



دوره ۷، شماره ۲، ۱۴۰۰، صفحات ۱۰۳-۱۱۲  
(DOI): 10.22044/JIRAG.2020.9862.1290 شناسه دیجیتال

## تضعیف نوفه خطوط نیرو در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از درونیابی طیفی

محمد حسین زادگان<sup>۱</sup>، امین روشندل کاهو<sup>۲\*</sup> و محمدرداد<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۸

\* نویسنده مسئول مکاتبات: roshandel@shahroodut.ac.ir

### چکیده

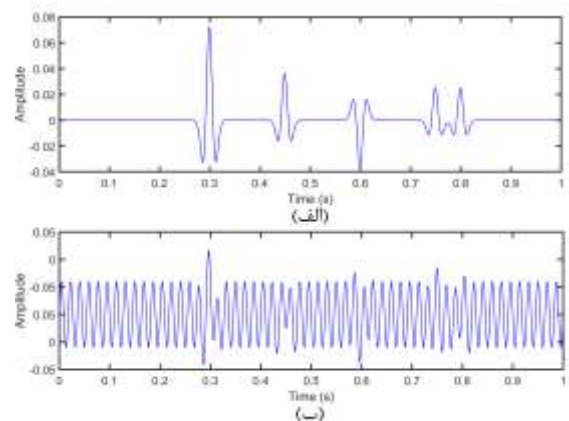
### واژگان کلیدی

امروزه با توجه به هزینه بالای برداشت داده و به منظور افزایش کیفیت داده نهایی، مهمترین چالش تضعیف نوفه در داده‌های لرزه‌ای، تضعیف حداکثری نوفه و آسیب حداقلی به سیگنال است تا بتوان به حداکثر نسبت سیگنال به نوفه دست پیدا کرد. نوفه خطوط انتقال برق فشار قوی یا نوفه هارمونیک (تک فرکانس) با فرکانس ثابت در بازه فرکانسی ۵۰ تا ۶۰ هرتز، یکی از عوامل مخرب داده‌های لرزه‌ای است؛ که باعث پایین آوردن کیفیت سیگنال‌ها و نسبت سیگنال به نوفه می‌شود. عدم تضعیف این نوفه سبب اثر منفی بر پردازش داده‌های پیش از برآینار و پیرو آن بر تفسیر داده‌ها می‌شود. فیلتر شکافی، متداول‌ترین روش تضعیف این نوفه در داده‌های لرزه‌ای است. این فیلتر در حوزه تبدیل Z دامنه فرکانس مرتبط با نوفه هارمونیک را در طیف دامنه سیگنال، تضعیف می‌کند. این فیلتر، ضمن تضعیف نوفه هارمونیک، محتوای فرکانسی سیگنال در فرکانس نوفه هارمونیک را نیز تضعیف می‌کند و همچنین، دامنه فرکانس‌های قرار گرفته در همسایگی فرکانس نوفه هارمونیک را نیز در طیف دامنه سیگنال تحت تاثیر قرار داده و تا حدودی تضعیف می‌کند. از این رو، معرفی روشی که ضمن تضعیف نوفه هارمونیک کمترین آسیب به محتوای فرکانسی سیگنال وارد کند ضرورت می‌یابد. در این پژوهش برای برخورد با نوفه خطوط انتقال نیرو روش درونیابی طیفی پیشنهاد می‌شود. روش درونیابی طیفی با استفاده از الگوریتم ساده درونیابی، دامنه سیگنال در فرکانس نوفه هارمونیک را با کمک دامنه فرکانس سیگنال در فرکانس‌های همسایه درونیابی می‌کند. نتایج ارزیابی بر روی داده مصنوعی و واقعی نشان می‌دهد، که روش درونیابی طیفی بر خلاف فیلتر شکافی، ضمن حفظ اطلاعات فرکانسی سیگنال در همپوشانی با فرکانس نوفه هارمونیک و آسیب حداقلی به فرکانس‌های همسایه، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش فیلتر شکافی در تضعیف نوفه خطوط انتقال نیرو باشد. اعتبار نتایج کار از طریق بررسی دقیق طیف دامنه سیگنال و نیز نمایش فرکانس-عدد موج رکورد چشمه مشترک لرزه‌ای صورت می‌گیرد.

داده لرزه‌ای  
نوفه خطوط انتقال نیرو  
فیلتر شکافی  
درونیابی طیفی  
طیف دامنه

## ۱- مقدمه

نوفه خط نیرو یکی از عوامل مخرب بر روی سیگنال‌های برداشت شده با بسیاری از دستگاه‌های اندازه‌گیری در حوزه‌های مختلف پزشکی، الکترونیکی، ژئوفیزیکی و غیره است؛ که باعث پایین آوردن کیفیت سیگنال‌ها و نسبت سیگنال به نوفه می‌شود. این رخداد از طریق تداخل فرکانسی یک هارمونیک تک فرکانس در محدوده‌ی فرکانس طبیعی خطوط نیرو (۵۰ تا ۶۰ هرتز) با فرکانس‌های مطلوب سیگنال صورت می‌گیرد. در مورد داده‌های لرزه‌ای خشکی و نیز دریایی با توجه به محدوده فرکانسی داده‌های لرزه‌ای که بین ۱۰ تا ۱۱۰ هرتز است، نوفه هارمونیک خط نیرو در این محدوده قرار می‌گیرد و باید تضعیف شود. از طرفی دامنه این نوفه با گذشت زمان ثبت ثابت است، در حالی که دامنه لرزه‌ای با زمان کاهش می‌یابد. بنابراین در جایی که دامنه لرزه‌ای به مقداری کمتر از دامنه این نوفه کاهش می‌یابد، وجود این نوفه بر پردازش داده‌های پیش از برانبارش و پیرو آن بر تفسیر داده‌ها اثر منفی می‌گذارد (Linville and Meek, 1992). در شکل ۱ یک سیگنال لرزه‌ای مصنوعی، قبل و بعد از اضافه شدن نوفه هارمونیک نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، حضور نوفه هارمونیک باعث پوشیده شدن سیگنال‌های بازتابی می‌شود. تا کنون روش‌های متعددی برای تضعیف این نوفه معرفی شده‌اند؛ اما اغلب این روش‌ها سبب آسیب به سیگنال نیز می‌شوند. هدف این مقاله، معرفی و بکارگیری روش درونیابی طیفی برای تضعیف بیشینه نوفه هارمونیک با هدف آسیب حداقلی به سیگنال بازتابی است.



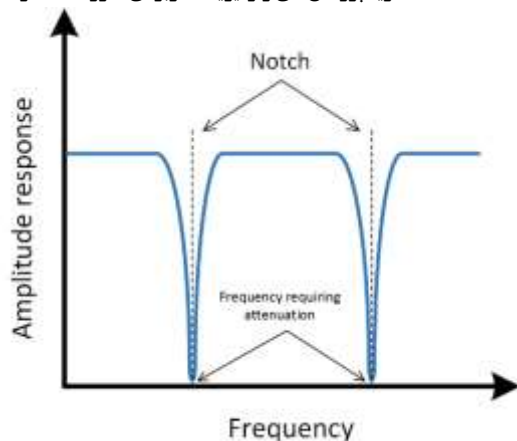
شکل ۱. الف) سیگنال لرزه‌ای بدون نوفه خطوط انتقال نیرو؛ ب) سیگنال لرزه‌ای آلوده به نوفه خطوط انتقال نیرو.

در برخی از سیستم‌های اندازه‌گیری برای اجتناب از این نوفه سیستم اندازه‌گیری در اتاق‌های محافظ و سپردار قرار داده می‌شود تا از این نوفه اجتناب شود. اگرچه بدیهی است در مواردی که سیستم باید برای کاربردهای میدانی استفاده شود، مانند سیستم‌های ثبت لرزه‌ای، این راهکار غیرعملی است. در این موارد راهکار پردازشی و فیلتر کردن سیگنال‌های آلوده بکار گرفته می‌شود. مرسوم‌ترین راهکار پردازشی

استفاده از فیلتر شکافی (notch) است؛ که یک فیلتر فرکانسی می‌باشد که به یک باند باریک خاص فرکانسی اجازه عبور نمی‌دهد و از این طریق توان فرکانس‌های آن باند تضعیف می‌شود. فیلترهای شکافی را هم می‌توان بصورت آنالوگ و در فرایند برداشت داده، و هم به صورت دیجیتال و در حین پردازش اعمال کرد که در هر دو صورت دامنه‌ی سیگنال بازتابی حول فرکانس شکافی نیز تضعیف می‌شود؛ که مطلوب نیست. از طرفی این استفاده از این فیلتر یک اثر جانبی نیز دارد؛ که عبارت است از اعوجاجات در باند عبوری فرکانس و در نتیجه سیگنال در حوزه زمان دچار اثر جعلی و مخرب طنین<sup>۱</sup> می‌شود؛ که تحت تأثیر پدیده گیبس رخ می‌دهد (Proakis and Manolakis, 2007).

در تحقیقات مختلف نشان داده شده است که فیلترهایی که بتوانند بین نوفه خط نیرو و سیگنال جدایش ایجاد کنند نتیجه مطلوبی دارند؛ که می‌توان به روش کنارگذاری تطبیقی (Nyman and Gaiser, 1983)، روش واهمامیخت وینر (Linville and Meek, 1992) و روش‌های حذف نوفه بر مبنای مدل‌سازی و وارون‌سازی (Butler and Russell, 2003; Larsen et al., 2013; Saucier et al., 2006; Xia and Miller, 2000) اشاره کرد. ویژگی اصلی این روش‌ها این است که یک تخمین دقیق از نوفه هارمونیک را از داده‌ها بدون این که باعث آسیب فرکانس‌های مطلوب شوند، حذف می‌کنند. بنابراین، موفقیت روش منوط به دقت بالای تخمین فرکانس‌های بنیادی نوفه هارمونیک است، به شکلی که وجود خطایی کوچک در تخمین فرکانس هارمونیک نتیجه منفی قابل ملاحظه‌ای بر نتیجه فیلتر می‌گذارد (Saucier et al., 2006). در همین رابطه روشندل کاهو و نجاتی کلاته (۱۳۹۲) از فیلتر کمینه پراکنش برای تضعیف نوفه خطوط انتقال نیرو استفاده کردند. فیلتر کمینه پراکنش برای یک فرکانس خاص به گونه‌ای طراحی می‌شود؛ که اولاً فرکانس مورد نظر را بدون هیچ‌گونه تغییری از خود عبور دهد و ثانیاً در سیگنال خروجی، پراکنش سایر فرکانس را کمینه کند. با استفاده از این فیلتر می‌توان محتوای فرکانس نوفه را از سیگنال استخراج نمود و با کسر آن از سیگنال اولیه، نوفه را تضعیف نمود.

یک راه دیگر استفاده از روش فیلتر میانگین-میانه است؛ که در تضعیف نوفه تصادفی و ضربه‌ای (spiky) بصورت رایج استفاده می‌شود. نسخه‌های مختلفی از فیلتر میانه ارائه شده‌اند؛ که شامل نسخه‌های وزنی، تکرار شونده و متغیر با زمان هستند (Bednar, 1983; Duncan and Karsli, 1995; Liu et al., 2006). کارشلی و دوندورور (Karsli and Dondurur, 2015) از نسخه‌ای دیگر از فیلترهای میانگین-میانه تحت عنوان فیلتر میانگین انقطاعی تکرار شونده (ITTM)، که ابتدا توسط میائو و ژیانگ (Miao and Jiang, 2014) معرفی شده بود، برای تضعیف نوفه هارمونیک از داده‌های لرزه‌ای بهره گرفتند. در این روش دامنه‌های بطور ناهنجار بزرگ بصورت تکرار شونده حذف و با یک حد آستانه جایگزین می‌شوند. در ادامه کارشلی و دوندورور (Karshli and



شکل ۲. طیف دامنه فیلتر شکافی.

### ۳- درونیایی طیفی

روش درونیایی طیفی با استفاده از الگوریتم ساده درونیایی، دامنه سیگنال در فرکانس نوفه هارمونیک را با کمک دامنه فرکانس سیگنال در فرکانس‌های همسایه درونیایی می‌کند. این روش برای تضعیف نوفه خط نیرو شامل نکات و مراحل زیر است.

۱- در مرحله اول سیگنال از حوزه اصلی زمان،  $x(t)$  توسط تبدیل فوریه گسسته به حوزه فرکانس،  $\hat{x}(f)$  منتقل می‌شود.

۲- مقدار قدرمطلق سیگنال جدید که مبین طیف دامنه سیگنال،  $|\hat{x}(f)|$  است برای آنالیز استفاده می‌شود و طیف فاز سیگنال،  $\angle \hat{x}(f)$ ، دست نخورده کنار گذاشته می‌شود.

۳- بخش فرکانس‌های مثبت طیف دامنه مورد آنالیز قرار می‌گیرد و فرکانس نوفه خط نیرو،  $f_n$ ، از روی طیف دامنه سیگنال شناسایی می‌شود (محدوده ۵۰ تا ۶۰ هرتز).

۴- فرایند درونیایی از طریق محاسبه مقدار میانگین دامنه فرکانس‌های مجاور  $f_n$ ، یعنی  $\frac{\sum_{i=n-p}^{n+p} f_i}{2p+1}$  و جایگزینی این مقدار با دامنه فرکانس نوفه  $f_n$  انجام می‌شود، که تعداد فرکانس‌های مجاور، یعنی  $p$ ، توسط کاربر تعیین می‌شود. لازم به ذکر است، فرایند درونیایی هم بر روی فرکانس‌های مثبت و هم بر روی فرکانس‌های منفی انجام می‌شود تا سیگنال خروجی، حقیقی باشد.

۵- بعد از درونیایی از طریق فرمول اولر،  $\hat{x}'(f) = |\hat{x}(f)|e^{\angle \hat{x}(f)}$ ، طیف دامنه پردازش شده  $|\hat{x}'(f)|$  با طیف فاز اولیه  $\angle \hat{x}(f)$  ترکیب می‌شود تا نمایش فرکانسی سیگنال پردازش شده  $\hat{x}'(f)$  حاصل شود. سپس با توجه به خاصیت هرمیتی تبدیل فوریه بخش فرکانس‌های منفی نیز که نسخه متقارن اما مزدوج مختلط بخش مثبت است، تدارک دیده می‌شود.

۶- در مرحله آخر از طریق تبدیل فوریه گسسته وارون سیگنال پردازش شده  $x'(t)$  به حوزه اصلی زمان بازگردانده می‌شود.

### ۴- ارزیابی روش بر روی داده مصنوعی

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، ابتدا یک موجک مصنوعی ریکر (Sheriff and Geldart, 1995) با فرکانس غالب ۳۰ هرتز در نظر گرفته

(Dondurur, 2018) یک نسخه محلی و پنجره‌ای از روش ITTM را تحت عنوان LITTM ارائه کردند که فرایند ITTM بر روی پنجره‌ای از طیف دامنه داده لرزه‌ای پیاده‌سازی شده و نوفه خط نیرو فیلتر می‌شود.

رهیافت دیگر برای تضعیف نوفه خط نیرو درونیایی طیفی است؛ که پیشتر در پزشکی برای تضعیف این نوفه از سیگنال‌های الکترومیوگرام (Mewett et al., 2004) و سیگنال‌های EEG و MEG (Leske and Dalal, 2019) استفاده شده است. در این مقاله عملکرد این روش در حذف نوفه خط نیرو از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و حقیقی انجام می‌شود. ضمن این که مقایسه‌ای نیز بین عملکرد این روش با روش متداول فیلتر شکافی انجام می‌شود.

همانطور که پیش‌تر بیان شد، مرسوم‌ترین و البته ساده‌ترین روش برای برخورد با نوفه خط نیرو استفاده از فیلتر شکافی است، که بیان شد نقائص دارد. به همین منظور در ادامه مقاله، ابتدا مباحث تئوری این روش و نحوه بکارگیری و معایب آن بررسی می‌شود. سپس به تشریح روش درونیایی طیفی پرداخته می‌شود و در ادامه از طریق آزمایشاتی نحوه عملکرد این روش در تضعیف نوفه خطوط انتقال نیرو از داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و نیز واقعی بررسی می‌شود. پس از مقایسه نتایج با نتایج فیلتر شکافی در پایان نتیجه پژوهش ارائه خواهد شد.

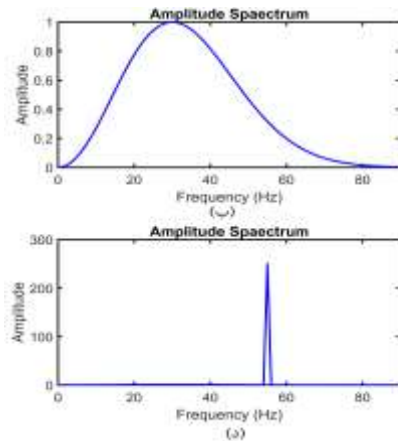
### ۲- فیلتر شکافی

فیلتر شکافی مطابق شکل ۲ شامل یک یا چند شکاف عمیق در پاسخ فرکانسی است که از آن می‌توان برای تضعیف فرکانس‌های منطبق بر شکاف‌ها استفاده نمود. معمولاً فیلتر شکافی با استفاده از تبدیل Z طراحی می‌شود. برای این منظور کافی است، صفرهای تبدیل Z روی دایره واحد در فرکانس زاویه‌ای مرتبط با فرکانس خطی قرار بگیرند. برای عملکرد بهتر فیلتر شکافی بر اساس تئوری تشدیدکننده دیجیتال (Proakis and Manolakis, 2007) قطب‌هایی با فرکانس زاویه‌ای معادل صفرها و دامنه‌ای کوچکتر از یک در نظر گرفته می‌شود. لذا تابع تبدیل فیلتر شکافی برای تضعیف فرکانس زاویه‌ای  $\omega_0$  به صورت رابطه (۱) تعریف به دست می‌آید (Proakis and Manolakis, 2007).

$$H(z) = b_0 \frac{(1 - e^{j\omega_0})(1 - e^{-j\omega_0})}{(1 - re^{j\omega_0})(1 - re^{-j\omega_0})} \quad (1)$$

که  $b_0$  به گونه‌ای تعیین می‌شود که بیشینه مقدار دامنه فرکانس در طیف دامنه فیلتر برابر یک باشد و مقدار  $r$  نزدیک به یک و کوچکتر از آن در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که صفرها و قطب‌های فیلتر شکافی به صورت مزدوج مختلط در نظر گرفته می‌شود تا فرایند مشابهی در فرکانس‌های منفی نیز اتفاق بیافتد.

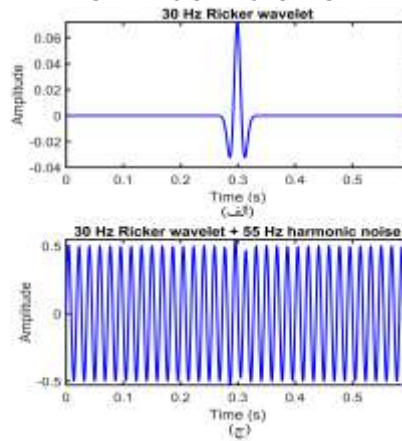
باریک شدن شکاف در طیف دامنه سبب ایجاد اعوجاجاتی در سیگنال حاصل در حوزه زمان می‌گردد، که در شکل ۴ - (ج) قابل مشاهده است. با کوچکتر شدن مقدار  $r$ ، عرض شکاف در طیف دامنه فیلتر شکافی بیشتر می‌شود. این پدیده سبب تاثیرات منفی بر روی فرکانس‌های همسایگی فرکانس نوفه هارمونیک می‌شود و در مقابل میزان اعوجاجات در سیگنال خروجی حوزه زمان کاهش می‌یابد. همان طور که مشاهده می‌شود، حتی در بزرگترین مقدار  $r$  نیز دامنه فرکانس‌های همسایگی فرکانس نوفه هارمونیک نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در شکل ۵ نتایج مربوط به روش پیشنهادی نشان داده شده است. در روش پیشنهادی، انتخاب دو پارامتر بسیار مهم و حیاتی است. از آنجایی که درونیابی بر روی طیف دامنه انجام می‌شود، باید سیگنال با استفاده از تبدیل فوریه گسسته به حوزه فرکانس منتقل شود. طول تبدیل فوریه گسسته حداقل باید برابر با دوره تناوب نوفه هارمونیک باشد، تا از پدیده نشت جلوگیری شود. همچنین، طول بازه فرکانسی برای درونیابی نیز بسیار تاثیر گذار است.



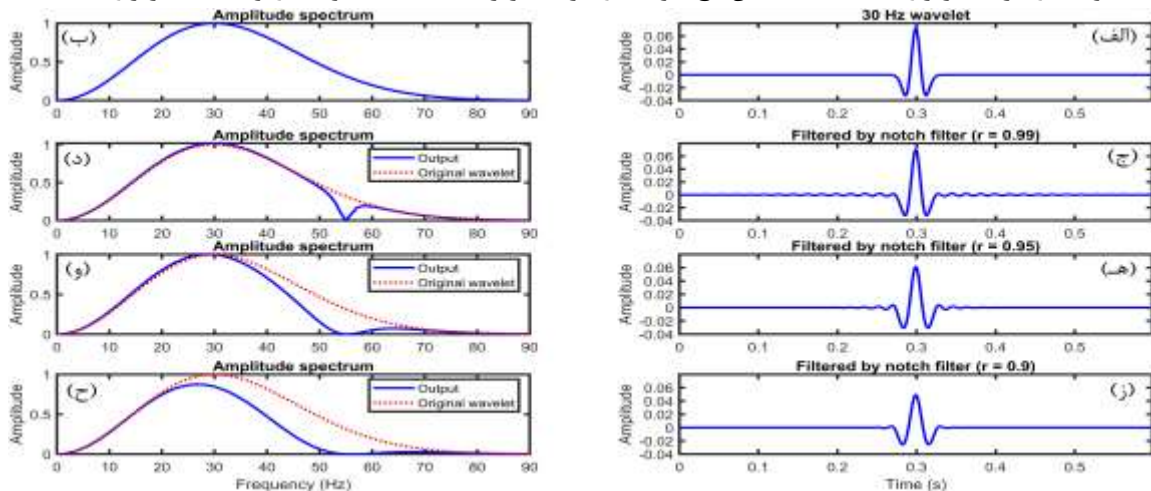
شد؛ که موجک و طیف دامنه آن در شکل ۳ - (الف) و (ب) نشان داده شده است. نوفه هارمونیک ۵۵ هرتز به موجک ۳۰ هرتز ریکر اضافه گردید که در شکل ۳ - (ج) و (د)، سیگنال آغشته به نوفه هارمونیک و طیف دامنه آن نشان داده شده است.

برای تضعیف نوفه هارمونیک در سیگنال شکل ۳ - (ج)، از دو روش فیلتر شکافی و درونیابی طیفی استفاده شد. نتایج فیلتر شکافی برای مقادیر مختلف  $r = 0.9, 0.95, 0.99$  محاسبه گردید؛ که در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴ - (الف) و (ب)، خروجی ایده‌آل نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، تغییر مقدار  $r$  باعث تغییرات زیادی در نتایج می‌شود. در شکل ۴ - (ج) و (د) به ترتیب سیگنال نوفه‌زدا شده و طیف دامنه سیگنال نوفه‌زدا شده در مقایسه با طیف دامنه خروجی ایده‌آل نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار بزرگ  $r$  سبب می‌شود که شکاف موجود در طیف دامنه فیلتر شکافی باریک شود. به عبارت دیگر، فیلتر شکافی بیشترین تضعیف را بر روی فرکانس ۵۵ هرتز دارد و تاثیر منفی زیادی بر روی فرکانس‌های همسایه فرکانس نوفه هارمونیک ندارد. البته



شکل ۳. (الف) موجک ریکر ۳۰ هرتز و (ب) طیف دامنه آن. (ج) موجک ریکر ۳۰ هرتز آغشته شده به نوفه هارمونیک ۵۵ هرتز و (د) طیف دامنه آن.



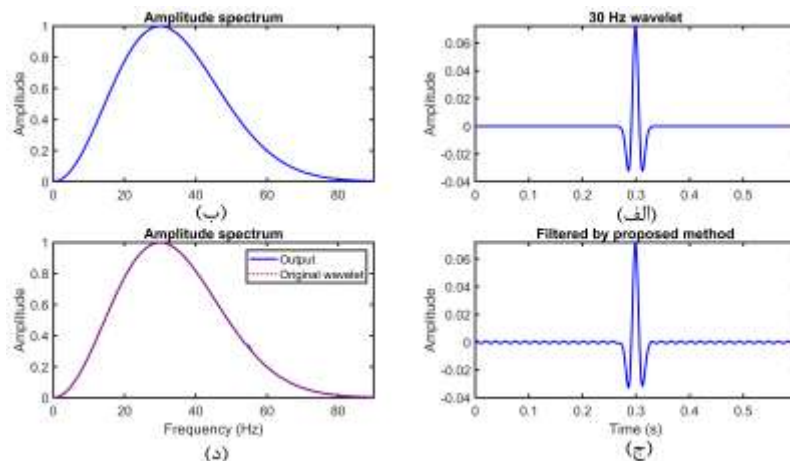
شکل ۴. (الف) و (ب) سیگنال ایده‌آل و طیف دامنه آن. سیگنال خروجی فیلتر شکافی و طیف دامنه آن برای مقادیر مختلف  $r$ : (ج) و (د)  $r = 0.99$ ، (ه) و (و)  $r = 0.95$  و (ز) و (ح)  $r = 0.9$ . در شکل‌های طیف دامنه، طیف دامنه خروجی با خط آبی توپر و طیف دامنه ایده‌آل با خط چین قرمز نشان داده شده است.

سیگنال خروجی می‌شود. در مثال مصنوعی، طول تبدیل فوریه گسسته

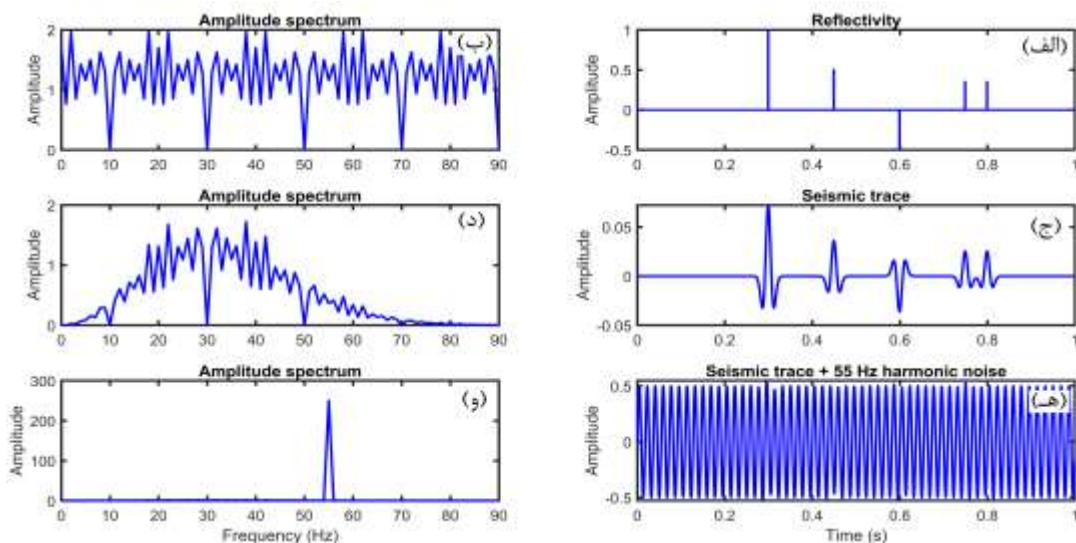
بازه فرکانسی بزرگتر برای درونیابی سبب ایجاد اعوجاجات گسترده در



به منظور ارزیابی روش در مدل مصنوعی که بیشتر به داده واقعی شبیه باشد، یک ردلرزه مصنوعی حاصل هم‌امیخت سری بازتاب مصنوعی شکل ۶- (الف) و موجک ریکر ۳۰ هرتز در نظر گرفته شد که در شکل ۶- (ج) نشان داده شده است. ردلرزه با نوفه هارمونیک ۵۵ هرتز آغشته گردید که در شکل ۶- (ه) نشان داده شده است. در شکل‌های ۶- (ب)، (د) و (و) به ترتیب طیف دامنه سری بازتاب، ردلرزه مصنوعی بدون نوفه و ردلرزه مصنوعی حاوی نوفه نشان داده شده است. در شکل ۷ نتایج تضعیف نوفه هارمونیک ۵۵ هرتز با استفاده از دو روش درونیایی طیفی و فیلتر شکافی نشان داده شده است. شکل ۷- (الف) و (ب) به ترتیب ردلرزه خروجی روش درونیایی طیفی به همراه طیف دامنه آن (خط آبی توپر) در مقایسه با طیف دامنه ایده‌آل (خط چین قرمز) نشان می‌دهد و شکل ۷- (ج) و (د) به ترتیب ردلرزه خروجی روش فیلتر شکافی به همراه طیف دامنه آن (خط آبی توپر) در مقایسه با طیف دامنه ایده‌آل (خط چین قرمز) نشان می‌دهد.



شکل ۵. (الف) و (ب) سیگنال خروجی ایده‌آل و طیف دامنه آن. (ج) و (د) سیگنال خروجی روش پیشنهادی و طیف دامنه آن. طیف دامنه خروجی روش پیشنهادی به صورت خط توپر آبی و طیف دامنه خروجی ایده‌آل به صورت خط چین قرمز نشان داده شده است.



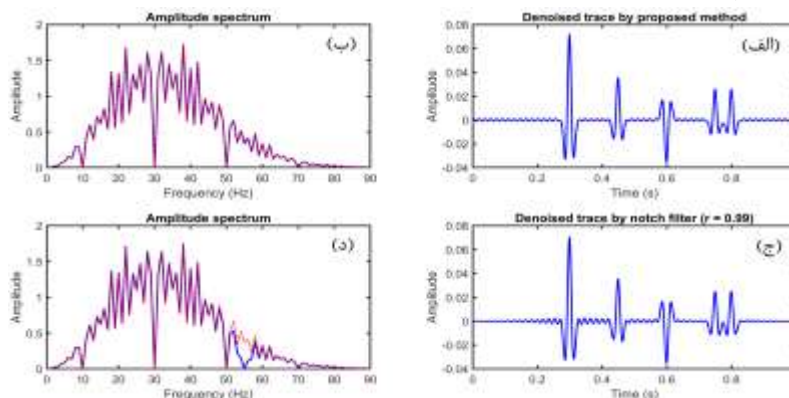
شکل ۶. (الف) سری بازتاب مصنوعی و (ب) طیف دامنه آن. (ج) ردلرزه مصنوعی حاصل هم‌امیخت سری بازتاب مصنوعی و موجک ریکر ۳۰ هرتز و (د) و (ه) سری بازتاب مصنوعی و (ب) طیف دامنه آن. (ج) ردلرزه مصنوعی حاصل هم‌امیخت سری بازتاب مصنوعی و موجک ریکر ۳۰ هرتز و (د) و (ه) سری بازتاب مصنوعی و (ب) طیف دامنه آن.

طیف دامنه آن. (ه) ردلرزه مصنوعی آغشته به نوفه هارمونیک ۵۵ هرتز و (و) طیف دامنه آن.

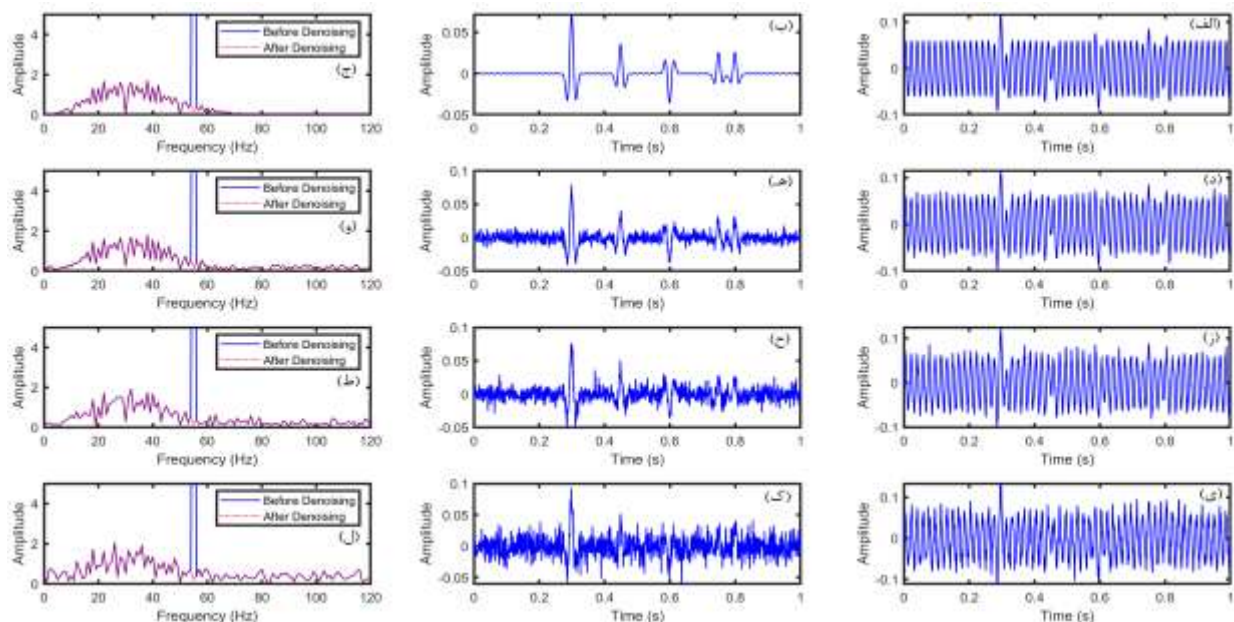
عملکرد پایداری دارد یا خیر؟ برای این منظور در این بخش به سیگنال شکل ۶ سطوح مختلف نوفه تصادفی با نسبت‌های سیگنال به نوفه متفاوت ارائه شده است و عملکرد روش درونیابی طیفی در تضعیف نوفه خطوط انتقال نیرو بررسی شده است؛ که در شکل ۸ نتایج آن نشان داده شده است. می‌توان دید که حضور نوفه تصادفی بر عملکرد روش درونیابی طیفی تاثیر مخرب چشمگیری ندارد و روش پیشنهادی قادر است در حضور سطوح مختلف نوفه تصادفی عملکرد قابل قبولی برای تضعیف نوفه خطوط انتقال نیرو داشته باشد و الگوریتم از پایداری مناسبی برخوردار است. این مورد به وضوح در طیف دامنه قبل و بعد از نوفه‌زدایی قابل مشاهده

برای محاسبه نتایج، مقدار  $r$  در فیلتر شکافی برابر با ۰.۹۹ و بازه فرکانسی در روش درونیابی طیفی برابر با  $55 \pm 1$  در نظر گرفته شده است. با توجه به پیچیدگی طیف دامنه، بازه فرکانسی درونیابی کوچک در نظر گرفته شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، روش درونیابی طیفی توانسته است ضمن تضعیف حداکثری نوفه هارمونیک، کمترین آسیب را به سیگنال اصلی وارد نماید، در صورتی که روش فیلتر شکافی علاوه بر تضعیف نوفه هارمونیک ۵۵ هرتز به محتوای فرکانسی سیگنال در فرکانس ۵۵ هرتز و همسایگی آن آسیب وارد نموده است.

یکی از آزمایش‌هایی که در مورد بررسی عملکرد الگوریتم‌های مختلف در زمینه مسئله مورد نظر انجام می‌شود، آزمایش تحلیل حساسیت است. حال باید بررسی شود که آیا الگوریتم مورد نظر در حضور نوفه

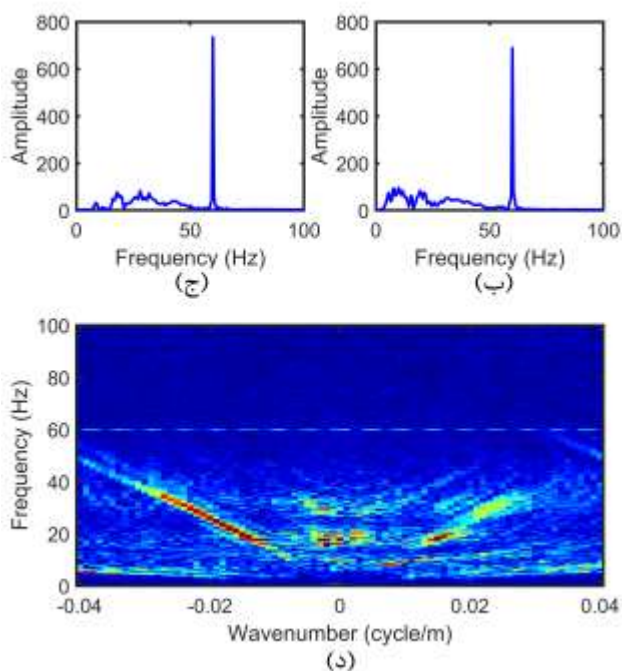


شکل ۷. (الف) ردلرزه خروجی روش درونیابی طیفی و طیف دامنه آن (خط آبی توپر) در مقایسه با طیف دامنه ایده‌آل (خط چین قرمز). (ج) ردلرزه خروجی روش فیلتر شکافی و طیف دامنه آن (خط آبی توپر) در مقایسه با طیف دامنه ایده‌آل (خط چین قرمز).



شکل ۸. ستون سمت راست از بالا به پایین ردلرزه مصنوعی آلوده به نوفه خطوط انتقال نیرو را که به ترتیب (الف) عاری از نوفه تصادفی، (د) آلوده به نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه کم، (ز) آلوده به نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه متوسط و (ی) آلوده به نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه زیاد را نشان می‌دهد. در ستون میانی نتیجه روش درونیابی طیفی در تضعیف نوفه خطوط انتقال نیرو از را برای هر یک از سیگنال‌های سمت راست نشان می‌دهد و در ستون سمت چپ نیز طیف دامنه سیگنال قبل و بعد از تضعیف نوفه خطوط انتقال نیرو نشان داده شده است.

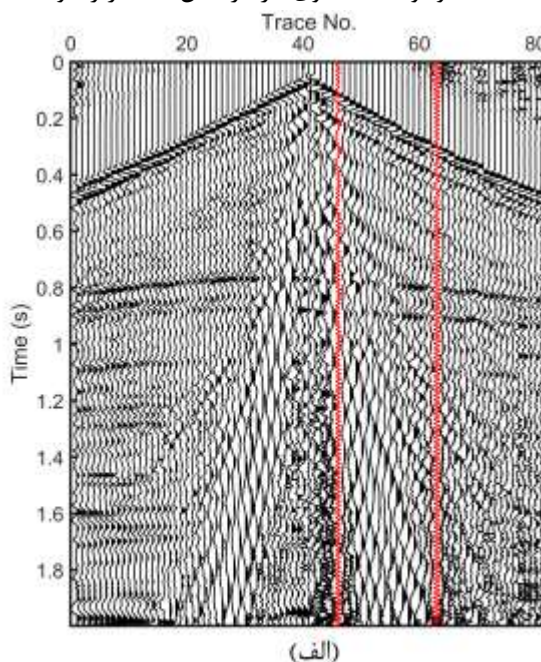
هارمونیک مورد نظر را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نتیجه خروجی دو روش درونیابی طیفی و فیلتر شکافی نشان داده شده است، که با مقایسه طیف دامنه دو ردلرزه قبل و بعد از نوفه‌زدایی به دو روش اشاره شده و همچنین مقایسه طیف  $f-k$  می‌توان دید که در داده واقعی نیز روش درونیابی طیفی در مقایسه با روش فیلتر شکافی موفق‌تر عمل نموده است و کارایی بیشتری از خود نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دیگر در طیف دامنه دو ردلرزه پس از نوفه‌زدایی اثری از دامنه قوی در فرکانس ۶۰ هرتز مشاهده نمی‌شود. همچنین خط ثابتی که در طیف  $f-k$  قبل از نوفه‌زدایی وجود داشت و مربوط به نوفه هارمونیک بود، دیگر در طیف  $f-k$  رکورد نوفه‌زدا شده وجود ندارد.



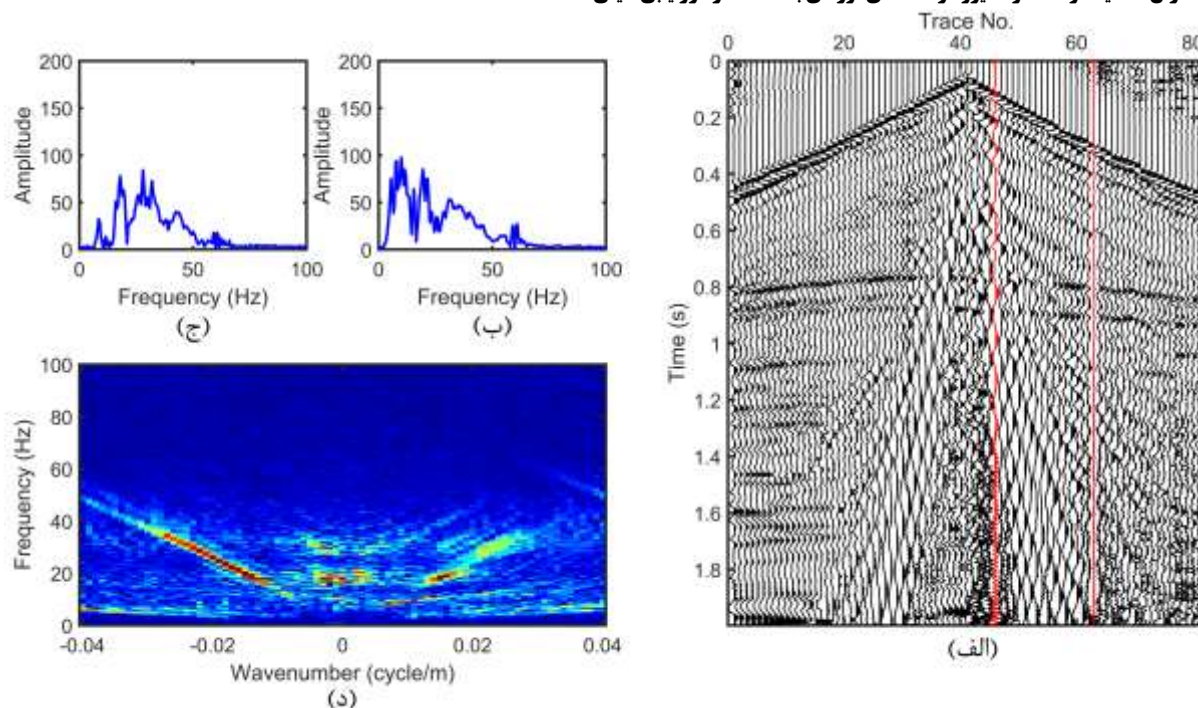
شکل ۹. (الف) رکورد نقطه میانی مشترک با دو ردلرزه حاوی نوفه هارمونیک ۶۰ هرتز (ردلرزه‌های شماره ۴۶ و ۶۳ به رنگ قرمز). (ب) و (ج) به ترتیب طیف دامنه دو ردلرزه شماره ۴۶ و ۶۳. (د) طیف  $f-k$  رکورد نقطه میانی مشترک.

## ۵- ارزیابی روش بر روی داده واقعی

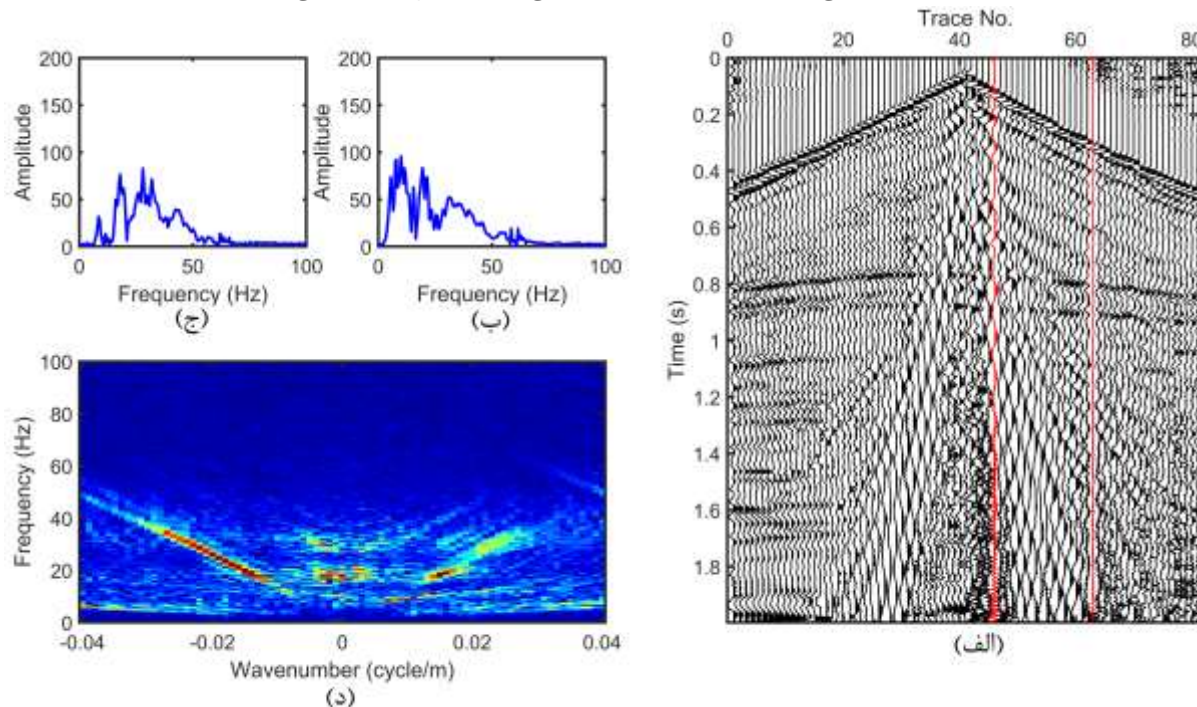
در نهایت، کارایی روش بر روی داده واقعی لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور یک رکورد نقطه میانی مشترک از مجموعه داده‌های واقعی نرم‌افزار VISTA انتخاب گردید که، در شکل ۹- (الف) نشان داده شده است. در ردلرزه شماره ۴۶ و ۶۳ در رکورد نقطه میانی مشترک به نوفه هارمونیک ۶۰ هرتز آغشته می‌باشند. دو ردلرزه مذکور در شکل ۹- (الف) به رنگ قرمز مشخص شده‌اند. در شکل ۹- (ب) و (ج) به ترتیب طیف دامنه دو ردلرزه شماره ۴۶ و ۶۳ نشان داده شده است. برای مقایسه بیشتر طیف  $f-k$  رکورد نقطه میانی مشترک مذکور نیز در شکل ۹- (د) رسم شده است. وجود دامنه قوی در فرکانس ۶۰ هرتز، نوفه







شکل ۱۰. (الف) رکورد نقطه میانی مشترک نوفه‌زدا شده با روش درونیابی طیفی. (ب) و (ج) به ترتیب طیف دامنه دو ردلرزه شماره ۴۶ و ۶۳ پس از نوفه‌زدایی. (د) طیف  $f-k$  رکورد نقطه میانی مشترک پس از نوفه‌زدایی.



شکل ۱۱. (الف) رکورد نقطه میانی مشترک نوفه‌زدا شده با روش فیلتر شکافی. (ب) و (ج) به ترتیب طیف دامنه دو ردلرزه شماره ۴۶ و ۶۳ پس از نوفه‌زدایی. (د) طیف  $f-k$  رکورد نقطه میانی مشترک پس از نوفه‌زدایی.

معرفی شده می‌تواند به عنوان یک روش مناسب جایگزین روش متداول فیلتر شکافی شود. روش جدید معرفی شده، بر خلاف روش فیلتر شکافی، قابلیت تضعیف حداکثری نوفه هارمونیک را با کمترین آسیب به محتوای فرکانسی در همسایگی فرکانس نوفه هارمونیک دارد. همچنین برخلاف روش فیلتر شکافی، روش درونیابی طیفی، دامنه فرکانس مربوط به نوفه

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش درونیابی طیفی به عنوان یک روش برای تضعیف نوفه هارمونیک در داده‌های لرزه‌ای معرفی شد. نتایج بدست آمده در داده مصنوعی و واقعی در مقایسه با نتایج فیلتر شکافی نشان داد که روش



Leske, S., and S. S. Dalal, 2019, Reducing power line noise in EEG and MEG data via spectrum interpolation: *NeuroImage*, 189, 763-776.

Linville, A. F., and R. A. Meek, 1992, Canceling stationary sinusoidal noise: *Geophysics*, 57, no. 11, 1493-1501.

Liu, C., Y. Liu, B. Yang, D. Wang, and J. Sun, 2006, A 2D multistage median filter to reduce random seismic noise: *Geophysics*, 71, no. 5, V105-V110.

Mewett, D. T., K. J. Reynolds, and H. Nazeran, 2004, Reducing power line interference in digitised electromyogram recordings by spectrum interpolation: *Medical and Biological Engineering and Computing*, 42, no. 4, 524-531.

Miao, Z., and X. Jiang, 2014, Additive and exclusive noise suppression by iterative trimmed and truncated mean algorithm: *Signal Processing*, 99, 147-158.

Nyman, D. C., and J. E. Gaiser, 1983, Adaptive rejection of high-line contamination: 53th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 321-323.

Proakis, J. G., and D. G. Manolakis. 2007, *Digital signal processing: Principles, algorithms and applications*.

Saucier, A., M. Marchant, and M. Chouteau, 2006, A fast and accurate frequency estimation method for canceling harmonic noise in geophysical records: *Geophysics*, 71, no. 1, V7-V18.

Sheriff, R. E., and L. P. Geldart, 1995, *Exploration seismology*: Cambridge university press.

Xia, J., and R. D. Miller, 2000, Design of a hum filter for suppressing power-line noise in seismic data: *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 5, no. 2, 31-38.

هارمونیک را در طیف دامنه سیگنال صفر نمی‌کند؛ بلکه سعی می‌کند بخشی از دامنه در آن فرکانس که مربوط به نوفه هارمونیک است را تضعیف نماید و اطلاعات سیگنال در آن فرکانس را حفظ می‌کند. با انجام تحلیل حساسیت روش در مقابل نوفه تصادفی، نشان داده شد؛ که حضور نوفه تصادفی تاثیر مخرب چشم‌گیری بر روی نتایج ندارد و در حضور سطوح مختلف نوفه تصادفی نیز این روش عملکرد قابل قبولی دارد و از پایداری مناسبی برخوردار است.

## ۷- منابع

روشندل کاهو، ا. و نجاتی کلاته، ع.، ۱۳۹۲، کاربرد فیلتر کمینه واریانس در تضعیف نوفه خط‌های انتقال نیرو، مجله ژئوفیزیک ایران، ۷، شماره ۱، ۷۹-۸۸.

Bednar, J. B., 1983, Applications of median filtering to deconvolution, pulse estimation, and statistical editing of seismic data: *Geophysics*, 48, no. 12, 1598-1610.

Butler, K. E., and R. D. Russell, 2003, Cancellation of multiple harmonic noise series in geophysical records: *Geophysics*, 68, no. 3, 1083-1090.

Duncan, G., and G. Beresford, 1995, Some analyses of 2-D median fk filters: *Geophysics*, 60, no. 4, 1157-1168.

Karsli, H., and D. Dondurur, 2015, Spectral Domain Local Cancellation Procedure of Harmonic Noise in Seismic Data: 8th Congress of the Balkan Geophysical Society.

Karşlı, H., and D. Dondurur, 2018, A mean-based filter to remove power line harmonic noise from seismic reflection data: *Journal of Applied Geophysics*, 153, 90-99.

Larsen, J. J., E. Dalgaard, and E. Auken, 2013, Noise cancelling of MRS signals combining model-based removal of powerline harmonics and multichannel Wiener filtering: *Geophysical Journal International*,