

## تضعیف نوفه تلاطم بر روی داده‌های لرزه‌ای دریایی با استفاده از روش تجزیه مد متغیر در یک رهیافت خودکار

زهرا سادات آتسگاهی<sup>۱</sup>، محمد رداد<sup>۲\*</sup> و امین روشندل کاهو<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹)

### چکیده

تضعیف نوفه یکی از مراحل مهم در پردازش داده‌های لرزه‌ای می‌باشد که می‌تواند باعث بهبود نتایج دیگر مراحل پردازشی و پیرو آن تفسیر دقیق‌تر مقاطع لرزه‌ای شود. یکی از نوفه‌های موجود در داده‌های لرزه‌ای دریایی نوفه تلاطم می‌باشد که دارای دامنه‌ی بالا و باند فرکانسی پایین است و در داده‌ها به صورت نوارهای عمودی مشاهده می‌شود. روش‌های مختلفی برای تضعیف نوفه تلاطم وجود دارند که هر یک مزایا و محدودیت‌هایی دارند. رهیافت بیشتر روش‌های نوفه‌زدایی جداسازی حداکثری نوفه از سیگنال است که در حین تضعیف نوفه کمترین آسیب به سیگنال‌های مطلوب زده شود. تجزیه مد متغیر روشی است که با جداسازی مدهای مختلف سیگنال و نوفه در این زمینه نتایج امیدبخشی داشته است. اگرچه با توجه به اینکه این روش بر روی سیگنال‌ها بصورت جداگانه اعمال می‌شود و چون تشخیص مد آلوده در فرایند تجزیه نیاز به نقش کاربر دارد، لذا کارایی روش برای نوفه‌زدایی از داده‌های لرزه‌ای، که شامل تعداد زیادی ردلرزه هستند، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به همین منظور در این مقاله یک الگوریتم خودکار برای تضعیف نوفه تلاطم با استفاده از تجزیه مد متغیر پیشنهاد شده است. در این الگوریتم ابتدا هر ردلرزه با تجزیه مد متغیر به مدهای سازنده‌اش تجزیه می‌شود. سپس بصورت خودکار و بر مبنای تابع خودهمبستگی، مدهای آلوده به نوفه تلاطم شناسایی شده و در یک فرایند آستانه‌گذاری خاص، این مدها نوفه‌زدایی شده و سپس سیگنال بازسازی می‌شود. کارایی الگوریتم پیشنهادی با بکارگیری آن بر روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی به اثبات رسیده است. قابل ذکر است که این روش در مقایسه با فیلتر بالاگذر و روش نوفه‌زدایی زمان-فرکانس (TFDN) متداول، عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد، به گونه‌ای که به طور مؤثر نوفه تلاطم را تضعیف می‌کند و در عین حال اطلاعات بالارزش لرزه‌ای با فرکانس پایین را حفظ می‌نماید.

**کلمه‌های کلیدی:** داده‌ی لرزه‌ای دریایی، تضعیف نوفه تلاطم، تجزیه مد متغیر، آستانه‌گذاری، الگوریتم خودکار

## ۱ مقدمه

لرزه‌نگاری روش توانمندی برای اکتشاف ذخایر هیدروکربنی زیر سطحی است که هم در خشکی و هم در دریا قابل انجام است. داده‌های لرزه‌ای اغلب آلوده به انواع مختلف نوفه می‌باشند. تضعیف نوفه از مراحل مهم پردازش داده‌های لرزه‌ای به حساب می‌آید که نقش اساسی در پردازش و تفسیر و در نهایت تصویرسازی زیرسطحی موفق ایفا می‌کند. انواع گوناگونی از نوفه همدوس و ناهمدوس بر روی داده‌های لرزه‌ای خشکی و دریایی ثبت شده حضور دارند. نوفه همدوس غالب در داده‌های لرزه‌ای خشکی نوفه زمین‌غلت است و البته رایج‌ترین نوفه ناهمدوس موجود در داده‌های لرزه‌ای نوفه تصادفی است که تضعیف آن نقش بسیار مؤثری بر ارتقای کیفیت داده‌های لرزه‌ای دارد. باقری و ریاحی (۲۰۱۶) اثر تضعیف نوفه در بهبود کیفیت داده لرزه‌ای را از طریق بکارگیری فیلتر میانه مبتنی بر تصمیم نشان دادند. اما در داده‌های دریایی رایج‌ترین نوفه لرزه‌ای نوفه تلاطم (swell) می‌باشد. نوفه تلاطم به دلیل شرایط آب و هوایی و تلاطم در سطح دریا تولید می‌شود. ویژگی اصلی این نوفه دامنه زیاد و محتوای فرکانسی پایین (۱۰-۲ هرتز) می‌باشد و معمولاً در داده‌های لرزه‌ای به صورت نوارهای عمودی مشاهده می‌شود. در ایجاد نوفه تلاطم دو مکانیزم مختلف نقش دارند: اولین مرتبط با تجهیزات داده‌برداری است. در کشتانه‌های (streamer) پر از سیال، حرکت کشتانه می‌تواند امواج عرضی به نام امواج برآمدگی ایجاد کند که باعث ایجاد نوفه با دامنه بالا و تا فرکانس ۱۰ هرتز می‌شود. دلیل دوم منشأ محیطی دارد. در دریا نوسان‌هایی با فشار قوی مانند نوسانات فشارهیدرواستاتیکی ناشی از حرکت عمودی سطح آب در نتیجه امواج قوی دریا و نیز تغییرات فشار دینامیکی در امتداد سطح جریان آب می‌تواند باعث تولید این نوع از نوفه بر روی داده‌های لرزه‌ای شود (البوٹ و همکاران، ۲۰۰۹). در سالیان گذشته برای تضعیف نوفه تلاطم در داده‌های لرزه‌ای، روش‌های مختلفی به کار گرفته

شده‌است. شونویل و همکاران (۲۰۰۸) روش فیلتر فرکانس مکان (FX) تکرارشونده را برای کاهش نوفه تلاطم در داده‌های لرزه‌ای استفاده کردند. در این روش ابتدا محدوده‌ی فرکانسی که در آن نوفه تلاطم وجود دارد شناسایی شده و سپس یک فیلتر فرکانسی به داده‌ها اعمال می‌شود تا نوفه در این محدوده فرکانسی کاهش یابد. محدوده فرکانسی نوفه در هر تکرار به روز می‌شود و فیلتر کردن به صورت تکرارشونده انجام می‌شود. البوٹ و همکاران (۲۰۱۰) از نوعی فیلتر زمان فرکانس برای حذف نوفه تلاطم از داده‌های لرزه‌ای دریایی استفاده کردند. آنها یک پنجره مکان-زمان بر روی داده در نظر گرفته و در این پنجره دامنه‌های طیف دامنه ردلرزه‌ها را در یک باند فرکانسی مشخص بر مبنای طیف دامنه یک ردلرزه منتخب عاری از نوفه آستانه‌گذاری کردند. بکارا و فان در بان (۲۰۱۰) از روش آستانه‌گذاری در جهت حذف نوفه تلاطم استفاده کردند به این صورت که دامنه‌های بالای یک آستانه خاص را نوفه دانسته و از طریق آزمون و خطا و روش داده محور آستانه مناسب محاسبه شده است. دوندورور و کارسلی (۲۰۱۲) از فیلتر پیش‌بینی وینر و یک فیلتر باند‌گذر برای تضعیف نوفه تلاطم استفاده کردند و نشان دادند که با این شیوه می‌توان نوفه تلاطم را در داده‌های لرزه‌ای تضعیف و در عین حال دامنه بازتاب را در باند فرکانسی مورد نظر حفظ کرد. کیم و هونگ (۲۰۱۲) از فیلتر فرکانس-دورافت و فیلتر میانه بصورت متوالی برای تضعیف نوفه تلاطم استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که با اعمال فیلتر فرکانس دورافت غالباً نوفه‌های غیرهمدوس حذف می‌شوند، اما نوفه‌های تلاطم با دامنه بالا باقی می‌مانند که با استفاده از فیلتر میانه این نوفه‌ها نیز تا حدود زیادی تضعیف می‌شوند. بعدتر از ترکیب فیلتر فرکانس دورافت و یک فیلتر میانه مبتنی بر تصمیم، باقری و ریاحی (۲۰۱۷) در تضعیف نوفه تصادفی و اسپایکی بهره بردند. واعظی و کاظمی (۲۰۱۶) از یک روش کمینه‌سازی متناوب مبتنی بر

مُد‌های سازنده به منظور جستجوی مُدهای آلوده بررسی شود تا فرایند فیلتر کردن بر روی آن مُدها انجام پذیرد. این فرایند برای هر یک از سیگنال‌ها باید جداگانه انجام شود و با توجه به اینکه داده‌های لرزه‌ای شامل تعداد بسیار زیادی سیگنال هستند، این رهیافت کارایی روش‌های تجزیه مُد را کاهش می‌دهد. با توجه به این موضوع در این مقاله الگوریتمی پیشنهاد شده است که در آن، پس از تجزیه مُد متغیر داده‌های لرزه‌ای، مُدهای آلوده بصورت خودکار شناسایی شوند تا فرایند فیلتر کردن روی آنها انجام شود و مُدهای بدون نوفه نیز دست نخورده باقی می‌مانند. فیلتر کردن مُدهای آلوده توسط یک استراتژی آستانه‌گذاری انجام می‌شود. در انتها مُدهای دست نخورده و مُدهای فیلتر شده با هم جمع می‌شوند تا سیگنال نوفه‌زدایی شده بازسازی شود.

در ادامه مقاله ابتدا مبانی تئوری روش تجزیه مُد متغیر ارائه می‌شود. سپس از طریق یک آزمایش عملکرد این روش در تجزیه یک سیگنال لرزه‌ای مصنوعی آلوده به نوفه تلاطم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس الگوریتم خودکار جستجوی مُد آلوده و استراتژی آستانه‌گذاری در فیلتر کردن مورد بحث قرار می‌گیرد و عملکرد آن ارزیابی می‌شود. در پایان روش پیشنهادی بر روی یک مجموعه داده لرزه‌ای دریایی واقعی اعمال و نتیجه آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲ مبانی نظری تجزیه مُد متغیر

برای تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های سازنده‌اش، هوانگ و همکاران (۱۹۹۸) یک روش مبتنی بر داده تحت عنوان تجزیه مُد تجربی (EMD) را معرفی کردند. در الگوریتم EMD می‌توان سیگنال را به مؤلفه‌های نوسانی که تابع مُد ذاتی (IMF) نامیده می‌شوند تجزیه کرد. فرایند تجزیه و بدست آوردن تابع مُد ذاتی این گونه است که ابتدا نقاط بیشینه و کمینه محلی سیگنال مشخص شده و پوش‌های

فاکتورسازی ماتریس غیرمنفی برای تضعیف نوفه تلاطم استفاده کردند. ایده آنها بر مبنای این فرضیه بود که مشخصه‌های زمان-فرکانسی نوفه تلاطم با مشخصه‌های مؤلفه‌های سیگنال تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. ژائو و همکاران (۲۰۱۹) از یک رویکرد مجهز به یک مدل یادگیری عمیق استفاده کردند که می‌تواند به طور مؤثر نوفه تلاطم با شدت‌ها و ویژگی‌های مختلف را در داده لرزه‌ای بدون آسیب رساندن به سیگنال‌های مفید تضعیف کند.

یکی از رهیافت‌های کارا در تضعیف نوفه، این است که بتوان سیگنال را از حوزه اصلی به حوزه‌ای دیگر منتقل کرد که در آنجا سیگنال و نوفه خصوصیات متفاوتی داشته باشند که بتوان بر مبنای آن ویژگی‌ها با طراحی فیلترهای مناسب نوفه را از سیگنال جدا کرد (باقری و ریاحی، ۲۰۱۸). در همین زمینه تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های سازنده می‌تواند کارساز باشد. تجزیه مُد تجربی (EMD) و نسخه‌های بهبود یافته آن و همچنین تجزیه مُد متغیر (VMD) ابزارهای موفق‌تری در این زمینه بوده‌اند. در سال‌های متعددی از نسخه‌های مختلف تجزیه مُد در جهت تضعیف نوفه لرزه‌ای استفاده شده است. روشندل و نجاتی (۲۰۱۱) با استفاده از روش تجزیه مُد تجربی به تضعیف نوفه‌های اتفاقی در داده‌های لرزه‌ای پرداختند. در الگوریتم آنها با استفاده از آستانه‌گذاری بازه‌ای روی هر تابع مُد ذاتی، میزان نوفه در هر رد لرزه تضعیف شده است. خلیل طهماسبی و همکاران (۱۳۹۶) از تجزیه مُد متغیر در تضعیف نوفه زمین‌غلت لرزه‌ای استفاده کردند. لیو و همکاران (۲۰۱۷) از روش تجزیه مُد متغیر برای تضعیف نوفه‌های تصادفی لرزه‌ای استفاده کردند. در این مقاله از روش تجزیه مُد متغیر برای تضعیف نوفه تلاطم استفاده شده و عملکرد این روش بر روی داده‌های مصنوعی و حقیقی آلوده به نوفه بررسی می‌شود. زمان محاسبات در روش‌های نوفه‌زدایی بر مبنای تجزیه مد (تجربی یا متغیر) عموماً زیاد است. دلیل این امر این است که در این روش‌ها بعد از تجزیه سیگنال باید تمام

تنکی نیز می‌باشد. در اینجا تنکی هر مد بیانگر پهنای باند همان مد است. به عبارت دیگر، فرض می‌شود که هر مد  $k$  حول فرکانس مرکزی  $\omega_k$  فشرده است، که این فرکانس مرکزی در تجزیه تعیین می‌شود. روش VMD برای سیگنال  $x(t)$  از طریق حل مسئله مقید زیر انجام می‌شود (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۳):

$$\min_{\{m_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{i}{\pi t} \right) * m_k(t) \right] e^{-i\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_k m_k = x(t)$$

که در آن  $\{\omega_k\} =$  و  $\{m_k\} = \{m_1, \dots, m_k\}$  بیانگر مدها و فرکانس‌های مرکزی متناظر هستند.  $\delta(t)$  تابع دیراک و  $\left( \delta(t) + \frac{i}{\pi t} \right) * m_k(t)$  تبدیل هیلبرت  $m_k(t)$  است که هدف آن تبدیل  $m_k(t)$  به سیگنال تحلیلی به منظور تولید یک طیف فرکانسی یک طرفه با فرکانس‌های مثبت است. عبارت نمایی  $e^{-i\omega_k t}$  باعث می‌شود طیف فرکانسی هر مد به باند پایه تغییر کند. برای تبدیل مسئله به یک مسئله غیرمقید، از عبارت پناستی درجه دو و ضرایب لاگرائز  $\lambda$  بصورت همزمان استفاده می‌شود:

$$L(\{m_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) := \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{i}{\pi t} \right) * m_k(t) \right] e^{-i\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| x(t) - \sum_k m_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), x(t) - \sum_k m_k(t) \rangle \quad (2)$$

که از طریق روش ADMM مسئله بهینه سازی در حوزه فوریه حل می‌شود (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۳).

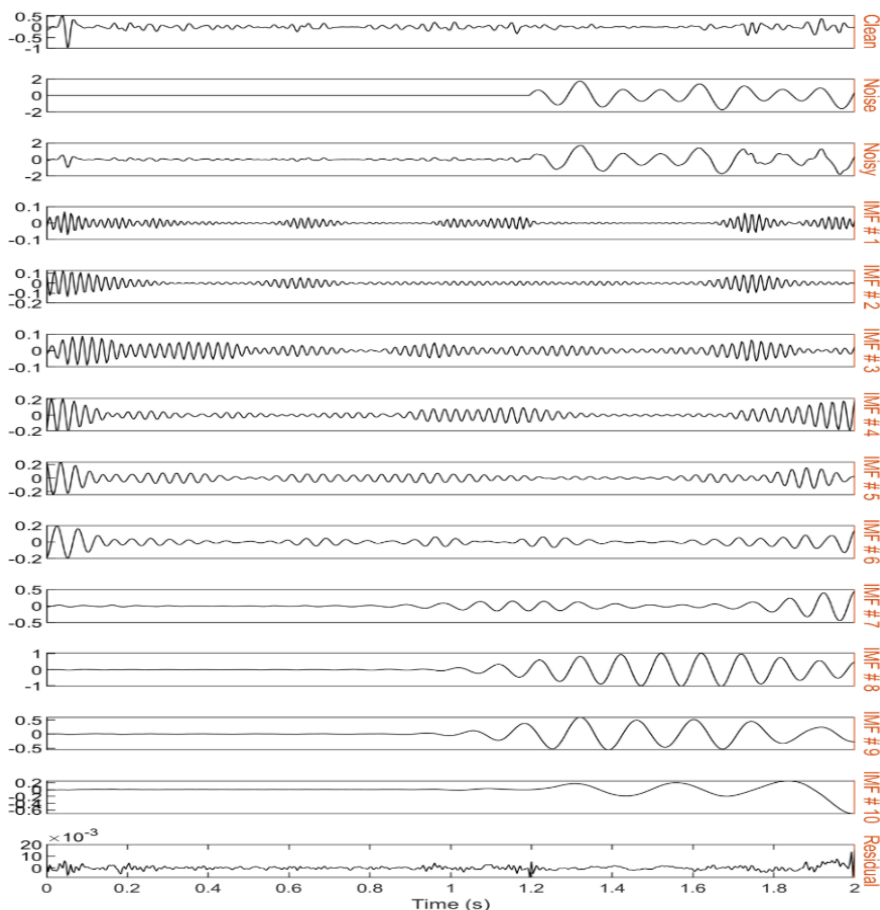
## ۲-۱ تجزیه سیگنال مصنوعی

بالایی و پایینی بدست آمده و میانگین پوش‌ها محاسبه می‌شود. تفاضل میانگین پوش‌ها از سیگنال اصلی به منزله‌ی اولین تابع مد ذاتی در نظر گرفته می‌شود و تفاضل اولین تابع مد ذاتی از سیگنال اصلی نشان دهنده‌ی باقیمانده است که فرایند مذکور برای بدست آوردن مد ذاتی دوم بر روی این باقیمانده انجام می‌شود. تا زمانی که باقیمانده شامل حداقل دو اکستریم نباشد، فرایند تجزیه ادامه می‌یابد. توابع مد ذاتی حاصل از تجزیه مد تجربی مبتنی بر فرضیه باند محدود فرکانسی نمی‌باشند (موهانتی و همکاران، ۲۰۱۴). به همین علت امکان جداسازی دو مؤلفه جدا از هم و با باند فرکانسی نزدیک به هم در روش تجزیه مد تجربی وجود ندارد که به این مشکل اختلاط مد می‌گویند. در اثر این پدیده دو یا چند مد مختلف نوسان در یک IMF ظاهر می‌شوند. برای رفع این مشکل الگوریتم تجزیه مد تجربی توسعه یافت و روش‌های تجزیه مد تجربی تجمعی (EEMD) (وو و هوانگ، ۲۰۰۹) و تجزیه مد تجربی تجمعی کامل (CEEMD) (تورس و همکاران، ۲۰۱۱) پیشنهاد شدند که در این روش‌ها نوفه سفید تصادفی به سیگنال اصلی در چندین مرحله از تجزیه اضافه می‌شود؛ اگرچه انتخاب دامنه نوفه سفید همچنان یک مشکل بود. از طرفی نیز هرکدام از توابع مد ذاتی بدست آمده در روش‌های تجزیه مد تجربی به صورت جداگانه محاسبه می‌شوند که موجب کاهش بازدهی روش می‌گردد. برای رفع این مشکلات روش تجزیه مد متغیر (VMD) ارائه شد و مزیت این روش نسبت به دو روش دیگر این است که دارای اختلاط مد کمتری می‌باشد (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۳). VMD، روشی کاملاً غیر بازگشتی است که در آن مدها در یک مرحله استخراج می‌شوند. هدف بدست آوردن مجموعه‌ای از توابع مدهای ذاتی و فرکانس‌های مرکزی متناظر است. رویکرد اصلی VMD تجزیه کردن سیگنال ورودی  $x(t)$  به تعدادی مد  $m_k$  است، که ضمن بازیابی سیگنال ورودی دارای ویژگی‌های

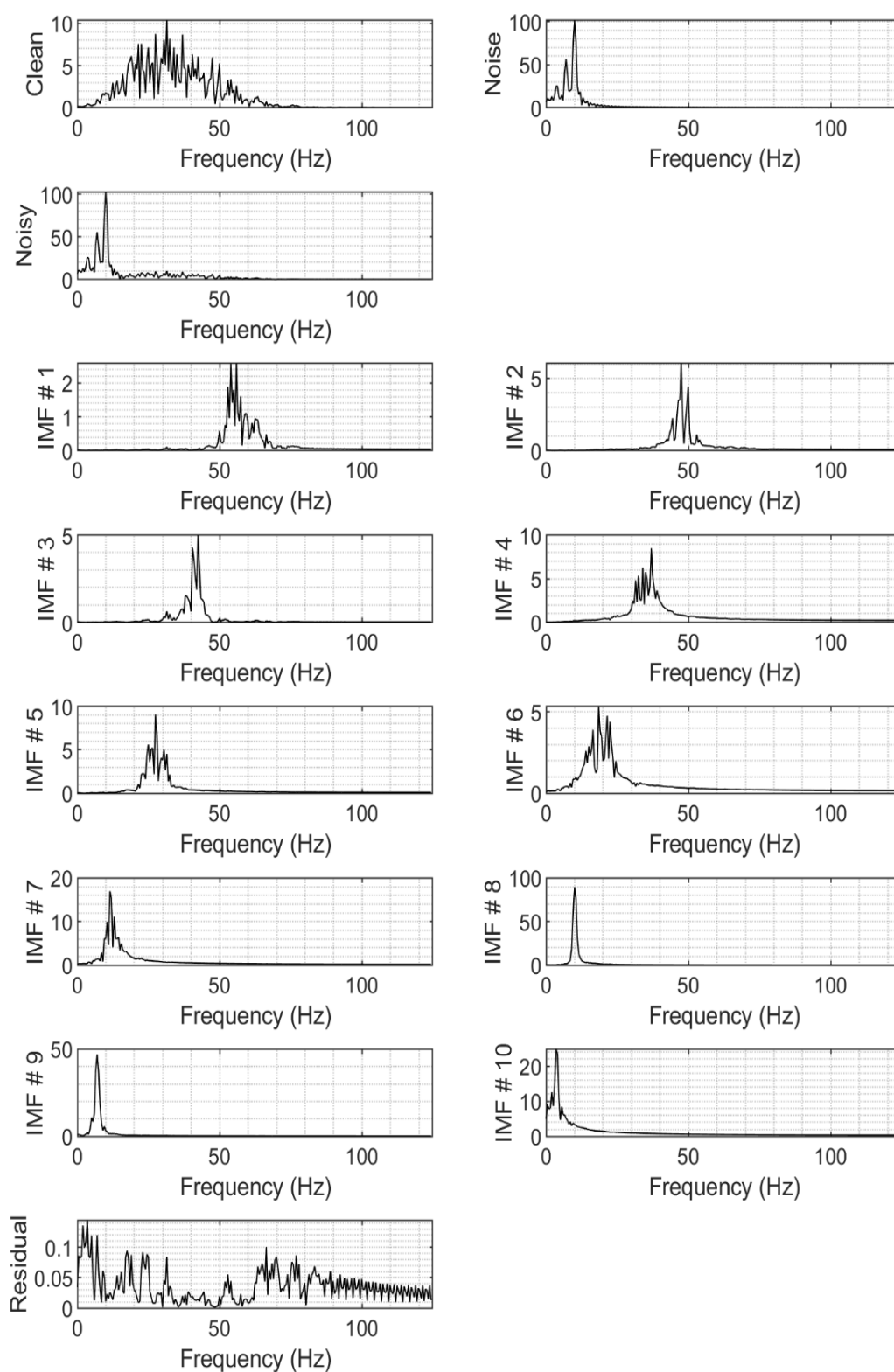
نتیجه‌ی تجزیه‌ی سیگنال از طریق روش VMD در شکل ۱ قابل مشاهده است. بطوریکه بیشترین سهم انرژی نوفه در مدهای هفتم و هشتم، نهم و دهم تجمع یافته است و در این چهار مد میزان کمی از انرژی سیگنال وجود دارد. این موضوع در طیف‌های دامنه نشان داده شده در شکل ۲ هم مشهود است. این جدایش خوب نوفه و سیگنال نتیجه فیلترینگ را بهبود خواهد داد. با دقت در شکل‌ها مشاهده می‌شود که مؤلفه‌های نوفه دامنه بالاتری نسبت به مؤلفه‌های سیگنال دارند که این موضوع هم در حوزه زمان (شکل ۱) و هم در حوزه فرکانس (شکل ۲) قابل بررسی است.

به منظور بررسی عملکرد روش VMD در تجزیه سیگنال، یک ردلرزه مصنوعی آلوده به نوفه تلاطم تولید شده است. سیگنال مصنوعی از همامیخت یک سری بازتاب تصادفی و موجک مورلت با فرکانس غالب ۳۰ هرتز و با بازه‌ی نمونه‌برداری ۴ میلی‌ثانیه ساخته شده است و نوفه تلاطم مطابق رابطه زیر به صورت ترکیبی از چند تابع سینوسی با فرکانس‌های چهار، هفت و ۱۰ هرتز در بخشی از سیگنال اضافه شده است:

$$\begin{aligned} swell(t) &= 0.25 \sin(8\pi t) \\ &+ 0.5 \sin(14\pi t) \\ &+ \sin(20\pi t) \quad \text{for } t \geq 1.2s \end{aligned} \tag{3}$$



شکل ۱. تجزیه سیگنال لرزه‌ای مصنوعی آلوده به نوفه تلاطم با روش VMD. در شکل سیگنال لرزه‌ای تمیز، نوفه تلاطم، سیگنال آلوده به نوفه، ده مد سازنده سیگنال آلوده به نوفه و باقیمانده نشان داده شده‌اند.

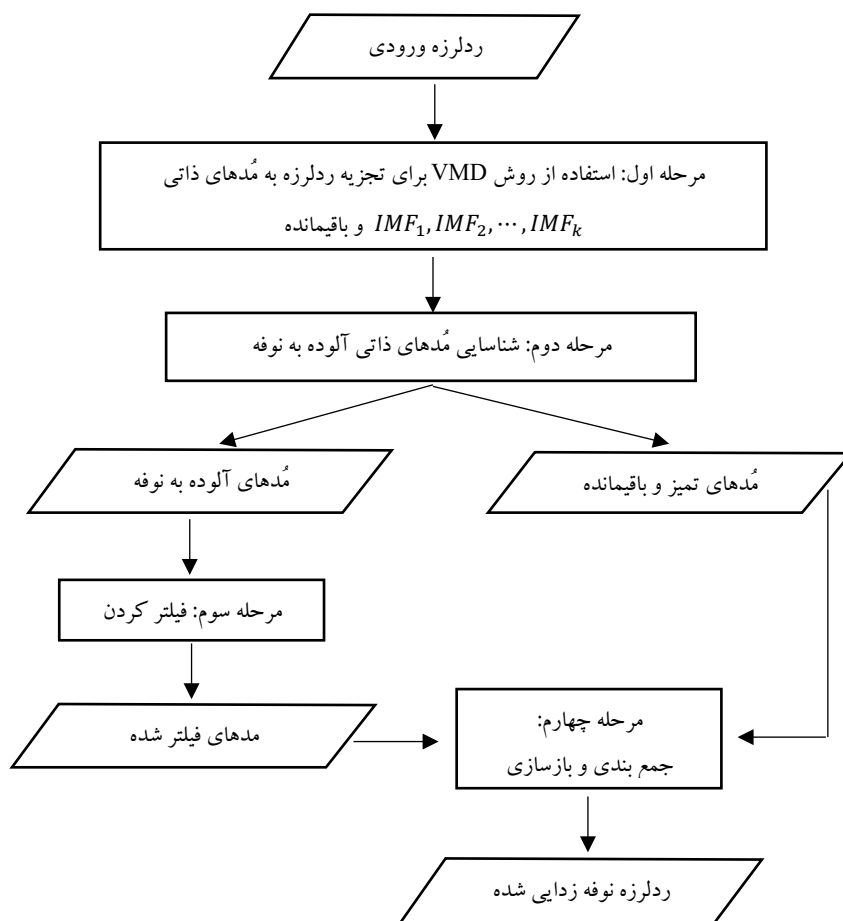


شکل ۲. طیف دامنه مؤلفه های نشان داده شده در شکل ۱.

### ۳ الگوریتم تضعیف نوفه تلاطم

مرحله سوم طی یک فرایند فیلتر کردن، نوفه زدایی شوند. در مرحله نهایی همه مدها شامل مدهای تمیز دست نخورده، مدهای نوفه‌زدایی شده و باقیمانده با هم جمع شده و طی فرایند بازسازی ردلرزه نوفه‌زدایی بازسازی می‌شود. در شکل ۳ الگوریتم پیشنهادی تضعیف نوفه تلاطم نشان داده شده است.

الگوریتم نوفه‌زدایی پیشنهاد شده در این مقاله شامل چهار مرحله است: تجزیه، شناسایی، فیلتر کردن و بازسازی. در مرحله اول ردلرزه توسط روش VMD به مدهای سازنده‌اش تجزیه می‌شود که پیش‌تر در رابطه با آن توضیح داده شد. در مرحله دوم باید مدهای آلوده به نوفه شناسایی شده و در



شکل ۳. الگوریتم پیشنهادی تضعیف نوفه تلاطم.

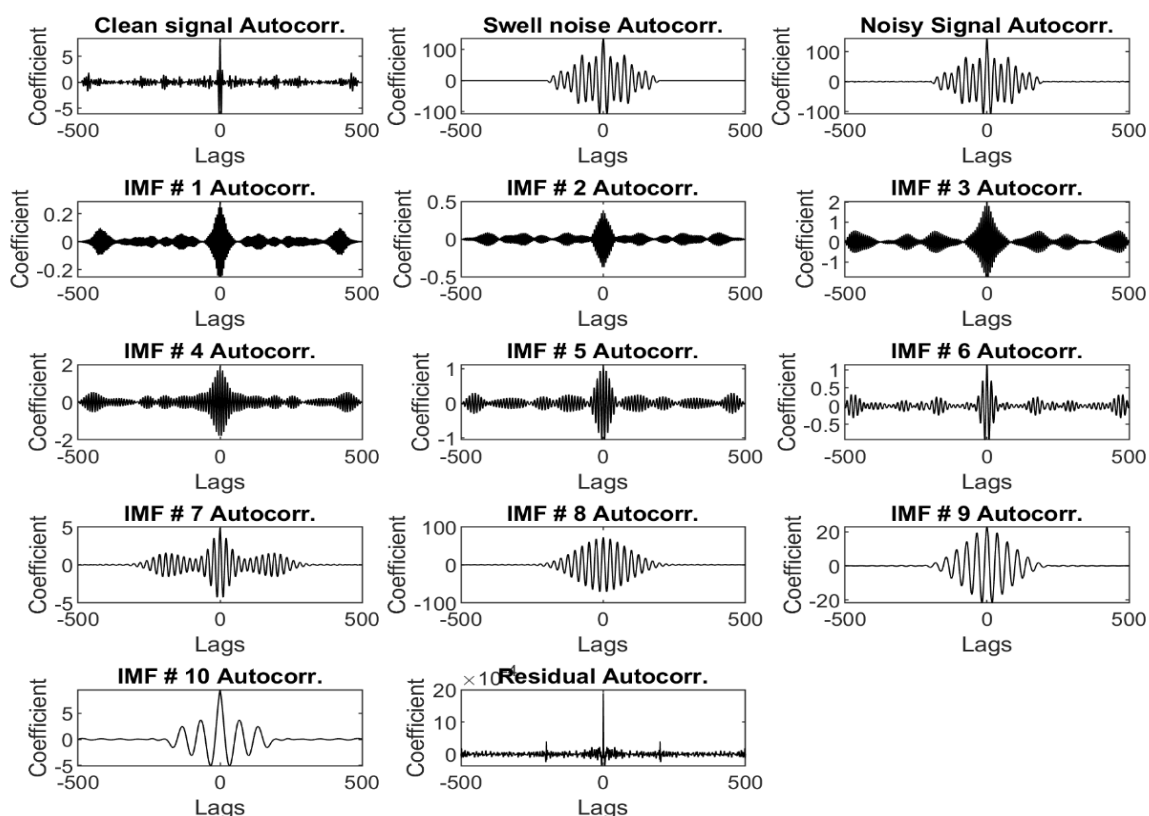
راهکاری که در این پژوهش برای شناسایی خودکار مدهای ذاتی آلوده به نوفه تلاطم در نظر گرفته می‌شود بر مبنای تابع خودهمبستگی مدهای سازنده سیگنال و معیار تصمیم نیز انحراف استاندارد خودهمبستگی است. همانطور که پیش‌تر بیان شد، نوفه تلاطم دو خصوصیت بارز دارد. دامنه بزرگ و رفتار هارمونیک. تابع خودهمبستگی سیگنال لرزه‌ای (که تقریباً رفتار تصادفی دارد)، به جز در تأخیر

### ۳-۱ شناسایی مدهای آلوده به نوفه

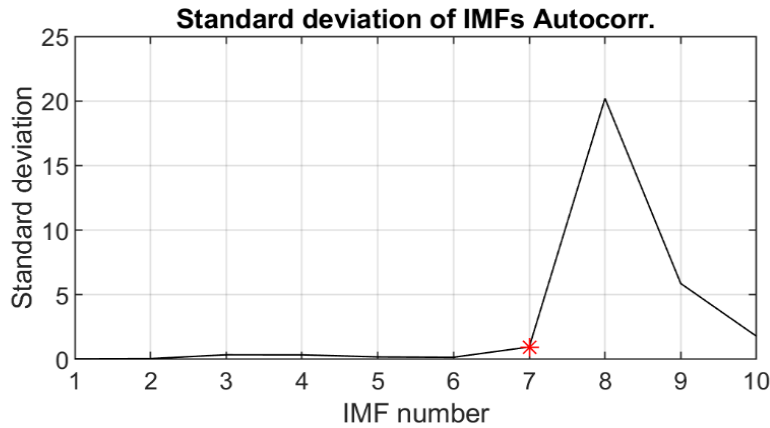
با توجه به حجم بودن داده‌های لرزه‌ای، بررسی بصری جزء به جزء مؤلفه‌های هر ردلرزه به منظور شناسایی مدهای آلوده به نوفه تلاطم، کار را بسیار سخت کرده و کارایی روش به شدت پایین می‌آید. بنابراین برای حل این مسئله باید از یک تکنیک خودکار استفاده شود تا مدهای آلوده به نوفه در هر ردلرزه به صورت اتوماتیک شناسایی شود.

شکل ۴ تابع خودهمبستگی مؤلفه‌های سیگنال نشان داده شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل می‌توان دید تابع خودهمبستگی نوفه تلاطم، سیگنال نوفه‌ای و مدهایی که انرژی نوفه در آنها غالب است (یعنی  $IMF_7$ ،  $IMF_8$ ،  $IMF_9$  و  $IMF_{10}$ ) مقدار و انحراف استاندارد بسیار بیشتری از سیگنال تمیز و دیگر مدها دارد. در شکل ۵ انحراف استاندارد تابع خودهمبستگی مدهای اول تا دهم نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود از  $IMF_7$  یک جهش در مقادیر انحراف استاندارد رخ داده است. بر این مبنای الگوریتم بصورت خودکار مدهای هفتم تا دهم را بعنوان مدهای آلوده شناسایی می‌کند.

صفر که مقدار بزرگی دارد، در تأخیرهای دیگر مقادیر کوچکی به خود می‌گیرد. از طرف مقابل، تابع خودهمبستگی نوفه تلاطم به علت رفتار هارمونیک آن، در تأخیرهای زیادی مقادیر بزرگ دارد. حال اگر دیگر ویژگی نوفه تلاطم، یعنی دامنه بزرگ، نیز در نظر گرفته شود، بر اساس واقعیات مطرح شده، می‌توان نتیجه گرفت که انحراف استاندارد تابع خودهمبستگی نوفه تلاطم نسبت به انحراف استاندارد تابع خودهمبستگی سیگنال، مقدار بزرگتری دارد. این موضوع در مورد مدهای ذاتی که شامل میزانی از نوفه تلاطم باشد نیز صدق می‌کند. بر این اساس معیار مقدار انحراف استاندارد تابع خودهمبستگی بعنوان معیار تشخیص مدهای آلوده به نوفه در نظر گرفته شد. در



شکل ۴. تابع خودهمبستگی مؤلفه‌های سیگنال نشان داده شده در شکل ۱.



شکل ۵. مقادیر انحراف استاندارد تابع خودهمبستگی IMFهای سیگنال نشان داده شده در شکل ۱. بر طبق الگوریتم خودکار از IMF<sub>7</sub> که با ستاره قرمز رنگ مشخص است تا IMF<sub>10</sub> بعنوان مدهای آلوده شناسایی می‌شوند.

### ۲-۳ فیلتر کردن مدهای آلوده

در نوفه‌زدایی از مدهای آلوده به نوفه تلاطم دو رویکرد وجود دارد: ۱- حذف IMFهای آلوده به نوفه تلاطم ۲ آستانه‌گذاری. در رویکرد اول IMFهای آلوده به نوفه تلاطم در فرایند جمع‌بندی و بازسازی سیگنال شرکت داده نمی‌شوند و دامنه‌ی آن‌ها صفر می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که برخی از انرژی سیگنال که به علت اختلاط مد در مدهای آلوده به نوفه نیز حضور دارند، در این روش کنار گذاشته شوند. به همین منظور بهتر است که از آستانه‌گذاری استفاده شود. آستانه‌گذاری روشی است که برای تضعیف دامنه‌های پایین‌تر از یک حد آستانه استفاده می‌شود. به طور کلی دو نوع آستانه‌گذاری نرم و سخت وجود دارد. اگر مد ذاتی  $imf_i(t)$  داشته باشیم، نسخه آستانه‌گذاری شده آن با استفاده از آستانه‌گذاری نرم و سخت به ترتیب مطابق روابط (۳) و (۴) بدست می‌آید (کپسینیس و مک‌لافلین، ۲۰۰۸):

(۳)

$$\overline{imf_i(t)} = \begin{cases} sgn[imf_i(t)](|imf_i(t)| - T_i) & |imf_i(t)| > T_i \\ 0 & |imf_i(t)| \leq T_i \end{cases}$$

$$\overline{imf_i(t)} = \begin{cases} imf_i(t) & |imf_i(t)| > T_i \\ 0 & |imf_i(t)| \leq T_i \end{cases} \quad (۴)$$

که  $T_i$ ، حد آستانه است. از آستانه‌گذاری عمدتاً برای تضعیف نوفه تصادفی که دامنه کوچکی دارد استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن رهیافت آستانه‌گذاری روابط (۳) و (۴)، در اثر آستانه‌گذاری آنچه بدست می‌آید عبارتست از دامنه‌های بالاتر از حد آستانه تعریف شده. بنابراین چون در مسئله حاضر هدف تضعیف نوفه تلاطم است که دامنه‌ی بزرگتری از پالس‌های لرزه‌ای دارد، پس باید فرایند آستانه‌گذاری برعکس عمل شود. یعنی در ابتدا مد آلوده به نوفه  $imf_i(t)$  در اثر آستانه‌گذاری به  $\overline{imf_i(t)}$  تبدیل می‌شود که شامل دامنه‌ای بزرگتر از یک حد آستانه تعریف شده است و بنابراین  $\overline{imf_i(t)}$  شامل انرژی نوفه تلاطم خواهد بود. پس برای نوفه‌زدایی باید  $\overline{imf_i(t)}$  از  $imf_i(t)$  کسر شود و آنچه باقی می‌ماند مد فیلتر شده  $\overline{imf_i(t)}$  است:

$$\overline{\overline{imf_i(t)}} = imf_i(t) - \overline{imf_i(t)} \quad (۵)$$

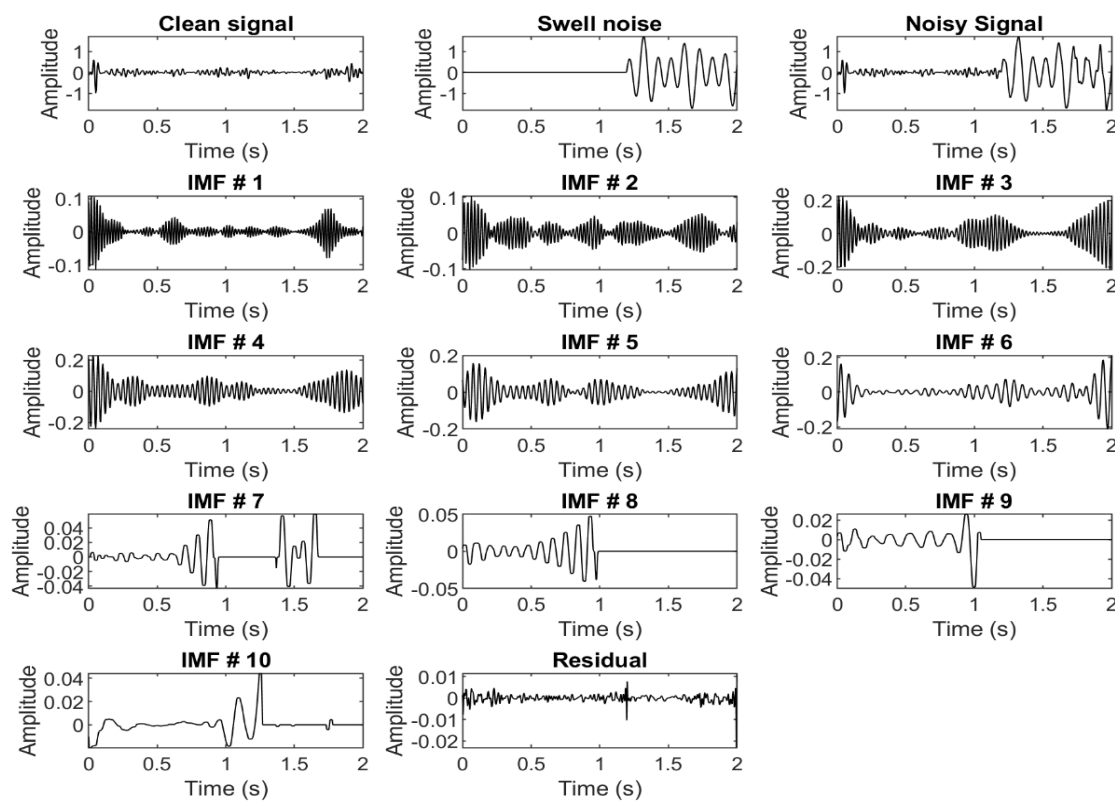
با بررسی انجام شده مشخص شد که آستانه‌گذاری سخت در مسأله بهتر عمل می‌کند و حد آستانه جهت آستانه‌گذاری سخت برابر ۰/۰۱ مقدار بیشینه سیگنال در نظر گرفته شد. نتیجه‌ی آستانه‌گذاری سخت بر روی مدهای هفتم تا دهم سیگنال نشان داده شده در شکل ۱ در شکل ۶ نمایش داده شده است. اگر مدهای مورد نظر در شکل ۱ و شکل ۶ با هم مقایسه شوند، مشاهده می‌شود که تقریباً تنها

آلوده به نوفه تلاطم با رنگ قرمز و سیگنال نوفه‌زدایی شده با رنگ سبز به منظور مقایسه بهتر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود روش با دقت مناسبی نوفه تلاطم را تضعیف و سیگنال را حفظ کرده است که مقایسه طیف‌های دامنه نیز این موضوع را تأیید می‌کند. به منظور تحلیل کمی نتیجه نوفه‌زدایی ضریب همبستگی پیرسون، بعنوان یک معیار کمی، بین سیگنال تمیز و سیگنال نوفه‌زدایی شده و همچنین بین طیف دامنه آنها محاسبه شد. ضریب همبستگی سیگنال تمیز و سیگنال بازسازی شده برابر  $0.9315$  و ضریب همبستگی طیف دامنه این دو سیگنال برابر با  $0.9620$  بدست آمد که گویای عملکرد مناسب روش پیشنهادی در نوفه‌زدایی است.

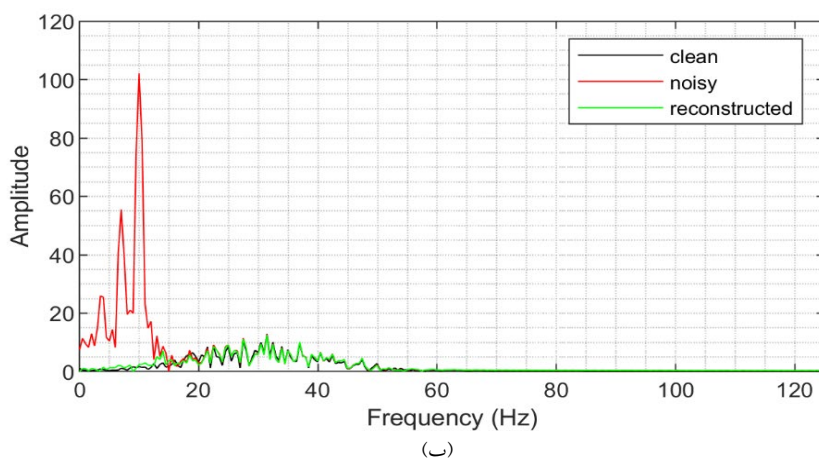
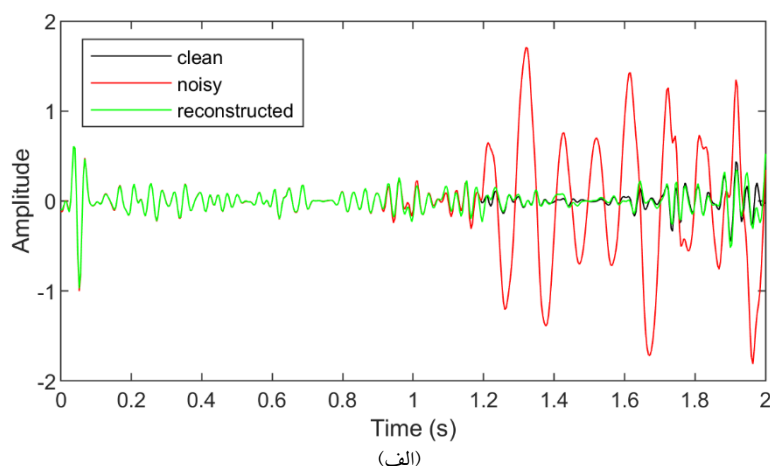
بخش‌هایی از مدها که آلوده به نوفه کم فرکانس تلاطم بوده‌اند مورد هدف تکنیک آستانه‌گذاری قرار گرفته و فیلتر شده‌اند. این موضوع به حفظ بیشتر سیگنال کمک می‌کند.

### ۳-۳ جمع‌بندی و بازسازی

همانطور که بیان شد، مرحله نهایی الگوریتم فیلترینگ پیشنهاد شده، مرحله بازسازی است. این مرحله شامل جمع‌بندی تمام مدهای دست نخورده (در اینجا مدهای اول تا ششم)، مدهای فیلتر شده (در اینجا مدهای هفتم تا دهم) و باقیمانده است. در شکل ۷-الف نتیجه تکنیک نوفه‌زدایی پیشنهادی و در شکل ۷-ب طیف دامنه متناظر نشان داده شده است. سیگنال عاری از نوفه با رنگ سیاه، سیگنال



شکل ۶. سیگنال لرزه‌ای نشان داده شده در شکل ۱ که مدهای ششم تا نهم آن با استفاده از آستانه‌گذاری سخت، فیلتر شده است.



شکل ۷. نتیجه تضعیف نوفه تلاطم توسط روش پیشنهادی برای سیگنال نشان داده شده در شکل ۱ سیگنال عاری از نوفه با رنگ سیاه، سیگنال آلوده به نوفه تلاطم با رنگ قرمز و سیگنال نوفه‌زدایی شده با رنگ سبز به منظور مقایسه بهتر نشان داده شده است. (الف) نمایش سیگنال‌ها در حوزه زمان و (ب) طیف دامنه آنها را نشان می‌دهد.

### ۳-۴ تحلیل پایداری روش

یکی از موضوعاتی در که در بررسی توانمندی روش‌های تحلیل سیگنال (در اینجا نوفه‌زدایی) مورد نظر قرار می‌گیرد، بررسی پایداری روش در حضور نوفه تصادفی است. در تجزیه مد متغیر، با توجه به اینکه نوفه تصادفی در مدهای ابتدایی تجمع دارند، مدهای انتهایی که محل حضور نوفه تلاطم هستند، کمتر تحت تأثیر نوفه تصادفی قرار می‌گیرند و بنابراین پیش‌بینی می‌شود که حضور نوفه تصادفی تأثیر چندانی در فرایند نوفه‌زدایی به روش پیشنهادی را نداشته باشد. با این حال در یک آزمایش، به

سیگنال مصنوعی آلوده به نوفه تلاطم که در **Error!**

**Reference source not found.** شکل ۱ نشان داده شده

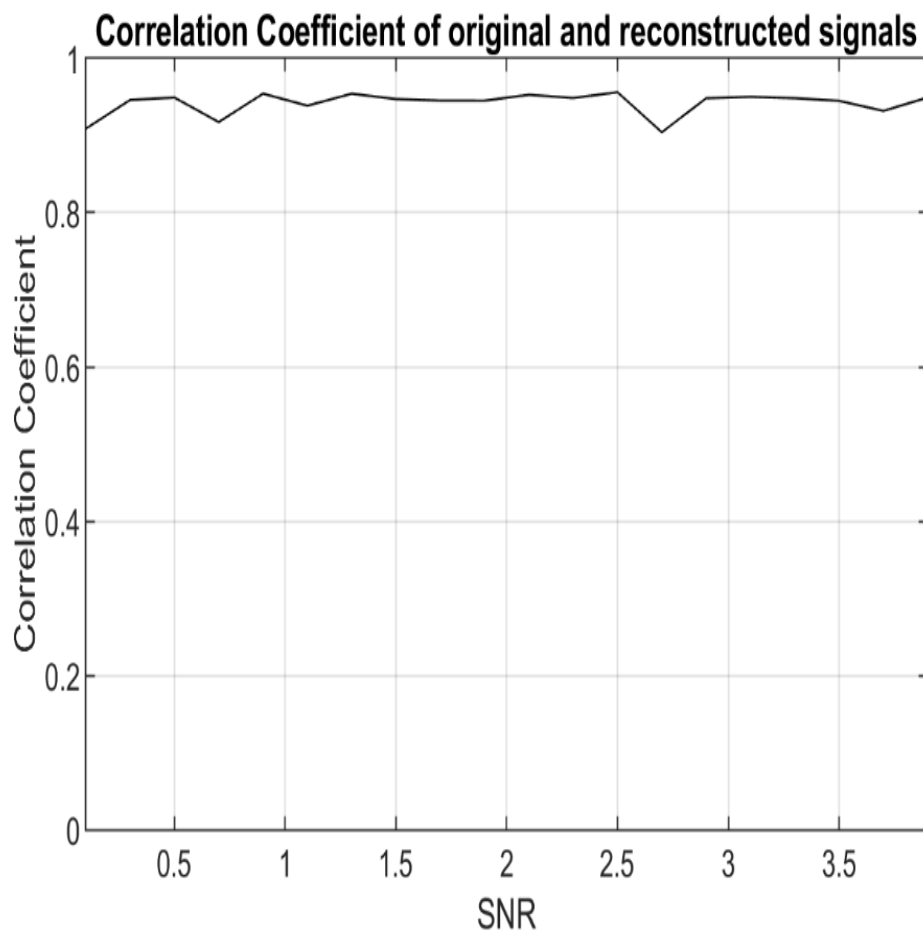
است، نوفه سفید تصادفی با مقادیر سیگنال به نوفه مختلف اضافه شد و فرایند نوفه‌زدایی (منظور تضعیف نوفه تلاطم است) به روش پیشنهادی بر روی سیگنال‌های آلوده انجام شد. پس از آن ضریب همبستگی سیگنال نوفه‌زدایی شده و سیگنال بدون نوفه تلاطم محاسبه شد که نتیجه در شکل ۸ مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای تمامی مقادیر سیگنال به نوفه، ضریب همبستگی مقادیر بالایی نشان می‌دهد که بیانگر پایداری عملکرد روش در

حضور نوفه تصادفی است.

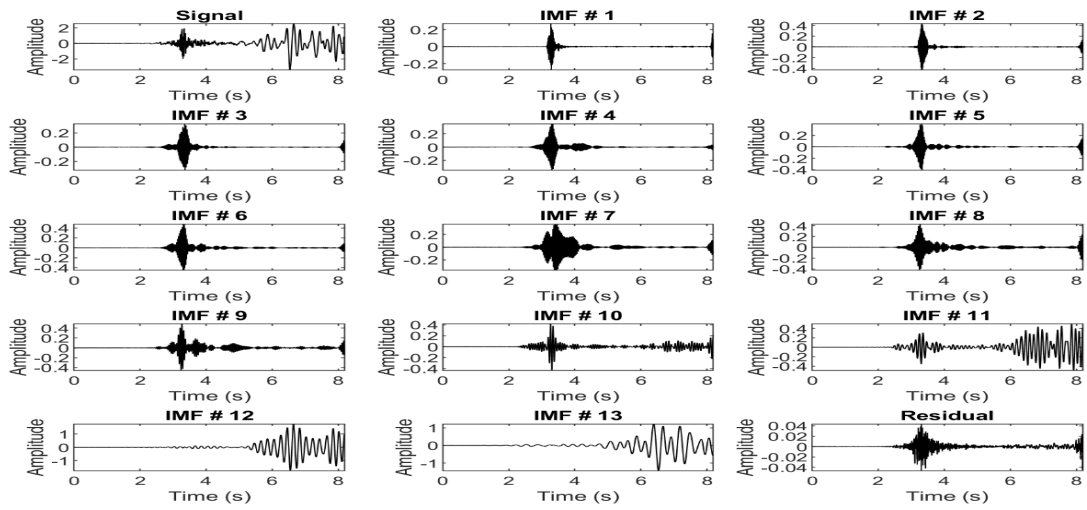
#### ۴ تضعیف نوفه تلاطم در داده‌های لرزه‌ای دریایی واقعی

داده‌ی واقعی مورد استفاده در این مقاله مجموعه‌ای از ثبت لرزه‌ای چشمه مشترک دریایی با ۴۸۰ سیگنال، بازه نمونه‌برداری چهار میلی‌ثانیه و فرکانس غالب حدوداً ۳۵ هرتز می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر، فرایند نوفه‌زدایی با الگوریتم پیشنهادی که برای سیگنال مصنوعی انجام شده بود، برای ردلرزه شماره ۳۸۱ از مجموعه داده در شکل‌های شکل ۹ شکل ۱۲ نشان داده شده است. شکل ۹ حاصل تجزیه مد متغیر ردلرزه را نشان می‌دهد که مشاهده

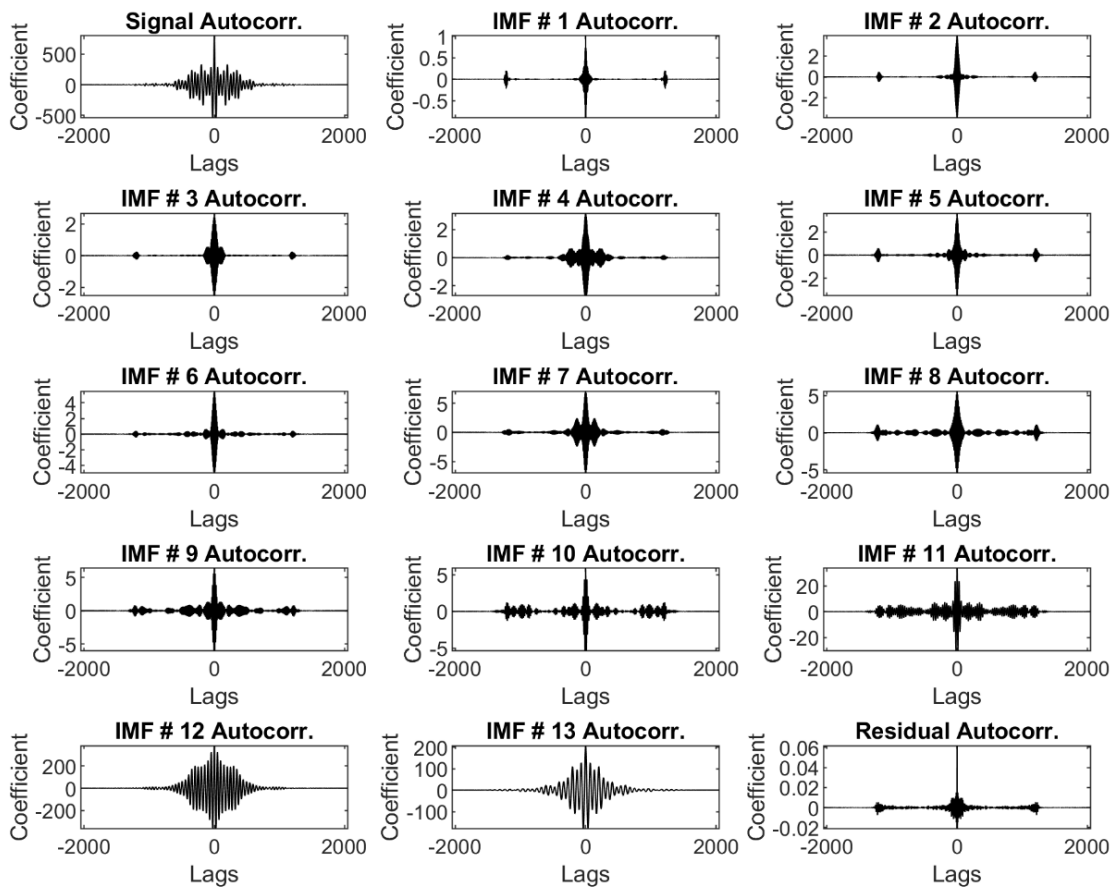
می‌شود غالب نوفه تلاطم در مدهای ۱۱ تا ۱۳ حضور دارند. تابع خودهمبستگی مدها به همراه تغییرات انحراف استاندارد هر تابع خودهمبستگی در شکل‌های شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود مد شماره ۱۱ توسط الگوریتم انتخاب شده است که از آن تا آخرین مد مورد نوفه‌زدایی توسط فرایند آستانه‌گذاری سخت قرار می‌گیرد. در نهایت نتیجه نوفه‌زدایی که از جمع مدهای دست نخورده، مدهای تحلیل شده و باقیمانده بدست می‌آید، به همراه مقایسه طیف دامنه ردلرزه در قبل و بعد از نوفه‌زدایی در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که نوفه تلاطم به شکل مطلوبی تضعیف شده است.



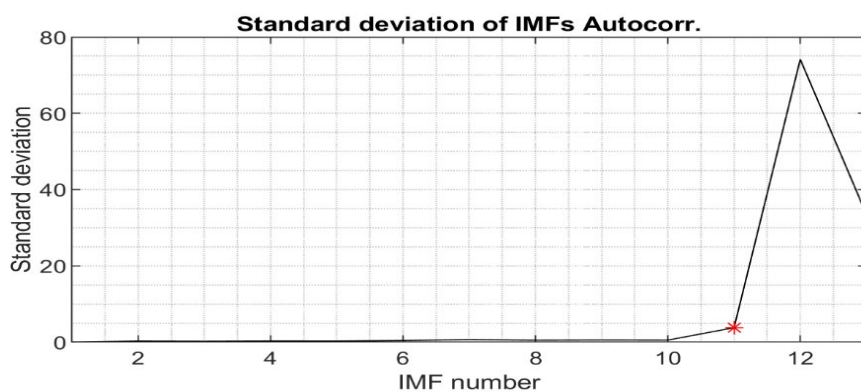
شکل ۸. تحلیل پایداری روش پیشنهادی نوفه‌زدایی در حضور نوفه تصادفی.



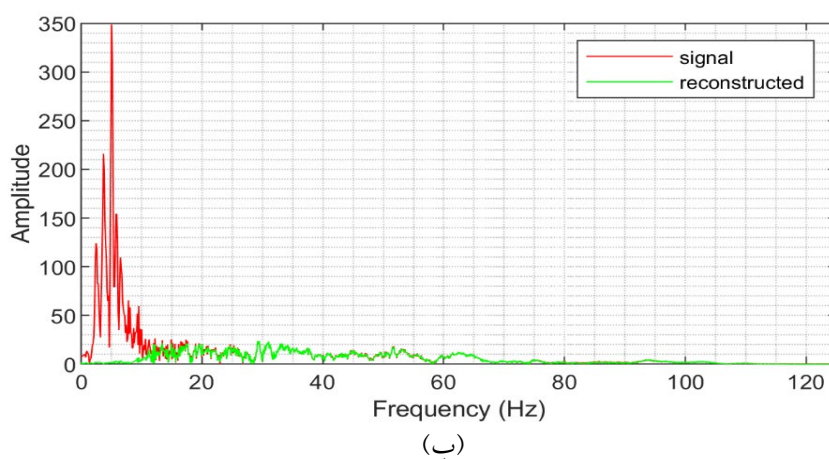
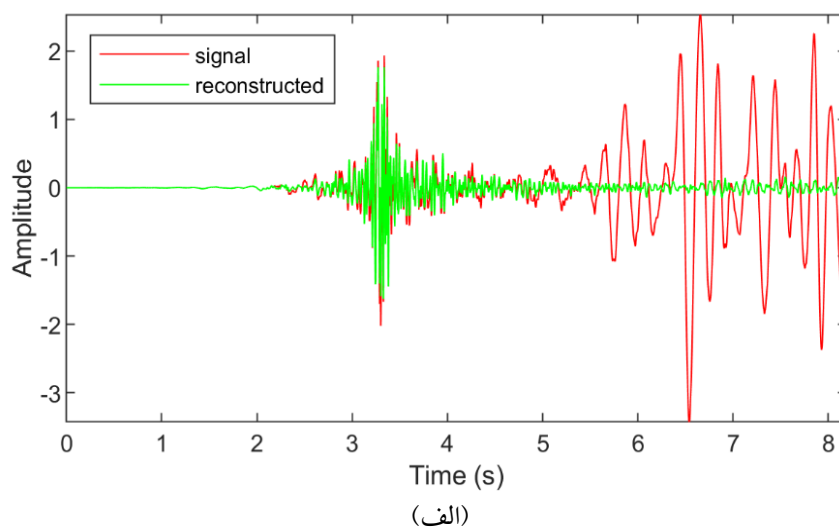
شکل ۹. تجزیه سیگنال لرزه‌ای شماره ۳۸۱ منتخب از داده واقعی نشان داده شده در شکل ۱۳-الف به روش پیشنهادی. در شکل ردلرزه آلوده به نوفه، ۱۳ مد سازنده ردلرزه و باقیمانده نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰. تابع خودهمبستگی مؤلفه‌های ردلرزه نشان داده شده در شکل ۹.



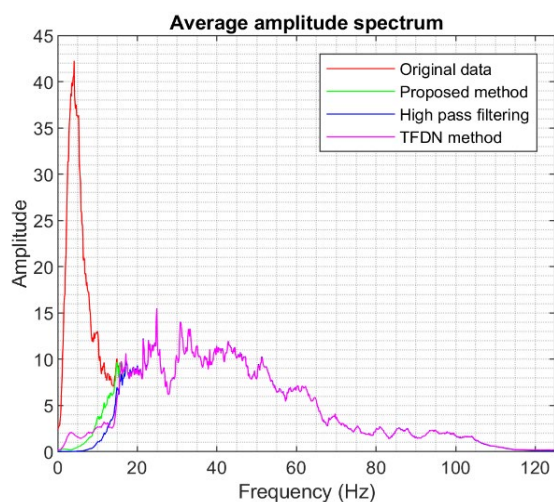
شکل ۱۱. مقادیر انحراف استاندارد تابع خودهمبستگی مدهای ردلرزه نشان داده شده در شکل ۹. بر طبق الگوریتم خودکار از  $IMF_{11}$  که با ستاره قرمز رنگ مشخص است تا  $IMF_{13}$  بعنوان مدهای آلوده شناسایی می‌شوند.



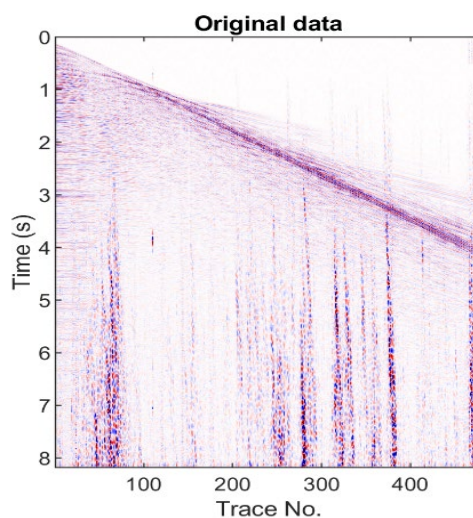
شکل ۱۲. نتیجه تضعیف نوفه تلاطم برای ردلرزه نشان داده شده در شکل ۹. ردلرزه قبل از نوفه‌زدایی با رنگ قرمز و پس از نوفه‌زدایی با رنگ سبز در حوزه زمان (الف) و حوزه فرکانس (ب) نشان داده شده است.

سبز طیف دامنه میانگین داده پس از نوفه‌زدایی است. جهت مقایسه با یک روش رایج تضعیف نوفه تلاطم، داده مورد نظر با یک فیلتر بالاگذر با پنجره (taper) گاوسی و نیز روش نوفه‌زدایی در زمان فرکانس (TFDN) (البوت و همکاران، ۲۰۱۰) مورد تحلیل قرار گرفته است که نتیجه نوفه‌زدایی با این روش‌ها بترتیب در شکل ۱۳-ه و شکل ۱۳-ز و مقاطع تفاضلی آنها نیز بترتیب در شکل ۱۳-و و شکل ۱۳-ح مشاهده می‌شود. با دقت در نتیجه می‌توان دید که هر دو روش قادر به نوفه‌زدایی قابل قبول نوفه تلاطم بوده‌اند اما بخشی از داده مطلوب (در محدوده بازتاب‌های سطحی) را نیز حذف کرده‌اند. عملکرد روش TFDN نسبت به فیلتر بالاگذر در مجموع بهتر بوده است. قابل ذکر است پارامترهای الگوریتم TFDN، شامل  $atmove$   $twin$  و  $xmove$  و فرکانس پیشینه (پرسترو، ۲۰۰۹) برای دستیابی به بهترین نتیجه تنظیم شده‌اند. طیف دامنه میانگین داده پس از نوفه‌زدایی با این دو روش در شکل ۱۳-ب با رنگ‌های آبی (برای فیلتر بالاگذر) و صورتی (برای روش TFDN) نشان داده شده است که از دست رفتن بخشی از انرژی سیگنال در محدوده فرکانس‌های پایین مؤید موضوع مطرح شده در مورد حذف انرژی مطلوب سیگنال توسط این دو روش می‌باشد.

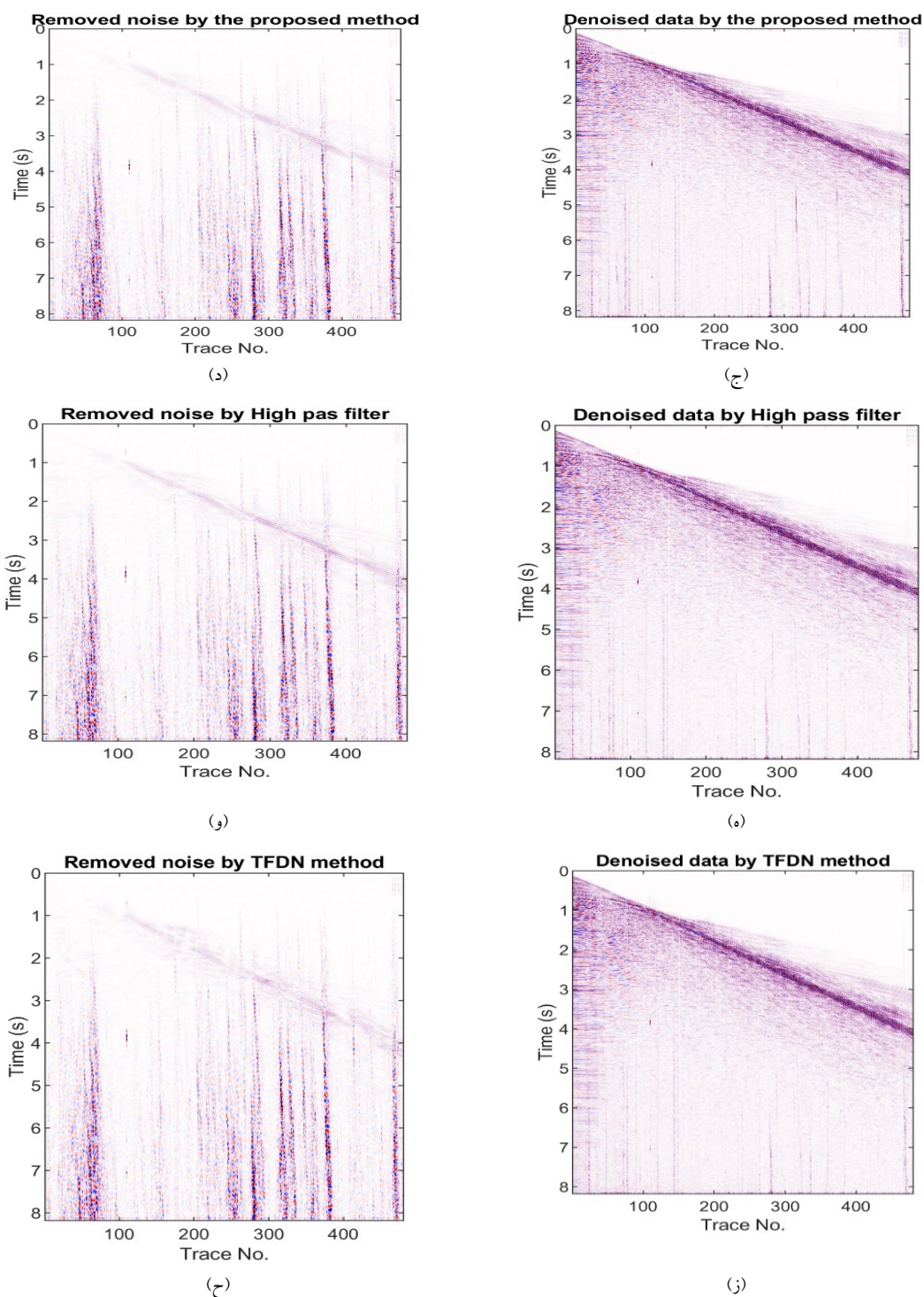
در این بخش نتیجه نوفه‌زدایی کل مجموعه داده واقعی ارائه خواهد شد. در شکل ۱۳-الف ثبت لرزه‌ای چشمه مشترک و در شکل ۱۳-ب طیف دامنه میانگین آن با رنگ قرمز نشان داده شده است. در ثبت چشمه مشترک، نوفه تلاطم بصورت نوارهای عمودی پرمیانه مشخص هستند. الگوریتم نوفه‌زدایی پیشنهادی بر روی این داده اعمال شد و نتیجه آن در شکل ۱۳-ج مشاهده می‌شود. در شکل می‌توان دید که نوفه تلاطم به میزان قابل ملاحظه‌ای تضعیف شده است و اثر ناچیزی از آن در ثبت چشمه مشترک باقیمانده است. به منظور بررسی اینکه آیا روش پیشنهادی انرژی سیگنال مطلوب را حفظ کرده است، تفاضل دو شکل ۱۳-الف و شکل ۱۳-ج تهیه و در شکل ۱۳-د ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بخش غالب انرژی مطلوب داده بعد از نوفه‌زدایی حفظ شده است و به جز میزان محدودی از بازتابنده قوی کف دریا اثر چندانی از آن در داده تفاضلی وجود ندارد و بخش عمده انرژی حذف شده مربوط نوفه تلاطم است. بررسی طیف دامنه میانگین داده لرزه‌ای که با رنگ قرمز در شکل ۱۳-ب مشخص است، نشان می‌دهد که بیشتر انرژی نوفه تلاطم در محدوده فرکانسی زیر ۱۲ هرتز است که روش پیشنهادی توانسته است انرژی نوفه را در این محدوده کاهش دهد که رنگ



(ب)



(الف)



**شکل ۱۳.** نتیجه تضعیف نوفه تلاطم در داده لرزه‌ای دریایی واقعی. (الف) داده لرزه‌ای آلوده به نوفه تلاطم؛ (ب) مقایسه طیف دامنه متوسط داده اصلی (منحنی قرمز) با سه روش نوفه زدایی پیشنهادی (منحنی سبز)، فیلتر بالاگذر (منحنی آبی) و TFDN (منحنی صورتی)؛ (ج) نتیجه نوفه زدایی به روش پیشنهادی و (د) نوفه تضعیف شده با این روش؛ (ه) نتیجه نوفه‌زدایی با روش فیلتر بالاگذر و (و) نوفه تضعیف شده با این روش؛ (ز) نتیجه نوفه‌زدایی با روش TFDN و (ح) نوفه تضعیف شده با این روش را نشان می‌دهند.

## ۵ نتیجه‌گیری

در ساخت هر سیگنال مؤلفه‌هایی با دوام زمانی و پهناهای باند متفاوت نقش دارند. روش تجزیه مد متغیر قادر به تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های سازنده آن است. در داده لرزه‌ای دریایی نوفه تلاطم معمولاً یک مؤلفه غالب بر روی ردلرزه‌ها است و بنابراین می‌توان از روش تجزیه مد متغیر به جداسازی آنها دست یافت. تجزیه سیگنال لرزه‌ای آلوده به نوفه تلاطم نشان داد که نوفه می‌تواند بر روی چند مد با مقدار انرژی متفاوت ظاهر شود. رویکرد این مقاله شناسایی این مدها و سپس تضعیف نوفه در این مدها از طریق اعمال یک الگوریتم آستانه‌گذاری بود. با توجه به زمانبر بودن بررسی تمام مدها در جستجوی نوفه، از یک تکنیک بر مبنای خودهمبستگی جهت شناسایی مدهای آلوده استفاده شد. مشاهده شد که انحراف استاندارد خودهمبستگی مدهای آلوده، ناشی از رفتار هارمونیک نوفه تلاطم و نیز دامنه بالای این نوفه، مقدار بالاتری نسبت به انحراف استاندارد خودهمبستگی مدهای تمیز دارند که این وجه تمایز، شناسایی خودکار آنها را میسر می‌سازد. همچنین نشان داده شد که با بکار بردن رهیافت آستانه‌گذاری می‌توان در مدهایی که به علت اختلاط مد، هم سیگنال و هم نوفه وجود دارد، انرژی سیگنال را به میزان بیشتری حفظ کرد. آزمایش بر روی داده مصنوعی و نیز واقعی نشان داد که روش پیشنهادی قادر است با دقت خوبی نوفه تلاطم را حذف و در مقایسه با روش رایج فیلتر بالاگذر و نیز روش TFDN، انرژی مطلوب بیشتری در داده را حفظ نماید. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان پیش‌بینی کرد که این روش در رابطه با تضعیف نوفه زمین‌غلت در داده لرزه‌ای زمینی بتواند نتایج امیدبخشی ارائه کند.

## منابع

- داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تجزیه مد متغیر. پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۳(۲)، ۱۷۷-۱۸۸.
- روشندل کاهو، امین و نجاتی کلاته، علی. (۱۳۹۵). تضعیف نوفه‌های اتفاقی در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تجزیه مد تجربی. مجله ژئوفیزیک ایران، ۵(۲)، ۶۱-۶۸.
- Bagheri, M., and Riahi, M. A. (2018). Using a Novel Method for Attenuating Random Noises from Seismic Data. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 7(3), 65-72.
- Bagheri, M., Riahi, M. A., and Hashemi, H. (2017). Denoising and improving the quality of seismic data using combination of DBM filter and FX deconvolution. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1-8.
- Bagheri, M., and Riahi, M. A. (2016). Seismic data random noise attenuation using DBM filtering. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 57(1).
- Bekara, M., and van der Baan, M. (2010). High-amplitude noise detection by the expectation-maximization algorithm with application to swell-noise attenuation. *Geophysics*, 75(3), V39-V49.
- Dondurur, D., and Karşlı, H. (2012). Swell noise suppression by Wiener prediction filter. *Journal of Applied Geophysics*, 80, 91-100.
- Dragomiretskiy, K., and Zosso, D. (2013). Variational mode decomposition. *IEEE transactions on signal processing*, 62(3), 531-544.
- Elboth, T., Hermansen, D., and Andreassen, Ø. (2009, June). Some unusual types of noise. In 71st EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2009 (pp. cp-127). European Association of Geoscientists and Engineers.
- Elboth, T., Presterud, I. V., and Hermansen, D. (2010). Time-frequency seismic data denoising. *Geophysical prospecting*, 58(3), 441-453.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., and Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, 454(1971), 903-995.
- Khalil Tahmasebi, M., Roshandel Kahoo, A. and Nejati Kalateh, A. (2017). Ground-roll noise suppression by time-frequency filtering based on variational mode decomposition. *Journal of*

خلیل طهماسبی، مهرداد، روشندل کاهو، امین و نجاتی کلاته، علی. (۱۳۹۶). تضعیف نوفه‌های زمین‌غلت در

- Research on Applied Geophysics, 3(2), 177-188.
- Kim, S., and Hong, J. K. (2012). Swell noise attenuation using a cascade of FX filter and median filter. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 15(4), 199-208.
- Kopsinis, Y., and McLaughlin, S. (2008, August). Empirical mode decomposition based soft-thresholding. In 2008 16th European Signal Processing Conference (pp. 1-5). IEEE.
- Liu, W., Cao, S., and Wang, Z. (2017). Application of variational mode decomposition to seismic random noise reduction. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(4), 888.
- Mohanty, S., Gupta, K. K., and Raju, K. S. (2014, December). Comparative study between VMD and EMD in bearing fault diagnosis. In 2014 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS) (pp. 1-6). IEEE.
- Presterud, I. V. (2009). Time frequency de-noising of seismic data. Master's thesis. University of Oslo.
- Roshandel Kahoo, A. and Najati Kalateh, A. (2011). Random noise suppression in seismic data by empirical mode decomposition, *Iranian Journal of Geophysics*, 5(2), 61-68.
- Schonewille, M., Vigner, A., and Ryder, A. (2008). Swell-noise attenuation using an iterative FX prediction filtering approach. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008 (pp. 2647-2651). Society of Exploration Geophysicists.
- Torres, M. E., Colominas, M. A., Schlotthauer, G., and Flandrin, P. (2011, May). A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise. In 2011 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP) (pp. 4144-4147). IEEE.
- Vaezi, Y., and Kazemi, N. (2016). Attenuation of swell noise in marine streamer data via nonnegative matrix factorization: 86th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 4633-4638, doi: 10.1190/segam2016-13848102.1. Abstract.
- Wu, Z., and Huang, N. E. (2009). Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in adaptive data analysis*, 1(01), 1-41.
- Zhao, X., Lu, P., Zhang, Y., Chen, J., and Li, X. (2019). Swell-noise attenuation: A deep learning approach. *The Leading Edge*, 38(12), 934-942.

## Swell noise attenuation on marine seismic data using variational mode decomposition in an automatic approach

Zahra Sadat Atashgahi<sup>1</sup>, Mohammad Radad<sup>2\*</sup> and Amin Roshandel Kahoo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(Received: 10 March 2024, Accepted: 08 June 2024)

### Summary

Denoising is an important step in seismic data processing that can improve the results of other processing steps and, consequently, the interpretation of seismic sections. Both land and marine seismic data contain coherent and incoherent noise. Swell noise is one of the noises present in marine seismic data. It has a high amplitude and low frequency band and is observed as vertical bands in marine seismic data. Developing methods that can attenuate swell noise more while causing the least damage to the signal in marine seismic data seems necessary. There are various methods for attenuating swell noise, each with its advantages and limitations. The approach of most denoising methods is to maximize the separation of noise from the signal. Variational mode decomposition (VMD) has shown promising results in seismic denoising by separating different modes of signal and noise. The goal is to obtain a set of intrinsic mode functions (IMFs) and their corresponding center frequencies. The main approach of VMD is to decompose the input signal into a number of sub-signals (modes), which also have sparsity properties while recovering the input signal. Here, the sparsity of each mode is chosen as the bandwidth of that mode. In other words, it is assumed that each mode is more concentrated around the center frequency, which is determined in the decomposition. Another important issue in noise attenuation is that the denoising method should be able to perform the denoising process automatically with minimal user intervention. The proposed denoising algorithm in this paper consists of four steps: decomposition, identification, filtering, and reconstruction. In the first step, the seismic signal is decomposed into its constituent modes using the VMD method. In the second step, the modes contaminated with noise is identified according to the autocorrelation function of the modes, where the higher values of standard deviation of autocorrelation above a predefined measure present noisy modes. In the third step, the noise is removed through a filtering process based on a hard thresholding procedure. In the final step, the constituent modes, including the clean untouched modes, the denoised modes, and the residue, are summed together and the signal is denoised. The proposed algorithm's efficacy is demonstrated through its application to both synthetic and real seismic data. Notably, the method demonstrates superior performance compared to conventional high-pass filtering and time-frequency denoising (TFDN) method, effectively attenuating swell noise while preserving valuable low-frequency seismic information.

**Keywords:** Marine seismic data, swell noise attenuation, variational mode decomposition, thresholding, automatic algorithm.