده به داده خام و گیرنده EM مورد استفاده برای نوفه‌زدائی یکی است وجود داشت. بیشترین میزان خطا برای نوفه‌زدائی گیرنده ۶۰۲ به میزان ۰.۰۶۰٪ مشاهده می‌شود.

در نمودار شکل (۱۲) خطای نوفه‌زدائی برای هر یک از گیرنده‌های شماره ۶۰۰ تا ۶۰۹ به نمایش در آمده‌است. حداقل میزان خطا برای نویزدائی در گیرنده شماره ۶۰۴ به مقدار ۰.۰۰۹٪ مشاهده می‌شود که البته انتظار این

- مدل مصنوعی مارموزی II به دلیل دارا بودن ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده و محتوای فرکانسی با دامنه مناسب یکسان با نوفه برق ۵۰ هرتز، شرایطی نزدیک به واقعیت و در عین حال کنترل‌پذیر را برای آزمون عملکرد روش نوفه خالص فراهم می‌آورد. این مدل ارزیابی دقیق و مجزای متغیرهای مختلف را با تکرارپذیری بالا را مهیا می‌کند.

- نتایج حاصل از استفاده مدل مصنوعی نشان داد که مؤلفه‌هایی همچون تعداد نمونه بهینه برای اصلاح فاز (در بازه ۱ تا ۵۰۰)، ضریب اصلاح دامنه (کاهش با مقادیر کمتر از ۱)، نسبت سیگنال به نوفه (حدود ۳) و موقعیت قرارگیری گیرنده EM در موقعیت بهینه EM5 که بیشترین دامنه نوفه را دریافت می‌کند نقش زیادی در کاهش میزان خطا تا حدود ۰.۰۰۹٪ و موفقیت نویززدایی دارند. افزایش ضریب اصلاح دامنه می‌تواند منجر به افزایش خطای باقیمانده گردیده و با افزایش نسبت نوفه به سیگنال، میزان خطای نهایی را نیز افزایش دهد.

- بررسی نتایج در قلمرو زمانی و فرکانسی نشان‌دهنده این است که این روش بدون آسیب به سیگنال اصلی، نوفه را به‌طور مؤثر حذف می‌کند. به دلیل ناپایداری و تغییرات لحظه‌ای شبکه‌های برق، استفاده از داده‌های غیرهمزمان لرزه‌نگاری و گیرنده EM برای حذف نوفه عملاً امکان‌پذیر نیست. بنابراین، ثبت همزمان نوفه و داده لرزه‌ای شرط لازم برای اثربخشی این روش است. همچنین، پیشنهاد می‌شود در فرآیند برداشت میدانی، عملیات نویززدایی به صورت روزانه انجام گیرد تا در صورت نیاز، موقعیت گیرنده EM با هدف کاهش خطا و بهبود کیفیت داده اصلاح شود.

پیشنهاد برای تحقیقات آینده:

- بررسی عملکرد روش بر روی داده‌هایی که دامنه و فرکانس نوفه سریع و ناگهانی تغییر می‌کنند (مثل مناطق صنعتی و فصل‌های گرم سال که بی‌ثباتی شبکه

به عنوان یک نتیجه غیرمستقیم از نوفه مورد استفاده می‌توان گفت که این میزان ناچیز خطای مشاهده شده در تغییر پارامترهای مختلف فوق‌الذکر، نشان‌دهنده دریافت بسیار مناسب نوفه در ۱۰ گیرنده شکل (۲) است و با توجه به اینکه روش نوفه خالص بر پایه دریافت نوفه خالص استوار است این داده‌ها تاییدی بر روش نوفه خالص هستند.

استفاده از مدل مصنوعی مارموزی ۲ برای بررسی نحوه عملکرد روش نوفه خالص نشان‌دهنده توانایی‌های مثبت این مدل برای بدست آوردن برخی از نتایج بود که با داده واقعی بدلیل اینکه پارامترهای زیادی در هر اندازه‌گیری تغییر می‌کند ممکن نیست. یکی از این نتایج نسبت سیگنال به نوفه است که در زمان استفاده از مدل مصنوعی بصورت کاملاً کنترل شده و قابل اعتماد قابل سنجش است.

اما همواره باید به خاطر داشت که مدل‌های مصنوعی قادرند فقط برخی پارامترهای موجود و اثرگذار در زمین را در نظر بگیرند و از طرف دیگر این پارامترها در هر منطقه تغییرات زیادی دارند که استفاده از مدل‌های مصنوعی را محدود می‌کنند.

## ۸ نتیجه‌گیری و پیشنهاد

- در بررسی کارایی حذف نوفه الکترومغناطیسی با استفاده از ثبت همزمان نوفه با داده لرزه‌نگاری از راهکار ترکیبی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری استفاده شد. برخلاف روش‌های مرسوم مبتنی بر فیلترهای فرکانسی و تخمین نویز، که برای حذف نویزهای الکترومغناطیسی هم‌پوشان با سیگنال لرزه‌نگاری دچار کاستی هستند، روش نوفه خالص با استفاده از گیرنده‌های EM، و اعمال دقیق اصلاح فاز و دامنه قبل از کسر نوفه از داده خام را فراهم می‌سازد. این راهکار باعث حفظ بهتر محتوای واقعی سیگنال لرزه‌ای و کاهش اثرات نامطلوب نوفه می‌شود.

با منابع انرژی مختلف از جمله ویبراتور و دینامیت و مقایسه خطا در حذف نوفه برق.

برق بیشتر می‌شود)، به منظور تحلیل پایداری روش در شرایط واقعی تر

- استفاده از این روش در داده‌های برداشت‌شده

noise from seismic reflection data. *Journal of applied geophysics*, 153, 90-99 .

Larsen, J. J., Langhof, R. B., Kjær, M. W., Vang, M., Liu, L., Griffiths, M., & Grombacher, D. (2022). Efficient processing of surface NMR data with spectral analysis. *Geophysical Journal International*, 229(1), 286-298 .

Linville, A. F., & Meek, R. A. (1992). Canceling stationary sinusoidal noise. *Geophysics*, 57(11), 1493-1501 .

Martin, G. S., Wiley, R., & Marfurt, K. J. (2006). *Marmousi2: An elastic upgrade for Marmousi*. *The leading edge*, 25(2), 156-166 .

Matei, R., & Chiper, D. F. (2024). Analytical Design of Gaussian Anisotropic 2D FIR Filters and Their Implementation Using the Block Filtering Approach. *Electronics*, 13(7), 1243 .

Nyman, D. C., & Gaiser, J. E. (1983). Adaptive rejection of high-line contamination. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1983* (pp. 321-323). Society of Exploration Geophysicists .

Proakis, J. G. (2007). *Digital signal processing: principles, algorithms, and applications*, 4/E. Pearson Education India .

Schuster, G. T. (2017). *Seismic inversion*. Society of Exploration Geophysicists .

Versteeg, R. (1994). The Marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set. *The leading edge*, 13(9), 927-936 .

Xia, J., & Miller, R. D. (2000). Design of a hum filter for suppressing power-line noise in seismic data. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 5(2), 31-38 .

Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of exploration geophysicists .

### منابع

Banjade, T. P., Zhou, C., Chen, H., Li, H., Deng, J., Zhou, F., & Adhikari, R. (2024). Seismic Random Noise Attenuation Using DARE U-Net. *Remote Sensing*, 16(21), 4051 .

Butler, K. E., & Russell, R. D. (2003). Cancellation of multiple harmonic noise series in geophysical records. *Geophysics*, 68(3), 1083-1090 .

Gardner, J., & Knopoff, L. (1974). Bulletin of the seismological society of America is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363-1367 .

Gerivani, M. R., Riahi, M. A., & Abdollahi-Fard, I. (2025). Improving electromagnetic noise removal from seismic data using innovative EM receivers: a novel hybrid approach. *Discover Applied Sciences*, 7, 723.

Haus, H. A. (2012). *Electromagnetic noise and quantum optical measurements*. Springer Science & Business Media .

Hunsucker, R. D., & Hargreaves, J. K. (2007). *The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation*. Cambridge University Press .

Hussain, Y., Uagoda, R., Borges, W., Prado, R., Hamza, O., Cárdenas-Soto, M., Havenith, H.-B., & Dou, J. (2020). Detection of cover collapse doline and other Epikarst features by multiple geophysical techniques, case study of Tarimba cave, Brazil. *Water*, 12(10), 2835 .

Ifeachor, E. C., & Jervis, B. W. (2002). *Digital signal processing: a practical approach*. Pearson Education .

Karshi, H., & Dondurur, D. (2018). A mean-based filter to remove power line harmonic

## Evaluating the effectiveness of the pure noise method for electromagnetic noise removal: utilizing a synthetic model

Mohammad Reza Gerivani,<sup>1</sup> Mohamad Ali Riahi<sup>2\*</sup>, Iraj Abdollahi-Fard<sup>3</sup> and Zohreh Sadat Riazi Rad<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Department of Petroleum, Mining and Materials Engineering, CT.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran

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

<sup>3</sup>Ph.D., Exploration Directorate, National Iranian Oil Company, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Associate Professor, Department of Geology, Chalus Branch, Islamic Azad University, Chalus, Iran

(Received: 07 July 2025, Accepted: 21 September 2025)

### Summary

Electromagnetic (EM) noise induced by high-voltage power grids remains a significant impediment to seismic data acquisition, particularly in large-scale hydrocarbon exploration projects. While conventional frequency-based filtering methods are commonly used to suppress EM noise, they often fall short in handling the transient and spatially variable nature of such interference. Moreover, these techniques risk attenuating critical portions of the seismic signal when the frequency spectra of signal and noise overlap.

This study was focused on evaluating the performance of a novel approach to removing EM noise (herein referred to as “pure EM noise removal”), where the complex synthetic Marmousi II model was used as the testbed. In the evaluated denoising method, the EM noise was supposed to be recorded concurrently with seismic data via dedicated EM receivers, allowing direct application of amplitude and phase corrections prior to subtraction from the raw seismic traces. The Marmousi II model, with its high-resolution representation of geologically realistic subsurface structures, provides a rigorous and controlled environment to examine the behavior of EM noise suppression under varied conditions.

By simulating diverse acquisition scenarios within the Marmousi II framework, effects of critical parameters were systematically explored, including the phase correction window size (in number of samples), amplitude correction factor, signal-to-noise ratio (SNR), and the spatial positioning of the EM receivers relative to the source of the EM noise (i.e., power lines). Optimal performance was achieved with a 500-sample phase correction window, a negative amplitude correction factor, an SNR of 3, and positioning the EM receiver at an identified optimal location (EM5), resulting in denoising errors as low as 0.009%. The spatial positioning of EM receivers emerged as a key factor in the effectiveness of the denoising. Incorrect placement led to reduced quality of recorded noise and, hence, increased denoising errors or waveform distortion after processing. The controlled layout of the Marmousi II model enabled fine-grained assessment of receiver geometry, ensuring that optimal locations could be reliably identified and replicated across different acquisition trials.

Furthermore, the analysis highlighted the importance of synchronized acquisition of the EM noise together with the primary seismic acquisition, as the inherently dynamic and non-stationary behavior of the EM noise makes the real-time concurrent recording essential. Using the Marmousi II model made it possible to systematically follow a one-factor-at-a-time approach, offering insights that are often obscured by environmental noise, equipment variability, and logistical limitations in field data acquisition.

Time-domain and frequency-domain evaluations confirmed that the pure EM noise removal method effectively preserved the integrity of the seismic signal, even in cases of spectral overlap with the EM noise. The results suggest that the proposed method not only offers enhanced denoising capabilities but also reduces the risk of signal loss compared to traditional filtering techniques.

The findings underscore the potentials of the proposed method as a robust alternative to frequency-based filters, particularly in environments with strong power grid interference. Its adoption could significantly improve seismic data quality and interpretation reliability in both synthetic and real-world scenarios.

**Keywords:** High-voltage power grids, electromagnetic noise, pure noise, Marmousi II model, synthetic model

---

\*Corresponding author:

mariahi@ut.ac.ir