

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد لرزه شناسی

تضعیف امواج زمین غلت در داده های لرزه ای بازتابی با استفاده از روش تجزیه مد
متغیر

نگارنده: مهرداد خلیل طهماسبی

اساتید راهنما

دکتر امین روشندل کاهو

دکتر علی نجاتی کلاته

بهمن ۱۳۹۵

تقديم به:
" مادر" عزيزتر از جانم،

با آرزوی آنکه پروردگار منان سایه ایشان را بر من مستدام
نماید
و دعای خیرش را لایق من بداند.

سپاس‌گزاری

در طول تحصیل در دانشگاه صنعتی شاهرود، افتخار آشنایی با اساتید برجسته‌ای را داشتم. به ویژه استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر امین روشندل کاهو به لحاظ راهنمایی‌های مناسب، ایده‌های نو در طول انجام این پایان‌نامه، و از اینکه با صبر و متانت من را راهنمایی کرده‌اند نهایت قدردانی را دارم. همچنین از رهنمودهای آقای دکتر علی نجاتی کلاته در این پایان‌نامه تشکر می‌کنم.

چکیده:

تصویرسازی لرزه‌ای به کیفیت داده‌های لرزه‌ای وابسته است. تفسیر ساختاری و چینه‌ای داده‌های لرزه‌ای که حاوی کمترین میزان نوفه باشند، به مراتب راحت‌تر است. دسته مهمی از نوفه‌های داده‌های لرزه‌ای، نوفه‌های همدوس هستند که از یک ردلرزه به ردلرزه دیگر دارای یک روند می‌باشند. یکی از مهمترین نوفه‌های همدوس، نوفه زمین‌غلت می‌باشد که دارای محدوده فرکانسی پایین، دامنه بالا و سرعت انتشار پایین می‌باشند که در رکورد لرزه‌ای باعث از دست رفتن ردلرزه‌ها می‌شوند. تاکنون روش‌های مختلفی برای تضعیف نوفه‌های زمین‌غلت ارائه شده است که هر کدام مزایا و معایب مربوط به خود را دارند.

در این پایان‌نامه، از روش صفحه‌زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر برای تضعیف امواج زمین‌غلت استفاده شده است. در این روش ردلرزه حاوی نوفه با استفاده از تجزیه مد متغیر به مدهای مختلفی تجزیه شده و مدهای حاصل از آن در صفحه‌زمان-فرکانس فیلتر می‌شوند. در ادامه برای بهبود نتایج از روش تبدیل زمان-زمان و تجزیه مد متغیر استفاده می‌شود که در این روش، ردلرزه حاوی نوفه به حوزه زمان-زمان انتقال داده می‌شود و با استفاده فیلتر دوبعدی و تجزیه مد متغیر تضعیف می‌شوند. هر دو روش بر روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی اعمال گردید و نتایج دو روش با هم مقایسه و با نتایج حاصل از روش متداول فیلتر $f - k$ نیز مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان داد که روش تبدیل زمان-زمان و تجزیه مد متغیر عملکرد بهتری نسبت روش صفحه‌زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر دارد، همچنین هر دو روش بر خلاف روش متداول فیلتر $f - k$ بدون آسیب رساندن به سیگنال بازتابی، به خوبی نوفه زمین‌غلت را تضعیف می‌نمایند.

کلمات کلیدی: لرزه‌نگاری بازتابی، امواج زمین‌غلت، تجزیه مد متغیر، توابع مد ذاتی، صفحه‌زمان-

فرکانس و تبدیل زمان-زمان.

فصل ۱- مقدمه	۱
فصل ۲- نوفه	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- نوفه ناهمدوس	۸
۳-۲- نوفه همدوس	۹
۱-۳-۲- امواج زمین غلت	۹
۲-۳-۲- تاریخچه روش‌های تضعیف امواج زمین غلت	۱۲
فصل ۳- روش تحقیق	۱۷
۱-۳- مقدمه	۱۸
۲-۳- روش تجزیه مد تجربی	۱۸
۳-۳- تجزیه مد متغیر	۲۱
۴-۳- مقایسه نتایج تجزیه مد متغیر و تجزیه مد تجربی	۳۲
۵-۳- صفحه زمان- فرکانس (هیلبرت - هوانگ) مبتنی بر تجزیه مد متغیر	۳۴
۳-۵-۱- محاسبه فیلتر در صفحه زمان-فرکانس	۳۹
۳-۵-۲- معایب صفحه زمان-فرکانس	۴۰
۳-۶- تبدیل زمان- زمان	۴۱
۳-۶-۱- توزیع فرکانس در حوزه زمان- زمان	۴۳

۳-۶-۲- تقارن در صفحه زمان-زمان نسبت به قطر اصلی	۴۷
۳-۶-۳- فیلتر در صفحه زمان - زمان	۵۰
۳-۷- تضعیف امواج زمین‌غلت با استفاده روش صفحه زمان - فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر	۵۴
۳-۸- استفاده از روش تبدیل زمان - زمان و تجزیه مد متغیر در تضعیف امواج زمین‌غلت.....	۵۴
فصل ۴- اعمال روش بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی	۵۵
۴-۱- مقدمه	۵۶
۴-۲- تضعیف نوفه همدوس با استفاده از صفحه زمان- فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر بر روی ردلرزه مصنوعی	۵۶
۴-۳- تضعیف نوفه همدوس با استفاده از تبدیل زمان-زمان و تجزیه مد متغیر بر روی ردلرزه مصنوعی	۶۰
۴-۴- اعمال روش بر روی رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک مصنوعی	۶۲
۴-۵- اعمال روش بر روی رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک واقعی	۶۵
فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۷۱
۵-۱- نتیجه‌گیری	۷۲
۵-۲- پیشنهادات	۷۳
منابع	۷۵

- شکل ۱-۲. رکورد چشمه مشترک حاوی نوفه زمین غلت (چند ضلعی آبی رنگ نشان‌دهنده‌ی نوفه زمین غلت). ۱۰
- شکل ۲-۲. طیف $f - k$ رکورد چشمه مشترک حاوی نوفه زمین غلت (مثلث قرمز رنگ موقعیت نوفه زمین غلت در طیف $f - k$). ۱۱
- شکل ۳-۲. (الف) ردلرزه واقعی بدون نوفه، (ب) ردلرزه واقعی دارای نوفه زمین غلت، (ج) طیف دامنه مربوط به ردلرزه بدون نوفه و (د) طیف دامنه مربوط به ردلرزه حاوی نوفه (پیکان قرمز رنگ نشان دهنده‌ی دامنه مربوط به نوفه زمین غلت). ۱۲
- شکل ۱-۳. فلوچارت الگوریتم تجزیه مد متغیر (برگرفته از سان و همکاران، ۲۰۱۶). ۲۵
- شکل ۲-۳. سیگنال مصنوعی y_t تولید شده از دو مولفه $y_1(t)$ ، y_2 ۲۷
- شکل ۳-۳. (الف) تجزیه با $k=2$ ، (ب) تجزیه با $k=3$ ۲۷
- شکل ۴-۳. سری بازتاب دلخواه. ۲۹
- شکل ۵-۳. سیگنال مصنوعی y_t تولید شده از سه مولفه $y_1(t)$ ، $y_2(t)$ و $y_3(t)$ ۲۹
- شکل ۶-۳. ردیف اول تجزیه سیگنال با پارامتر $\alpha=1$ ، ردیف دوم تجزیه سیگنال با پارامتر $\alpha=1000$ ، ردیف سوم تجزیه سیگنال با پارامتر $\alpha=2000$ و ردیف چهارم تجزیه سیگنال با پارامتر $\alpha=3000$ (سیگنال ایده‌آل با رنگ قرمز و سیگنال خروجی با رنگ آبی). ۳۰
- شکل ۷-۳. ردیف اول تجزیه سیگنال با پارامتر $\varepsilon=0$ ، ردیف دوم تجزیه سیگنال با پارامتر $\varepsilon=0/0000001$ ، ردیف سوم تجزیه سیگنال با پارامتر $\varepsilon=0/0000001$ و ردیف چهارم تجزیه سیگنال با پارامتر $\varepsilon=0/0000001$ (سیگنال ایده‌آل با رنگ قرمز و سیگنال خروجی با رنگ آبی). ۳۱
- شکل ۸-۳. سیگنال مصنوعی y_t تولید شده از چهار مولفه $y_1(t)$ ، $y_2(t)$ ، $y_3(t)$ و $y_4(t)$ ۳۳
- شکل ۹-۳. (الف) توابع مد ذاتی برای y_t با استفاده از تجزیه مد تجربی و (ب) توابع مد ذاتی برای y_t با استفاده از تجزیه مد متغیر. ۳۴

شکل ۳-۱۰. (الف) سیگنال مصنوعی $y(t)$ و (ب) نمایش زمان-فرکانس مربوط به آن. ۳۶

شکل ۳-۱۱. (الف) موجک ریکر همامیخت شده در سری بازتاب دلخواه، (ب) سیگنال چیرپ، (ج) صفحه زمان-فرکانس سیگنال همامیخت شده در سری بازتاب دلخواه و (د) صفحه زمان-فرکانس سیگنال چیرپ. ۳۶

شکل ۳-۱۲. (الف) سیگنال مصنوعی مرکب از فرکانس‌های ۲۰، ۱۰ و ۳۰ هرتز و (ب) صفحه زمان-فرکانس مربوط به آن. ۳۸

شکل ۳-۱۳. (الف) سیگنال مرکب از سیگنال ریکر و سیگنال چیرپ، (ب) طیف زمان-فرکانس مربوط به آن. ۳۸

شکل ۳-۱۴. صفحه زمان-فرکانس بعد از اعمال تجزیه مد متغیر بر روی سیگنال مصنوعی در شکل ۳-۱۲ (الف). ۳۹

شکل ۳-۱۵. صفحه زمان-فرکانس بعد از اعمال تجزیه مد متغیر بر روی سیگنال مصنوعی در شکل ۳-۱۳ (الف). ۳۹

شکل ۳-۱۶. (الف) نمایش سیگنال در حوزه‌ی زمان، (ب) نمایش در حوزه‌ی زمان - زمان و (ج) نمایش در حوزه‌ی تبدیل K ۴۴

شکل ۳-۱۷. (الف) نمایش در حوزه‌ی زمان سیگنال چیرپ، (ب) نمایش در حوزه‌ی زمان - زمان و (ج) نمایش در حوزه‌ی تبدیل K ۴۵

شکل ۳-۱۸. (الف) نمایش ردلرزه حاصل همامیخت موجک ریکر در سری بازتاب دلخواه، (ب) نمایش ردلرزه حاصل همامیخت موجک مورلت در سری بازتاب دلخواه، (ج) نمایش تبدیل زمان - زمان ردلرزه الف، (د) نمایش تبدیل زمان - زمان ردلرزه ب، (ه) نمایش تبدیل K ردلرزه الف و (و) نمایش تبدیل K ردلرزه ب. ۴۶

شکل ۳-۱۹. (الف) نمایش سیگنال چیرپ در حوزه‌ی زمان، (ب) نمایش تبدیل زمان - زمان، (ج) نمایش تبدیل K ۴۸

شکل ۳-۲۰. (الف) سیگنال بازسازی شده از قطر ۴- تا ۱-، (ب) سیگنال بازسازی شده از قطر ۱ تا ۴،
 (ج) نمایش تبدیل زمان - زمان سیگنال (الف)، (د) نمایش تبدیل زمان - زمان سیگنال (ب)، (ه) طیف
 دامنه قطره‌ای از ۴- تا ۱-، (و) طیف دامنه‌ی قطره‌ای ۱ تا ۴. ۴۹

شکل ۳-۲۱: نمایش فیلتر در صفحه زمان- زمان. ۵۰

شکل ۳-۲۲: نمایش فیلتر در صفحه زمان- زمان. ۵۱

شکل ۳-۲۳. (الف) حاصل هم‌امیخت سیگنال ریکر با فرکانس ۲۵ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه،
 (ب) صفحه زمان- زمان مربوط به آن. ۵۲

شکل ۳-۲۴. (الف) حاصل جمع سیگنال چیرپ (معرف نوفه زمین‌غلت)، (ب) صفحه زمان- زمان مربوط
 به آن. ۵۳

شکل ۳-۲۵. سیگنال بعد از اعمال فیلتر با استفاده از پهناهای مختلف فیلتر. ۵۳

شکل ۴-۱. (الف) حاصل هم‌امیخت سیگنال ریکر با فرکانس ۲۵ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه،
 (ب) سیگنال چیرپ با فرکانس ۵ تا ۱۵ هرتز، (ج) حاصل جمع دو سیگنال مذکور. ۵۷

شکل ۴-۲. (الف) صفحه زمان فرکانس بعد از تجزیه مد متغیر، (ب) فیلتر طراحی شده، (ج) نتیجه‌ی
 اعمال فیلتر بر صفحه زمان- فرکانس مربوطه و (د) ردلرزه خروجی (رنگ آبی) به همراه رد لرزه ایده‌آل
 (رنگ قرمز). ۵۸

شکل ۴-۳: (الف) حاصل هم‌امیخت سیگنال ریکر با فرکانس ۲۰ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه، (ب)
 سیگنال چیرپ با فرکانس ۲۵-۵ هرتز معرف نوفه زمین‌غلت، (ج) حاصل جمع دو سیگنال مذکور. ۵۹

شکل ۴-۴. (الف) صفحه زمان فرکانس مربوط به دو مد، (ب) فیلتر طراحی شده، (ج) نتیجه‌ی اعمال
 فیلتر بر صفحه زمان- فرکانس مربوطه، (د) ردلرزه خروجی (رنگ آبی) به همراه رد لرزه ایده‌آل (رنگ
 قرمز). ۵۹

شکل ۴-۵. (الف) تبدیل زمان-زمان مربوط به سیگنال مصنوعی مثال اول (شکل ۴-۳ ج)، (ب) فیلتر دو بعدی طراحی شده در حوزه زمان-زمان، (ج) نتیجه اعمال فیلتر بر تبدیل زمان-زمان و (د) ردلرزه خروجی به همراه رد لرزه ایده‌آل. ۶۱

شکل ۴-۶. (الف) تبدیل زمان-زمان مربوط به سیگنال مصنوعی مثال دوم (شکل ۴-۳ ج)، (ب) فیلتر دو بعدی طراحی شده در حوزه زمان-زمان، (ج) نتیجه اعمال فیلتر بر تبدیل زمان-زمان و (د) ردلرزه خروجی به همراه رد لرزه ایده‌آل. ۶۲

شکل ۴-۷. (الف) رکورد لرزه‌های چشمه مشترک مصنوعی و (ب) نمایش حوزه‌ی $f - k$ ۶۳

شکل ۴-۸: (الف) رکورد لرزه‌های چشمه مشترک مصنوعی پس از تضعیف با استفاده از صفحه زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر بعد از اعمال AGC (ب) نمایش حوزه‌ی $f - k$ ۶۴

شکل ۴-۹: (الف) رکورد لرزه‌های چشمه مشترک مصنوعی پس از روش تبدیل زمان-زمان و استفاده از روش تجزیه مد متغیر بعد از اعمال AGC (ب) نمایش حوزه‌ی $f - k$ ۶۴

شکل ۴-۱۰. (الف) رکورد لرزه‌ای واقعی چشمه مشترک، (ب) طیف $f - k$ رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک (دو مثلث مشکی رنگ نواحی مربوط به نوفه زمین‌گلت را نشان می‌دهد)، (ج) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۸ از رکورد لرزه‌ای (پیکان قرمز رنگ مولفه‌های فرکانس پایین نوفه زمین‌گلت را نشان می‌دهد) و (د) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۳۵ از رکورد لرزه‌ای. ۶۶

شکل ۴-۱۱. (الف) رکورد لرزه‌ای واقعی چشمه مشترک پس از تضعیف نوفه زمین‌گلت با استفاده از صفحه زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر بعد از اعمال AGC، (ب) باقیمانده تفاضل نتیجه تضعیف با روش مذکور از رکورد چشمه مشترک اولیه، (ج) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۸ از رکورد لرزه‌ای، (د) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۳۵ از رکورد لرزه‌ای و (ه) طیف $f - k$ رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک. ۶۷

شکل ۴-۱۲. (الف) رکورد لرزه‌ای واقعی چشمه مشترک پس از تضعیف نوفه زمین‌گلت با استفاده از تبدیل زمان - زمان و تجزیه مد متغیر بعد از اعمال AGC، (ب) باقیمانده تفاضل نتیجه تضعیف با

روش مذکور از رکورد چشمه مشترک اولیه، (ج) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۸ از رکورد لرزه ای، (د) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۳۵ از رکورد لرزه ای و (ه) طیف $f - k$ رکورد لرزه ای چشمه مشترک. ۶۸

شکل ۴-۱۳. (الف) رکورد لرزه ای واقعی چشمه مشترک پس از تضعیف نوفه زمین غلت با استفاده از روش $f - k$ بعد از اعمال AGC، (ب) باقیمانده تفاضل نتیجه تضعیف با روش مذکور از رکورد چشمه مشترک اولیه، (ج) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۸ از رکورد لرزه ای، (د) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۳۵ از رکورد لرزه ای و (ه) طیف $f - k$ رکورد لرزه ای چشمه مشترک. ۶۹

جدول ۱-۳. مجموع مربعات خطا حاصل از تجزیه سیگنال برای پارامتر α با سیگنال اولیه.....	۲۸
جدول ۲-۳. مجموع مربعات خطا حاصل از تجزیه سیگنال برای پارامتر ε با سیگنال اولیه.....	۲۹
جدول ۱-۴. پارامترهای انتخاب شده برای روش صفحه زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر.....	۵۴
جدول ۱-۴. پارامترهای انتخاب شده برای روش تبدیل زمان-زمان و تجزیه مد متغیر.....	۵۸

فهرست علائم اختصاری

اختصار	لاتین	توضیحات
لاتین		
AGC	Automatic Gain Control	بهبود کارایی روش
EMD	Empirical Mode Decomposition	تجزیه مُد تجربی
$f - k$	Frequency – Wavenumber	فرکانس – عدد موج
IMF	Intrinsic Mode Function	تابع مُد ذاتی
TT	Time – Time Transform	تبدیل زمان – زمان
VMD	Varitional mode decomposition	تجزیه مد متغیر

فصل اول

مقدمه

روش‌های لرزه‌ای بازتابی یکی از روش‌های مطالعه ساختار زیر سطحی به منظور اکتشافات هیدروکربن می‌باشد. سیگنال‌های لرزه‌ای که از داخل زمین بازتاب می‌شوند، حاوی اطلاعات مهمی از لایه‌های زمین می‌باشند. بنابراین، کیفیت بالای داده‌ها می‌تواند در استخراج این اطلاعات از ردلرزه به مفسر کمک کند (شریف^۱ و جلدارت^۲، ۱۹۹۵). مقاطع لرزه‌ای خام اغلب حاوی نوفه^۳ هستند که امکان تفسیر مناسب و تبدیل این مقاطع را به مدل‌های زمین‌شناسی با مشکل مواجه می‌کند و ممکن است به تفسیر اشتباه و مدل زمین‌شناسی نادرست بیانجامد. بنابراین، گسترش روش‌هایی که بتواند به صورت بهینه باعث تضعیف انواع مختلف نوفه‌ها در داده‌های لرزه‌ای شود، ضروری به نظر می‌رسد. لذا مرحله تضعیف نوفه همواره از اصلی‌ترین مراحل پردازش داده‌های لرزه‌ای بازتابی به شمار می‌آید. نوفه‌های موجود در داده‌های لرزه‌ای را می‌توان به دو دسته مهم همدوس^۴ و ناهمدوس^۵ تقسیم‌بندی نمود (شریف و جلدارت، ۱۹۹۵). نوفه زمین‌غلت^۶ دسته مهمی از نوفه‌های همدوس همراه داده‌های لرزه‌ای خشکی می‌باشند که دارای سرعت و فرکانس کمتر و دامنه قوی‌تری نسبت به امواج بازتابی هستند (ایلماز^۷، ۲۰۰۱). به دلیل پاششی بودن (پویول^۸، ۲۰۰۳)، این دسته از امواج به صورت بادبزی در رکورد چشمه مشترک مشاهده می‌شوند و رویدادهای بازتابی کم عمق را در دورافت‌های نزدیک و رویدادهای عمیق را در دورافت‌های دور می‌پوشانند (ایکله^۹ و آموندسن^{۱۰}، ۲۰۰۵؛ چن^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۵) که باعث افت کیفیت داده‌های لرزه‌ای و از بین رفتن داده‌های بازتابی می‌شود. بنابراین، قبل از هر فرایند پردازشی بایستی این نوفه‌ها

^۱. Sheriff

^۲. Geldart

^۳. noise

^۴. Coherent

^۵. Incoherent

^۶. Ground roll

^۷. Yilmaz

^۸. Pujol

^۹. Ikelle

^{۱۰}. Amundsen

^{۱۱}. Chen

را تضعیف نمود. روش‌های متفاوتی برای تضعیف نوفه زمین‌غلت معرفی شده است. نوفه زمین‌غلت را می‌توان با استفاده از طراحی آرایه‌های مخصوص در حین برداشت داده تضعیف نمود (کردسن^۱ و همکاران، ۲۰۰۰). البته با وجود طراحی آرایه‌ها، همچنان مقدار قابل توجهی نوفه زمین‌غلت در داده‌های برداشت شده باقی می‌ماند که بایستی در مرحله پردازش آن‌ها را تضعیف نمود. با توجه به خصوصیات که برای نوفه زمین‌غلت بیان شد، می‌توان این نوفه را در حوزه زمان، فرکانس یا زمان-فرکانس تضعیف نمود (ایلماز، ۲۰۰۱؛ ایکله و آموندسن، ۲۰۰۵). حوزه فرکانس متداول‌ترین، حوزه برای تضعیف نوفه زمین‌غلت می‌باشد. استفاده از فیلتر فرکانسی باندگذر یا استفاده از فیلتر $f - k$ از جمله روش‌های پرکاربرد تضعیف نوفه زمین‌غلت می‌باشد. با توجه به اینکه امواج زمین‌غلت دارای باند فرکانسی تقریباً متفاوتی از داده‌های بازتابی می‌باشد، لذا به راحتی با استفاده از یک فیلتر باندگذر، می‌توان آن را تضعیف نمود. اما در پاره‌ای از موارد، این نوفه دارای همپوشانی باند فرکانسی با داده لرزه‌ای بازتابی است و لذا استفاده از یک فیلتر ساده فرکانسی باندگذر نمی‌تواند در تضعیف آن موثر باشد. امواج زمین‌غلت به دلیل سرعت متفاوت با رویدادهای بازتابی در حوزه $f - k$ در ناحیه‌ای متفاوت از رویدادهای بازتابی قرار می‌گیرند و می‌توان با حذف ناحیه مذکور امواج زمین‌غلت را تضعیف نمود (چن و همکاران، ۲۰۱۵؛ گادالاه^۲ و فیشر^۳، ۲۰۰۵؛ ایلماز، ۲۰۰۱). بسیاری از روش‌های متداول تضعیف نوفه زمین‌غلت مبتنی بر تبدیل‌های رادون^۴ (راسل^۵ و همکاران، ۱۹۹۰؛ هو^۶ و همکاران، ۲۰۱۶)، تبدیل ردلرزه شعاعی^۷ (هنلی، ۲۰۰۳) و $\tau - p$ ^۸ (تاتهام^۹ و همکاران، ۱۹۸۳) می‌باشند. یکی دیگر از ابزارهای پرکاربرد در تضعیف نوفه

^۱. Cordsen,

^۲. Gadallah

^۳. Fisher

^۴. Radon

^۵. Russell

^۶. Hu

^۷. Radial trace

^۸. Tau-p

^۹. Tatham

زمین‌غلت، استفاده از تجزیه مقادیر تکین^۱ می‌باشد (کندال^۲ و همکاران، ۲۰۰۵؛ پورسانی^۳ و همکاران، ۲۰۱۰؛ لو^۴، ۲۰۰۶). اغلب این روش‌ها، خاصیت ناپایا بودن داده‌های لرزه‌ای (ایلماز، ۲۰۰۱) را در نظر نمی‌گیرند و محتوای فرکانسی موجک چشمه لرزه‌ای را در تمام ردلرزه ثابت فرض می‌کنند. اما محتوای فرکانسی موجک چشمه لرزه‌ای به دلیل خاصیت ذاتی زمین در حین انتشار درون زمین در حال تغییر می‌باشد که به منظور بهبود نتایج تضعیف نوفه زمین‌غلت، روش‌هایی مبتنی بر تبدیل‌های زمان-فرکانس که ابزار مناسبی برای تحلیل سیگنال‌های ناپایا می‌باشند (بوآشاش^۵، ۲۰۱۵)، معرفی شدند که خاصیت ناپایا بودن داده‌های لرزه‌ای را در نظر می‌گیرند (کورسو^۶ و همکاران، ۲۰۰۳؛ نیلمانی^۷ و همکاران، ۲۰۰۸؛ بکارا^۸ و همکاران، ۲۰۰۹؛ البوت^۹ و همکاران، ۲۰۱۰؛ حسینی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۵؛ آلمیدا^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۵؛ چن، ۲۰۱۶). در تمام روش‌های مبتنی بر زمان-فرکانس، با استفاده از خواص ذاتی نوفه زمین‌غلت، این نوفه از امواج بازتابی در حوزه زمان-فرکانس تفکیک شده و با حذف آن، ردلرزه یا رکورد چشمه مشترک نوفه‌زدا شده به دست می‌آید. یکی از ابزارهای جدید که برای تحلیل و تجزیه سیگنال‌های ناپایا معرفی شده است، تجزیه مُد متغیر^{۱۲} (دراگومیرتسکی^{۱۳} و زوسو^{۱۴}، ۲۰۱۴) می‌باشد که همانند

^۱. Singular Value Decomposition (SVD)

^۲. Kendall

^۳. Porsani

^۴. Lu

^۵. Boashash

^۶. Corso

^۷. Neelamani

^۸. Bekara

^۹. Elboth

^{۱۰}. Hosseini

^{۱۱}. Almeida

^{۱۲}. Variational Mode Decomposition (VMD)

^{۱۳}. Dragomiretskiy

^{۱۴}. Zosso

تجزیه مُد تجربی^۱ (هوانگ^۲ و وو^۳، ۲۰۰۸)، سیگنال را به یکسری توابع مُد ذاتی^۴ تجزیه می‌کند. تجزیه مد متغیر در مقایسه با تجزیه مُد تجربی در مقابل نوفه پایدارتر می‌باشد و تجزیه سیگنال را بر اساس روابط منطقی ریاضی و نه به صورت کیفی و تجربی انجام می‌دهد. لیو^۵ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تجزیه مُد متغیر توانستند امواج زمین‌غلت را تضعیف نمایند. در این پایان‌نامه ابتدا با استفاده از تجزیه مد متغیر و تجزیه طیفی به تضعیف امواج زمین‌غلت پرداخته می‌شود و در ادامه با الگوگیری از روش خجسته (۱۳۹۲) مبتنی بر استفاده از تبدیل زمان-زمان و تجزیه مد تجربی برای حذف امواج زمین‌غلت، روش جدیدی با عنوان استفاده از تبدیل زمان-زمان و تجزیه مد متغیر ارائه و مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این پایان‌نامه، در فصل دوم، ابتدا به معرفی نوفه و دسته‌بندی نوفه‌های لرزه‌ای و همچنین معرفی چند روش متداول در تضعیف نوفه‌های زمین‌غلت پرداخته می‌شود. در فصل سوم به معرفی تجزیه مد متغیر و صفحه زمان-فرکانس حاصل از آن پرداخته شده است و در ادامه تبدیل زمان-زمان و روش تضعیف نوفه بر مبنای تجزیه مد متغیر بیان می‌شود. در فصل چهارم عملکرد روش‌های پیشنهادی بر روی داده مصنوعی و واقعی مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج آن با یک روش متداول (روش فیلتر $f - k$) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در نهایت در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات مربوط به پایان‌نامه ارائه می‌شود.

^۱. Empirical Mode Decomposition (EMD)

^۲. Huang

^۳. Wu

^۴. Intrinsic Mode Functions (IMF)

^۵. Liu

فصل دوم

نوفه

۲-۱- مقدمه

در مسائل مربوط به لرزه‌شناسی اکتشافی، نوفه به صورت سیگنال‌های لرزه‌ای کاذب ناشی از حرکت زمین که ربطی به بازتابنده‌ها ندارد تعریف می‌شود (دوبرین^۱ و سایت^۲، ۱۹۹۸). در این تعریف، امواج سطحی^۳ و تکراری‌ها^۴ از این قبیل اشاره شده است. به عبارت دیگر، سیگنال‌های همدوس و ناخواسته را نیز در نظر داشته‌اند. در واژه‌نامه لغتی شلومبرژه^۵ نوفه به این صورت تعریف می‌شود که هر انرژی به غیر از داده مطلوب نوفه است و نوفه شامل اختلالاتی است که به وسیله انرژی‌های لرزه‌ای شناخته شده یا ناشناخته به وجود می‌آید، مانند چشمه‌های تولیدکننده زمین‌گلت، اثر حرکت آب و باد، فعالیت‌های انسانی و یا رخدادهای تصادفی در زمین. در حالت کلی نوفه به دو گروه اصلی نوفه همدوس و نوفه ناهمدوس تقسیم می‌شود.

۲-۲- نوفه ناهمدوس

این نوفه همان گونه که از نام آن مشخص است، تصادفی است و از روند خاصی تبعیت نمی‌کند. به طور کلی نوفه تصادفی برای همه فرکانس‌ها وجود دارد به عبارت دیگر فرکانس‌ها نسبت به همدیگر برتری خاصی ندارند. حضور این نوفه در داده‌ها بر روی همه فرکانس‌ها تاثیر می‌گذارد. نکته دیگری که در خصوص این نوفه‌ها می‌توان به آن اشاره کرد این است که حاصل خود همبستگی برای یک سری زمانی کاملاً تصادفی در تاخیر صفر بیشینه و برای تاخیرهای دیگر صفر می‌باشد (کریمی و روشندل کاهو، ۱۳۹۲).

^۱. Dobrin

^۲. Savit

^۳. Surface waves

^۴. Multiples

^۵. Schlumbergers oilfield glossary

روش‌های زیادی برای تضعیف نوفه تصادفی ارائه شده است. یکی از روش‌های مرسوم و متداول برانبارش می‌باشد. از جمله تکنیک‌های برانبارش که به طور رایج بر اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی اعمال می‌شود، میانگین‌گیری از ردلرزه‌های داده بازتابی لرزه‌ای در یک نقطه مشترک است. همچنین از فیلترهای میان‌گذر متغیر با زمان برای تضعیف این نوفه نیز استفاده شده است (ایلماز، ۲۰۰۱؛ راشد^۱ و ناکاگاوا^۲، ۲۰۰۶).

۳-۲- نوفه همدوس

نوفه همدوس اکثر اوقات شکلی شبیه سیگنال واقعی دارند. این نوفه را می‌توان از یک ردلرزه به ردلرزه دیگر دنبال کرد به عبارت دیگر، نوفه همدوس مولفه‌هایی از شکل موج‌هایی هستند که اکثراً به وسیله چشمه‌های لرزه‌ای در طول عملیات تولید می‌شوند. اما برای داده‌های نهایی، ناخواسته و نامطلوب هستند (کی ری^۳ و همکاران، ۲۰۰۲). نوفه‌های همدوس خود به دو گروه خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌گردد. نوفه‌های خطی نوفه‌های هستند که اثرشان به صورت یک پدیده شیب‌دار خطی در داده‌های لرزه‌ای دیده می‌شود که به عنوان مثال می‌توان امواج هدایت شده، امواج ریلی و نوفه‌های کشتی در عملیات دریایی را نام برد. نوفه‌های همدوس غیرخطی نوفه‌هایی هستند که به صورت تناوبی در داده لرزه‌ای دیده می‌شود. از جمله این نوفه‌ها می‌توان به امواج شبیح^۴ و چندگانه‌ها اشاره کرد (ایلماز، ۲۰۰۱).

۳-۲-۱- امواج زمین‌غلت

امواج زمین‌غلت دسته‌ی مهمی از نوفه‌های همدوس می‌باشند که نسبت به داده‌های لرزه‌ای بازتابی محدوده فرکانسی و سرعت پایین‌تری را دارا می‌باشند و ممکن است باعث محو شدن بازتاب‌ها در رکوردهای لرزه‌ای شوند (شریف، ۱۹۹۵). ریلی (۱۸۸۷) در زمینه تئوری انتشار امواج کشسان در یک سطح آزاد و همگن نشان داد که ذره در سطح دارای یک حرکت چرخشی پسرو در یک مدار بیضی و

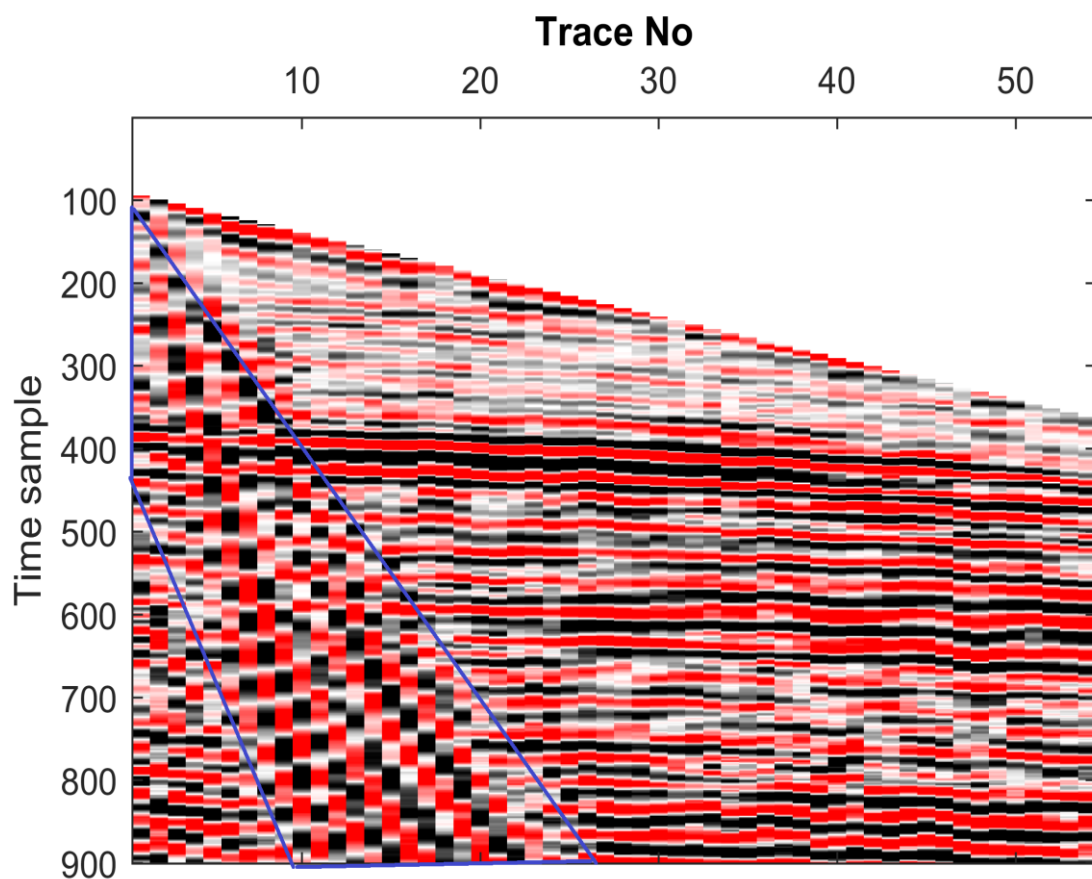
^۱. Rashed

^۲. Nakagawa

^۳. Kearey

^۴. Ghost

در صفحه قائم می‌باشد. امواجی که دارای چنین حرکتی هستند امواج ریلی نام گرفتند. امواج زمین‌غلت مولفه قائم جابجایی امواج ریلی هستند که با محتوای فرکانسی مختلف و سرعت‌های متفاوت منتشر می‌شوند (جولی^۱ و میفسود^۲، ۱۹۷۱). به دلیل پاششی بودن امواج زمین‌غلت، این امواج در رکورد چشمه مشترک به صورت بادبزنی مشاهده می‌شوند و رویدادهای بازتابی کم‌عمق را در دورافت‌های نزدیک و رویدادهای عمیق را در دورافت‌های دور می‌پوشانند (ایکله و آموندسن، ۲۰۰۵). در شکل ۱-۲ یک رکورد چشمه مشترک را نشان می‌دهد که حاوی نوفه زمین‌غلت می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، نوفه زمین‌غلت به صورت بادبزنی بر روی ردلرزه‌های بازتابی قرار گرفته است.

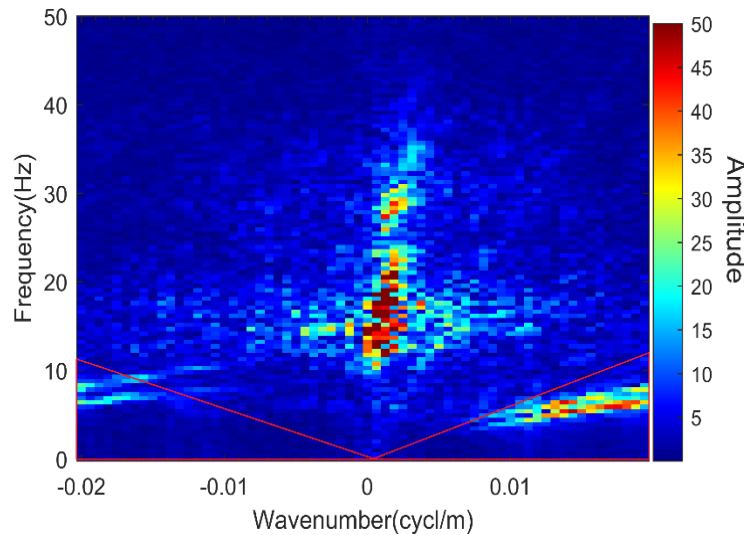


شکل ۱-۲. رکورد چشمه مشترک حاوی نوفه زمین‌غلت (چند ضلعی آبی رنگ نشان‌دهنده‌ی نوفه زمین‌غلت).

^۱. Jolly

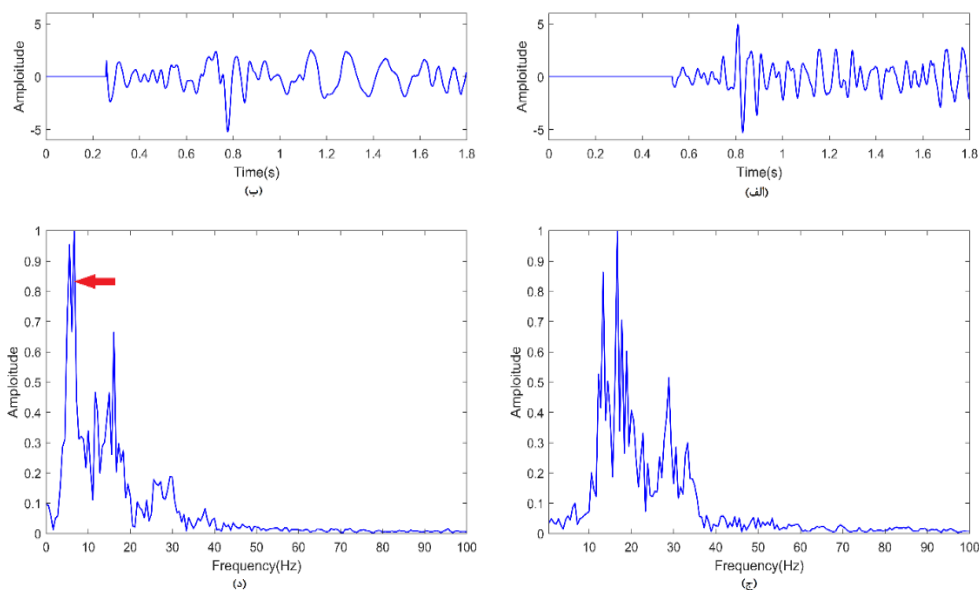
^۲. Mifsud

شکل ۲-۲ طیف $f - k$ رکورد چشمه مشترک شکل ۱-۲ را نشان می‌دهد. محدوده‌ای که با مثلث قرمز رنگ نشان داده شده است، نشان‌دهنده‌ی نوفه زمین‌گلت می‌باشد.



شکل ۲-۲. طیف $f - k$ رکورد چشمه مشترک حاوی نوفه زمین‌گلت (مثلث قرمز رنگ موقعیت نوفه زمین‌گلت در طیف $f - k$).

در شکل‌های ۳-۲ (الف) و ۳-۲ (ب) به ترتیب دو ردلرزه که یکی حاوی نوفه زمین‌گلت و دیگری بدون نوفه زمین‌گلت را نشان می‌دهد. همچنین در شکل‌های ۳-۲ (ج) و ۳-۲ (د) به ترتیب طیف دامنه مربوط ردلرزه بدون نوفه و طیف ردلرزه حاوی نوفه نشان داده شده است. نوفه زمین‌گلت در طیف دامنه ردلرزه حاوی نوفه با دامنه‌ی بالا و محتوای فرکانس پایین با پیکان قرمز رنگ مشخص شده است.



شکل ۳-۲. (الف) ردلرزه واقعی بدون نوفه، (ب) ردلرزه واقعی دارای نوفه زمین‌غلت، (ج) طیف دامنه مربوط به ردلرزه بدون نوفه و (د) طیف دامنه مربوط به ردلرزه حاوی نوفه (پیکان قرمز رنگ نشان‌دهنده‌ی دامنه مربوط به نوفه زمین‌غلت).

۲-۳-۲- تاریخچه روش‌های تضعیف امواج زمین‌غلت

روش‌های متداول تضعیف نوفه زمین‌غلت از داده‌های لرزه‌ای به دو گروه تقسیم بندی می‌شوند که شامل روش‌های حوزه زمان و روش‌های حوزه فرکانس می‌باشد (ایلماز، ۲۰۰۱). تاکنون روش‌های متعددی به منظور تضعیف امواج زمین‌غلت معرفی شده‌اند. چند نمونه از مهم‌ترین روش‌های تضعیف امواج زمین‌غلت به طور خلاصه در ادامه توضیح داده شده است.

۲-۳-۲-۱- فیلترهای فرکانسی بالاگذر و میان‌گذر

از آنجایی که امواج زمین‌غلت غالباً دارای محدوده فرکانسی پایینی نسبت به بازتابنده‌ها هستند، می‌توان با استفاده از یک فیلتر بالاگذر و یا میان‌گذر اثر آن‌ها را تضعیف نمود. بعد از طراحی فیلتر در حوزه فرکانس، سیگنال به حوزه فرکانس برده می‌شود و در پاسخ فرکانسی فیلتر ضرب می‌شود و به حوزه زمان برگردانده می‌شود (ایلماز، ۲۰۰۱).

۲-۲-۳-۲- تبدیل $T - p$

از تبدیل $T - p$ به منظور تضعیف امواج زمین‌غلت به این صورت استفاده می‌شود که داده‌های رکورد نقطه میانی مشترک^۱ پس از تصحیح برون راند خطی^۲ (LMO) به فضای تبدیل $T - p$ هذلولی یا خطی برده می‌شود. در این حالت انرژی در مناطق کوچک متمرکز در فضای این تبدیل کانونی شود (تاتهام و همکاران، ۱۹۸۳). محدوده‌ی شیب در این تبدیل به گونه‌ای انتخاب می‌شود که نوفه زمین‌غلت هیچ هم‌دوسی واضحی را در محدوده‌ی تغییرات شیب نشان ندهد با معکوس گرفتن این تبدیل از نتیجه به دست آمده از اعمال فیلتر، داده‌ها در حوزه‌ی زمان-دورافت بدون حضور نوفه‌ی زمین‌غلت بازیابی می‌شوند (تاتهام و همکاران، ۱۹۸۳؛ رضایی فرح آبادی، ۱۳۹۰).

۲-۲-۳-۳- فیلتر شیب^۳ (فرکانس-عدد موج^۴)

فیلتر شیب، روش بسیار پرکاربرد به منظور تضعیف امواج زمین‌غلت است، اختلاف سرعت ظاهری رخدادها، اساس این فیلتر می‌باشد. طراحی فیلترهای دوبعدی $(f - k)$ برای تضعیف نوفه از داده‌های لرزه‌ای توسط مارچ^۵ و بایلی^۶ (۱۹۸۳) و ایلماز (۲۰۰۱) مورد بررسی قرار گرفته است. تضعیف امواج زمین‌غلت در این فیلتر به این صورت است که رکورد چشمه مشترک لرزه‌ای از حوزه دورافت - زمان به حوزه فرکانس- عدد موج انتقال داده می‌شود. داده‌های مطلوب بازتابی در مجاورت محور فرکانس (محور عمودی) و نوفه زمین‌غلت در نزدیکی محور افقی تمرکز می‌یابند (ایلماز، ۲۰۰۱). با اعمال یک فیلتر مناسب می‌توان اثر نوفه زمین‌غلت را تضعیف نمود و به حوزه زمان- دورافت برگرداند.

^۱. Common mid point

^۲. Linear Moveout Correction

^۳. Dip filter

^۴. Frequency – Wavenumber

^۵. March

^۶. Bailey

فیلتر $f - k$ اغلب باعث آسیب زدن جدی به محتوای فرکانسی و شکل موج بازتاب‌ها می‌شوند و همچنین سبب هموارسازی سیگنال‌ها، کج‌شدگی سیگنال‌ها و تضعیف ناکافی نوفه‌های همدوس می‌شود. همچنین به دلیل قطع ناگهانی می‌تواند یکسری رخدادهای ناخواسته را ایجاد نماید (دونکن^۱ و برسفورد^۲، ۱۹۹۴).

۲-۳-۴- تبدیل ردلرزه‌ی شعاعی

تبدیل ردلرزه‌ی شعاعی، اولین بار در گزارش‌های انجمن اکتشاف نفت دانشگاه استنفورد معرفی شد که در آن زمان بیشترین کاربرد این تبدیل در زمینه مهاجرت و تصویرسازی لرزه‌ای بود. این تبدیل به منظور تضعیف بازتاب‌های تکراری با طول موج بلند و همچنین تضعیف امواج زمین‌غلت نیز استفاده می‌شود (کلربات^۳، ۱۹۷۵؛ اتولینی^۴، ۱۹۷۹). در واقع این تبدیل، یک تغییر مختصات و انتقال داده‌های لرزه‌ای از حوزه زمان-دورافت به حوزه سرعت ظاهری-زمان سیر است. تضعیف امواج زمین‌غلت در این تبدیل به این صورت است که داده‌های لرزه‌ای از حوزه‌ی زمان-دورافت به حوزه‌ی ردلرزه‌ی شعاعی برده می‌شود. در این تبدیل، نوفه‌های زمین‌غلت در این حوزه کشیده می‌شوند و فرکانس ظاهری این پدیده‌ها در حوزه‌ی جدید، به دلیل کشیدگی، کاهش پیدا می‌کند و محتوای فرکانسی بازتاب‌های اصلی در حوزه‌ی جدید تا حدی دست نخورده باقی می‌ماند. با توجه به این مسئله با اعمال فیلترهای بالاگذر و میان‌گذر در حوزه‌ی ردلرزه‌ی شعاعی از روی داده‌های لرزه‌ای، بخش وسیعی از این نوفه‌های خطی همدوس، شامل امواج زمین‌غلت تضعیف خواهد شد (کلربات، ۱۹۷۵؛ هنلی، ۲۰۰۳).

^۱. Duncan

^۲. Beresford

^۳. Claerbout

^۴. Ottolini

۲-۳-۵- تبدیل کارهونن- لائو

یکی از روش‌های مورد استفاده تبدیل کارهونن - لائو^۱ ($K - L$) می‌باشد. این تبدیل امواج زمین‌غلت را از دیگر پدیده‌های بازتابی جدا می‌کند. همون^۲ و مس^۳ (۱۹۷۸)، اولین بار برای پردازش داده‌های لرزه‌ای بازتابی این تبدیل را معرفی کردند. داده‌های لرزه‌ای در این تبدیل به یکسری تصاویر مشخصه براساس مقادیر ویژه تجزیه می‌شود که براساس همبستگی مکانی و به صورت کاهشی با توجه به میزان انرژی مرتب شده‌اند و نماینده‌ی مهم‌ترین خصوصیات داده هستند. در تصاویر مشخصه‌ی ابتدایی این تبدیل نوفه زمین‌غلت ظاهر می‌شود که با حذف آن‌ها می‌توان امواج زمین‌غلت را تضعیف نمود (لیو، ۱۹۹۹؛ سیاکوهی، ۱۳۷۹؛ مونتگن^۴ و واسکنسلوس^۵، ۲۰۰۵).

۲-۳-۶- روش تجزیه مقدار منفرد تطبیقی

روش تجزیه مقدار منفرد یک روش ریاضی بر پایه جبر خطی با استفاده از خواص ماتریس‌ها است که به عنوان روشی کاهنده، یک ماتریس را به سه ماتریس و در حقیقت به تصاویر مشخصه سازنده‌اش تجزیه می‌کند که دو ماتریس متعامد و یک ماتریس قطری تجزیه می‌نماید که در تصاویر مشخصه ابتدایی پدیده‌های افقی را شناسایی می‌نماید. در این روش هرچه یک پدیده لرزه‌ای افقی‌تر باشد، به دلیل پایین آمدن مرتبه ماتریس و افزایش وابستگی خطی بین نمونه‌ها می‌توان به وسیله تصاویر مشخصه ابتدایی‌تر آن را بازسازی کرد (بیکر^۶، ۲۰۰۵؛ گروز^۷ و پوسانی، ۲۰۱۶). امواج زمین‌غلت از یک پدیده شیب‌دار به یک پدیده افقی تبدیل شده و در تصاویر مشخصه ابتدایی خود را نشان خواهد داد. با صفر

^۱. Karhunen-loeve transorm

^۲. Hemon

^۳. Mace

^۴. Montagne

^۵. Vasconcelos

^۶. Baker

^۷. Cruz

قرار دادن تصاویر، مشخصه‌های که بیانگر زمین‌غلت هستند، امواج زمین‌غلت تضعیف می‌شوند (پورسانی و همکاران، ۲۰۱۰).

فصل سوم

روش تحقیق

۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا مروری بر روش تجزیه مد تجربی به منظور معرفی روش تجزیه مد متغیر که یکی دیگر از روش‌های تجزیه سیگنال می‌باشد، پرداخته می‌شود و در ادامه نحوه محاسبه صفحه زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر و تبدیل زمان-زمان نیز بررسی خواهد شد و در نهایت الگوریتم تضعیف امواج زمین‌غلت که شامل تجزیه مد متغیر با استفاده از صفحه زمان-فرکانس و تبدیل زمان-زمان بیان می‌گردد.

۳-۲- روش تجزیه مد تجربی

فرکانس در تحلیل فوریه برای یک تابع سینوسی و کسینوسی که طول کل داده را با مقادیر دامنه‌ای ثابت پوشش می‌دهد، تعریف می‌شود به عنوان تعمیمی از این تعریف، فرکانس لحظه‌ای^۱ باید به یک تابع سینوسی یا کسینوسی مربوط باشد. بنابراین، با این تعریف فرکانس لحظه‌ای برای تابعی سینوسی یا کسینوسی که حداقل یک تناوب کامل از آن وجود داشته باشد، تعریف می‌شود (هوانگ و همکاران، ۱۹۹۸). لذا برای سیگنالی با کمتر از یک طول موج نمی‌توان فرکانس لحظه‌ای را تعریف نمود. بنابراین، این تعریف برای داده‌های ناپایا که محتوای فرکانسی آن‌ها با گذشت زمان تغییر می‌کند، امکان‌پذیر نیست.

برای یک سری زمانی دلخواه $f(t)$ می‌توان تبدیل هیلبرت $H_f(t)$ را به صورت رابطه (۳-۱) بیان نمود (هوانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

$$H_f(t) = f(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (۳-۱)$$

^۱. instantaneous frequency

که (*) بیانگر هم‌امیخت می‌باشد. سیگنال تحلیلی^۱ $f_A(t)$ به صورت رابطه (۲-۳) تعریف می‌شود و در واقع تبدیل هیلبرت یک راه برای تعریف قسمت موهومی فراهم می‌کند تا نتیجه آن یک تابع تحلیلی شود (هوانگ و شن، ۲۰۰۵).

$$f_A(t) = f(t) + jH_f(t) = A(t)e^{j\phi(t)} \quad (2-3)$$

که $A(t)$ دامنه لحظه‌ای و $\phi(t)$ فاز لحظه‌ای می‌باشند.

تبدیل هیلبرت-هوانگ^۲، برای تحلیل داده‌های غیرخطی و ناپایا موثر است. این تبدیل شامل دو بخش می‌باشد، یکی تحلیل طیفی هیلبرت^۳ و دیگری تجزیه‌ی مد تجربی. تحلیل طیفی هیلبرت، ویژگی‌های برجسته‌ی ساختارهای پنهان و تشکیل‌دهنده‌ی طیف پیچیده را معین می‌کند. هدف از تحلیل طیفی هیلبرت محاسبه فرکانس و دامنه‌ی لحظه‌ای توابع مد ذاتی به وسیله‌ی تبدیل هیلبرت و به دست آوردن توزیع دامنه نسبت به زمان و فرکانس می‌باشد. تجزیه مد تجربی بخش اصلی تبدیل هیلبرت - هوانگ را تشکیل می‌دهد. روش تجزیه مد تجربی یک سیگنال را به تعدادی متناهی از توابع نوسانی که دارای تبدیل هیلبرت خوش‌رفتاری هستند، تجزیه می‌نماید (هوانگ و همکاران، ۱۹۹۸). این توابع نوسانی توابع مد ذاتی (IMF) نامیده می‌شوند. این توابع برخلاف یک هارمونیک که دارای دامنه و فرکانس ثابت است، دارای فرکانس‌های متغیر با دامنه‌های متفاوت می‌باشند. با تجزیه‌ی سیگنال به توابع مد ذاتی می‌توان اطلاعات فرکانس لحظه‌ای را استخراج کرد. اکثر سیگنال‌ها، شامل مدهای ذاتی نوسانی ساده گوناگونی هستند. هر مد ذاتی یک نوسان ساده است که تعداد نقاط صفرگذر^۴ و اکستrema^۵ آن‌ها برابر است. توابع مد ذاتی (IMF) دارای مشخصات زیر می‌باشند (هوانگ و شن، ۲۰۰۵):

۱- در طول کل داده، تعداد نقاط اکسترمم و نقاط صفرگذر باهم برابر هستند و یا حداکثر در یک واحد با هم تفاوت دارند.

^۱. Analytic signal

^۲. Hilbert-Huang Transform

^۳. Hilbert Analysis Spectrum (HAS)

^۴. Zero-cross

^۵. Extrema

۲- در هر نقطه از تابع مد ذاتی مقدار میانگین پوش برازش داده شده بر نقاط بیشینه‌ی محلی و پوش برازش داده شده بر نقاط کمینه‌ی محلی باید صفر باشد. به عبارت دیگر یک IMF باید تابعی متقارن حول صفر باشد.

برای به دست آوردن توابع مد ذاتی یک سیگنال مانند $x(t)$ از الگوریتم زیر استفاده می‌شود (هوانگ و همکاران، ۱۹۹۸؛ هوانگ و شن، ۲۰۰۵):

۱- نقاط اکسترمم‌های محلی سیگنال تعیین می‌شود.

۲- پوش پایینی و بالایی سیگنال با استفاده از برازش به نقاط بیشینه و کمینه محلی محاسبه می‌شود.

۳- میانگین پوش پایینی و پوش بالای سیگنال با نام $m_i(t)$ محاسبه می‌شود.

۴- اختلاف میان میانگین پوش بالا و پایین با سیگنال طبق رابطه‌ی (۳-۳) محاسبه می‌شود.

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (3-3)$$

۵- اگر $h_1(t)$ شرایط یک تابع مد ذاتی را داشت، به عنوان اولین تابع مد ذاتی، $imf_1(t)$ در نظر

گرفته و محاسبات به مرحله ۶ الگوریتم منتقل می‌شود. اگر شرایط برقرار نبود، مراحل ۱ تا ۴ بر

روی $h_1(t)$ تا زمانی که شرایط تابع مد ذاتی برقرار شود، اعمال می‌شود.

۶- باقیمانده مطابق رابطه‌ی (۴-۳) محاسبه می‌شود.

$$r_1(t) = x(t) - imf_1(t) \quad (4-3)$$

۷- مراحل ۱ تا ۶ تا جایی ادامه داده می‌شود که باقیمانده حداقل دارای دو اکسترمم باشد. در این

حالت آخرین $r_1(t)$ به عنوان باقیمانده سیگنال در نظر گرفته می‌شود.

سیگنال $x(t)$ پس از تجزیه شدن به مدهای نوسانی را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۵-۳) بازیابی نمود.

$$x(t) = \sum_{i=1}^n imf_i(t) + r_n(t) \quad (5-3)$$

۳-۳- تجزیه مد متغیر

از آنجایی که توابع مد ذاتی حاصل از تجزیه مد تجربی مبتنی بر فرضیه باند محدود فرکانسی نمی‌باشند (موهانتی^۱ و همکاران، ۲۰۱۴)، به همین دلیل امکان جداسازی دو مولفه مجزا با باند فرکانسی نزدیک به هم در روش تجزیه مد تجربی وجود ندارد. همچنین این روش برای محاسبه توابع مد ذاتی به صورت بازگشتی عمل می‌کند، به عبارت دیگر هر کدام از توابع مد ذاتی به صورت جداگانه محاسبه می‌شوند که باعث کاهش کارایی روش تجزیه مد تجربی می‌گردد. همچنین روش تجزیه مد تجربی در مواجهه با نوفه پایداری مناسبی ندارد. روش تجزیه مد متغیر به گونه‌ای است که توابع مد ذاتی به صورت هم‌زمان محاسبه می‌شوند و به همین دلیل از کارایی بهتری نسبت به تجزیه مد تجربی برخوردار می‌باشد (لیو و همکاران، ۲۰۱۶). در واقع هدف از تجزیه مد متغیر، تجزیه یک سیگنال حقیقی به مدهایی می‌باشد که دارای خاصیت تنکی در طیف فرکانسی هستند. به عبارت دیگر، طیف هر یک از توابع مد ذاتی بایستی حول یک فرکانس مرکزی متمرکز باشد. در عین حال، سیگنال اولیه بایستی از توابع مد ذاتی حاصل از تجزیه مد متغیر قابل بازیابی باشد (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴).

روش تجزیه مد متغیر برای سیگنال $f(t)$ به شرح زیر است:

۱- مدهای $u_k(t)$ و فرکانس مرکزی ω_k مقدار دهی اولیه می‌شوند.

۲- برای هر مد، سیگنال تحلیلی مرتبط با استفاده از تبدیل هیلبرت محاسبه می‌شود تا طیف فرکانسی یک‌طرفه به دست آید.

۳- برای هر مد، باند فرکانسی به باند پایه شیفت داده می‌شود.

۴- پهنای باند به وسیله کمینه‌سازی مجذور نرم گرادیان تخمین زده می‌شود.

^۱. Mohanty

رابطه (۶-۳) به منظور محاسبه طیف فرکانسی یک طرفه مثبت و همچنین شیف دادن فرکانس حول ω_k (فرکانس مرکزی)، با ضرب $e^{-j\omega_k t}$ در سیگنال تحلیلی استفاده می شود (آنیش^۱ و همکاران، ۲۰۱۵).

$$u_k^M(t) = (u_k(t) + ju_k^H(t))e^{-j\omega_k t} \quad (۶-۳)$$

با استفاده از رابطه (۷-۳) که انتگرال از مشتق درجه دوم طیف فرکانسی هر مد می باشد، می توان پهنای باند توابع مد ذاتی را اندازه گیری کرد (آنیش و همکاران، ۲۰۱۵).

$$\Delta\omega_k = \int (\partial_t(u_k^M(t))) \overline{(\partial_t(u_k^M(t)))} \quad (۷-۳)$$

از همامیخت $u_k(t)$ با $\delta(t) + \frac{j}{\pi t}$ سیگنال تحلیلی $u_k(t)$ حاصل می شود. بنابراین می توان رابطه (۸-۳) را تعریف نمود.

$$\partial_t(u_k^M(t)) = \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_t(t) \right] \quad (۸-۳)$$

با توجه به خاصیت نرم ها، انتگرال را می توان به عنوان یک نرم بیان نمود. بنابراین رابطه ی (۷-۳) به صورت رابطه ی (۹-۳) باز نویسی می شود (آنیش و همکاران، ۲۰۱۵).

$$\Delta\omega_k = \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_t(t) \right] \right\|_2^2 \quad (۹-۳)$$

مجموع پهنای باندهای مربوط به همه ی مدها را به صورت $\sum_{k=1}^K \Delta\omega_k$ نمایش می دهند که از طریق رابطه (۱۰-۳) کمینه می شود (آنیش و همکاران، ۲۰۱۵).

$$\begin{aligned} \min_{\{u_k, \omega_k\}} & \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} & \sum_k u_k(t) = f(t) \end{aligned} \quad (۱۰-۳)$$

^۱. Aneesh

رابطه (۱۰-۳) نشان می‌دهد که مجموع مدهای خروجی باید با سیگنال ورودی برابر باشد که این خود یک قید برای بهینه‌سازی رابطه (۱۰-۳) می‌باشد. برای حل این مسئله از بهینه‌سازی به روش ضرایب لاگرانژی استفاده شده است. معادله (۱۰-۳) به صورت یک مسئله بهینه‌سازی نامحدود می‌باشد که با افزودن یک عبارت جبرانی درجه دوم و یا لاگرانژ افزاینده (λ) محدود می‌شود و در نهایت معادله اصلاح شده به صورت رابطه (۱۱-۳) نشان داده می‌شود (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴).

$$L(u_k, \omega_k, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f - \sum_k u_k \right\|_2^2 + \langle \lambda, f - \sum_k u_k \rangle \quad (11-3)$$

دراگومیرتسکی و زوسو (۲۰۱۴) برای در نظر گرفتن شرط بازسازی از جمله جبرانی درجه دوم و افزاینده لاگرانژی به صورت هم زمان استفاده نمودند و برای محاسبه رابطه (۱۱-۳) از متناوب‌کننده جهتی افزاینده^۱ (ADMM) استفاده کردند (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴). با بهینه‌سازی رابطه (۱۱-۳) برای سه مجهول $u_k(t)$ ، $\omega_k(t)$ و λ سه رابطه حاصل خواهد شد که اولین رابطه شامل همه مدهای تخمین زده شده در حوزه فرکانس می‌باشد که به صورت رابطه (۱۲-۳) به روزرسانی می‌شوند.

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i < k} \hat{u}_i^{n+1}(\omega) - \sum_{i > k} \hat{u}_i^n(\omega) + \frac{\hat{\lambda}^n(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k^n)^2} \quad (12-3)$$

$$\omega \geq 0$$

در رابطه (۱۲-۳) علامت $\hat{\cdot}$ نشان‌دهنده تبدیل فوریه متغیر، $\hat{f}(\omega)$ تبدیل فوریه سیگنال ورودی، ω فرکانس و α پارامتر ثابت تعادل می‌باشد. رابطه دوم شامل همه فرکانس‌های مرکزی مربوط به مدهای تخمین زده شده است که به صورت رابطه (۱۲-۳) در حوزه فرکانس به روزرسانی می‌شود (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴).

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |u_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |u_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega} \quad (13-3)$$

^۱. Alternate direction method of multipliers

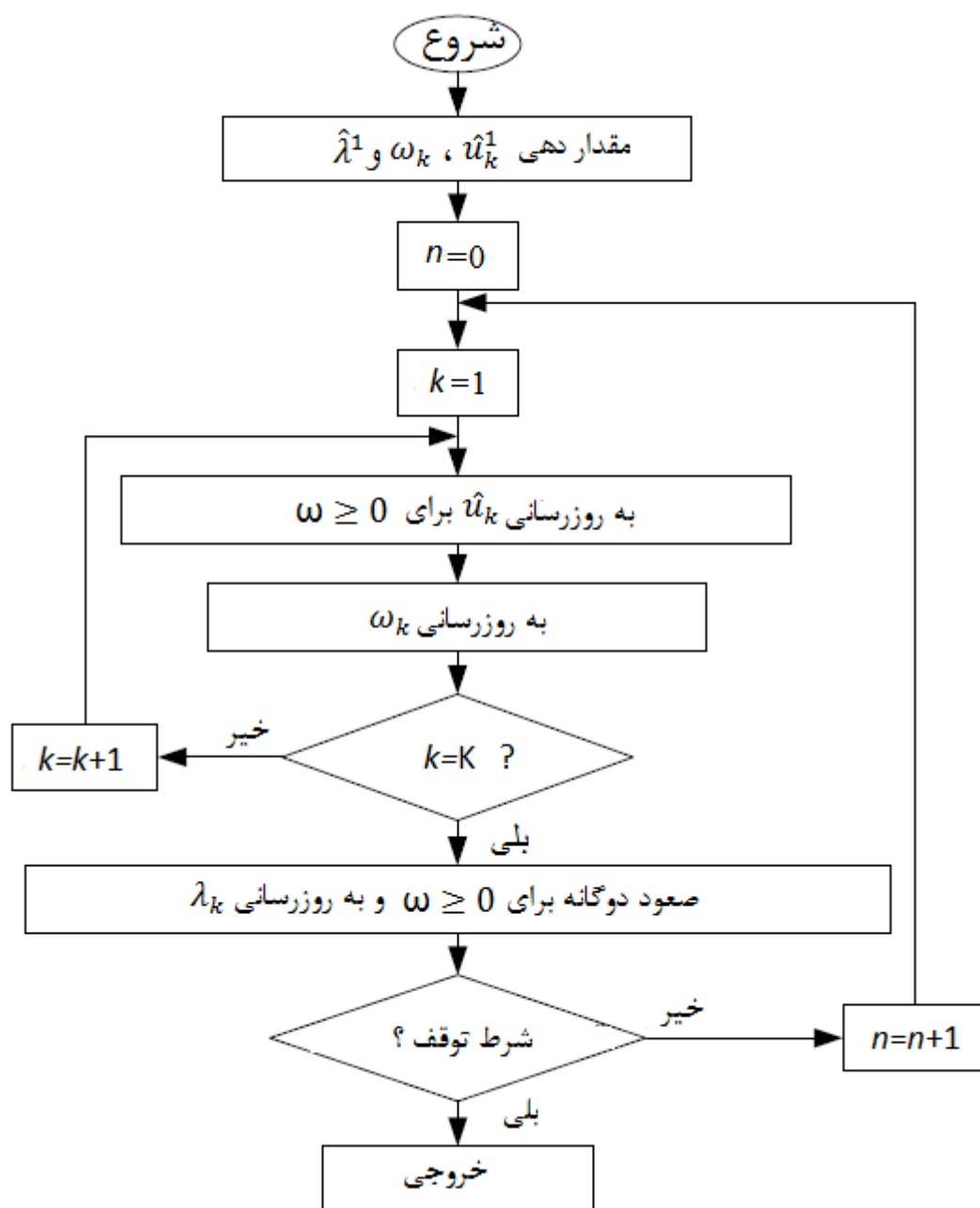
ضرایب لاگرانژ نیز با استفاده از رابطه (۳-۱۴) در حوزه فرکانس به روزرسانی می‌شود که در آن پارامتر τ گام زمانی از یک صعود دوگانه می‌باشد.

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n + \tau \left[\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right] \quad (۳-۱۴)$$

با استفاده سه رابطه مذکور و در نظر گرفتن شرط توقف در رابطه (۳-۱۵)، می‌توان یک سیگنال را به مولفه‌های نوسانی آن تجزیه نمود (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴).

$$\sum_k \left(\frac{\|u_k^{n+1} - u_k^n\|_2^2}{\|u_k^n\|_2^2} \right) < \varepsilon \quad (۳-۱۵)$$

شکل ۳-۱ فلوچارت الگوریتم تجزیه مد متغیر را نشان می‌دهد که در آن مقادیر اولیه صفر در نظر گرفته شده است، که دلیل آن به خاطر وجود سیگنال ورودی در الگوریتم می‌باشد. در واقع هدف جستجو در فرکانس مرکزی‌های کوچکتر نیز می‌باشد با این حال مقادیر اولیه در تکرار بعدی از سیگنال ورودی تاثیر می‌پذیرند. همچنین در این الگوریتم می‌توان مشاهده کرد که با توجه به شرط مربوط به تعداد مدها مورد نظر که باید برابر با تعداد مدهای محاسبه شده در الگوریتم باشد این عامل خود نشان می‌دهد که روش تجزیه مد متغیر یک روش غیر بازگشتی می‌باشد و بر خلاف روش تجزیه مد تجربی که هر مد را جداگانه محاسبه و به مرحله شرط می‌برد این روش تمام مدها را همزمان محاسبه و به مرحله شرط می‌برد.



شکل ۳-۱. فلوچارت الگوریتم تجزیه مد متغیر (برگرفته از سان^۱ و همکاران، ۲۰۱۶).

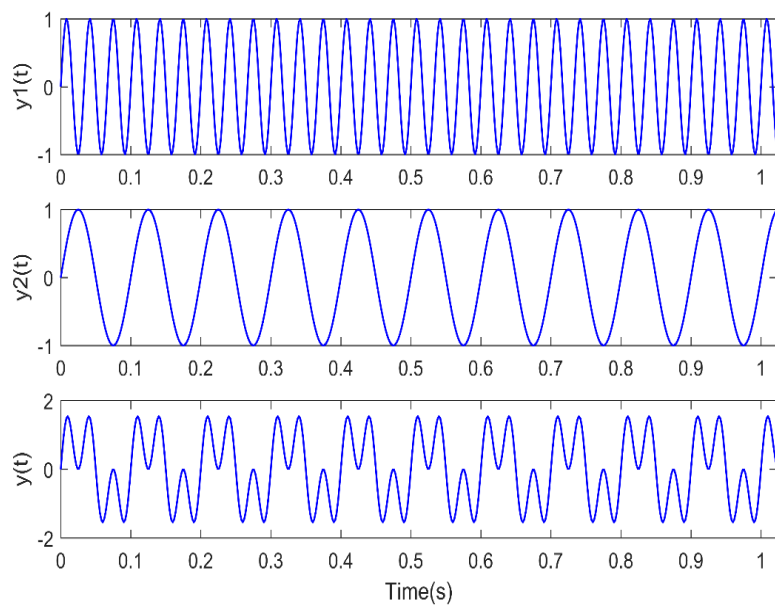
در تجزیه سیگنال‌های لرزه‌ای دو پارامتر k و α بیشترین تاثیر را در روند تجزیه مد متغیر دارند (لیو و همکاران، ۲۰۱۶). پارامتر τ در روند تجزیه تاثیر چندانی ندارد. این پارامتر به نوعی کنترل‌کننده‌ی

^۱.Sun

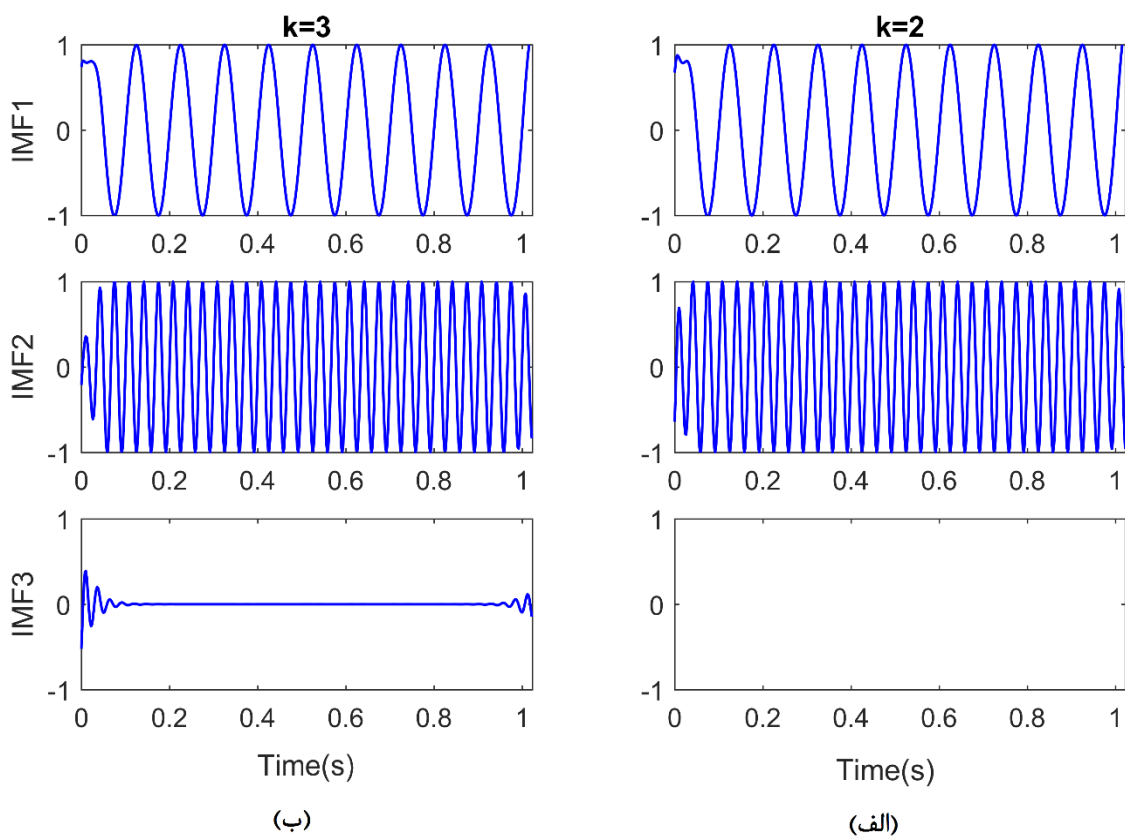
لاگرانژ افزوده و مقدار آن شرطی می‌باشد. به عنوان مثال در صورت وجود نویز گاوسی در داده‌ها این پارامتر فعال می‌شود و مقدار آن برابر با یک ($\tau=1$) در نظر گرفته می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۶ و دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴). پارامتر k در تجزیه مد متغیر دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در تجزیه مد متغیر، اولین مد حاوی مولفه‌های با فرکانس کم و دامنه بالا هستند. بنابراین پارامتر k براساس تعداد مدهای سازنده سیگنال انتخاب می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۶). برای درک بهتر، سیگنال مصنوعی $y(t)$ مرکب از دو موج سینوسی به ترتیب با فرکانس‌های ۱۰ و ۳۰ هرتز مطابق رابطه‌ی (۱۶-۳) به دست آمده است.

$$\begin{aligned} y_1(t) &= \sin(2\pi f_1 t) , f_1 = 30 , t = (0:511) \times 0.002 , \\ y_2(t) &= \sin(2\pi f_2 t) , f_2 = 10 , t = (0:511) \times 0.002 , \\ y(t) &= y_1(t) + y_2(t) \end{aligned} \quad (16-3)$$

شکل ۲-۳ نتیجه حاصل از رابطه (۱۶-۳) را نشان می‌دهد. با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترهای تجزیه، سیگنال $y(t)$ برای دو مقدار $k=2$ و $k=3$ تجزیه شده است. نتایج تجزیه در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. در شکل ۳-۳ (الف) تجزیه سیگنال با دو مد ($k=2$) و در شکل ۳-۳ (ب) تجزیه سیگنال با سه مد ($k=3$) را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن $k=3$ یک مد کاذب که همان مد سوم است ایجاد شده است که بعدها در تجزیه طیفی باعث بروز خطا می‌شود. در این صورت پارامتر k باید متناسب با تعداد فرکانس‌های سازنده یک سیگنال انتخاب شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۶).



شکل ۳-۲. سیگنال مصنوعی $y(t)$ تولید شده از دو مولفه $y_1(t)$ ، y_2 .



شکل ۳-۳. (الف) تجزیه با $k=2$ ، (ب) تجزیه با $k=3$.

پارامتر تعادل α ، داری مقدار تجربی است. مقدار این پارامتر در محدوده‌ی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ بهترین نتایج را برای تجزیه سیگنال ایجاد می‌نماید (دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴؛ لیو همکاران، ۲۰۱۶؛ آنیش و همکاران، ۲۰۱۶).

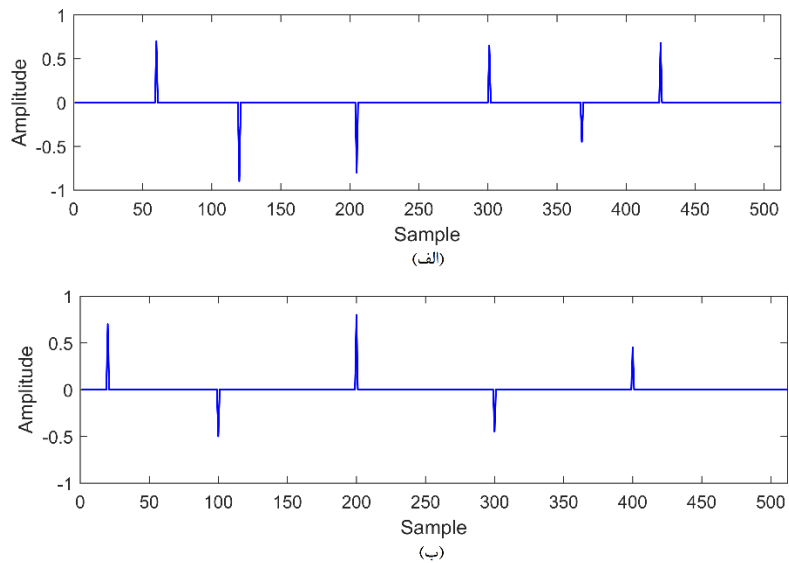
سیگنال مصنوعی $y(t)$ در شکل ۳-۵ مطابق رابطه (۳-۱۷) به دست آمده است که متشکل از سه مولفه $y_1(t)$ ، $y_2(t)$ و $y_3(t)$ می‌باشد، مولفه‌های آن شامل سیگنال چیرپ با فرکانس ۱۵-۵ هرتز، سیگنال ریکر با فرکانس ۲۰ هرتز و یک سیگنال مورلت با فرکانس ۳۰ هرتز که در سری بازتاب دلخواه (شکل ۳-۴) همامیخت شده است، می‌باشند.

$$y_1(t) = \text{Ricker} * (\text{الف}) \text{ سری بازتاب}, f_1 = 20, \\ t = (0:511) \times 0.002$$

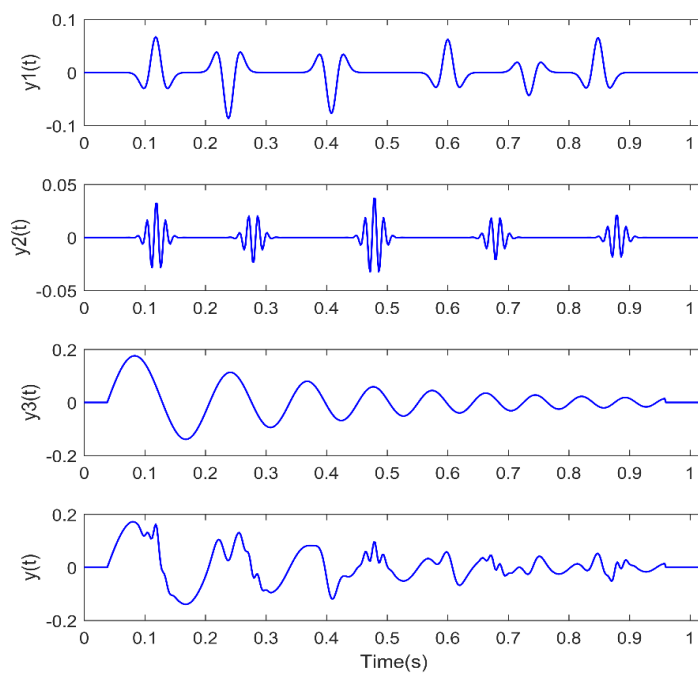
$$y_2(t) = \text{Morlet} * (\text{ب}) \text{ سری بازتاب}, f_2 = 30, \quad (3-17) \\ t = (0:511) \times 0.002$$

$$y_3(t) = \text{chirp}, f_3 = 5 - 15, t = (0:511) \times 0.002$$

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) + y_3(t)$$

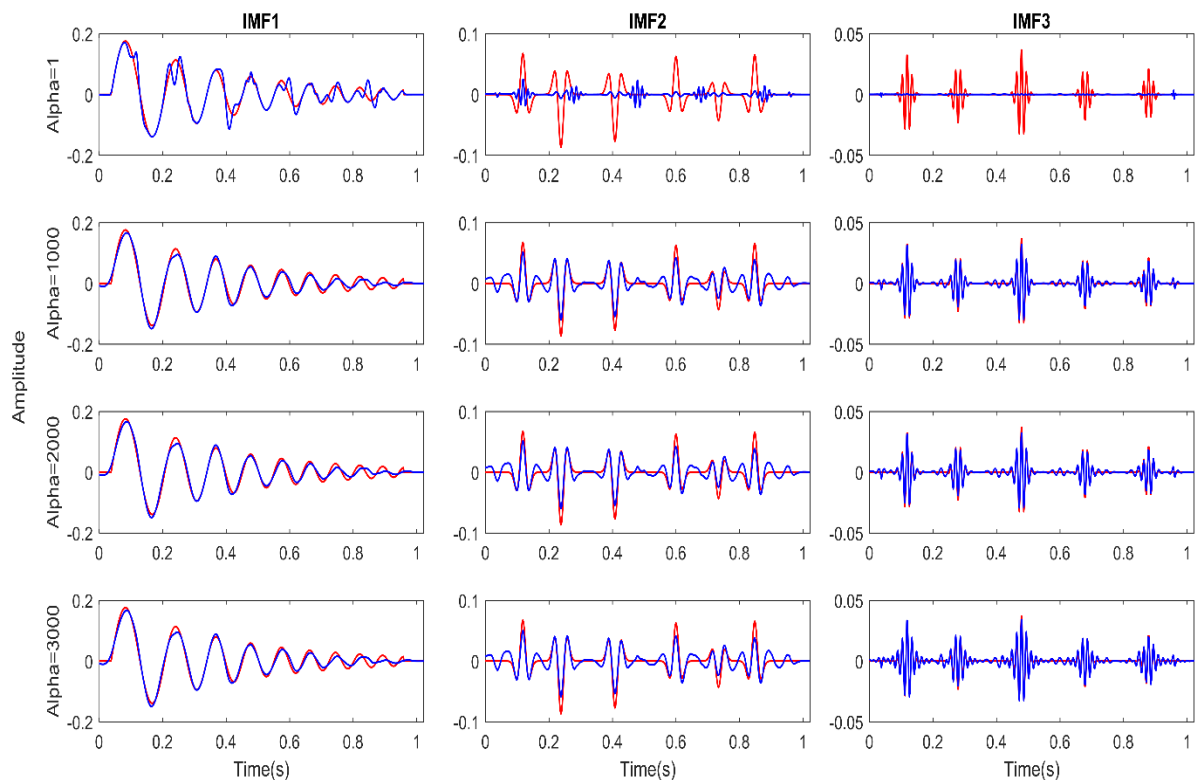


شکل ۳-۴. سری بازتاب دلخواه.



شکل ۳-۵. سیگنال مصنوعی $y(t)$ تولید شده از سه مولفه $y_1(t)$ ، $y_2(t)$ و $y_3(t)$.

نتایج تجزیه سیگنال $y(t)$ برای مقادیر α با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها در شکل ۳-۶ نشان داده شده است.



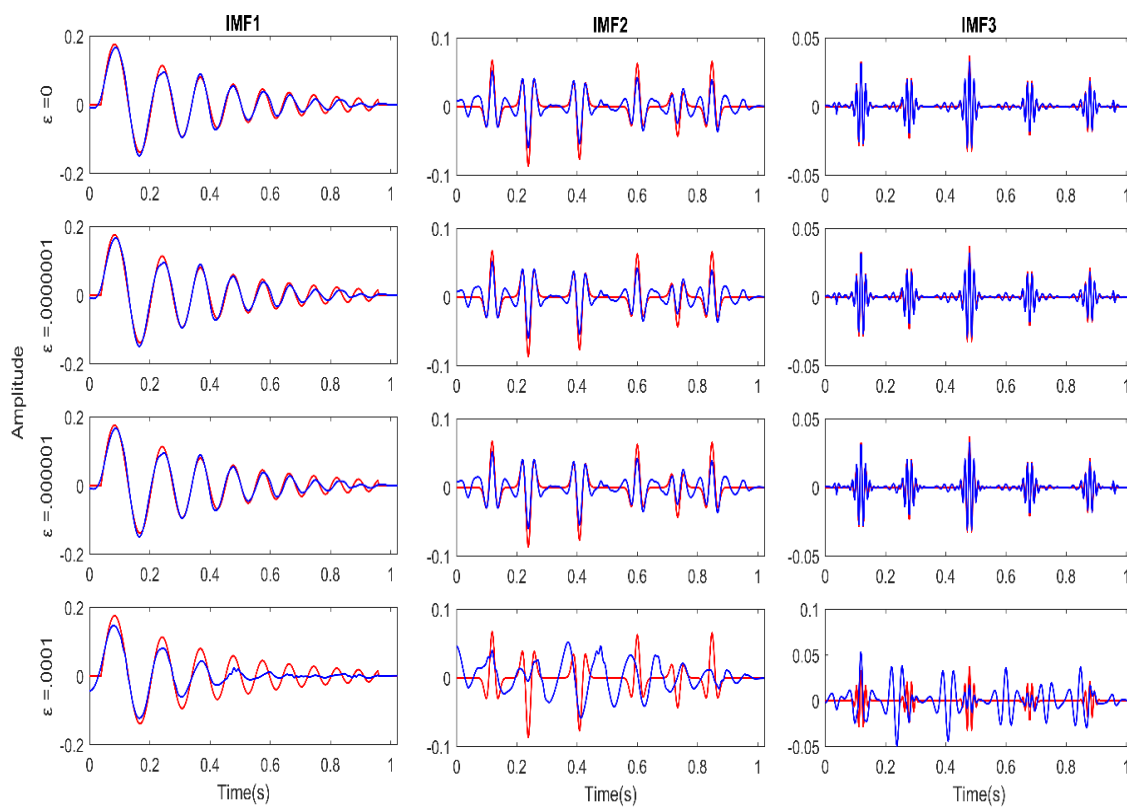
شکل ۳-۶. ردیف اول تجزیه سیگنال با پارامتر $\alpha=1$ ، ردیف دوم تجزیه سیگنال با پارامتر $\alpha=1000$ ، ردیف سوم تجزیه سیگنال با پارامتر $\alpha=2000$ و ردیف چهارم تجزیه سیگنال با پارامتر $\alpha=3000$ (سیگنال ایده‌آل با رنگ قرمز و سیگنال خروجی با رنگ آبی).

مجموع مربعات خطا برای هر مد و مقدار ایده‌آل در جدول ۳-۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تجزیه با پارامتر $\alpha=1000-2000$ نسبت به سایر مقادیر این پارامتر دارای خطای کمتری می‌باشد. برای انتخاب پارامتر شرط توقف (ε) از سیگنال مصنوعی حاصل از رابطه (۳-۱۷) استفاده شده است. همچنین نتایج برای چهار مقدار خطا در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.

جدول ۳-۲ مجموع مربعات خطا مربوط به هر مد و مقدار ایده‌آل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود اگر چه با کوچک‌تر شدن پارامتر ε مجموع مربعات خطا کاهش می‌یابد، ولی تاثیر زیادی در نتایج تجزیه ندارد و زمان اجرای الگوریتم افزایش می‌یابد (لیو و همکاران، ۲۰۱۶؛ دراگومیرتسکی و زوسو، ۲۰۱۴).

جدول ۳-۱: مجموع مربعات خطا حاصل از تجزیه سیگنال برای پارامتر α با سیگنال اولیه.

پارامتر α	خطای مربوط به مد اول	خطای مربوط به مد دوم	خطای مربوط به مد سوم
۱	۰/۰۱۹۴	۰/۰۱۹۷	۰/۰۰۶۹
۱۰۰۰	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۱۵
۲۰۰۰	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۱۴
۳۰۰۰	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۲۴



شکل ۳-۷. ردیف اول تجزیه سیگنال با پارامتر $\epsilon=0$ ، ردیف دوم تجزیه سیگنال با پارامتر $\epsilon=0/0000001$ ، ردیف سوم تجزیه سیگنال با پارامتر $\epsilon=0/0000001$ و ردیف چهارم تجزیه سیگنال با پارامتر $\epsilon=0/0001$ (سیگنال ایده‌آل با رنگ قرمز و سیگنال خروجی با رنگ آبی).

جدول ۳-۲: مجموع مربعات خطا حاصل از تجزیه سیگنال برای پارامتر ε با سیگنال اولیه.

خطای مربوط به مد سوم	خطای مربوط به مد دوم	خطای مربوط به مد اول	پارامتر ε
۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۹۵	۰
۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱
۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۰۰۰۰۱
۰/۰۱۴۶	۰/۰۲۶۲	۰/۰۲۱۹	۰/۰۰۰۰۱

۳-۴- مقایسه نتایج تجزیه مد متغیر و تجزیه مد تجربی

به منظور مقایسه تجزیه مد متغیر و تجزیه مد تجربی، در شکل ۳-۸ سیگنال مصنوعی $y(t)$ حاصل

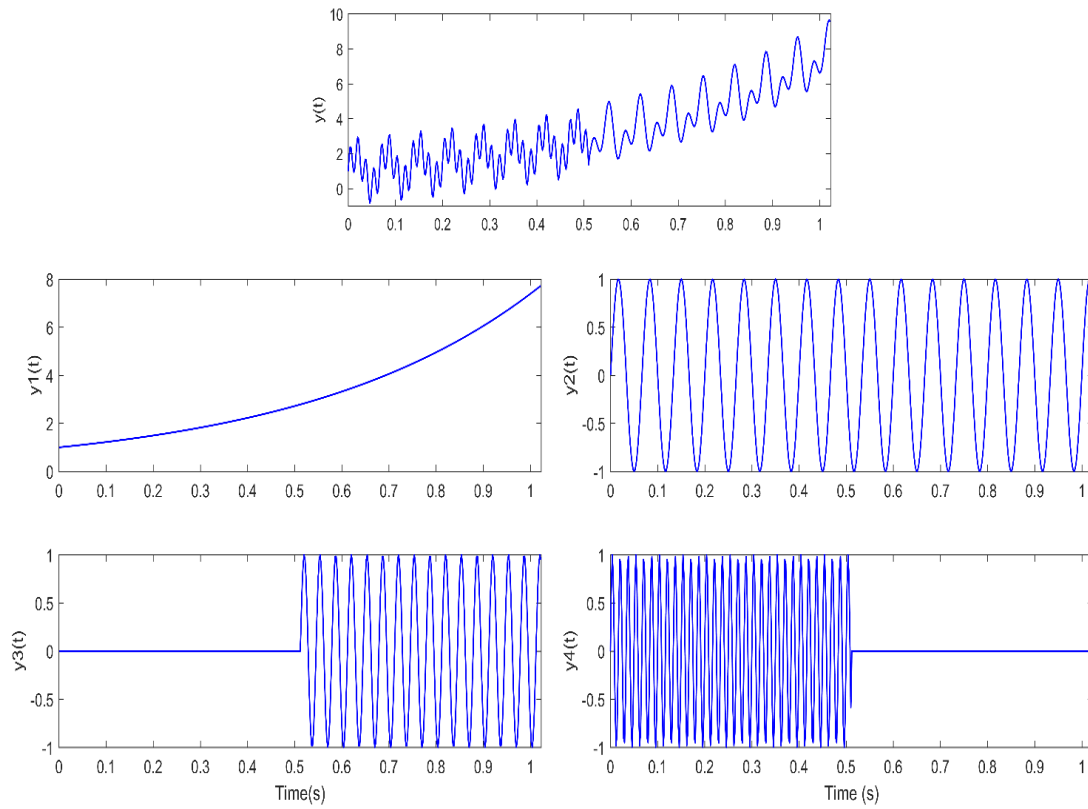
جمع چهار سیگنال با محتوای فرکانسی متفاوت مطابق رابطه (۳-۱۸) به دست آمده است.

$$\begin{aligned}
 y_1(t) &= e^t & t \in [0 \ 1.022] \\
 y_2(t) &= \sin(30\pi t) & t \in [0 \ 1.022] \\
 y_3(t) &= \begin{cases} 0 & t \in [0 \ 0.51] \\ \sin(60\pi t) & t \in [0.51 \ 1.022] \end{cases} \\
 y_4(t) &= \begin{cases} \sin(120\pi t) & t \in [0 \ 0.51] \\ 0 & t \in [0.51 \ 1.022] \end{cases} \\
 y(t) &= y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) + y_4(t)
 \end{aligned}
 \tag{۳-۱۸}$$

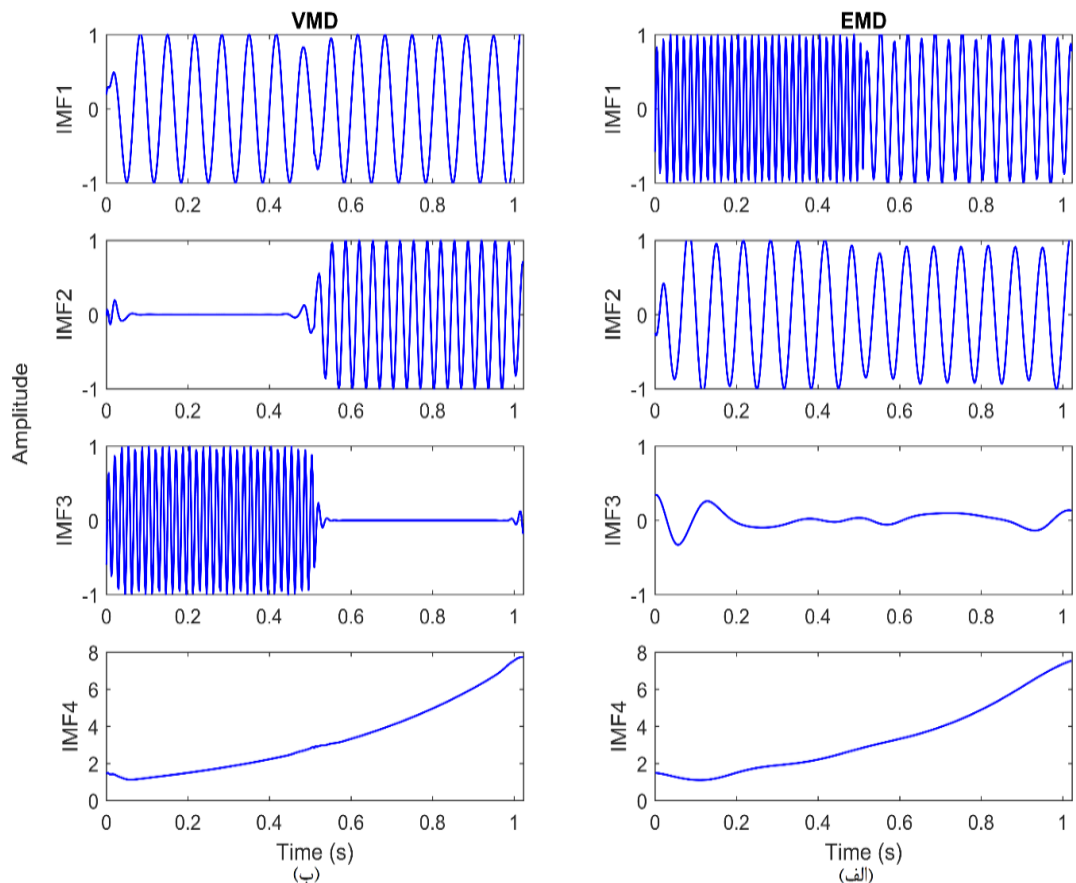
در ادامه الگوریتم تجزیه مد متغیر و تجزیه مد تجربی بر روی سیگنال مصنوعی $y(t)$ اعمال و توابع مد

ذاتی هر کدام در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، روش تجزیه مد متغیر

بر خلاف روش تجزیه مد تجربی تفکیک مولفه‌های فرکانسی مختلف را بهتر انجام داده و نتایج به مؤلفه‌های اصلی سازنده سیگنال مصنوعی نزدیک‌تر است.



شکل ۳-۸. سیگنال مصنوعی $y(t)$ تولید شده از چهار مولفه $y_1(t)$ ، $y_2(t)$ ، $y_3(t)$ و $y_4(t)$.



شکل ۳-۹. (الف) توابع مد ذاتی برای $y(t)$ با استفاده از تجزیه مد تجربی و (ب) توابع مد ذاتی برای $y(t)$ با استفاده از تجزیه مد متغیر.

۳-۵- فرکانس-زمان (هیلبرت - هوانگ) مبتنی بر تجزیه مد متغیر

در واقع این صفحه نوعی نمایش زمان-فرکانس می‌باشد با این تفاوت که قدرت تفکیک بالاتری در نمایش زمان-فرکانس در مقایسه با سایر تبدیل‌های زمان-فرکانس دارد (هوانگ و وو، ۲۰۱۴). برای محاسبه این صفحه ابتدا تبدیل هیلبرت برای هر مد یا هر سیگنال دیگری محاسبه می‌گردد و در ادامه دامنه لحظه‌ای ($A(t)$) از رابطه (۳-۱۹)، فاز لحظه‌ای ($\phi(t)$) از رابطه (۳-۲۰) و فرکانس لحظه‌ای ($f_i(t)$) از رابطه (۳-۲۱) به دست می‌آیند.

$$A(t) = \sqrt{(\text{Real}(f_A(t)))^2 + (\text{Imag}(f_A(t)))^2} \quad (۳-۱۹)$$

$$\phi(t) = \text{Arctan} \frac{\text{Imag}(f_A(t))}{\text{Real}(f_A(t))} \quad (۳-۲۰)$$

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{d(t)} \quad (21-3)$$

در روابط (۱۹-۳) تا (۲۱-۳) $Imag(f_A(t))$ قسمت موهومی سیگنال تحلیلی و $Real(f_A(t))$ قسمت حقیقی سیگنال تحلیلی می باشد (هوانگ، ۲۰۱۴). در نهایت مقادیر دامنه و فاز لحظه ای به صورت جداگانه در صفحه زمان- فرکانس قرار می گیرند. به عبارت دیگر مقادیر دامنه و مقادیر فاز لحظه ای در این صفحه توزیع می شوند. بنابراین دو صفحه $A(t, f)$ و $\phi(t, f)$ که به ترتیب دامنه و فاز صفحه زمان- فرکانس می باشند، به دست می آید.

همچنین معکوس این صفحه براساس رابطه (۲۲-۳) محاسبه می گردد (هوانگ، ۲۰۱۴).

$$x(t) = Real \left\{ \sum_f A(t, f) \times e^{-i\phi(t, f)} \right\} \quad (22-3)$$

به منظور درک بهتر این صفحه، سیگنال مصنوعی $y(t)$ مرکب از سه موج سینوسی به ترتیب با فرکانس های ۳۵، ۱۵ و ۵۰ هرتز مطابق رابطه ی (۲۳-۳) به دست آمده است.

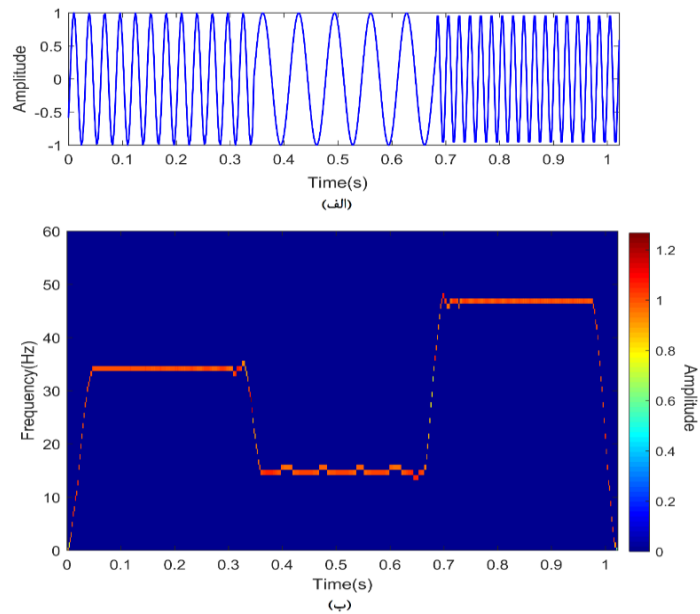
$$\begin{aligned} y_1(t) &= \sin(2\pi f_1 t), f_1 = 35, t = (0:170) \times 0.002 \\ y_2(t) &= \sin(2\pi f_2 t), f_2 = 15, t = (171:342) \times 0.002 \\ y_3(t) &= \sin(2\pi f_3 t), f_3 = 45, t = (343:511) \times 0.002 \\ y(t) &= [y_1(t), y_2(t), y_3(t)] \end{aligned} \quad (23-3)$$

نتیجه حاصل از رابطه (۲۳-۳) و صفحه زمان- فرکانس مربوط به آن، در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می شود برای سیگنال های با فرکانس ثابت این صفحه دقت بالایی در نمایش محتوای فرکانسی آن ها دارد.

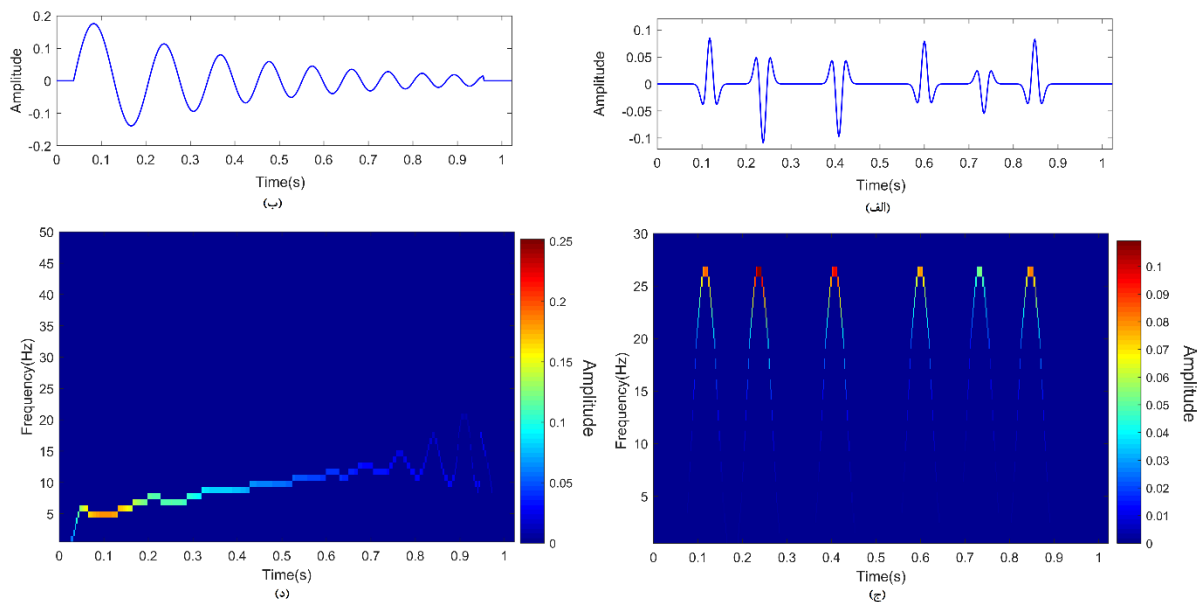
مثال بعدی، همامیخت یک موجک ریکر با فرکانس ۲۵ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه (شکل ۳-۴) مطابق رابطه (۱۷-۳) $y_1(t)$ با گام زمانی ۲ میلی ثانیه و طول زمانی ۱/۰۲۲ ثانیه در شکل ۳-۱۱ (الف) نشان داده شده است و سیگنال چیرپ با فرکانس ۱۵-۵ هرتز با گام زمانی ۲ میلی ثانیه و طول زمانی

۱/۰۲۲ ثانیه در شکل ۱۱-۳ (ب) مطابق رابطه (۳-۱۷) $y_3(t)$ نشان داده شده است. صفحه زمان-

فرکانس آنها به ترتیب در شکل ۱۱-۳ (ج) و شکل ۱۱-۳ (د) نشان داده شده است.



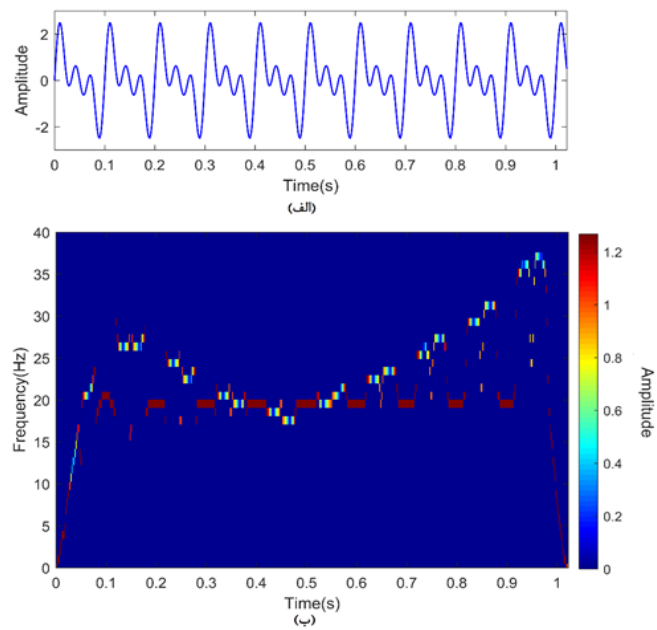
شکل ۱۰-۳. (الف) سیگنال مصنوعی $y(t)$ و (ب) نمایش زمان-فرکانس مربوط به آن.



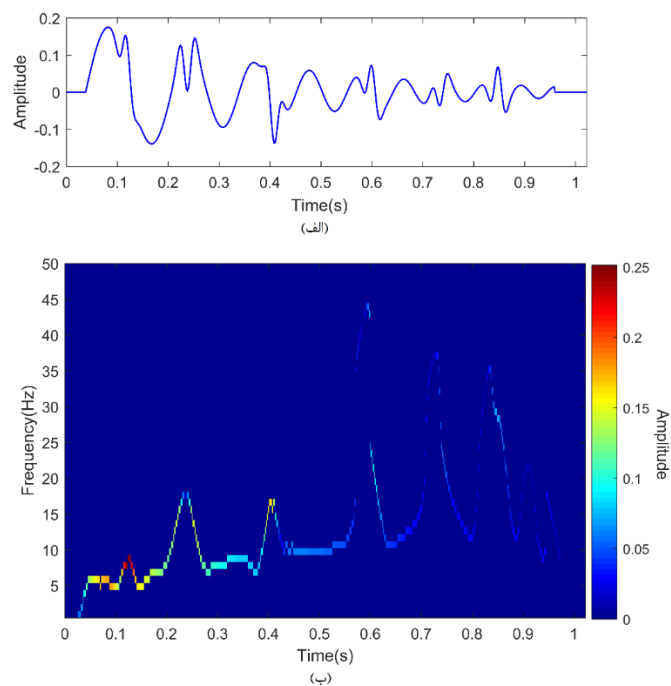
شکل ۱۱-۳. (الف) موجک ریکر هممیخت شده در سری بازتاب دلخواه، (ب) سیگنال چیرپ، (ج) صفحه زمان-فرکانس سیگنال هممیخت شده در سری بازتاب دلخواه و (د) صفحه زمان-فرکانس سیگنال چیرپ.

شکل ۱۲-۳ (الف) و شکل ۱۲-۳ (ب) به ترتیب سیگنال مصنوعی متشکل از فرکانس‌های ۲۰، ۱۰ و ۳۰ هرتز و طول زمانی ۱/۰۲۲ ثانیه و صفحه زمان-فرکانس مربوط به آن را نشان می‌دهد. در شکل ۱۳-۳ (الف) مجموع دو سیگنال ذکر شده در شکل ۱۱-۳ (الف) و شکل ۱۱-۳ (ب)، نشان داده شده است. همچنین شکل ۱۳-۳ (ب) صفحه زمان-فرکانس مربوط به آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲-۳ (ب) و ۱۳-۳ (ب) مشاهده می‌شود، مولفه‌های فرکانسی به درستی محاسبه نشده است و این به خاطر وجود مولفه‌های فرکانسی مختلف در سیگنال می‌باشد. همچنین این صفحه فقط روند فرکانسی یک سیگنال را نشان می‌دهد به عبارت دیگر این صفحه قادر به تفکیک محتوای فرکانسی یک سیگنال، با فرکانس‌های مختلف را ندارد بنابراین اگر مولفه‌های فرکانسی در این صفحه تا حد قابل توجهی از لحاظ فرکانسی از هم تفکیک نشوند، اعمال فیلتر در این صفحه امکان‌پذیر نیست. به این منظور از الگوریتم‌های تجزیه مد استفاده می‌گردد تا سیگنال را به مولفه‌های فرکانسی سازنده تجزیه نماید.

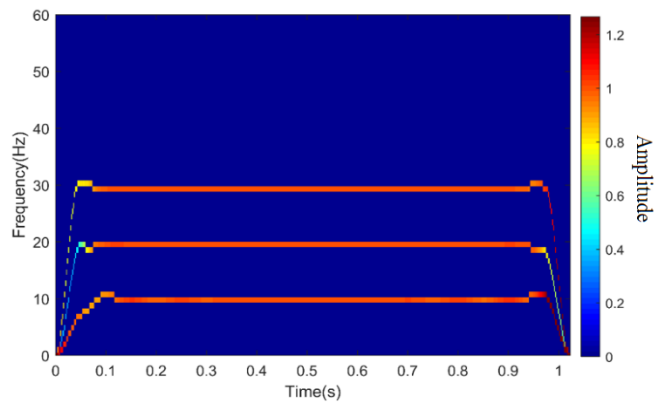
شکل ۱۴-۳ و شکل ۱۵-۳ به ترتیب صفحه زمان-فرکانس سیگنال‌های مصنوعی مذکور در شکل ۱۲-۳ (الف) و شکل ۱۳-۳ (الف) را بعد از اعمال تجزیه مد متغیر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود مولفه‌ی فرکانسی سازنده سیگنال از هم تفکیک شده است. در این صورت بر روی این صفحه می‌توان فیلتر اعمال نمود.



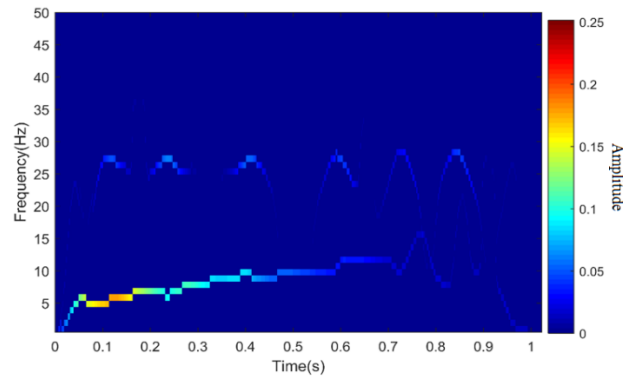
شکل ۳-۱۲. (الف) سیگنال مصنوعی مرکب از فرکانس‌های ۲۰، ۳۰ و ۱۰ هرتز و (ب) صفحه زمان-فرکانس مربوط به آن.



شکل ۳-۱۳. (الف) سیگنال مرکب از سیگنال ریکر و سیگنال چیرپ ، (ب) طیف زمان-فرکانس مربوط به آن.



شکل ۳-۱۴. صفحه زمان-فرکانس بعد از اعمال تجزیه مد متغیر بر روی سیگنال مصنوعی در شکل ۳-۱۲ (الف).



شکل ۳-۱۵. صفحه زمان-فرکانس بعد از اعمال تجزیه مد متغیر بر روی سیگنال مصنوعی در شکل ۳-۱۳ (الف).

۳-۵-۱- محاسبه فیلتر در صفحه زمان-فرکانس

به منظور تضعیف نوفه زمین غلت با استفاده از صفحه زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر یک فیلتر براساس پهنای باند سیگنال طراحی می‌شود که رابطه (۳-۲۴) فیلتر طراحی شده براساس پهنای باند را نشان می‌دهد (لیو و همکاران، ۲۰۱۵).

$$H(t, f) = \begin{cases} 1 & f \in \left[f_i(t) - \frac{B(t)}{2}, f_i(t) + \frac{B(t)}{2} \right] \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (3-24)$$

که $H(t, f)$ فیلتر، $f(t)_i$ فرکانس لحظه‌ای و $B(t)$ پهنای باند می‌باشد که براساس رابطه (۳-۲۵) محاسبه می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۵؛ بواشاش، ۲۰۱۵).

$$B(t) = \frac{\int_0^\infty |f - f_c(t)|^2 \times |TFR(t, f)|^2 df}{\int_0^\infty |TFR(t, f)|^2 df} \quad (۳-۲۵)$$

که $TFR(t, f)$ صفحه زمان-فرکانس، f فرکانس و $f_c(t)$ فرکانس مرکزی سیگنال است که مطابق رابطه (۳-۲۶) محاسبه می‌گردد (بواشاش، ۲۰۱۵).

$$f_c(t) = \frac{\int_0^\infty f \times |TFR(t, f)|^2 df}{\int_0^\infty |TFR(t, f)|^2 df} \quad (۳-۲۶)$$

لازم به ذکر است که، برای فاز لحظه‌ای یک صفحه زمان-فرکانس نیز وجود دارد با توجه به اینکه فیلتر طراحی شده براساس صفحه زمان-فرکانس مربوط به دامنه لحظه‌ای می‌باشد، بنابراین فیلتر در این صفحه دارای مقادیر صفر و یک می‌باشد و با ضرب فیلتر در صفحه زمان-فرکانس حاصل از دامنه لحظه‌ای، مقدار آن یا بدون تغییر خواهد ماند یا اینکه مقدار آن برابر صفر خواهد شد که رابطه (۳-۲۲) تاثیر آن را نشان می‌دهد با این تفاسیر اعمال فیلتر در صفحه زمان-فرکانس مربوط به فاز لحظه‌ای بی معنی می‌باشد به این سبب از نمایش صفحه زمان-فرکانس مربوط فاز لحظه‌ای در این پایان‌نامه خودداری شده است.

۳-۵-۲- معایب صفحه زمان-فرکانس

یکی از معایب صفحه زمان-فرکانس (هیلبرت-هوانگ) عدم نمایش مولفه‌های مختلف فرکانسی یک سیگنال (سیگنال با فرکانس‌های مختلف) می‌باشد و فقط روند فرکانسی یک سیگنال را نمایش می‌دهد و هیچگونه جداسازی فرکانسی انجام نمی‌دهد. یکی دیگر از علل ناکارآمدی صفحه زمان-فرکانس حساسیت به فرکانس لحظه‌ای می‌باشد در صورتی که فرکانس لحظه‌ای به درستی محاسبه نشود، علاوه بر اینکه در نمایش صفحه زمان-فرکانس دامنه و فاز خطا ایجاد می‌کند، فیلتر طراحی شده براساس آن

نیز به درستی محاسبه نمی‌شود. برای حل این پاره‌ای از این مشکلات می‌توان از تبدیل زمان-زمان استفاده نمود.

۳-۶- تبدیل زمان-زمان

تبدیل زمان - زمان دارای تابعیت دوبعدی از زمان است و مانند سایر تبدیل‌های زمان-فرکانس، سیگنال یک بعدی را به فضای دو بعدی انتقال می‌دهد. به طور کلی تبدیل زمان - زمان را می‌توان در ادامه‌ی تبدیل تبدیل S تعریف نمود (پینگار، ۲۰۰۵).

تبدیل S دارای پنجره‌ای است که ارتفاع و عرضش با فرکانس متغیر است (پینگار، ۲۰۰۳). در این تبدیل عرض و دامنه‌ی پنجره به فرکانس f وابسته است. به این صورت که عرض پنجره با فرکانس ارتباط معکوس و با بزرگی آن ارتباط مستقیم دارد. تبدیل S با استفاده از رابطه (۳-۲۷) قابل محاسبه است (استاکول^۱ و همکاران، ۱۹۹۶).

$$S(\mathcal{T}, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(\mathcal{T}-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} dt \quad (3-27)$$

تبدیل زمان - زمان حاصل معکوس تبدیل فوریه از محور فرکانس تبدیل S مطابق رابطه‌ی (۳-۲۸) می‌باشد.

$$TT(t, \mathcal{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t, f) \exp(+2\pi i f \mathcal{T}) df \quad (3-28)$$

با اعمال جمع بر روی محور فرکانس می‌توان تبدیل فوریه‌ی سری زمانی اولیه را به دست آورد. بنابراین، چنانچه تبدیل زمان - زمان بر روی محور زمان جمع زده شود، می‌توان سری زمانی اولیه را به دست آورد که از طریق رابطه (۳-۲۹) به دست می‌آید.

^۱.Stockwell

$$\sum_{T=0}^{N-1} TT(\mathcal{T}, t) = h(t)$$

پینگار (۲۰۰۵) از این تبدیل در فیلتر کردن سیگنال‌های ناپایا استفاده نمود. با توجه به خواص این تبدیل، فرکانس‌های بالا معمولاً در محدوده‌ی قطر اصلی این تبدیل تجمع می‌کنند و فرکانس‌های پایین در محدوده‌ی دورتری از قطر اصلی قرار می‌گیرند. با استفاده از این خواص می‌توان محدوده‌های مورد نظر را در این حوزه تضعیف و عمل فیلتر کردن را انجام داد (پینگار، ۲۰۰۵).

اگرچه این تبدیل تابعیت دوبعدی از زمان را داراست، با این وجود با کمک برخی روش‌های مکمل، به راحتی می‌توان اطلاعات فرکانسی و طیفی را نیز در این تبدیل مشاهده نمود. از مزایای تبدیل زمان - زمان نسبت به تبدیل S می‌توان به قدرت تفکیکی بالای زمانی این تبدیل به منظور تعیین زمان شروع رویدادها اشاره کرد. به این معنی که مشخصات دقیق زمان‌هایی که در آن‌ها می‌بایست تضعیف و سایر فرآیندهای پردازشی انجام شود، با دقت بالاتری مشخص است. این تبدیل کاملاً مربعی و متقارن است و تابعیت دوبعدی از زمان دارد (پینگار و منسینها^۱، ۲۰۰۳).

همچنین هنگام استفاده از طیف دامنه‌ی تبدیل S ، علامت رویداد یا به عبارتی قطبش^۲ آن مشخص نیست زیرا قدر مطلق طیف دامنه‌ی آن ترسیم می‌شود، در صورتی که در طیف زمان - زمان علامت یا قطبش رویداد نیز مشخص است و این تبدیل یک تبدیل حقیقی است. در برخی موارد، بکارگیری هم‌زمان این دو تبدیل می‌تواند یک تفسیر و نتیجه خوبی تولید نماید، تا با دقت بیشتری بتوان در شناسایی زمان آغاز رویدادها صحبت نمود (پینگار و منسینها، ۲۰۰۳).

در فیلتر کردن یک سیگنال در حوزه‌ی زمان - فرکانس نیاز به استفاده از یک پنجره به منظور حذف ناحیه‌ی هدف یا حفظ کردن آن در صفحه‌ی زمان - فرکانس می‌باشد. استفاده از این پنجره باعث ایجاد یکسری از پدیده‌های کاذب در حوزه‌ی زمان در سیگنال خروجی می‌شود که عامل این پدیده‌های کاذب

^۱. Mansinha

^۲. Polarity

را می‌توان پدیده‌ی گیبس دانست. یکی از مزایای فیلتر کردن سیگنال در حوزه‌ی زمان - زمان عدم ایجاد پدیده‌های کاذب در اثر استفاده از پنجره می‌باشد (خجسته، ۱۳۹۲).

۳-۶-۱- توزیع فرکانس در حوزه زمان- زمان

برای درک بهتر، سیگنال مصنوعی $y(t)$ مرکب از سه موج سینوسی به ترتیب با فرکانس‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ هرتز مطابق رابطه‌ی (۳-۳۰) به دست آمده است.

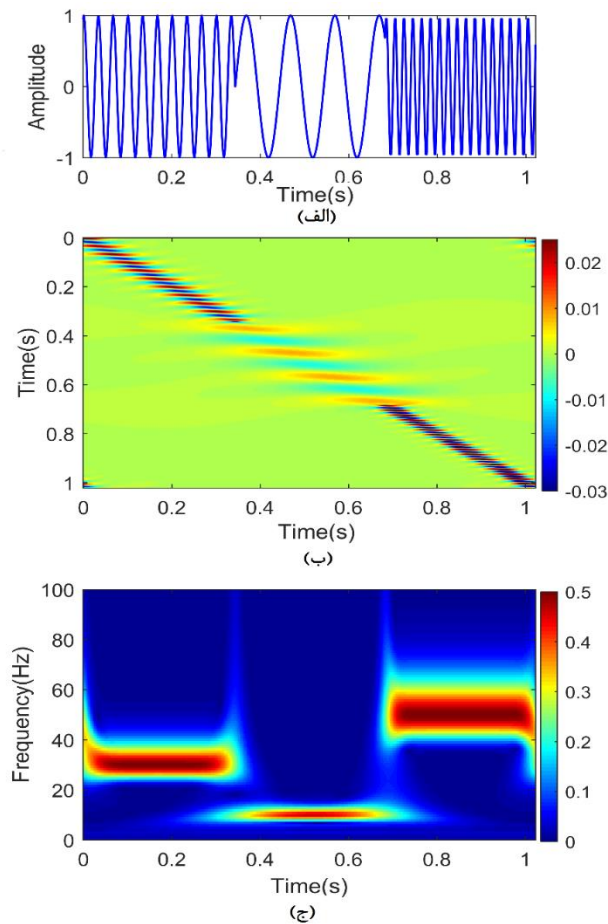
$$y_1(t) = \sin(2\pi f_1 t), f_1 = 30, \quad t = (0:170) \times 0.002$$

$$y_2(t) = \sin(2\pi f_2 t), f_2 = 10, \quad t = (171:342) \times 0.002 \quad (3-30)$$

$$y_3(t) = \sin(2\pi f_3 t), f_3 = 50, \quad t = (343:511) \times 0.002$$

$$y(t) = [y_1(t), y_2(t), y_3(t)]$$

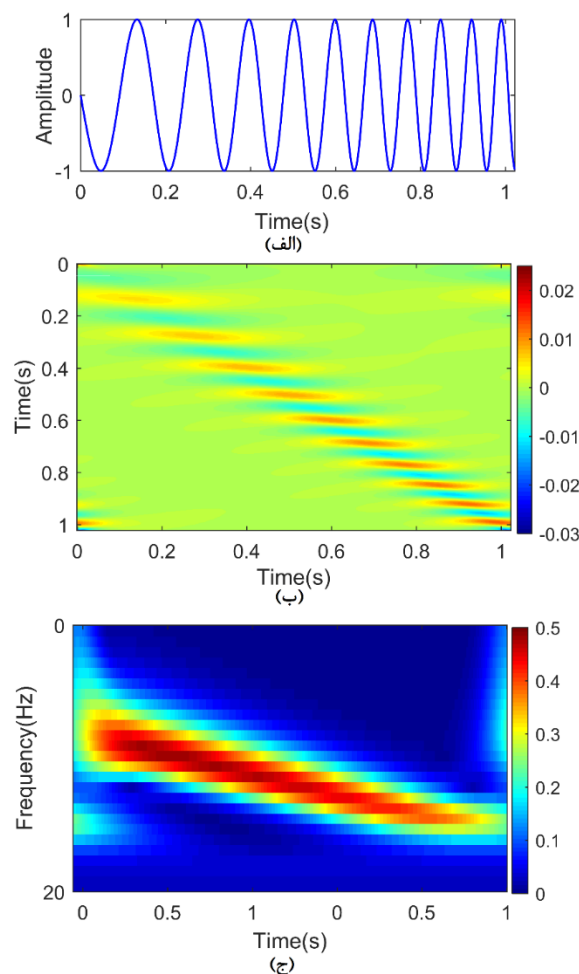
شکل ۳-۱۶ (الف) سیگنال مصنوعی $y(t)$ در حوزه زمان را نشان می‌دهد. در شکل ۳-۱۶ (ب) نمایش تبدیل زمان - زمان سیگنال مذکور نشان داده شده است. همچنین نمایش تبدیل S سیگنال مرکب در فضای دو بعدی به صورت سه موج تک فرکانس در شکل ۳-۱۶ (ج) قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محدوده‌های شامل دامنه‌های فرکانس پایین در فاصله‌ی دورتری از قطر اصلی تبدیل زمان - زمان، نسبت به محدوده‌های فرکانس بالا قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر فرکانس‌های بالاتر نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر حول قطر اصلی تمرکز یافته‌اند. همچنین زمان شروع هر کدام از سه مولفه‌ی فرکانسی سیگنال در صفحه‌ی زمان - زمان به مراتب دقیق‌تر و واضح‌تر از صفحه‌ی زمان - فرکانس می‌باشد که یکی از مزایای این تبدیل در مقایسه با سایر تبدیل‌های زمان - فرکانس می‌باشد.



شکل ۳-۱۶. (الف) نمایش سیگنال در حوزه‌ی زمان، (ب) نمایش در حوزه‌ی زمان - زمان و (ج) نمایش در حوزه‌ی

تبدیل S .

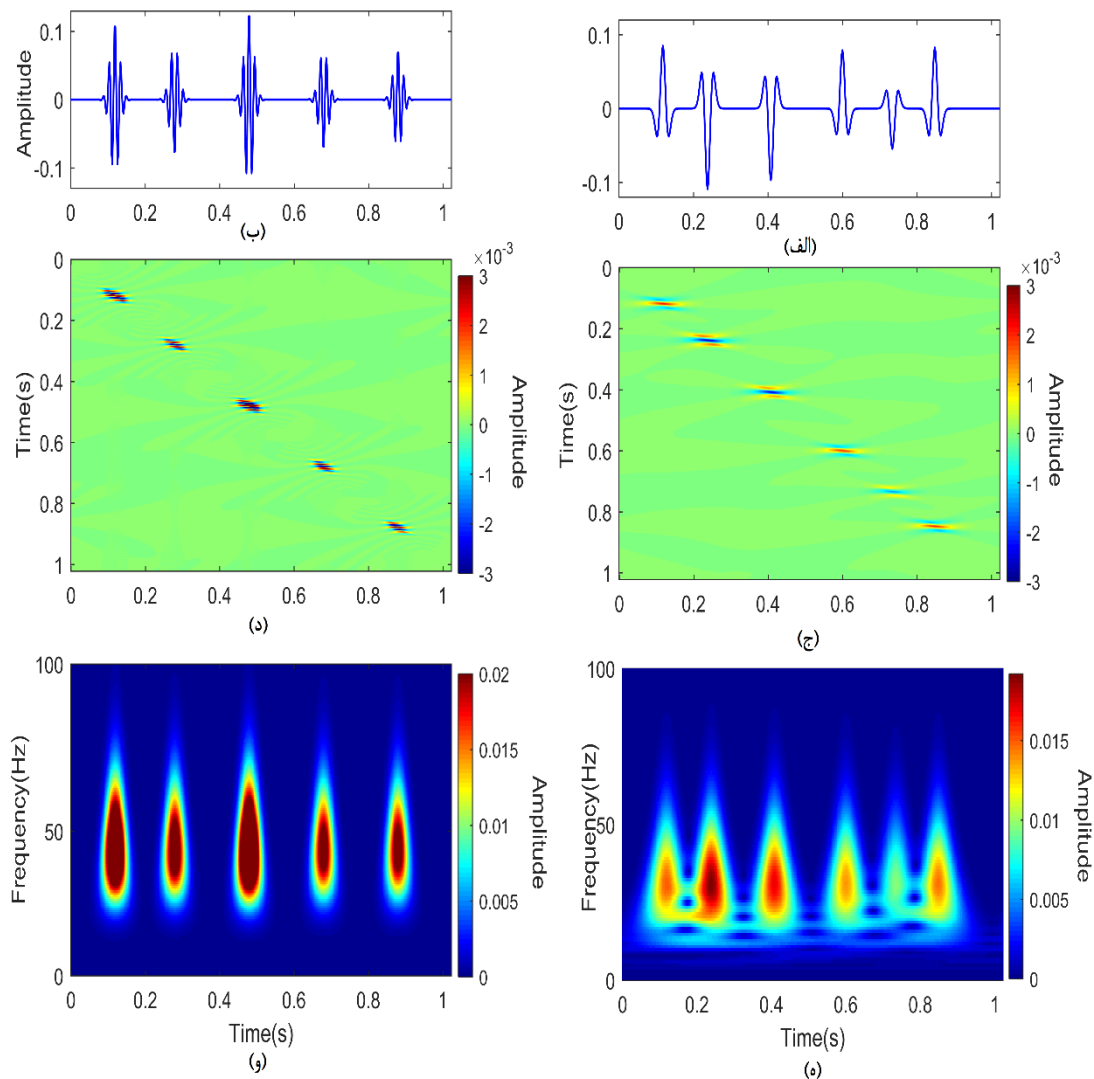
در شکل ۳-۱۷ (الف) یک سیگنال چیرپ با فرکانس ۵ تا ۱۵ هرتز و فاصله‌ی نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه در حوزه زمان و نمایش تبدیل زمان - زمان آن در شکل ۳-۱۷ (ب) نشان داده شده است. با افزایش زمان به تدریج بر میزان تمرکز طیف حول قطر اصلی تبدیل زمان - زمان افزوده می‌شود. همچنین تبدیل S سیگنال حاصل در شکل ۳-۱۷ (ج) نشان داده شده است. روند افزایش فرکانس در حوزه‌ی دو بعدی زمان - فرکانس نیز با شیب ملایمی قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۷. (الف) نمایش در حوزه‌ی زمان سیگنال چیرپ، (ب) نمایش در حوزه‌ی زمان - زمان و (ج) نمایش در حوزه‌ی تبدیل S .

در شکل ۳-۱۸ (الف) ردلرزه مصنوعی حاصل از همامیخت موجک ریکر با فرکانس ۲۵ هرتز در یک سری بازتابی دلخواه (شکل ۳-۴) با فاصله‌ی نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه در حوزه زمان نشان داده شده است. نمایش دو بعدی در فضای تبدیل زمان - زمان از ردلرزه‌ی مفروض، در شکل ۳-۱۸ (ب) و نمایش تبدیل S آن در شکل ۳-۱۸ (ج) نشان داده شده است. همچنین شکل ۳-۱۸ (د) یک ردلرزه مصنوعی حاصل از همامیخت موجک مورلت با فرکانس ۳۵ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه (شکل ۳-۴)، در حوزه‌ی زمان را نشان می‌دهد. در شکل ۳-۱۸ (ه) نمایش دوبعدی در فضای تبدیل زمان - زمان از ردلرزه‌ی مفروض و نمایش تبدیل S آن در شکل ۳-۱۸ (و) نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طیف دامنه تبدیل S سیگنال‌های مورد نظر نمی‌توان در مورد قطبش سیگنال در زمان‌های مختلف اطلاعاتی را مشاهده نمود، زیرا قدر مطلق طیف دامنه در حوزه‌ی این تبدیل ترسیم می‌شود. در صورتی که در تبدیل زمان – زمان سیگنال، قطبش هر کدام از ردلرزه‌های حاصل از موجک‌های ریکر و مورلت قابل مشاهده است.



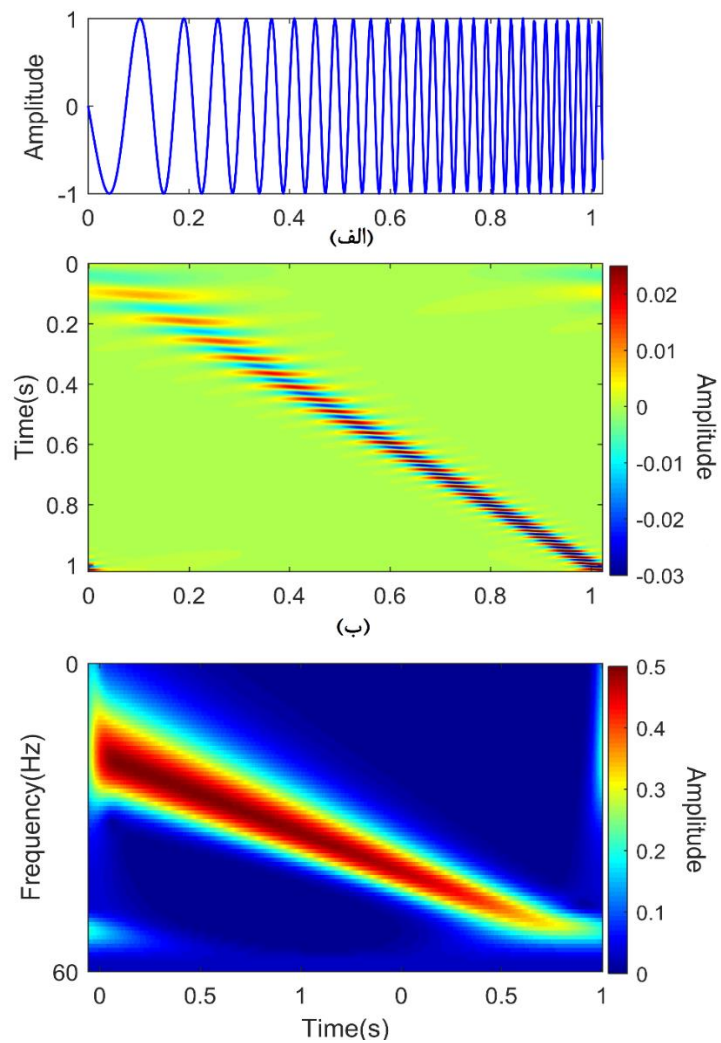
شکل ۳-۱۸. (الف) نمایش ردلرزه حاصل هم‌امیخت موجک ریکر در سری بازتاب دلخواه، (ب) نمایش ردلرزه حاصل هم‌امیخت موجک مورلت در سری بازتاب دلخواه، (ج) نمایش تبدیل زمان – زمان ردلرزه الف، (د) نمایش تبدیل زمان – زمان ردلرزه ب، (ه) نمایش تبدیل S ردلرزه الف و (و) نمایش تبدیل S ردلرزه ب.

۳-۶-۲- تقارن در صفحه زمان-زمان نسبت به قطر اصلی

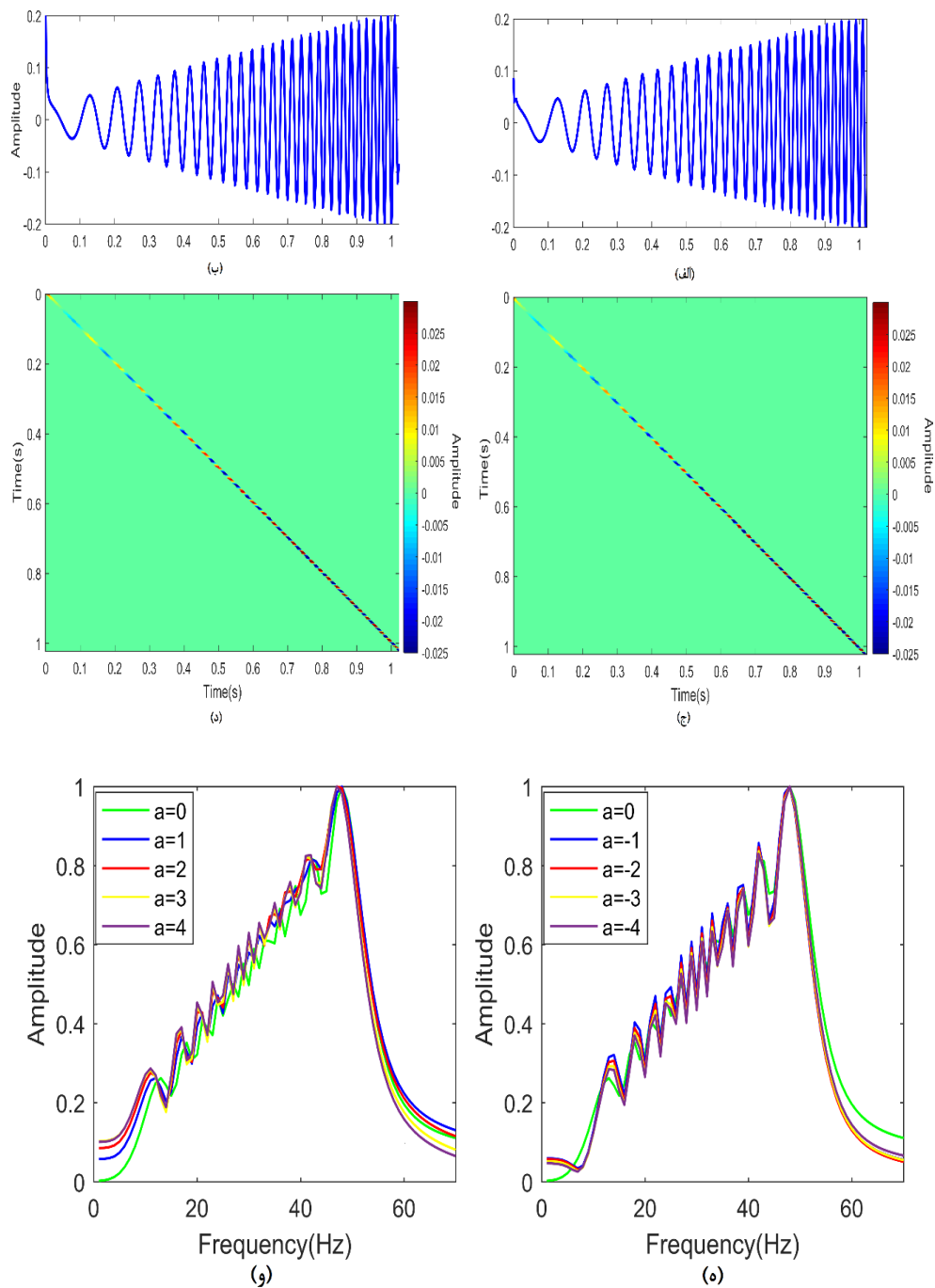
به منظور بررسی تقارن در تبدیل زمان - زمان یک سیگنال چیرپ با فرکانس ۵ تا ۵۰ هرتز با گام زمانی ۲ میلی ثانیه و طول زمانی ۱/۰۲۲ ثانیه استفاده شده است. شکل ۳-۱۹ (الف) سیگنال مصنوعی در حوزه زمان را نشان می‌دهد. در شکل ۳-۱۹ (ب) تبدیل زمان - زمان سیگنال چیرپ و تبدیل S سیگنال حاصل در شکل ۳-۱۹ (ج) نشان داده شده است.

شکل ۳-۲۰ (الف) و شکل ۳-۲۰ (ب) به ترتیب سیگنال بازسازی شده از قطره‌های ۴- تا ۱- و سیگنال بازسازی شده از قطره‌های ۱ تا ۴ را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۳-۲۰ (ج) تبدیل زمان - زمان قطره‌های ۴- تا ۱- و شکل ۳-۲۰ (د) تبدیل زمان - زمان قطره‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیگنال‌های بازسازی شده از قطره‌های ۴- تا ۱- برابر سیگنال‌های بازسازی شده از قطره‌های ۱ تا ۴ هستند. همچنین در شکل ۳-۲۰ (ه) و شکل ۳-۲۰ (و) طیف دامنه هر یک از قطره‌های این صفحه رسم شده است که از مقایسه‌ی سیگنال‌های بازسازی شده و طیف دامنه قطره‌های مختلف می‌توان مشاهده نمود که قطره‌های متقارن حول قطر اصلی تبدیل زمان - زمان، دارای مقادیر یکسانی می‌باشند و تقارن نسبت به قطر اصلی تبدیل زمان - زمان را نشان می‌دهند.



شکل ۳-۱۹. (الف) نمایش سیگنال چیرپ در حوزه‌ی زمان ، (ب) نمایش تبدیل زمان - زمان، (ج) نمایش تبدیل S .

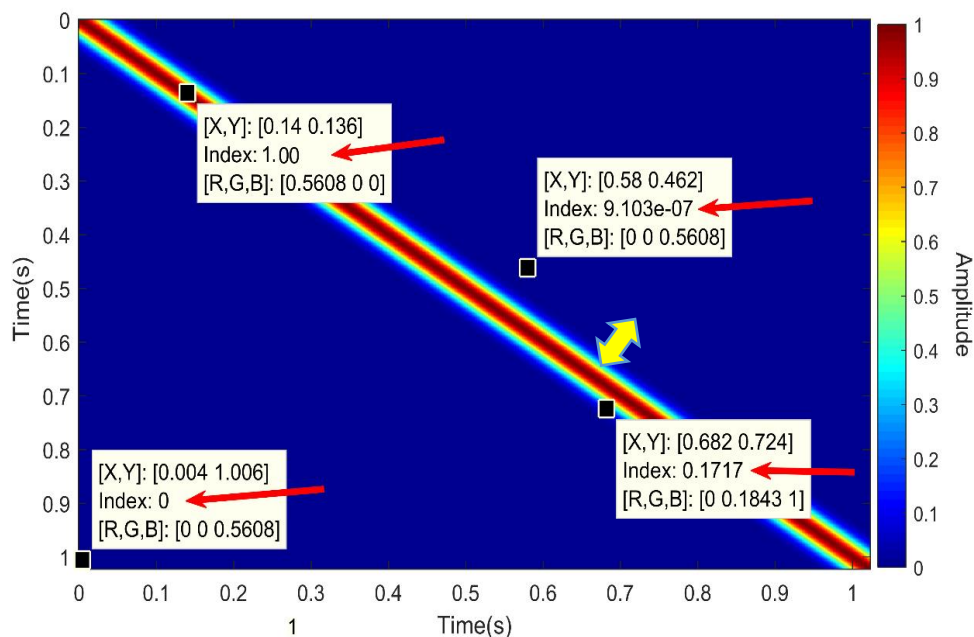


شکل ۳-۲۰. (الف) سیگنال بازسازی شده از قطر ۴- تا ۱-، (ب) سیگنال بازسازی شده از قطر ۱ تا ۴، (ج) نمایش تبدیل زمان - زمان سیگنال (الف)، (د) نمایش تبدیل زمان - زمان سیگنال (ب)، (ه) طیف دامنه قطره‌های از ۴- تا ۱-، (و) طیف دامنه‌ی قطره‌های ۱ تا ۴.

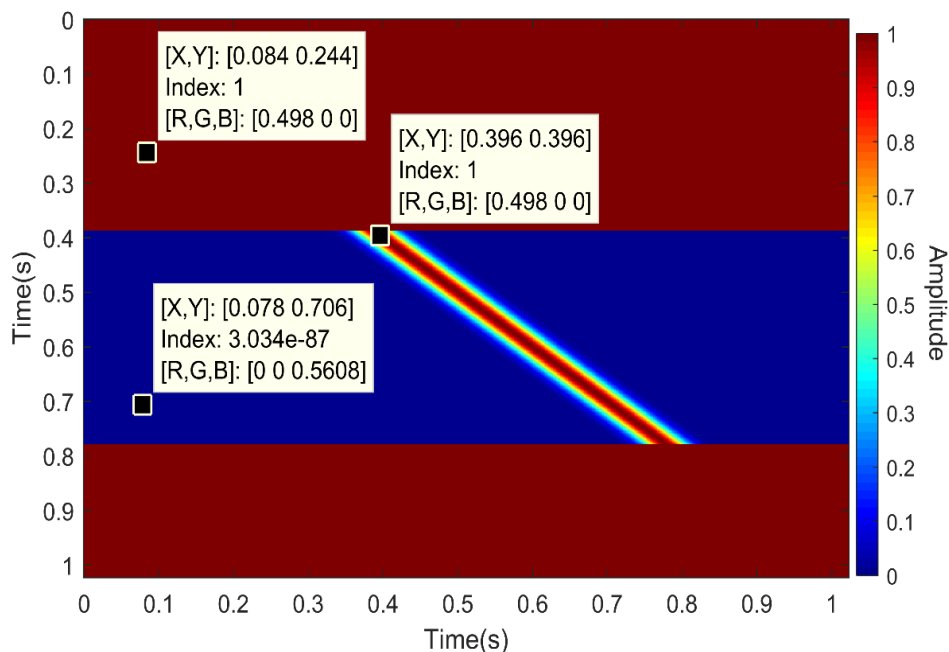
۳-۶-۳- فیلتر در صفحه زمان - زمان

فیلترها در این صفحه ماهیت دو بعدی از زمان را دارند. با توجه به اینکه سیگنال‌های بازتابی دارای فرکانس بالاتری نسبت به نوفه زمین‌غلت می‌باشند، لذا در تبدیل زمان- زمان حول قطر اصلی متمرکز می‌شوند و امواج زمین‌غلت از قطر اصلی فاصله می‌گیرند بنابراین فیلتر به گونه طراحی می‌شود که قطرهای اصلی را حفظ نماید. شکل ۳-۲۱ نمایش یک فیلتر دو بعدی از صفحه زمان- زمان را نشان می‌دهد قطر اصلی این صفحه دارای مقدار یک می‌باشد و به سمت گوشه‌ها مقدار آن کاهش می‌یابد و در نهایت مقدار آن برابر صفر می‌شود. همچنین در این شکل موقعیت این نقاط (دامنه‌ها) و مقادیر آن‌ها با پیکان قرمز رنگ نشان داده شده است. در صورت اعمال این فیلتر بر روی یک سیگنال، که حاوی مولفه‌های فرکانسی مختلفی می‌باشد، دامنه مولفه‌های فرکانس پایین آن تضعیف می‌شود و مولفه‌های فرکانس بالا با کاهش ناچیز دامنه حفظ می‌شوند.

چنانچه هدف تضعیف ناحیه آغشته به نوفه باشد می‌توان فیلتر را به گونه‌ای طراحی نمود که فقط ناحیه مورد نظر را تضعیف نماید نمونه‌ای از این فیلتر در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است.

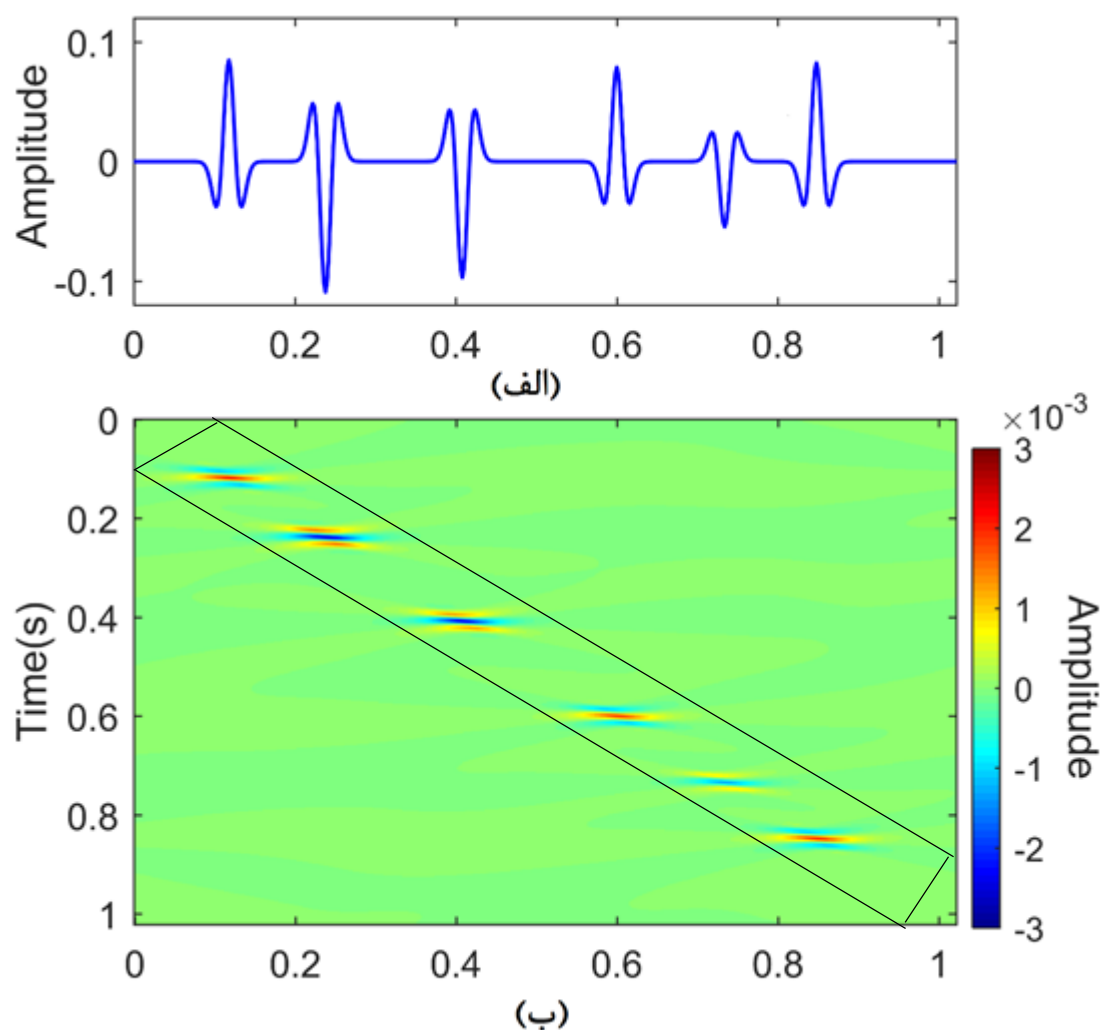


شکل ۳-۲۱: نمایش فیلتر در صفحه زمان- زمان.



شکل ۳-۲۲. نمایش فیلتر در صفحه زمان-زمان

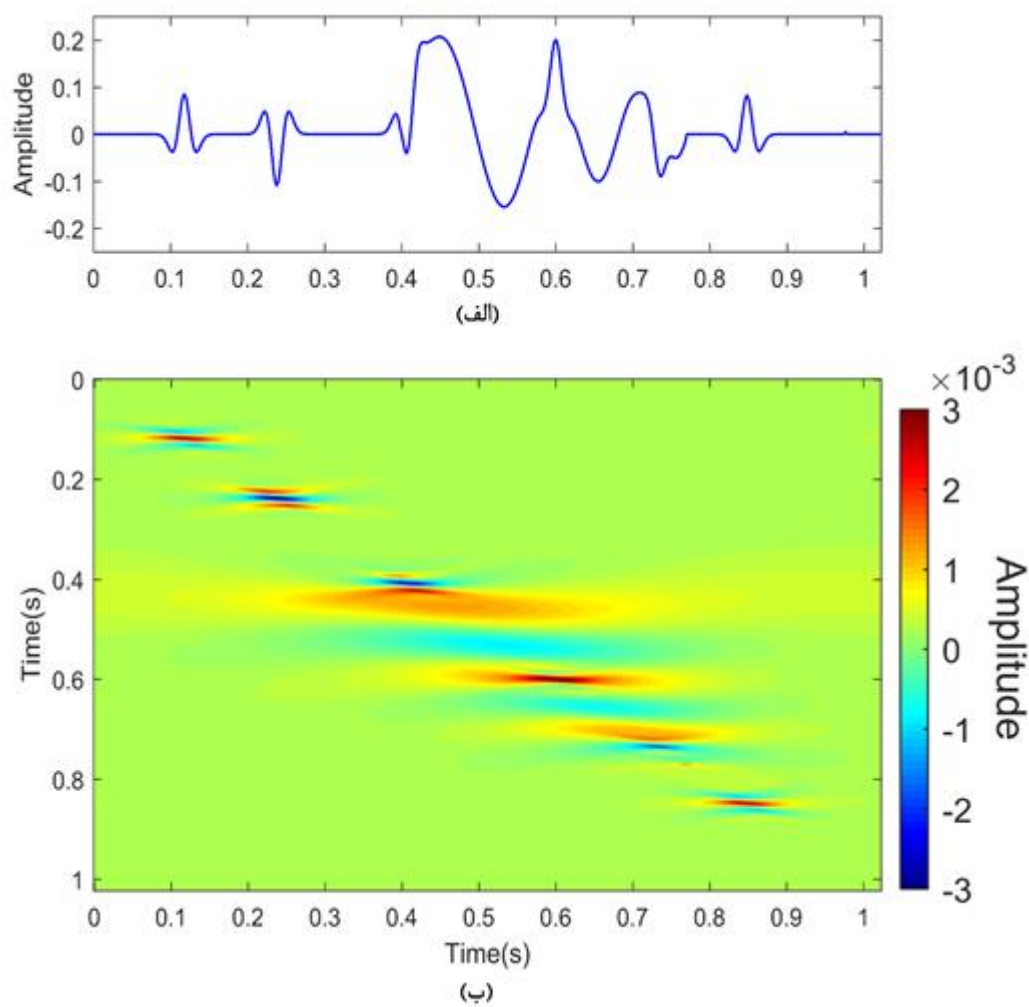
در شکل ۳-۲۱ پیکان دو طرفه زرد رنگ پهنای اصلی فیلتر را نشان می‌دهد. پهنای اصلی فیلتر براساس فرکانس سیگنال ایده‌آل تعیین می‌شود به این گونه که با افزایش فرکانس، تعداد نقاط حاوی دامنه بر روی قطر اصلی تمرکز می‌یابند به عبارت دیگر، دامنه‌ها بر روی قطر اصلی متمرکز می‌شوند و در نتیجه پهنای اصلی کاهش می‌یابد. به منظور بررسی پهنای اصلی موثر، در شکل ۳-۲۳ (الف) ردلرزه مصنوعی حاصل از هم‌امپخت موجک ریکر با فرکانس ۲۵ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه، با طول زمانی ۱/۰۲۲ و گام زمانی ۲ میلی ثانیه نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳-۲۳ (ب) صفحه زمان-زمان مربوط به آن نشان داده شده است که در آن کادر مشکی با ابعاد ۴۸۲×۶۰ موقعیت قرارگیری بیشترین تعداد دامنه بر روی قطر اصلی را نشان می‌دهد.



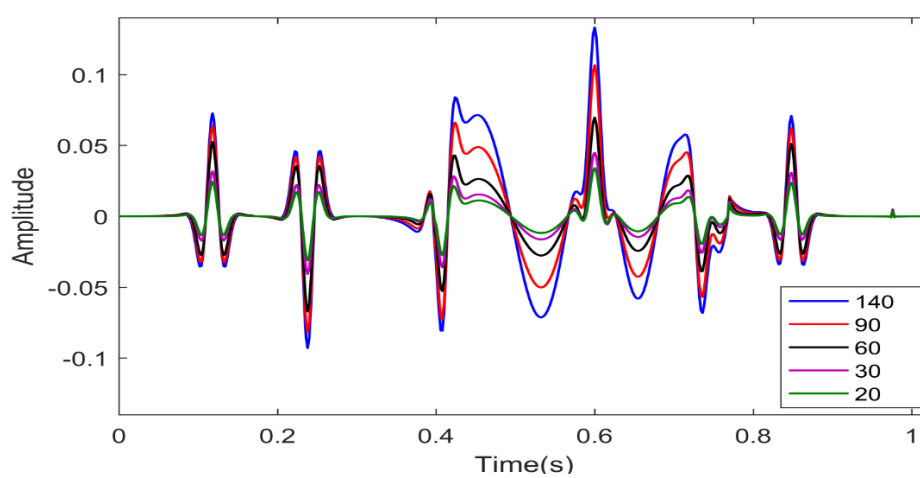
شکل ۳-۲۳. (الف) حاصل هم‌مییخت سیگنال ریکر با فرکانس ۲۵ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه، (ب) صفحه زمان-زمان مربوط به آن.

شکل ۳-۲۴ (الف) و شکل ۳-۲۴ (ب) به ترتیب حاصل جمع سیگنال چیرپ (معرف نوفه زمین‌غلت) با فرکانس ۵ تا ۱۵ هرتز با ردلرزه مصنوعی در شکل ۳-۲۳ (الف) و صفحه زمان-زمان مربوط به آن در نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن پهنای متفاوت برای فیلتر و اعمال فیلتر بر روی صفحه زمان-زمان در شکل ۳-۲۴ (ب)، نتایج در شکل ۳-۲۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فیلتر با پهنای اصلی برابر با ۶۰ عملکرد بهتری در تضعیف دارد.



شکل ۳-۲۴. (الف) حاصل جمع سیگنال چیرپ (معرف نوفه زمین غلت)، (ب) صفحه زمان-زمان مربوط به آن.



شکل ۳-۲۵. سیگنال بعد از اعمال فیلتر با استفاده از پهناهای مختلف فیلتر.

۷-۳- تضعیف امواج زمین‌غلت با استفاده روش صفحه زمان - فرکانس مبتنی بر تجزیه

مد متغیر

برای تضعیف امواج زمین‌غلت در این روش ابتدا با استفاده از الگوریتم تجزیه مد متغیر، ردلرزه حاوی نوفه به مدهای مختلفی تجزیه می‌گردند و با استفاده از تبدیل هیلبرت دامنه لحظه‌ای، فاز لحظه‌ای و فرکانس لحظه‌ای برای هر یک از مدها محاسبه می‌گردد. در ادامه دامنه و فاز لحظه‌ای به صورت جداگانه در صفحه زمان-فرکانس جانمایی می‌شوند و فیلتر مناسب مطابق رابطه (۲۴-۳) برای آن‌ها طراحی می‌گردد و بر روی صفحه زمان-فرکانس مربوط به آن‌ها اعمال می‌شود. این مراحل برای همه ردلرزه‌ها انجام می‌شود و صفحات زمان-فرکانس فیلتر شده حاصل فاز لحظه‌ای و دامنه لحظه‌ای با استفاده از رابطه معکوس این صفحه به حوزه زمان برگردانده می‌شوند و ردلرزه تضعیف نوفه شده را تولید می‌نمایند.

۸-۳- استفاده از روش تبدیل زمان - زمان و تجزیه مد متغیر در تضعیف امواج زمین‌غلت

برای تضعیف امواج زمین‌غلت ابتدا ردلرزه‌های حاوی نوفه با استفاده از تبدیل زمان - زمان به حوزه‌ی مذکور منتقل می‌شوند. در آن حوزه با توجه به اینکه حادثه‌های بازتابی دارای فرکانس بالاتری نسبت به نوفه زمین‌غلت می‌باشند، لذا حول قطر اصلی تبدیل زمان - زمان متمرکز می‌شوند. سپس یک فیلتر دو بعدی طراحی می‌شود این فیلتر به گونه‌ای است که مقادیر از قطر اصلی به سمت کناره‌ها روند کاهشی دارد. با توجه به اینکه مولفه‌های فرکانس بالا روی قطر اصلی قرار می‌گیرند، قطر اصلی فیلتر دارای مقداری عددی یک است. با ضرب فیلتر در تبدیل زمان-زمان حاصل از ردلرزه حاوی نوفه، دامنه سیگنال به جز قطر اصلی کاهش پیدا می‌کند. ولی مقداری از نوفه زمین‌غلت در ردلرزه‌ها بعد از اعمال فیلتر دوبعدی باقی می‌ماند به این منظور برای تضعیف نوفه باقیمانده از الگوریتم تجزیه مد متغیر استفاده می‌شود و الگوریتم بر روی قطرهای اعمال و مدهای حاوی مولفه‌های فرکانس پایین حذف می‌گردد. در نهایت برای برگرداندن به حوزه زمان، از رابطه (۲۹-۳) استفاده می‌شود.

فصل چهارم

اعمال روش بر روی داده‌های

مصنوعی و واقعی

۱-۴- مقدمه

در این بخش ابتدا با استفاده از صفحه زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر (روش اول) و همچنین با استفاده از تبدیل زمان-زمان و تجزیه مد متغیر (روش دوم) بر روی ردلرزه‌های مصنوعی با طیف فرکانسی مختلف اعمال می‌شود و در ادامه هر دو روش روی رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک مصنوعی و واقعی اعمال می‌شود و نتایج هر دو روش علاوه بر اینکه با هم مقایسه می‌شوند با روش متداول $f - k$ نیز مقایسه می‌گردد.

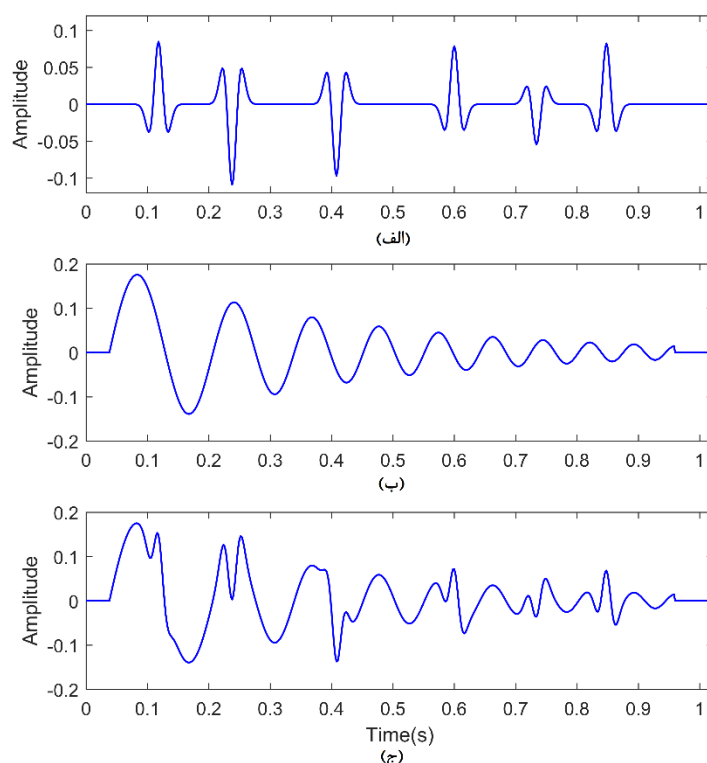
۲-۴- تضعیف نوفه همدوس با استفاده از صفحه زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر

بر روی ردلرزه مصنوعی

شکل ۱-۴ (الف) ردلرزه مصنوعی حاصل هم‌امیخت موجک ریکر با فرکانس ۲۵ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه (شکل ۳-۴ الف)، با طول زمانی ۱/۰۲۲ و گام زمانی ۲ میلی ثانیه را نشان می‌دهد و در شکل ۱-۴ (ب) سیگنال چیرپ (معرف نوفه زمین‌غلت) با فرکانس ۵ تا ۱۵ هرتز و در شکل ۱-۴ (ج) حاصل جمع دو سیگنال مذکور که معرف ردلرزه حاوی نوفه زمین‌غلت است، نمایش داده شده است. ردلرزه و نوفه در این مثال از نظر فرکانسی از هم قابل تفکیک هستند و هیچ‌گونه فرکانس مشترک در طیف فرکانسی آن‌ها وجود ندارد. روش اول با در نظر گرفتن پارامترهای تجزیه مد متغیر مطابق جدول ۱-۴ بر روی ردلرزه حاوی نوفه زمین‌غلت اعمال می‌گردد.

جدول ۱-۴. پارامترهای انتخاب شده برای تجزیه مد متغیر و تجزیه مد متغیر مبتنی بر صفحه زمان-فرکانس.

ε	α	k
۰/۰۰۰۰۰۰۱	۲۰۰۰	۲

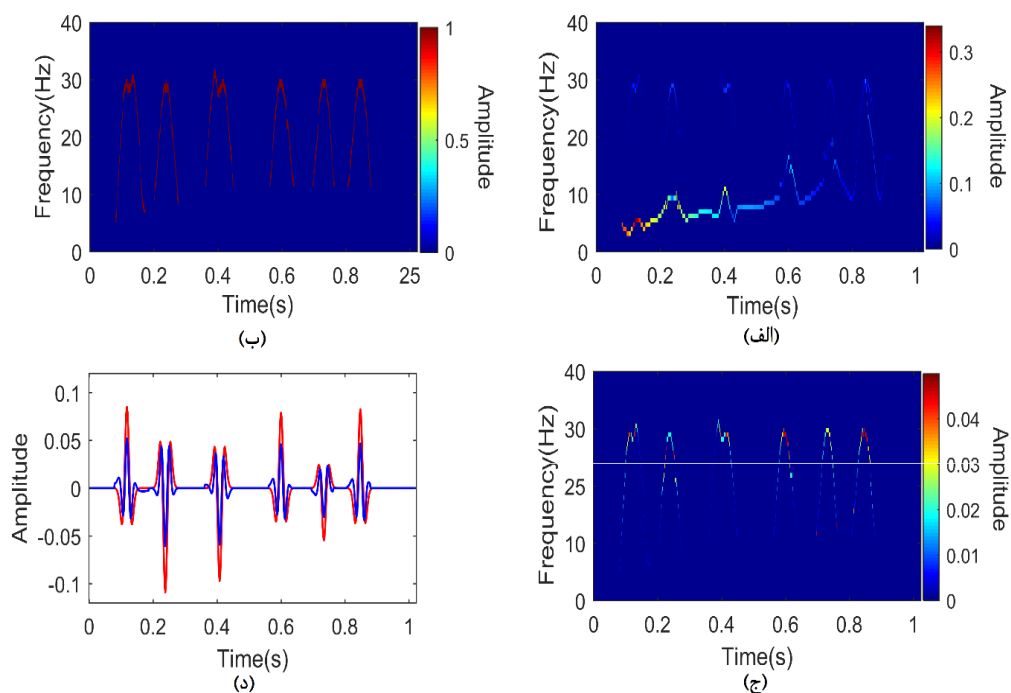


شکل ۴-۱. (الف) حاصل هم‌مبخت سیگنال ریکر با فرکانس ۲۵ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه، (ب) سیگنال چیرپ با فرکانس ۵ تا ۱۵ هرتز، (ج) حاصل جمع دو سیگنال مذکور.

نتایج اعمال روش بر روی ردلرزه مصنوعی حاوی نوفه در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. شکل ۴-۲ (الف) و شکل ۴-۲ (ب) به ترتیب صفحه زمان-فرکانس بعد از اعمال تجزیه مد متغیر و فیلتر طراحی شده بر اساس صفحه زمان-فرکانس را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۴-۲ (ج) و شکل ۴-۲ (د) به ترتیب اعمال فیلتر بر صفحه زمان-فرکانس مربوطه و ردلرزه خروجی به همراه ردلرزه ایده‌آل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، همپوشانی خوبی بین ردلرزه خروجی و ردلرزه ایده‌آل وجود دارد.

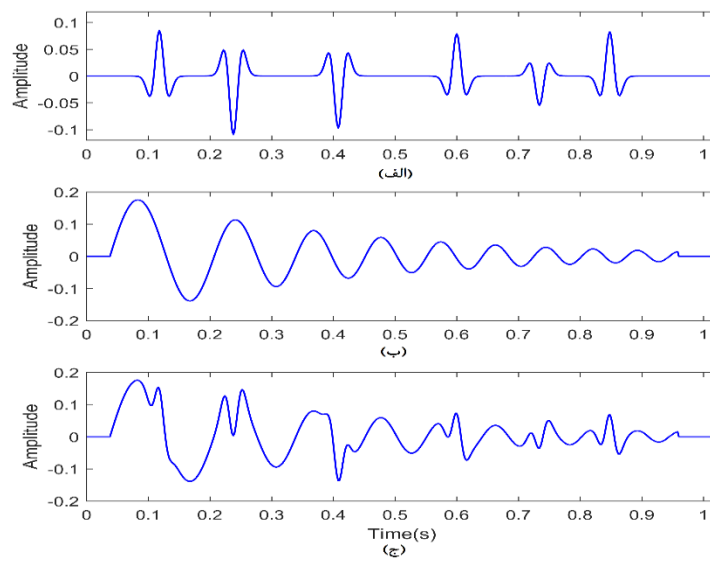
امواج زمین‌گلت در پاره‌ای از مواقع دارای محدوده فرکانسی ۵ تا ۱۵ هرتز و ردلرزه‌های بازتابی دارای فرکانس ۱۵ تا ۱۰۰ هرتز می‌باشند. اما در بعضی مواقع مشاهده می‌شود که از نظر فرکانسی بین امواج زمین‌گلت و ردلرزه‌ها همپوشانی وجود دارد. بنابراین با ذکر یک مثال عملکرد این روش برای زمانی که همپوشانی فرکانسی بین نوفه زمین‌گلت و ردلرزه وجود دارد بررسی می‌شود.

شکل ۳-۴ (الف) ردلرزه مصنوعی حاصل هم‌امیخت موجک ریکر با فرکانس ۲۰ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه (شکل ۴-۳ الف)، با طول زمانی ۱/۰۲۲ و گام زمانی ۲ میلی ثانیه را نشان می‌دهد و در شکل ۳-۴ (ب) سیگنال چیرپ (معرف نوفه زمین‌غلت) با فرکانس ۵ تا ۲۵ هرتز و در شکل ۳-۴ (ج) حاصل جمع دو سیگنال مذکور که معرف ردلرزه حاوی نوفه زمین‌غلت است، نشان داده شده است.

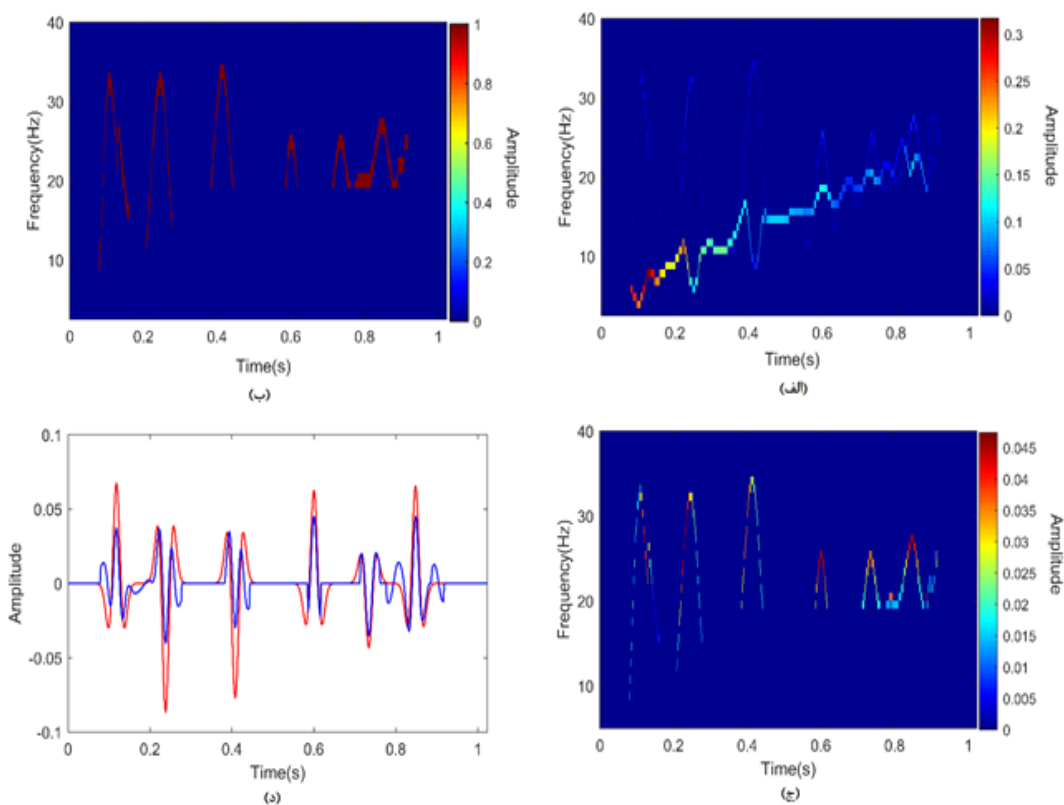


شکل ۳-۴. (الف) صفحه زمان-فرکانس بعد از تجزیه مد متغیر، (ب) فیلتر طراحی شده، (ج) نتیجه‌ی اعمال فیلتر بر صفحه زمان-فرکانس مربوطه و (د) ردلرزه خروجی (رنگ آبی) به همراه ردلرزه ایده‌آل (رنگ قرمز).

در شکل ۴-۴ نتایج اعمال روش تجزیه مد متغیر مبتنی بر صفحه زمان-فرکانس را بر روی ردلرزه مصنوعی با در نظر گرفتن پارامترهای جدول ۴-۱ نشان داده می‌شود. اگر چه قسمتی از سیگنال خروجی، مانند شکل اصلی ردلرزه ایده‌آل نیست ولی همپوشانی نسبتاً خوبی بین ردلرزه خروجی و ردلرزه ایده‌آل وجود دارد.



شکل ۴-۳: الف) حاصل هم‌میکت سیگنال ریکر با فرکانس ۲۰ هرتز در یک سری بازتاب دلخواه، ب) سیگنال چیرپ با فرکانس ۲۵-۵ هرتز معرف نوفه زمین‌گلت، ج) حاصل جمع دو سیگنال مذکور.



شکل ۴-۴: الف) صفحه زمان فرکانس مربوط به دو مد، ب) فیلتر طراحی شده، ج) نتیجه‌ی اعمال فیلتر بر صفحه زمان-فرکانس مربوطه، د) ردلرزه خروجی (رنگ آبی) به همراه رد لرزه ایده‌آل (رنگ قرمز).

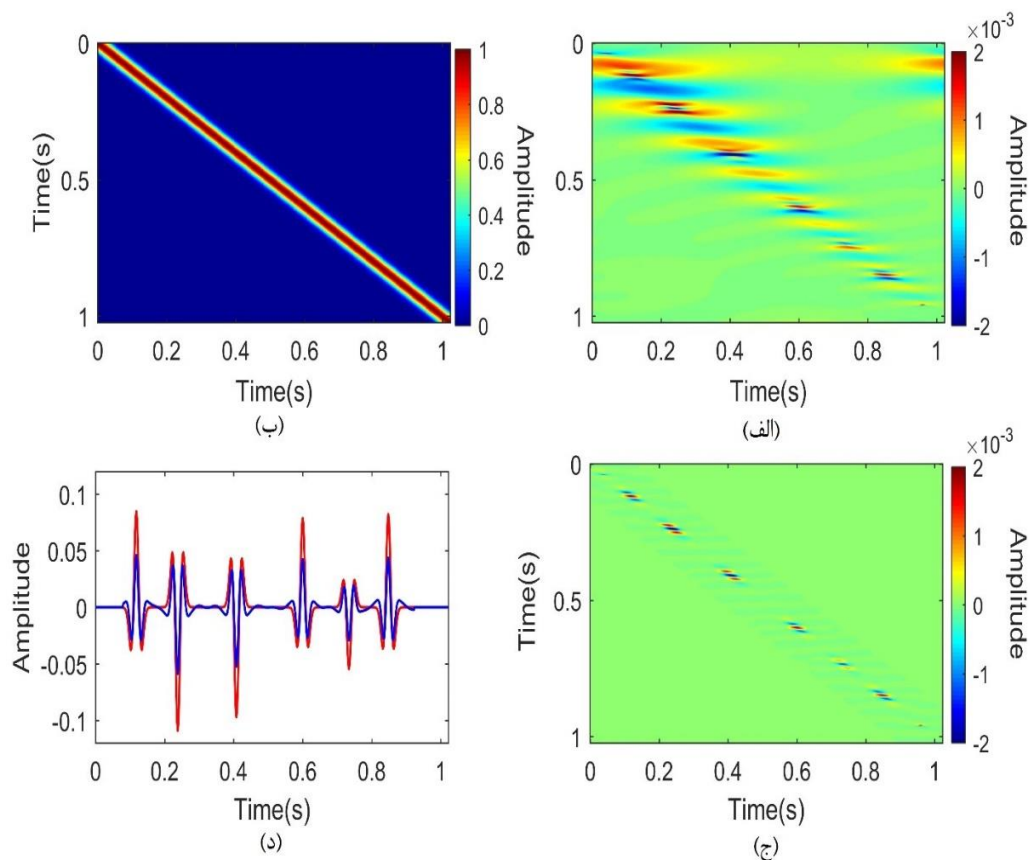
۳-۴- تضعیف نوفه همدوس با استفاده از تبدیل زمان-زمان و تجزیه مد متغیر بر روی

ردلرزه مصنوعی

برای دو مثال استفاده شده در روش قبلی، روش تجزیه مد متغیر با استفاده از تبدیل زمان-زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۵-۴ (الف) تبدیل زمان-زمان مربوط به سیگنال مصنوعی مثال اول (شکل ۱-۴ ج)، شکل ۵-۴ (ب) و شکل ۵-۴ (ج) به ترتیب فیلتر دو بعدی طراحی شده در حوزه زمان-زمان و نتیجه‌ی اعمال فیلتر بر روی تبدیل زمان-زمان ردلرزه‌ی حاوی نوفه نشان داده شده است لازم به ذکر است که پهنای فیلتر دوبعدی ایده‌آل در این روش با مقدار ۶۰ بهترین نتیجه را ایجاد نموده است. در مرحله بعد بایستی نوفه زمین‌غلت در ناحیه باقیمانده از تبدیل زمان-زمان که با بازتاب‌ها تداخل دارند، تضعیف شود. بنابراین از تجزیه مد متغیر استفاده می‌شود. هر قطر از ناحیه قرارگرفته در شکل ۵-۴ (ج) با استفاده از الگوریتم تجزیه مد متغیر و استفاده از پارامترهای جدول ۲-۴ تجزیه می‌شوند. با توجه به اینکه مولفه‌های فرکانس پایین در مد اول قرار می‌گیرند، اولین مد حاصل از تجزیه حذف می‌گردد. نتیجه حاصل در شکل ۵-۴ (د) به همراه ردلرزه ایده‌آل نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این روش، همانند روش قبلی همپوشانی خوبی بین ردلرزه خروجی و ردلرزه ایده‌آل وجود دارد.

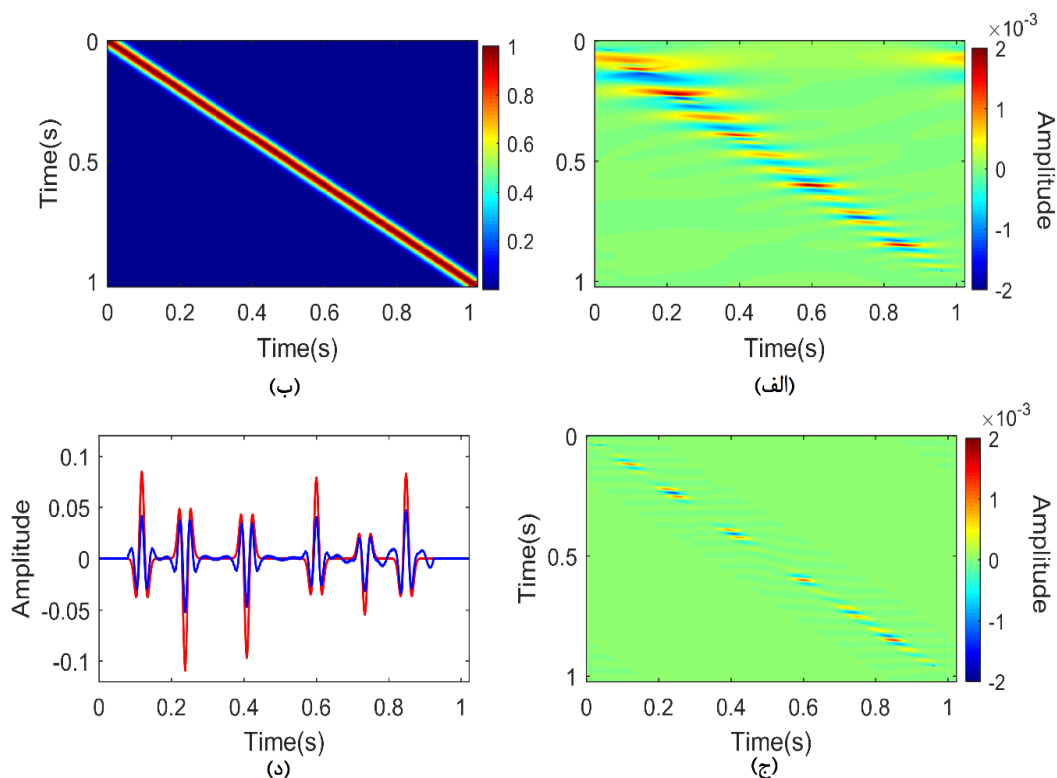
جدول ۲-۴. پارامترهای انتخاب شده برای روش استفاده از تبدیل زمان-زمان و تجزیه مد متغیر.

k	α	ε
۲	۲۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۱



شکل ۴-۵. (الف) تبدیل زمان-زمان مربوط به سیگنال مصنوعی مثال اول (شکل ۴-۳ ج)، (ب) فیلتر دو بعدی طراحی شده در حوزه زمان-زمان، (ج) نتیجه اعمال فیلتر بر تبدیل زمان-زمان و (د) ردلرزه خروجی به همراه رد لرزه ایده‌آل.

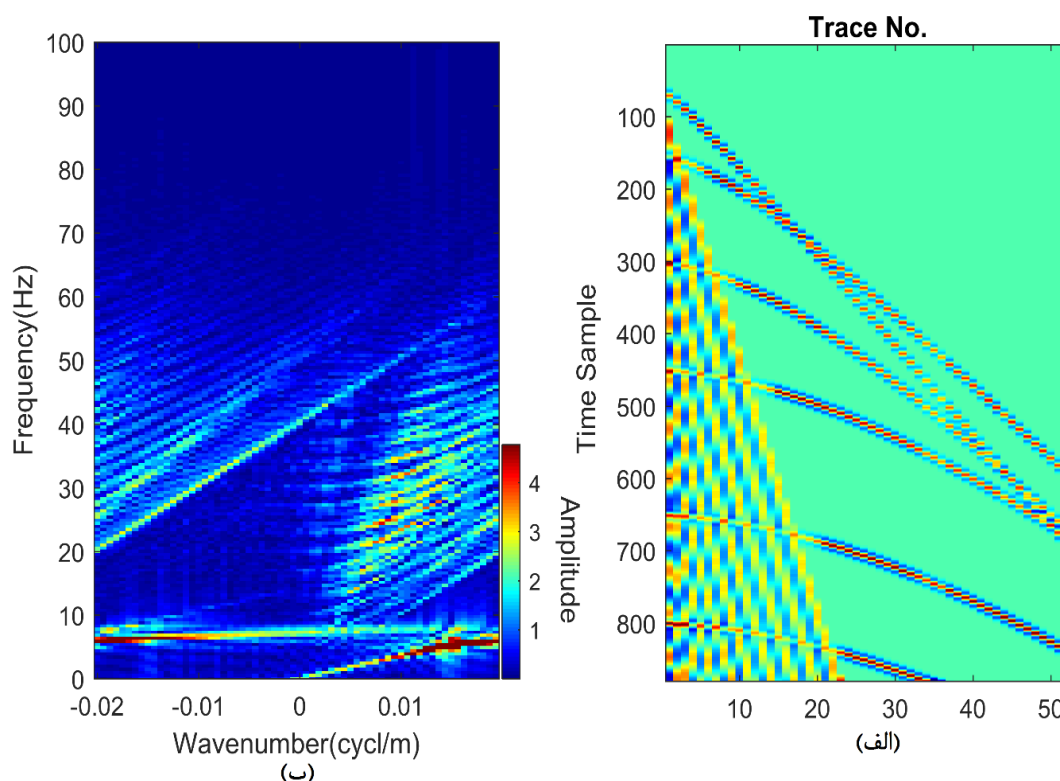
همچنین این روش در شرایطی که نوفه و ردلرزه از نظر فرکانسی همپوشانی دارند برای مثال دوم با در نظر گرفتن پارامترهای جدول ۴-۲ اعمال گردید. نتایج اعمال روش دوم در شکل ۴-۶ نشان می‌دهد که این روش در بازیابی ردلرزه ایده‌آل تا حدودی بهتر از روش تجزیه مد متغیر مبتنی بر صفحه زمان – فرکانس عمل کرده است.



شکل ۴-۶. (الف) تبدیل زمان-زمان مربوط به سیگنال مصنوعی مثال دوم (شکل ۴-۳، ج)، (ب) فیلتر دو بعدی طراحی شده در حوزه زمان-زمان، (ج) نتیجه اعمال فیلتر بر تبدیل زمان-زمان و (د) ردلرزه خروجی به همراه رد لرزه ایده‌آل.

۴-۴- اعمال روش بر روی رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک مصنوعی

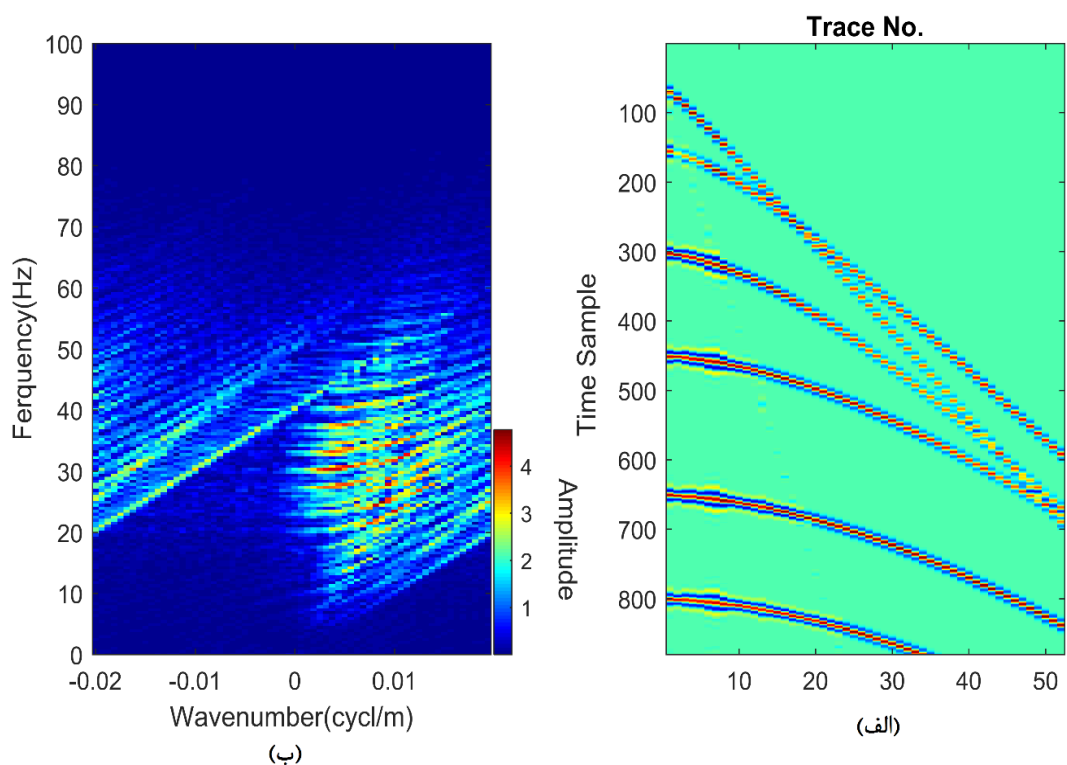
شکل ۴-۷ (الف) یک رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک مصنوعی تشکیل شده از ۷ لایه به ترتیب با سرعت‌های ۱۰۰۰، ۱۲۰۰، ۱۱۵۰، ۱۳۵۰، ۱۳۰۰، ۱۲۵۰ و ۱۱۰۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. این رکورد چشمه مشترک از ۵۲ ردلرزه تشکیل شده که ۲۵ ردلرزه ابتدایی آن با نوفه‌ی زمین‌غلت پوشیده شده است. فاصله‌ی اولین گیرنده تا چشمه ۲۵ متر و فاصله‌ی گیرنده‌ها از یکدیگر نیز ۲۵ متر با نمونه-برداری زمانی ۲ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل ۴-۷ (ب) طیف $f - k$ داده‌ی لرزه‌ای بازتابی مذکور نشان داده شده است که نوفه‌ی زمین‌غلت با فرکانس کمتر از داده‌ی لرزه‌ای بازتابی واقع شده است.



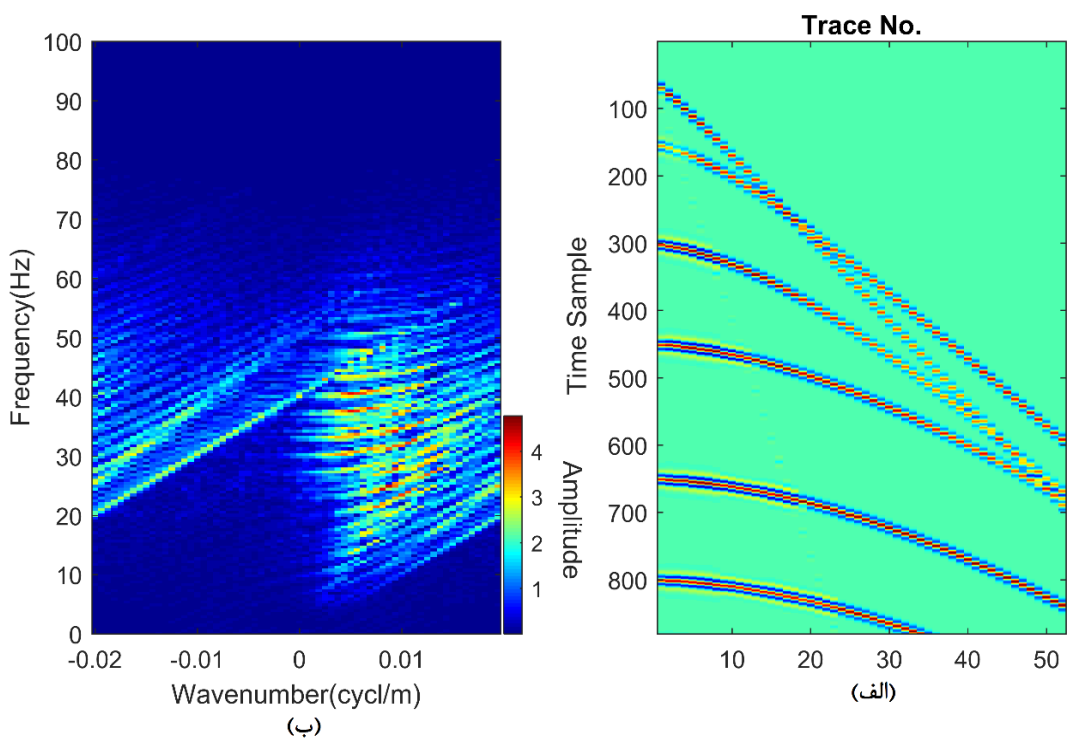
شکل ۴-۷. (الف) رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک مصنوعی و (ب) نمایش حوزه $f - k$.

از هر دو روش به منظور تضعیف رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک مصنوعی استفاده شده است. شکل ۴-۸ (الف) رکورد تضعیف نوفه شده با استفاده از تجزیه مد متغیر مبتنی بر صفحه زمان-فرکانس (روش اول) با پارامترهای جدول ۴-۱ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نوفه زمین‌غلت از رکورد چشمه مشترک مصنوعی تضعیف شده است. همچنین در شکل ۴-۸ (ب) طیف $f - k$ رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک مصنوعی پس از تضعیف نوفه زمین‌غلت به کمک این روش نشان داده شده است که در طیف $f - k$ آن نیز اثری از نوفه زمین‌غلت مشاهده نمی‌شود.

شکل ۴-۹ (الف) رکورد تضعیف نوفه شده با استفاده از تبدیل زمان-زمان و روش تجزیه مد متغیر (روش دوم) با پارامترهای جدول (۴-۲) را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۴-۹ (ب) طیف $f - k$ رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک مصنوعی بعد از تضعیف نوفه زمین‌غلت با کمک این روش نشان داده شده است که همانند روش قبل اثری از نوفه در طیف $f - k$ آن مشاهده نمی‌شود.



شکل ۴-۸: الف) رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک مصنوعی پس از تضعیف با استفاده از صفحه زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر بعد از اعمال AGC ب) نمایش حوزه‌ی $f - k$



شکل ۴-۹: الف) رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک مصنوعی پس از تضعیف به روش تبدیل زمان-زمان و استفاده از روش تجزیه مد متغیر بعد از اعمال AGC ب) نمایش حوزه‌ی $f - k$

۴-۵- اعمال روش بر روی رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک واقعی

شکل ۴-۱۰ (الف) یک رکورد چشمه مشترک واقعی مربوط به نرم‌افزار VISTA با فاصله نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه نشان داده شده است که حاوی نوفه زمین‌غلت می‌باشد. فاصله گیرنده‌ها از یکدیگر برابر ۲۵ متر و اولین گیرنده نیز در فاصله‌ی ۲۵ متری چشمه قرار گرفته است. طیف $f - k$ رکورد مورد نظر نیز در شکل ۴-۱۰ (ب) نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۴-۱۰ (ج) و شکل ۴-۱۰ (د) به ترتیب طیف دامنه دو ردلرزه از رکورد مورد نظر نیز نشان داده شده است. اولین ردلرزه که ردلرزه شماره ۸ می‌باشد، دارای نوفه زمین‌غلت است و در مقابل ردلرزه دوم ردلرزه ۳۵ است که فاقد نوفه زمین‌غلت می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حضور مولفه‌های فرکانس پایین در طیف دامنه ردلرزه شماره ۸ و همچنین مولفه‌های فرکانس پایین با شیب کم و عدد موج زیاد در طیف $f - k$ نشانگر حضور مقادیر قابل توجهی نوفه زمین‌غلت در رکورد لرزه‌ای می‌باشد.

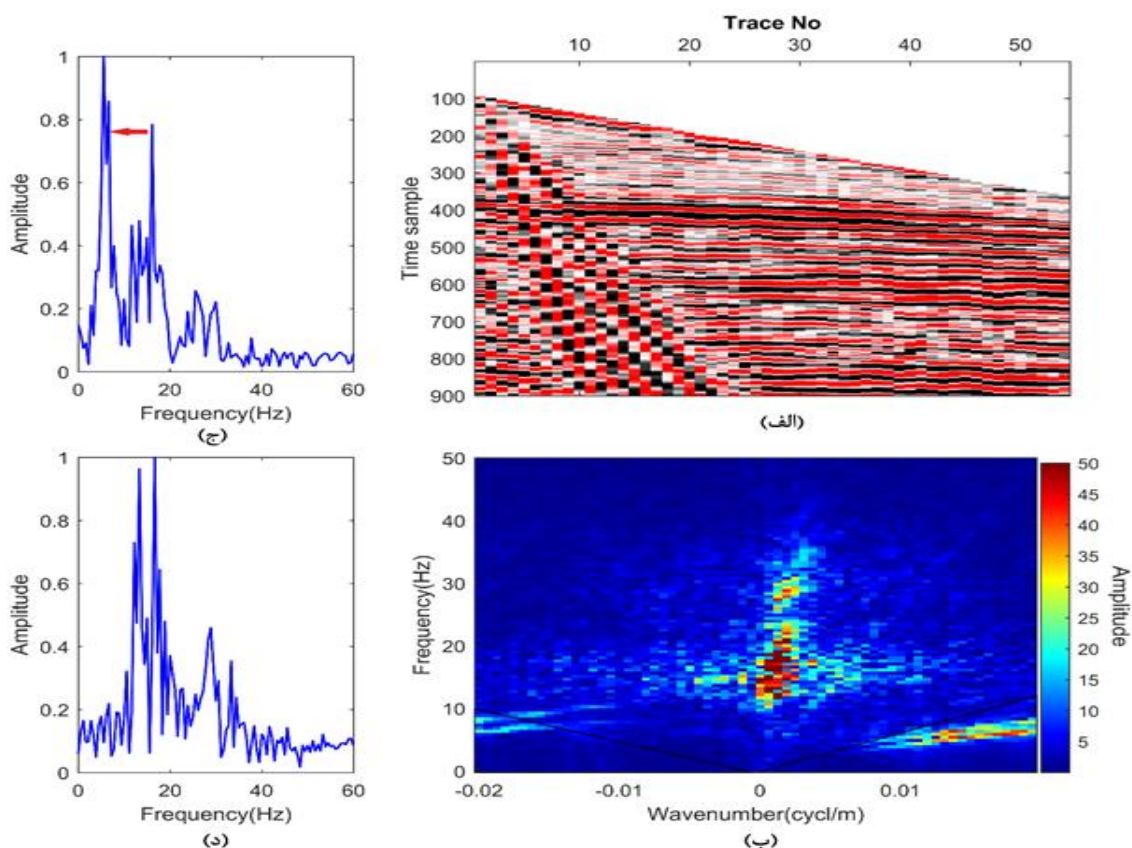
در شکل ۴-۱۱ (الف) نتیجه تضعیف نوفه زمین‌غلت با استفاده از روش صفحه زمان فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر (روش اول) با در نظر گرفتن پارامترهای جدول ۴-۱ نشان داده شده است. همچنین باقیمانده‌ی تفاضل نتیجه‌ی تضعیف با روش مذکور از رکورد چشمه مشترک اولیه در شکل ۴-۱۱ (ب) مشاهده می‌شود. در شکل ۴-۱۱ (ج) و شکل ۴-۱۱ (د) به ترتیب طیف دامنه دو ردلرزه شماره ۸ و ۳۵ و همچنین طیف $f - k$ رکورد لرزه‌ای بعد از اعمال روش در شکل ۴-۱۱ (د) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که این روش با تقریب خوبی امواج زمین‌غلت را از رکورد چشمه مشترک تضعیف نموده است.

همچنین شکل ۴-۱۲ (الف) نتیجه تضعیف نوفه زمین‌غلت با استفاده از روش تبدیل زمان - زمان و تجزیه مد متغیر (روش دوم) با در نظر گرفتن پارامترهای جدول ۴-۲ و همچنین پهنای فیلتر دوبعدی با مقدار ۴۰ (در این رکورد بهترین مقدار را فیلتر با ابعاد ۴۰ حاصل نموده است) نشان داده شده است. باقیمانده‌ی تفاضل نتیجه‌ی تضعیف با روش مذکور از رکورد چشمه مشترک اولیه نیز ترسیم شده است. برای این روش نیز طیف دامنه دو ردلرزه شماره ۸ و ۳۵ و همچنین طیف $f - k$ رکورد لرزه‌ای بعد از

اعمال روش نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، این روش نیز با تقریب نسبتاً خوبی قادر به تشخیص روند و حذف امواج زمین غلت است.

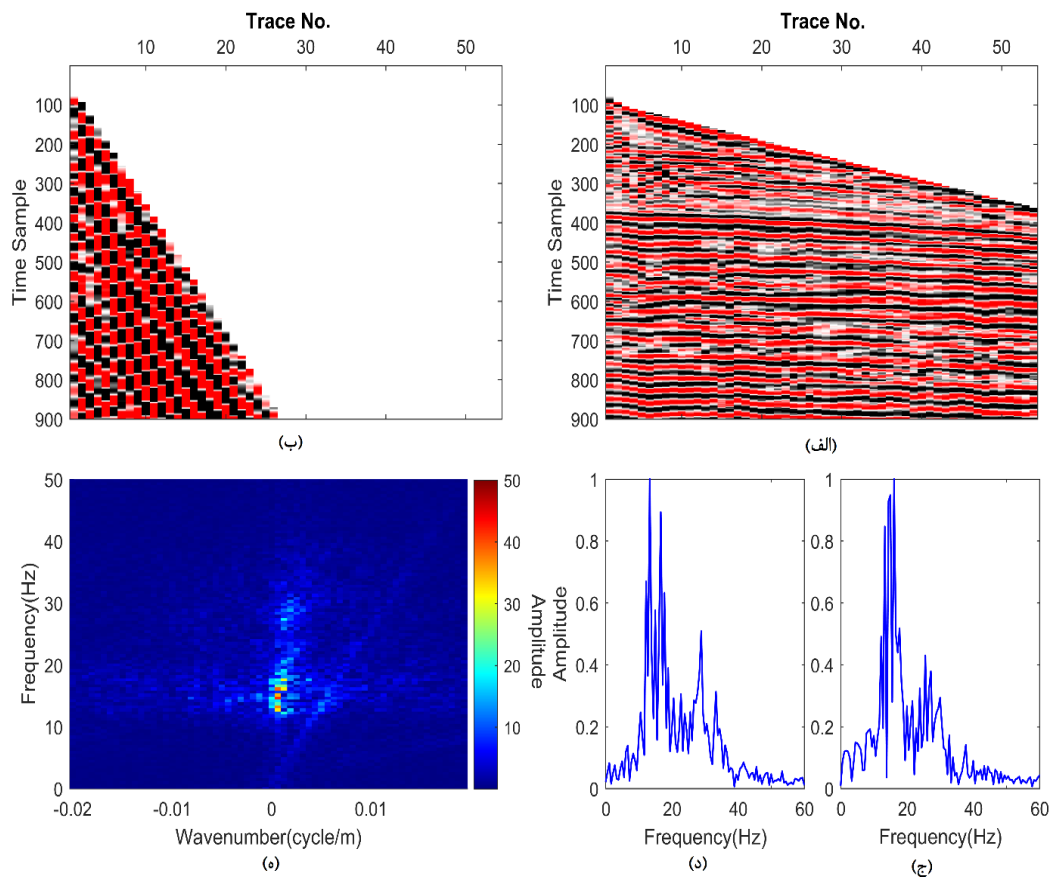
به دلیل اینکه تعداد ردلرزه‌هایی که وارد الگوریتم هر دو روش می شوند در اختیار کاربر می باشد، بنابراین ردلرزه‌هایی که فاقد نوفه زمین غلت هستند، بدون هیچ تغییر باقی خواهند ماند. همان طور که مشاهده می شود، روش دوم عملکرد بهتری در مقایسه با روش اول دارد.

به منظور بررسی‌های بیشتر، دو روش پیشنهادی در این پایان نامه، با روش متداول $f - k$ مقایسه شده است. در شکل ۴-۱۳ نتایج روش $f - k$ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در روش $f - k$ بخشی از نوفه زمین غلت در خروجی باقی می ماند و همچنین بخشی از ردلرزه‌ها در باقیمانده حاصل از تقاضل رکورد چشمه مشترک اصلی و رکورد تضعیف نوفه شده باقی می ماند.

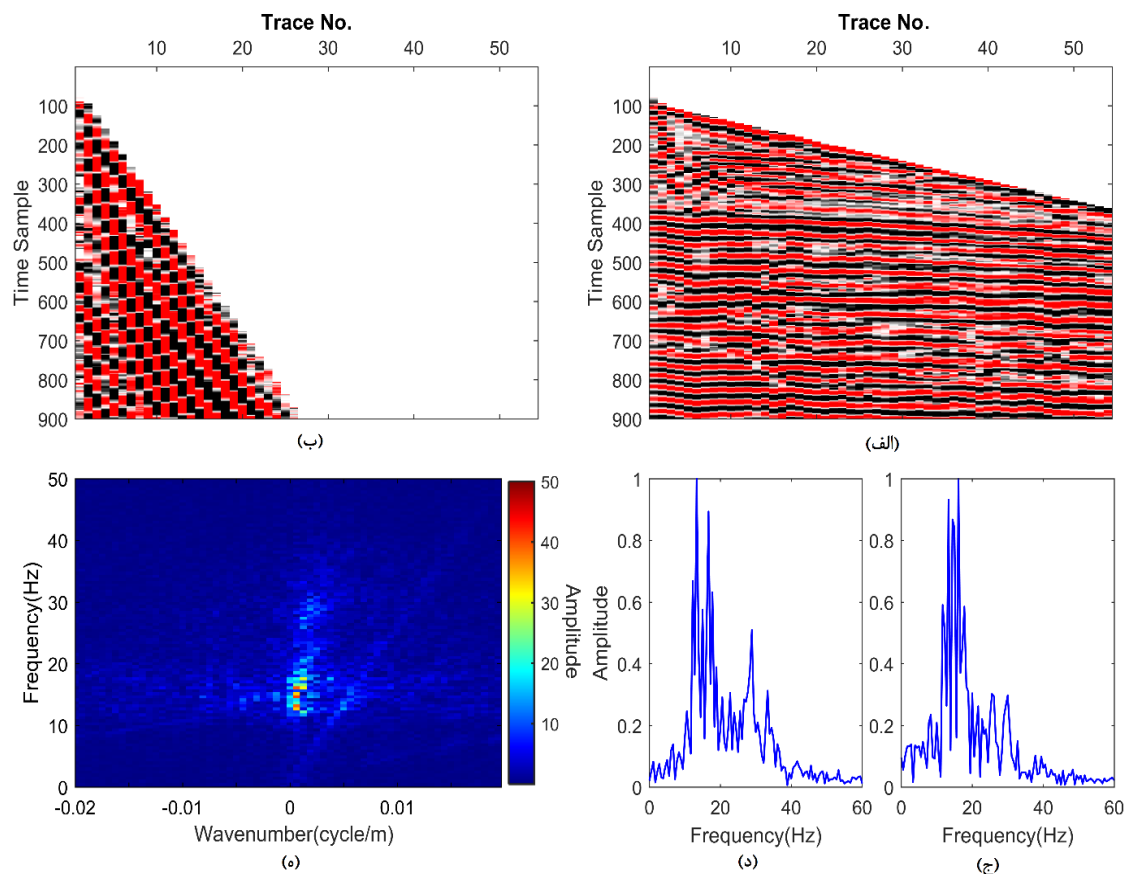


شکل ۴-۱۰. (الف) رکورد لرزه‌ای واقعی چشمه مشترک، (ب) طیف $f - k$ رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک (دو مثلث مشکی رنگ نواحی مربوط به نوفه زمین غلت را نشان می دهد)، (ج) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۸ از رکورد

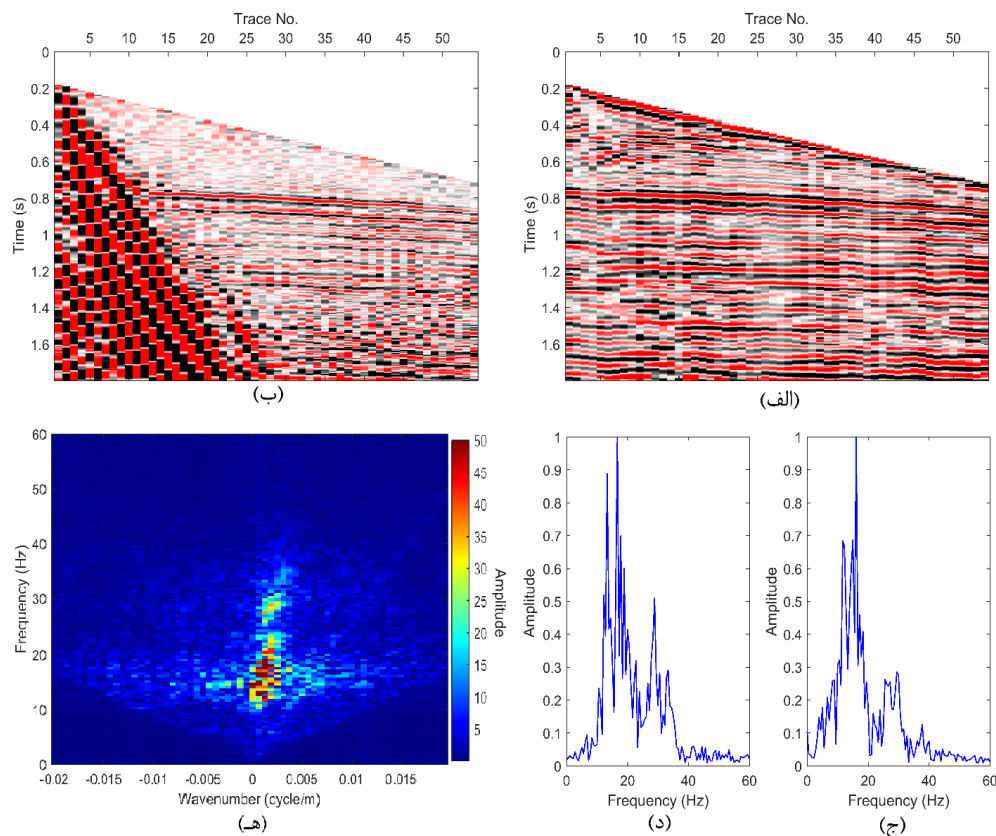
لرزه‌ای (پیکان قرمز رنگ مولفه‌های فرکانس پایین نوفه زمین‌غلت را نشان می‌دهد) و (د) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۳۵ از رکورد لرزه‌ای.



شکل ۴-۱۱. (الف) رکورد لرزه‌ای واقعی چشمه مشترک پس از تضعیف نوفه زمین‌غلت با استفاده از صفحه زمان-فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر بعد از اعمال *AGC*، (ب) باقیمانده تفاضل نتیجه تضعیف با روش مذکور از رکورد چشمه مشترک اولیه، (ج) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۸ از رکورد لرزه‌ای، (د) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۳۵ از رکورد لرزه‌ای و (ه) طیف $f-k$ رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک.



شکل ۴-۱۲. (الف) رکورد لرزه‌ای واقعی چشمه مشترک پس از تضعیف نوفه زمین‌غلت با استفاده از تبدیل زمان - زمان و تجزیه مد متغیر بعد از اعمال *AGC*، (ب) باقیمانده تفاضل نتیجه تضعیف با روش مذکور از رکورد چشمه مشترک اولیه، (ج) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۸ از رکورد لرزه‌ای، (د) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۳۵ از رکورد لرزه‌ای و (ه) طیف $f - k$ رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک.



شکل ۴-۱۳. (الف) رکورد لرزه‌ای واقعی چشمه مشترک پس از تضعیف نوفه زمین‌گلت با استفاده از روش $f - k$ بعد از اعمال AGC ، (ب) باقیمانده تفاضل نتیجه تضعیف با روش مذکور از رکورد چشمه مشترک اولیه، (ج) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۸ از رکورد لرزه‌ای، (د) طیف دامنه نرمال شده ردلرزه شماره ۳۵ از رکورد لرزه‌ای و (ه) طیف $f - k$ رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه روش تجزیه مد متغیر که یکی از روش های تطبیقی تجزیه سیگنال است، معرفی شده است. همچنین از دو روش تجزیه مد متغیر مبتنی بر صفحه زمان-فرکانس و تجزیه مد متغیر با استفاده از تبدیل زمان-زمان به منظور تضعیف امواج زمین غلت استفاده شده است که با توجه به نتایج به دست آمده می توان به موارد زیر به عنوان دستاوردهای این پایان نامه اشاره کرد:

۱- نمایش زمان-فرکانس هیلبرت-هوانگ، قدرت تفکیک فرکانسی، در نمایش فرکانس دو سیگنال مجزا را دارد.

۲- نمایش زمان-فرکانس هیلبرت-هوانگ، روند فرکانسی یک سیگنال را نشان می دهد و باعث هیچ گونه جداسازی فرکانسی نمی شود.

۳- دقت نمایش زمان-فرکانس هیلبرت-هوانگ، و فیلترهای طراحی شده بر اساس آن، به دقت فرکانس لحظه ای بستگی دارد.

۴- تبدیل زمان-زمان ضمن داشتن تابعیت دوبعدی از زمان، قابلیت جداسازی محتوای فرکانسی یک سیگنال با محتوای فرکانسی مختلف را دارد.

۵- روش تجزیه ی مد متغیر یک روش ریاضی است و نسبت به روش تجزیه مد تجربی عملکرد بهتری در تجزیه سیگنال دارد.

۶- روش تبدیل زمان-زمان و استفاده از تجزیه ی مد متغیر عملکرد بهتری نسبت به روش تجزیه مد متغیر مبتنی بر صفحه زمان-فرکانس دارد.

۷- تضعیف نوفه ی زمین غلت با استفاده از تبدیل زمان - زمان و استفاده از تجزیه مد متغیر دارای عملکرد بهتری نسبت به روش متداول $f - k$ می باشد.

۸- تضعیف نوفه ی زمین غلت با استفاده از صفحه زمان - فرکانس مبتنی بر تجزیه مد متغیر عملکرد بهتری نسبت به روش متداول $f - k$ دارد.

۵-۲- پیشنهادات

- ۱- استفاده از تجزیه مد متغیر تعمیم یافته به جای تجزیه مد متغیر.
- ۲- استخراج نشانگرهای لرزه‌ای با استفاده از تجزیه مد متغیر برای تفسیر داده‌های لرزه‌ای بازتابی.
- ۳- استفاده از تجزیه مد متغیر با استفاده از آستانه گذاری به منظور تضعیف نوفه‌های تصادفی.
- ۴- استفاده از روش ICA به منظور تجزیه سیگنال و ترکیب آن با تبدیل زمان-زمان به منظور تضعیف نوفه.
- ۵- حل معادله هدف در الگوریتم تجزیه مد متغیر با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی نوین.
- ۶- بهبود روش‌های محاسبه فرکانس لحظه‌ای که باعث بهبود صفحه زمان فرکانس هیلبرت-هوانگ می‌شود.

منابع

خجسته ف، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، "معرفی تبدیل زمان - زمان و کاربرد آن در فیلتر کردن داده‌های لرزه‌ای"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

رضایی فرح آبادی م.، ریاحی م. و مشین چی م، (۱۳۹۰) "اثر دگرنامی در تبدیل $p - \tau$ و چگونگی تضعیف نوفه های لرزه‌ای خطی در دگرنامی شده در این تبدیل" *مجله‌ی فیزیک زمین و فضا*، دوره ۳۷، شماره ۲، ص ۹۷-۱۱۰.

سیاهکوهی ح، (۱۳۷۹) "استفاده از تبدیل Karhunen-Loeve در پردازش داده‌های لرزه‌ای سه بعدی" *مجله‌ی فیزیک زمین و فضا*، دوره ۲۶، شماره ۱، ص ۹۷-۱۰۶.

کریمی ف، روشندل کاهو ا، (۱۳۹۲) "تضعیف نوفه های تصادفی داده های لرزه ای با استفاده از فیلتر میانگین غیرمحملی" *مجله‌ی فیزیک زمین و فضا*، دوره ۷، شماره ۴، ص ۱-۱۰.

Almeida L. J., Manenti R. R. and Porsani M. J. (2015), "Coherent Noise Attenuation using the Wavelet Transform on Radial Basis", SEG Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists.

Aneesh C., Kumar S., Hisham P., and Soman K. (2015), "Performance comparison of variational mode decomposition over empirical wavelet transform for the classification of power quality disturbances using support vector machine", **Procedia Computer Science**, **46**, 372-380.

Baker K. (2005), "Singular value decomposition tutorial", The Ohio State University, **24**.

Bekara M., and Van der Baan M. (2009), "Random and coherent noise attenuation by empirical mode decomposition", **Geophysics**, **74**, V89-V98.

Boashash B. (2015), "Time-frequency signal analysis and processing", a comprehensive reference: Academic Press.

Chen W. (2016), "Sparsity-enabled ground-roll noise suppression using tunable Q factor wavelet transform", SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016: Society of Exploration Geophysicists, 4674-4678.

Chen Y., Jiao S., Ma J., Chen H., Zhou Y. and Gan S. (2015), "Ground-roll noise attenuation using a simple and effective approach based on local band-limited

- orthogonalization”, **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, **12**, 2316-2320.
- Claerbout J. (1975), “Slant-stacks and radial traces”, Stanford Exploration Project report.
- Cordsen A., Galbraith M., Peirce J. and Hardage B. A. (2000), “Planning land 3-D seismic surveys”, Society of exploration geophysicists Tulsa.
- Corso G., Kuhn P., Lucena L. and Thomé Z. (2003), “Seismic ground roll time–frequency filtering using the Gaussian wavelet transform”, **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, **318**, 551-561.
- Cruz D. S., and Porsani M. J. (2016), “Ground roll attenuation using adaptive singular value decomposition filtering in the Fk domain”, **Revista Brasileira de Geofísica**, **33**.
- Dobrin M. B. and Savit C. H. (1988), **Introduction to geophysical prospecting**, McGraw-Hill.
- Dragomiretskiy K. and Zosso D. (2014), “Variational mode decomposition”, **IEEE transactions on signal processing**, **62**, 531-544.
- Duncan G. and Beresford G. (1994), “Slowness adaptive fk filtering of prestack seismic data” **Geophysics**, **59**, 140-147.
- Elboth T., Vik Presterud I., and D. Hermansen, (2010), “Time-frequency seismic data denoising”, **Geophysical Prospecting**, **58**, 441-453.
- Gadallah M. R. and Fisher R. L. (2005), “**Applied seismology: A comprehensive guide to seismic theory and application**”, PennWell Books.
- Hemon C. and Mace D. (1978), Use of the Karhunen-Loeve transformation seismic data processing”, **Geophysical Prospecting**, **26**, 600-626.
- Henley D. C. (2003), “Coherent noise attenuation in the radial trace domain”, **Geophysics**, **68**, 1408-1416.
- Hosseini S. A., Javaherian A., Hassani H., Torabi S. and Sadri M. (2015), “Shearlet transform in aliased ground roll attenuation and its comparison with fk filtering and curvelet transform”, **Journal of Geophysics and Engineering**, **12**, 351.
- Hu, Y., Wang L., Cheng F., Luo Y., Shen C. and Mi B. (2016), “Ground-roll noise extraction and suppression using high-resolution linear Radon transform”, **Journal of Applied Geophysics**, **128**, 8-17.
- Huang N. E. (2014), “**Hilbert-Huang transform and its applications**”, World Scientific.

- Huang N. E. and Shen, S. S. P., (2005), “**Hilbert-Huang transform and its applications**”, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd 5.
- Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N. C., Tung C. C. 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 A: **Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, The Royal Society, 903-995.
- Huang N. E. and Wu Z. (2008), “A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies”, **Reviews of Geophysics**, **46**.
- Ikelle, L. T., and L. Amundsen, 2005, Introduction to Petroleum Seismology: Society of Exploration Geophysicists.
- Jolly R. N., and Mifsud J. F. (1971). Experimental studies of source-generated seismic noise. **Geophysics**, 36(6), 1138-1149.
- Kearey P., Brooks M. and Hill I. (2013), “**An introduction to geophysical exploration**”, John Wiley & Sons.
- Kendall R., Jin S., Ronen S., and Meersman K. De. (1999), “An SVD-polarization filter for ground roll attenuation on multicomponent data”, EAGE/SEG Research Workshop-Multicomponent Seismic-Past, Present and Future.
- Liu W., Cao S. and Chen Y. (2016), “Applications of variational mode decomposition in seismic time-frequency analysis”, **Geophysics**, **81**, V365-V378.
- Liu, X. (1999), “Ground roll supression using the Karhunen-Loeve transform”, **Geophysics**, **64**, 564-566.
- Lu W., (2006), “Adaptive noise attenuation of seismic images based on singular value decomposition and texture direction detection” **Journal of Geophysics and Engineering**, **3**, 28.
- Liu W., Cao S. and He Y., (2014), “Ground Roll Attenuation Using Variational Mode Decomposition”, 77th EAGE Conference and Exhibition
- March, D. and Bailey A. (1983), “A review of the two-dimensional transform and its use in seismic processing”, **First break**, **1**, 9-21.
- Mohanty S., Gupta K. K. and Raju K. S. (2014), “Comparative study between VMD and EMD in bearing fault diagnosis”, 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS).

- Montagne R. and Vasconcelos G. L. (2006), “Optimized suppression of coherent noise from seismic data using the Karhunen-Loève transform”, **Physical Review E**, **74**, 016213.
- Neelamani R., Baumstein A. I., Gillard D. G., Hadidi M. T. and Soroka W. L. (2008), “Coherent and random noise attenuation using the curvelet transform”, **The Leading Edge**, **27**, 240-248.
- Ottolini R. (1979), “Migration of radial trace sections”, Stanford Exploration Project Report, SEP-20, 97-115.
- Pinnegar C. R. (2005), “Time–frequency and time–time filtering with the S-transform and TT-transform”, **Digital Signal Processing**, **15**, 604-620.
- Pinnegar C. R., and Mansinha L. (2003), “A method of time–time analysis: The TT-transform”, **Digital Signal Processing**, **13**, 588-603.
- Porsani M. J., Silva M. G., Melo P. E., and Ursin B. (2010), “SVD filtering applied to ground-roll attenuation”, **Journal of Geophysics and Engineering**, **7**, 284.
- Pujol J. (2003), “**Elastic wave propagation and generation in seismology**”, Cambridge University Press.
- Russell B., Hampson D. and Chun J. (1990), “Noise elimination and the Radon transform”, part 1: The Leading Edge, **9**, 18-23.
- Sheriff, R. E., and L. P. Geldart, (1995), “**Exploration seismology**”, Cambridge university press.
- Stockwell, R. G., Mansinha L. and Lowe R. (1996), “Localization of the complex spectrum: the S transform”, **IEEE transactions on signal processing**, **44**, 998-1001.
- Sun, G., Chen T., Wei Z., Sun Y., Zang H. and Chen S., (2016), “A Carbon Price Forecasting Model Based on Variational Mode Decomposition and Spiking Neural Networks”, **Energies**, **9**, 54.
- Tatham, R. H., Keeney J. W. and Noponen I. (1983), “Application of the tau-p transform (slant-stack) in processing seismic reflection data”, **Exploration Geophysics**, **14**, 163-172.
- Yarham, C., and Herrmann F. J. (2008), “Bayesian ground-roll separation by curvelet-domain sparsity promotion”, SEG Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists.

- Yarham, C., Trad D., and Herrmann F. J. (2004) , “Curvelet processing and imaging: adaptive ground roll removal”, Proc. CSEG National Convention.
- Yilmaz, O., (2001),“**Seismic Data Analysis Society of Exploration Geophysicists**”, Tulsa, USA.

Abstract:

Seismic imaging is highly dependent on the quality of seismic data. Structural and stratum interpretation of seismic sections that contain the least amount of noise is much easier. Coherent noise is major categories of noise that associated with seismic data. Coherent noise has a same trend from one seismic trace to another trace Ground roll is one of the main coherent noises which have a low frequency high amplitude and low velocity. There are many methods to undermine the rolling noises are provided, each with their own advantages and disadvantages.

In this thesis, the variational mode decomposition (VMD) with using the time-frequency map has been used for undermine ground roll noise. In this method, traces containing noise with using VMD decomposed to variation modes and filtering in time frequency map. In continuing, to improve the results of VMD and time-time transform mode is used. In continuing, to improve the results of VMD and time-time transform mode is used that in this method, traces containing noise transmission to domain Time-Time and undermine with using 2D filter and VMD.

Both methods were applied on synthetic and real seismic data and results of two methods compared with to gether and also this metods comparing with comon method f-k. The results showed that the VMD method and time-time transform have beter performance than first method. Also each both methods have best performance in comparing with f-k method without damaging to reflection traces.

Keywords: Seismic Reflection, Ground rolling Noise, Variational Mode Decomposition, Instrict Mode Function, Time-Frequency Map, Time – Time Tansform.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc.Thesis in Seismic Exploration

**Ground roll attenuation in reflection seismic data using
variational mode decomposition**

By:Mehrdad Khalil Tahmasebi

Supervisor:

Dr.Amin Roshandel Kahoo

Dr.Ali Nejati Kalateh

January 2017