

## چکیده

امواج ریلی نسبت به سایر امواج، اثرات مخرب تری بر روی سازه‌های ساخت بشر دارند. شناسایی و استخراج امواج ریلی از شتاب‌نگاشت‌ها در حوزه زمان-فرکانس از دقت بالایی برخوردار است. در تحقیق حاضر، از تبدیل موجک پیوسته و تبدیل استوکول برای انتقال سه مؤلفه شتاب‌نگاشت هر ایستگاه زلزله به حوزه زمان-فرکانس و استخراج امواج ریلی استفاده شده است. با استفاده از مشخصات حرکت بیضوی، امواج ریلی از شتاب‌نگاشت‌ها در حوزه زمان-فرکانس قابل استخراج می‌باشند. همچنین با انتقال فاز حرکت قائم و با استفاده از ضرب داخلی نرمالایز شده، می‌توان امواج ریلی پس‌رونده، پیش‌رونده و نیز زاویه انتشار این امواج را در حوزه زمان-فرکانس به طور مجزا استخراج نمود و در نهایت پاسخ را در فضای زمان ارائه داد. در مطالعه حاضر، الگوریتم‌های مذکور در زبان برنامه‌نویسی متلب کدنویسی شده است. صحت تحلیل‌های صورت گرفته، با استفاده از امواج ریلی استخراج شده از سیگنال‌های مصنوعی و نیز داده‌های زلزله چی‌چی، ارزیابی شده است. در نهایت زلزله‌های ایران شامل طبس، بم و منجیل مورد بررسی قرار گرفته و امواج ریلی آنها استخراج و پارامترهای لرزه‌ای آنها محاسبه شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در شتاب‌نگاشت‌ها سهم امواج ریلی پس‌رونده بیشتر از سهم امواج ریلی پیش‌رونده و سایر امواج است.

**واژگان کلیدی:** شتاب‌نگاشت، امواج ریلی، حوزه زمان-فرکانس، فیلتر، متلب، تبدیل موجک پیوسته، تبدیل استوکول.

## استخراج امواج ریلی زلزله‌های ایران با استفاده از سه مؤلفه شتاب‌نگاشت در حوزه زمان - فرکانس

### پویا نقشین (نویسنده مسئول)

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، Poya.naghshin@gmail.com

### هادی بهادری

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

### عباس اسلامی حقیقت

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

## ۱- مقدمه

صورت می‌گیرد. قطبیدگی امواج ریلی به صورت بیضوی و قطبیدگی امواج حجمی و لاو به صورت خطی می‌باشد. از دهه شصت میلادی مطالعات گسترده‌ای برای شناسایی و استخراج امواج سطحی صورت گرفته است. مطالعاتی در حوزه زمان توسط فلین [۲]، مونتالبی و کاناسویچ [۳]، ویدال [۴] و موروزو و اسمیتسون [۵] صورت گرفته است. مطالعاتی نیز برای شناسایی امواج سطحی در حوزه فرکانس توسط سیمسون [۶] و سامسون و اولسون [۷] انجام شده است. در اکثر مطالعات، شناسایی امواج سطحی کاملاً در حوزه زمان یا کاملاً در حوزه فرکانس صورت گرفته است. در لرزه‌نگارهای واقعی، امواج با مشخصات قطبیدگی و فرکانسی مختلف می‌توانند در زمان

از دیدگاه تمرکز انرژی امواج تولید شده در اثر زلزله، به دو دسته کلی امواج حجمی و امواج سطحی تقسیم می‌شوند [۱]. امواج سطحی با سرعت کمتری نسبت به امواج حجمی میرا شده و دامنه بیشتری نسبت به امواج حجمی دارند. در نتیجه امواج سطحی اثرات مخرب تری بر روی سازه‌های ساخت بشر می‌گذارند. بنابراین، یکی از وظایف مهم در لرزه‌شناسی و ژئوفیزیک کاربردی، شناسایی و استخراج انواع امواج از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ها می‌باشد. امواج سطحی به دلیل لایه‌بندی و غیر ایزوتروپ بودن زمین، از نوع پراکنده<sup>۱</sup> می‌باشند، یعنی سرعت انتشار این امواج وابسته به فرکانس است. شناسایی امواج سطحی بر پایه دو مشخصه اصلی این امواج، شامل پراکنده‌گی و نوع قطبیدگی<sup>۲</sup>

زمان-فرکانس استفاده شده است که تفاوت محاسبات صورت گرفته در اینجا نسبت به تحقیقات قبل، استفاده از تبدیل موجک پیوسته به جای تبدیل استوکول و تبدیل موجک گسسته است. همچنین مزا-فاجاردو و همکاران [۱۷] روشی ارائه داده‌اند که با استفاده از این روش نیازی به تخصیص اولیه جهت انتشار موج نیست. با استفاده از این روش امواج ریلی پس‌رونده<sup>۶</sup> و پیش‌رونده<sup>۷</sup>، به طور مجزا از سه مؤلفه شتاب‌نگاشت قابل تفکیک و زاویه انتشار این امواج قابل محاسبه می‌باشد. بنابراین در مطالعه حاضر، از این روش نیز برای استخراج و تفکیک امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده استفاده شده است. در این مطالعه، الگوریتم‌های مذکور، در نرم‌افزار متلب<sup>۸</sup> کدنویسی شده و با استفاده از امواج سطحی استخراج شده از سیگنال‌های مصنوعی و شتاب‌نگاشت‌های پس‌لرزه زلزله چی‌چی تایوان در سال ۱۹۹۹ [۱۷]، کدنویسی مذکور، صحت‌سنجی شده است. در نهایت با استفاده از دو الگوریتم مجزا، امواج ریلی (الگوریتم I)، امواج ریلی پس‌رونده، پیش‌رونده و زاویه انتشار این امواج (الگوریتم II) از سه مؤلفه طولی، عرضی زلزله‌های طبس، بم و منجیل استخراج شده است.

## ۲- معرفی الگوریتم‌ها

در مطالعه حاضر از دو الگوریتم متفاوت برای استخراج امواج ریلی استفاده شده است. در الگوریتم I با استفاده از تبدیل موجک پیوسته، سیگنال به حوزه زمان-فرکانس منتقل شده و امواج ریلی بر اساس نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی استخراج شده است. در الگوریتم II طبق روش پیشنهاد شده توسط مزا-فاجاردو و همکاران [۱۷] امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده به طور مجزا استخراج شده است. الگوریتم‌های مذکور در ادامه به اختصار شرح داده شده است.

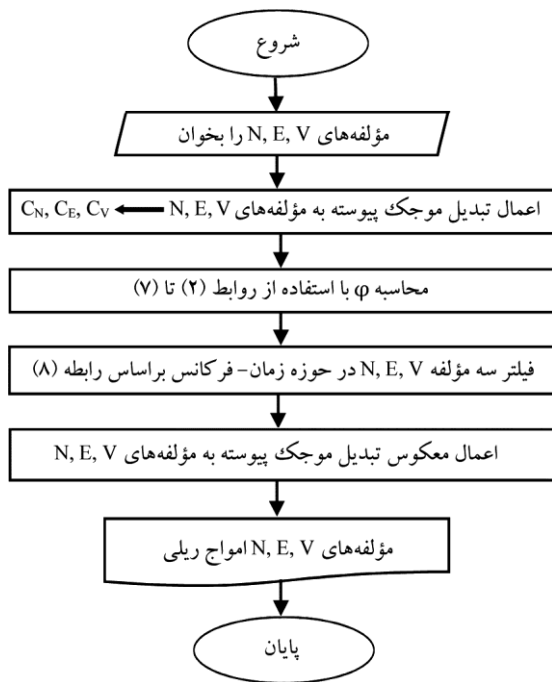
### ۲-۱- الگوریتم I

همان‌طور که ذکر شد، در مطالعات پیشین با استفاده از تبدیل‌های استوکول و موجک گسسته سیگنال‌ها به حوزه زمان-فرکانس منتقل شده و امواج ریلی بر اساس پارامتر نسبت قطر کوچک به قطر

مشخصی ایجاد و ثبت گردند. همچنین ممکن است امواج با مشخصات قطبیدگی مختلف و فرکانسی یکسان در زمان‌های متفاوتی ایجاد و ثبت شوند. به عبارت دیگر، در صورتی که به استخراج امواج ریلی در حوزه زمان پرداخته شود، امواج مختلفی که با فرکانس‌های متفاوت در یک زمان مشخص ثبت شده‌اند، قابل تمیز نخواهند بود. از طرف دیگر در صورتی که استخراج امواج در حوزه فرکانس صورت بگیرد، امواج مختلفی که در زمان‌های مختلف با فرکانس یکسانی ثبت شده‌اند قابل تشخیص و جداسازی نخواهند بود. بنابراین، در شتاب‌نگاشت‌های واقعی مطالعه در حوزه زمان-فرکانس برای شناسایی امواج سطحی بهتر از حوزه زمان یا حوزه فرکانس به تنهایی می‌باشد. برای شناسایی و استخراج امواج سطحی در حوزه زمان-فرکانس از تبدیل‌های مختلفی استفاده می‌شود. با استفاده از این تبدیل‌ها، سیگنال از حوزه زمان به حوزه زمان-فرکانس انتقال پیدا می‌کند. در مطالعاتی که توسط دایالو و همکاران [۸-۹] و کولش و همکاران [۱۰-۱۱] برای شناسایی امواج سطحی انجام شده است، از تبدیل موجک پیوسته<sup>۳</sup> برای انتقال سیگنال به حوزه زمان-فرکانس استفاده شده است. انانت و دولا [۱۲]، گالیانا-مرینو و همکاران [۱۳-۱۴]، آوریو و همکاران [۱۵] و از تبدیل موجک گسسته<sup>۴</sup> برای انتقال سیگنال به حوزه زمان-فرکانس و شناسایی امواج سطحی استفاده نموده‌اند. در مطالعات صورت گرفته توسط پینگار [۱۶] و مزا-فاجاردو و همکاران [۱۷]، از تبدیل استوکول<sup>۵</sup> جهت انتقال سیگنال به حوزه زمان-فرکانس و شناسایی امواج سطحی استفاده شده است.

در اکثر مطالعات صورت گرفته، جهت انتشار موج اولیه‌ای فرض شده و با استفاده از پارامترهای بیضوی، امواج ریلی استخراج شده‌اند. گالیانا-مرینو و همکاران [۱۴] و پینگار [۱۶] به ترتیب با استفاده از تبدیل موجک گسسته و تبدیل استوکول سیگنال را به حوزه زمان-فرکانس انتقال داده و امواج ریلی را بر اساس نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی استخراج کرده‌اند. در مطالعه حاضر برای استخراج امواج ریلی بر اساس قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی، از تبدیل موجک پیوسته برای انتقال سیگنال به حوزه

در رابطه (۸)،  $X$  همان مؤلفه‌های  $N, E, V$  در حوزه زمان-فرکانس می‌باشد. در نهایت با استفاده از معکوس تبدیل موجک پیوسته، سه مؤلفه سیگنال فیلتر شده، از حوزه زمان-فرکانس به حوزه زمان برگردانده می‌شوند. روند استخراج موج ریلی بر اساس الگوریتم I در شکل (۱) آورده شده است.



شکل (۱): فلوجارت الگوریتم.

## ۲-۲- الگوریتم II

مشخصات قطبیدگی، ابزار مناسبی برای شناسایی و جداسازی انواع امواج از سیگنال‌های چند مؤلفه‌ای می‌باشند. اگر مؤلفه‌های سیگنال هم‌فاز باشند، قطبیدگی خطی خواهد بود. در صورتی که مؤلفه‌های سیگنال به اندازه ۹۰ درجه اختلاف فاز داشته باشند و دامنه آنها متفاوت باشد، قطبیدگی بیضوی خواهد شد. روش ارائه شده توسط مز-فاجاردو و همکاران [۱۷]، که در مطالعه حاضر برای استخراج امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده به کار رفته است، بر پایه تئوری اختلاف فاز می‌باشد.

نحوه ایجاد امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. در صورتی که دو مؤلفه شعاعی و عمودی در یک فرکانس به اندازه ۹۰ درجه اختلاف فاز داشته باشند، حرکت بیضوی ایجاد می‌گردد.

بزرگ بیضی استخراج شده است. در این مطالعه الگوریتمی مشابه روش‌های مطالعات پیشین معرفی شده است، با این تفاوت که از تبدیل موجک پیوسته برای انتقال سیگنال به حوزه زمان-فرکانس استفاده شده است. تبدیل موجک پیوسته به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$X(a, b) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \bar{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

که در این رابطه  $x(t)$  سیگنال در حوزه زمان،  $\Psi$  تابع موجک مادر،  $b$  متغیر انتقال (بیانگر زمان)،  $a$  متغیر مقیاس (بیانگر فرکانس) و  $X(a, b)$  سیگنال در حوزه زمان-فرکانس می‌باشد. با استفاده از رابطه (۱)، سه مؤلفه تغییر مکان  $N, E, V$  به حوزه زمان-فرکانس منتقل شده، که خروجی حاصل از تبدیل موجک پیوسته به صورت عددی مختلط در هر زمان و فرکانس می‌باشد. با استفاده از روابط (۲) تا (۷)، نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی در هر زمان و فرکانس محاسبه می‌گردد.

$$A(\tau, f) = R_{N(\tau, f)}^2 + I_{N(\tau, f)}^2 + R_{E(\tau, f)}^2 + I_{E(\tau, f)}^2 + R_{V(\tau, f)}^2 + I_{V(\tau, f)}^2 \quad (2)$$

$$B(\tau, f) = R_{N(\tau, f)}^2 - I_{N(\tau, f)}^2 + R_{E(\tau, f)}^2 - I_{E(\tau, f)}^2 + R_{V(\tau, f)}^2 - I_{V(\tau, f)}^2 \quad (3)$$

$$C(\tau, f) = -2(R_{N(\tau, f)} \cdot I_{N(\tau, f)} + R_{E(\tau, f)} \cdot I_{E(\tau, f)} + R_{V(\tau, f)} \cdot I_{V(\tau, f)}) \quad (4)$$

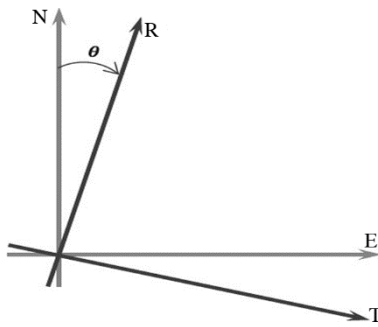
$$a(\tau, f) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A(\tau, f) + \sqrt{B(\tau, f)^2 + C(\tau, f)^2}} \quad (5)$$

$$b(\tau, f) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A(\tau, f) - \sqrt{B(\tau, f)^2 + C(\tau, f)^2}} \quad (6)$$

$$\varphi(\tau, f) = \frac{b(\tau, f)}{a(\tau, f)} \quad (7)$$

در این روابط  $R$  و  $I$  به ترتیب قسمت حقیقی و موهومی مؤلفه‌های منتقل شده به حوزه زمان-فرکانس با استفاده از تبدیل موجک پیوسته می‌باشند. بر اساس پارامتر  $\varphi$  (نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی)، سه مؤلفه سیگنال در حوزه زمان-فرکانس طبق رابطه (۸) فیلتر می‌شود.

$$X(\tau, f) = \begin{cases} X(\tau, f) & \varphi(\tau, f) \geq 0.5 \\ 0 & \varphi(\tau, f) < 0.5 \end{cases} \quad (8)$$



شکل (۳): سیستم مرجع برای جهت انتشار امواج ریلی.

در الگوریتم II به منظور انتقال سیگنال از حوزه زمان به حوزه زمان-فرکانس تبدیل استوکول استفاده شده است. تبدیل استوکول در سال ۱۹۹۶ توسط استوکول و همکاران [۱۸] معرفی شده است. در تبدیل استوکول، فاز مطلق هر مؤلفه فرکانسی حفظ می‌گردد. با توجه به اینکه امواج ریلی در الگوریتم II بر اساس اختلاف فاز استخراج می‌شود، از سایر تبدیل‌ها نمی‌توان در این الگوریتم استفاده کرد. تبدیل استوکول به صورت رابطه زیر است.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-2\pi i f t} dt \quad (9)$$

که در این رابطه  $h(t)$  سیگنال در حوزه زمان،  $\tau$  مرکز پنجره گاسین<sup>۹</sup> و  $S(\tau, f)$  معرف سیگنال به صورت تابع نمایی در هر زمان و فرکانس می‌باشد. خروجی تبدیل استوکول ماتریسی با اعداد مختلط خواهد بود، که هر درایه ماتریس تابعی نمایی در هر زمان و فرکانس می‌باشد. دوران مؤلفه‌های افقی در حوزه زمان-فرکانس با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) صورت می‌گیرد.

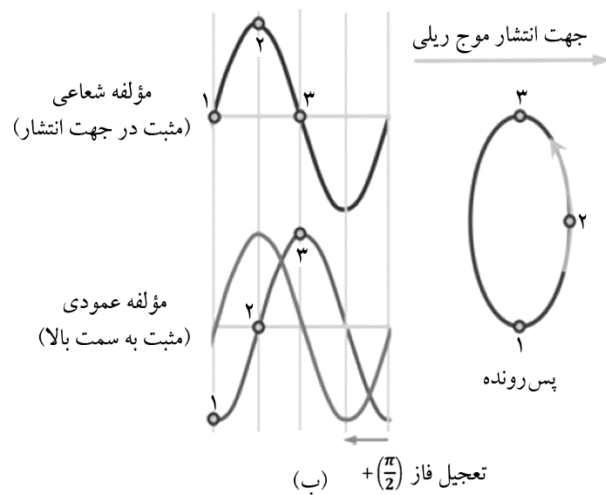
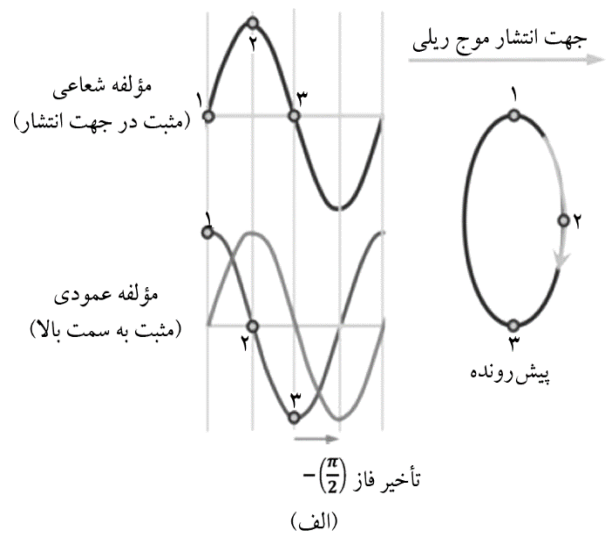
$$S_R(\tau, f) = S_N(\tau, f) \cdot \cos(\theta) + S_E(\tau, f) \cdot \sin(\theta) \quad (10)$$

$$S_T(\tau, f) = S_E(\tau, f) \cdot \cos(\theta) + S_N(\tau, f) \cdot \sin(\theta) \quad (11)$$

در ادامه فاز بردار مؤلفه عمودی در هر زمان و فرکانس، به اندازه ۹۰ درجه انتقال داده می‌شود. انتقال فاز برای استخراج امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده به ترتیب با تقدم و تأخیر به صورت رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) انجام می‌شود.

$$S_{\dot{V}}(\tau, f) = S_V(\tau, f) * e^{+\frac{i\pi}{2}} \quad (12)$$

$$S_{\dot{V}}(\tau, f) = S_V(\tau, f) * e^{-\frac{i\pi}{2}} \quad (13)$$



شکل (۲): انتقال فاز مؤلفه عمودی (الف) حرکت پیش‌رونده (تأخیر فاز) و (ب) حرکت پس‌رونده (تقدم فاز).

با توجه به شکل (۲) مشاهده می‌گردد که اگر مؤلفه عمودی دارای تأخیر فاز ۹۰ درجه نسبت به مؤلفه شعاعی باشد، حرکت ریلی پیش‌رونده ایجاد می‌گردد. در صورتی که مؤلفه عمودی تقدم فاز ۹۰ درجه نسبت به مؤلفه شعاعی داشته باشد، حرکت ریلی پس‌رونده ایجاد می‌شود.

برای شناسایی و استخراج امواج ریلی زلزله، از سه مؤلفه تغییر مکان-زمان (N, E, V) استفاده می‌شود. در صورتی که مؤلفه‌های افقی (N, E) به اندازه  $\theta$  دوران داده شوند، مؤلفه‌های شعاعی و عرضی (R, T) به صورت شکل (۳)، به دست می‌آیند. مؤلفه شعاعی (R) جهت انتشار موج ریلی را نشان می‌دهد و مؤلفه عرضی (T) در صفحه افقی عمود بر جهت انتشار موج می‌باشد.

پس از اعمال فیلتر، سیگنال حاصل با استفاده از معکوس تبدیل استوکول، از حوزه زمان-فرکانس به حوزه زمان منتقل می‌شود. در نهایت، پس از اعمال فیلترها و استخراج امواج ریلی، زاویه قطبیدگی و انتشار موج ریلی استخراج شده، با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌گردد.

$$\theta_r = \arctan \left( \frac{\sum_i^n E(i) \cdot \hat{V}(i)}{\sum_i^n N(i) \cdot \hat{V}(i)} \right) \quad -\frac{\pi}{2} < \theta_r < +\frac{\pi}{2} \quad (17)$$

الگوریتمی که به اختصار توضیح داده شد، به‌طور برای امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده استفاده می‌شود. قابل ذکر است که نقطه تمایز در روند استخراج امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده، فقط در انتخاب رابطه (۱۲) یا (۱۳) می‌باشد. فلوچارتی برای الگوریتم II تهیه و در شکل (۴) آورده شده است.

### ۳- صحت‌سنجی

الگوریتم‌های I و II معرفی شده در قسمت قبل، در زبان برنامه‌نویسی متلب کدنویسی شده است. به منظور صحت‌سنجی الگوریتم‌های صورت گرفته، دو مثال معرفی شده در مرجع [۱۷] که با الگوریتم II تحلیل یافته، اتخاذ شده است. در مثال اول از سیگنال‌های مصنوعی که حرکت بیضوی و حرکت خطی ایجاد می‌کنند، استفاده شده و در مثال دوم سیگنال‌های زلزله چپی چپی مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۳-۱- صحت‌سنجی با استفاده از سیگنال‌های مصنوعی

برای ایجاد سیگنال‌های مصنوعی، از پنجره‌های سینوسی با فرکانس‌های ۱، ۲ و ۵ هرتز و بازه زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه مطابق شکل (۵)، استفاده شده است. سیگنال در سه جهت x, y, z طبق رابطه‌های (۱۸) تا (۲۰) که در شکل (۶) نشان داده شده، ایجاد شده است. در این روابط پنجره‌های سینوسی ۱ و ۲ هرتزی حرکت بیضوی را ایجاد می‌کنند که باید با استفاده از الگوریتم‌های معرفی شده به‌عنوان موج ریلی استخراج گردند و پنجره سینوسی ۵ هرتزی حرکت خطی ایجاد می‌کند یعنی موج مزاحم بوده و باید طی الگوریتم‌های مذکور از سیگنال حذف گردد.

مقدار دوران بردار مؤلفه‌های افقی در هر زمان و فرکانسی طوری تعیین خواهد شد که ضرب داخلی بردار مؤلفه عرضی و مؤلفه عمودی منتقل شده برابر با صفر باشد. در واقع زاویه  $\theta$  طوری محاسبه می‌گردد که مؤلفه عرضی و مؤلفه عمودی منتقل شده به اندازه ۹۰ درجه اختلاف فاز داشته باشند. در این صورت برای حرکت بیضوی، مؤلفه عرضی و مؤلفه عمودی اختلاف فاز صفر و مؤلفه شعاعی و مؤلفه عمودی اختلاف فاز ۹۰ درجه خواهند داشت. در این صورت محور شعاعی منطبق بر جهت انتشار موج ریلی در هر زمان و فرکانسی خواهد بود. زاویه  $\theta$  با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$\theta_r(\tau, f) = \tan^{-1} \left[ \frac{R_E(\tau, f) \cdot R_{\hat{V}}(\tau, f) + I_E(\tau, f) \cdot I_{\hat{V}}(\tau, f)}{R_N(\tau, f) \cdot R_{\hat{V}}(\tau, f) + I_N(\tau, f) \cdot I_{\hat{V}}(\tau, f)} \right] \quad (14)$$

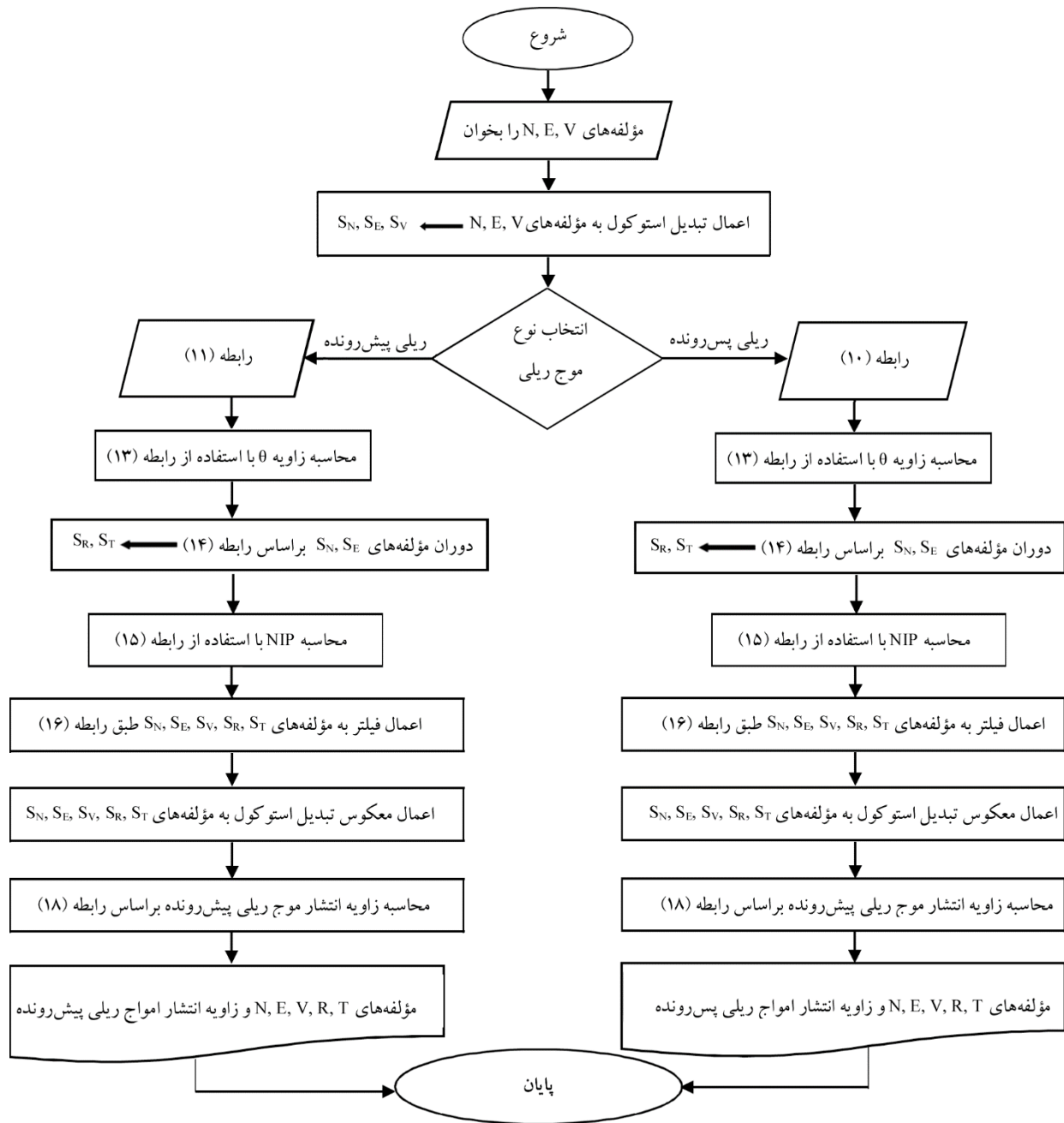
$$-\frac{\pi}{2} < \theta_r < +\frac{\pi}{2}$$

بر اساس مؤلفه عمودی تقدم و تأخر داده شده، زاویه  $\theta_r$  به‌طور مجزا برای امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده محاسبه می‌گردد. پس از محاسبه زاویه  $\theta_r$ ، مؤلفه‌های T و R در حوزه زمان-فرکانس با استفاده از رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌گردند. سپس ضرب داخلی نرمالایز شده<sup>۱۱</sup> مؤلفه شعاعی و مؤلفه عمودی منتقل شده طبق رابطه (۱۵) در حوزه زمان-فرکانس محاسبه می‌شود.

$$NIP(R, \hat{V}) = \frac{R_R(\tau, f) \cdot R_{\hat{V}}(\tau, f) + I_R(\tau, f) \cdot I_{\hat{V}}(\tau, f)}{\sqrt{R_R(\tau, f)^2 + I_R(\tau, f)^2} \cdot \sqrt{R_{\hat{V}}(\tau, f)^2 + I_{\hat{V}}(\tau, f)^2}} \quad (15)$$

برای ایجاد حرکت بیضوی عمودی در صفحه R-V بایستی اختلاف فاز R و V برابر ۹۰ درجه و در نتیجه اختلاف فاز R و  $\hat{V}$  صفر درجه باشد. بنابراین در صورت ایجاد حرکت بیضوی  $NIP(R, \hat{V})$  تقریباً مساوی یک خواهد بود. فیلتر حرکات بیضوی از مؤلفه‌های N, E, R, T و V در حوزه زمان-فرکانس با استفاده از رابطه (۱۶) انجام می‌شود.

$$X(\tau, f) = \begin{cases} 0 & NIP(R, \hat{V}) < 0.7 \\ \frac{1}{2} X(\tau, f) \cos \left[ \frac{\pi(NIP(R, \hat{V}) - 0.8)}{0.1} \right] + \frac{1}{2} & 0.7 < NIP(R, \hat{V}) < 0.8 \\ X(\tau, f) & NIP(R, \hat{V}) > 0.8 \end{cases} \quad (16)$$



شکل (۴): فلوجارت الگوریتم II.

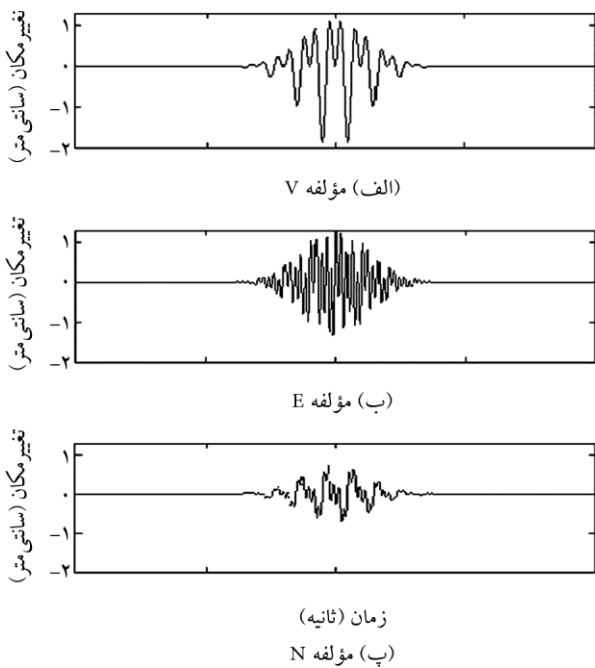
سیگنال  $x, y, z$  طوری ایجاد شده‌اند که در صفحه  $x-z$  موج ریلی پیش‌رونده با فرکانس ۱ هرتز و در صفحه  $y-z$  موج ریلی پس‌رونده با فرکانس ۲ هرتز ایجاد شود. برای صحت‌سنجی زاویه استخراج شده از الگوریتم II، در اینجا محورهای افقی  $x, y$  به اندازه ۶۰ درجه به صورت ساعتگرد دوران داده شده و محورهای  $N, E$  و  $V$  مطابق شکل (۷) به دست آمده‌اند. با توجه به اینکه دورانی بر روی محور  $Z$  اعمال نشده، محور  $Z$  ثابت مانده است.

$$x(t) = (1/\sqrt{2})S_3(t) + (0.5)S_1(t) \quad (18)$$

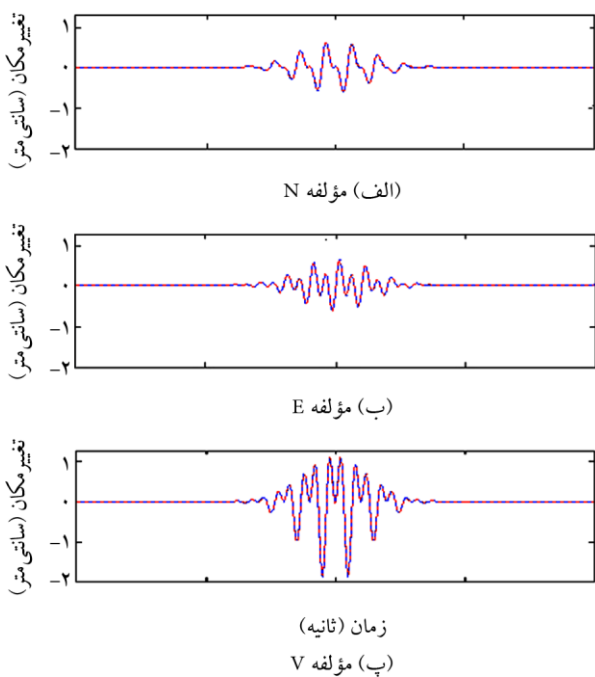
$$y(t) = (1/\sqrt{2})S_3(t) + (0.5)S_2(t) \quad (19)$$

$$z(t) = \hat{S}_1^+(t) + \hat{S}_2^-(t) \quad (20)$$

که  $\hat{S}_1^+(t)$  پنجره سینوسی ۱ هرتزی با ۹۰ درجه تقدم فاز و  $\hat{S}_2^-(t)$  پنجره سینوسی ۲ هرتزی با ۹۰ درجه تأخیر فاز می‌باشد. سه مؤلفه

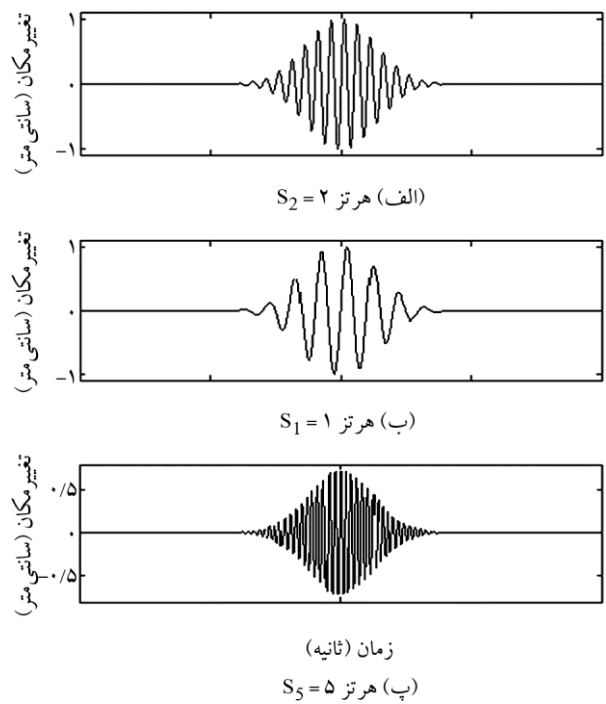


شکل (۷): سه مؤلفه سیگنال مصنوعی.

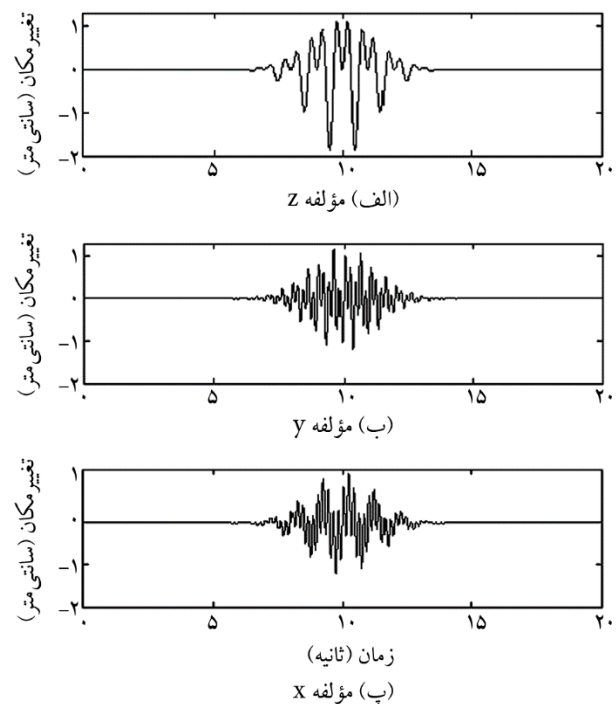


شکل (۸): امواج ریلی سه مؤلفه N, E, V (خط توپو امواج ریلی استخراج شده با استفاده از الگوریتم I، خط چین امواج ریلی به کار رفته در ایجاد سیگنال مصنوعی).

گرفته شده است. شکل (۸) امواج ریلی استخراج شده با خط چین رسم شده است. در سیگنال مصنوعی مذکور، پنجره‌های سینوسی ۱ و ۲ هرتزی امواج ریلی را ایجاد می‌کنند که در شکل (۸) با خط توپو نشان داده شده است. با توجه به اینکه الگوریتم I امواج ریلی

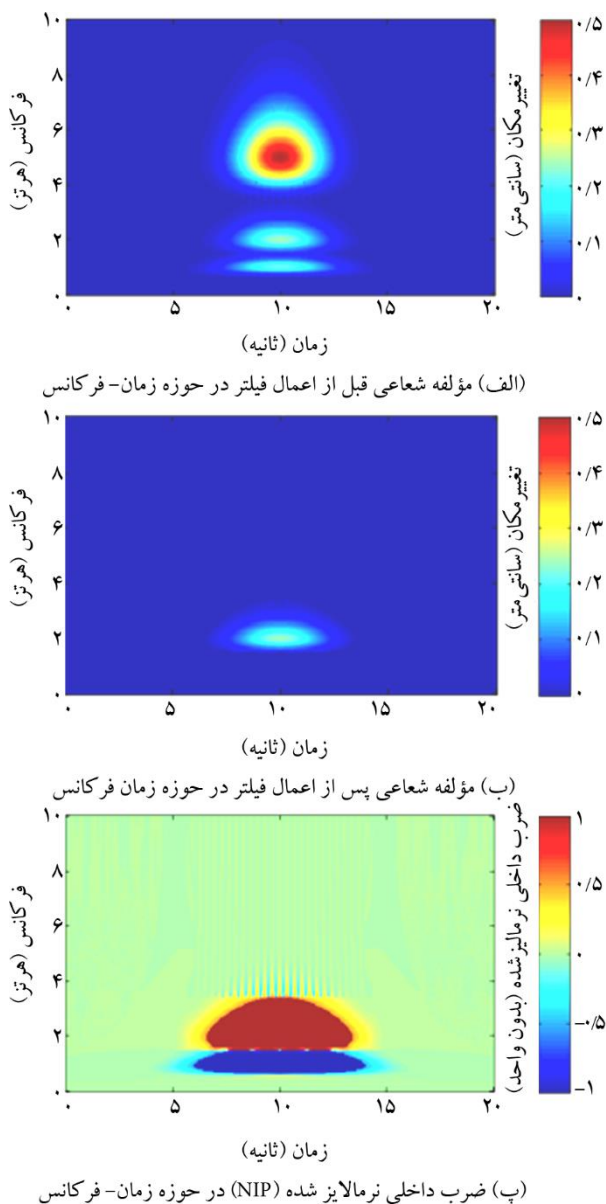


شکل (۵): سیگنال مصنوعی سینوسی.



شکل (۶): سه مؤلفه سیگنال مصنوعی.

ابتدا با استفاده از الگوریتم I که در این مطالعه معرفی شده، امواج ریلی از سه مؤلفه سیگنال مصنوعی استخراج شده است. در الگوریتم I که از تبدیل موجک پیوسته برای انتقال سیگنال به حوزه زمان-فرکانس استفاده شده، بازه فرکانسی ۰/۰۰۵ هرتز در نظر



شکل (۹): امواج ریلی پس رونده.

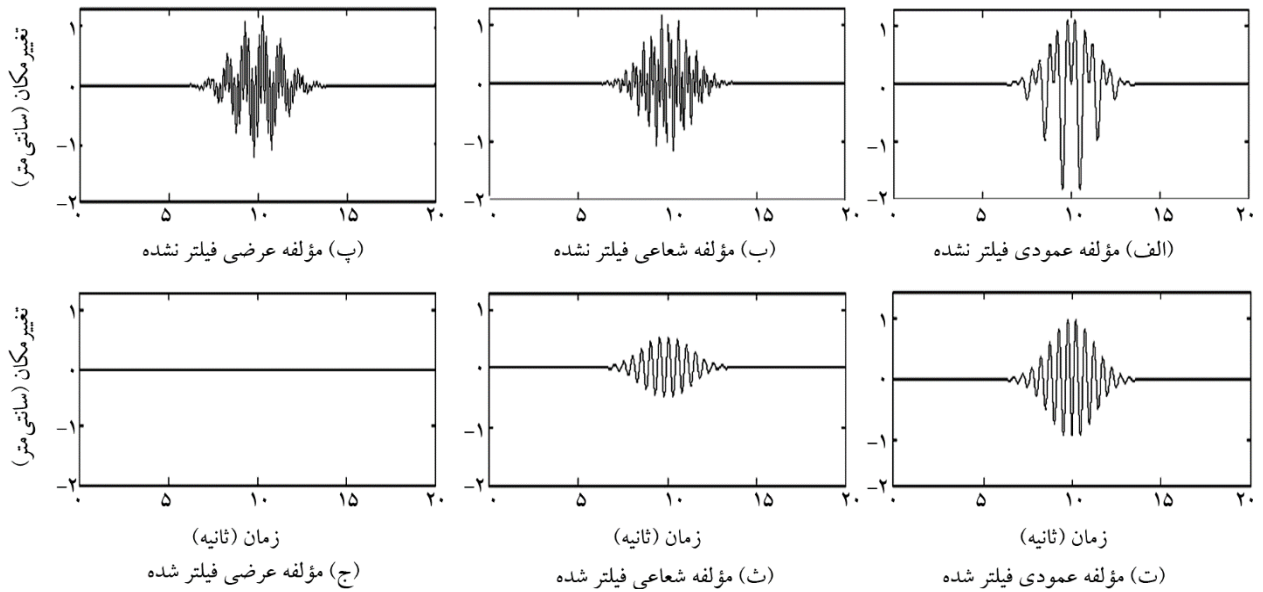
امواج ریلی پس رونده استخراج شده، در شکل (۱۱) آورده شده است. مشاهده می شود که تحلیل های صورت گرفته جهت استخراج امواج ریلی پس رونده از سیگنال های مصنوعی، از دقت بالایی برخوردار می باشند.

با استفاده از الگوریتم II و اعمال تأخیر فاز ۹۰ درجه به مؤلفه عمودی، امواج ریلی پیش رونده استخراج شده است. ضرب داخلی نرمالایز شده (NIP) مؤلفه شعاعی و مؤلفه عمودی با تأخیر فاز، مؤلفه شعاعی قبل از اعمال فیلتر و مؤلفه شعاعی بعد از اعمال فیلتر، در حوزه زمان-فرکانس، در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

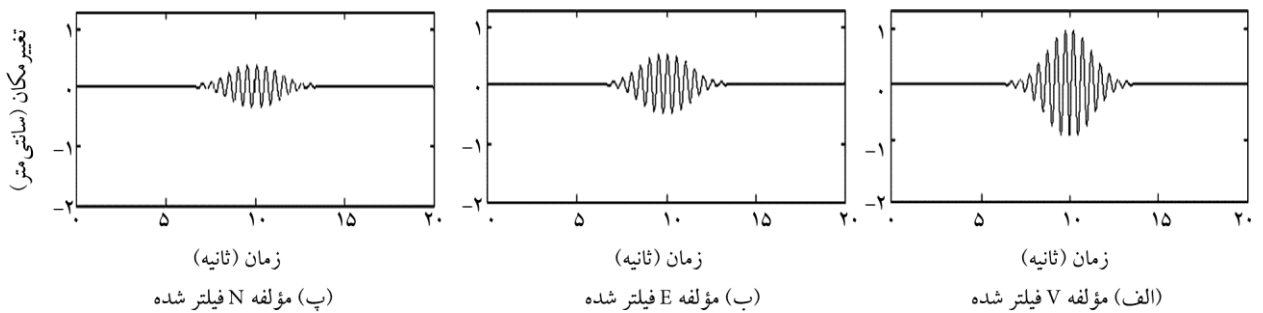
پس رونده و پیش رونده را باهم استخراج می کند، بنابراین با اعمال الگوریتم I به سیگنال های مصنوعی، پنجره های سینوسی ۱ و ۲ هر تزی باید به عنوان امواج ریلی استخراج گردند. با مقایسه امواج ریلی استخراج شده و امواج ریلی ایجاد شده در سیگنال مصنوعی، مشاهده می شود که الگوریتم I از دقت بالایی برخوردار است.

با استفاده از الگوریتم II، امواج ریلی پس رونده و پیش رونده از مؤلفه های N, E, V سیگنال مصنوعی استخراج شده اند. در این الگوریتم که از تبدیل استوکول برای انتقال سیگنال به حوزه زمان-فرکانس استفاده شده، بازه فرکانسی ۰/۰۵ هر تزی می باشد. با توجه به دوران اعمال شده، زاویه قطبیدگی موج ریلی پس رونده ۶۰ درجه و موج ریلی پیش رونده ۱۵۰ درجه (۹۰+۶۰) نسبت به محور N می باشد. با استفاده از الگوریتم II و اعمال تقدم فاز ۹۰ درجه به مؤلفه قائم، امواج ریلی پس رونده استخراج شده اند. مؤلفه شعاعی که در حوزه زمان-فرکانس بر اساس روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۴) محاسبه شده، در شکل (۹) نشان داده شده است. در شکل (۹-پ) ضرب داخلی نرمالایز شده (NIP) مؤلفه شعاعی و مؤلفه عمودی با تقدم فاز ۹۰ درجه نشان داده شده، که در محدوده قرمز رنگ تقریباً برابر یک است و باید به عنوان موج ریلی پس رونده استخراج شود. محدوده قرمز رنگ، سیگنال سینوسی ۲ هر تزی را نشان می دهد که دقیقاً همان موج ریلی پس رونده ای است که در سیگنال مصنوعی طبق روابط (۱۸) تا (۲۰) ایجاد شده است. در شکل (۱۰) مؤلفه های T, R و V سیگنال های فیلتر نشده و فیلتر شده برای امواج ریلی پس رونده نشان داده شده است. با توجه به مؤلفه عمودی استخراج شده برای امواج ریلی پس رونده (شکل ۱۰-الف)، مشاهده می شود که سیگنال، فرکانس ۲ هر تزی و دامنه حداکثر ۱ سانتی متر دارد که دقیقاً مطابق رابطه (۲۰) می باشد. به علاوه، مؤلفه شعاعی استخراج شده فرکانس ۲ هر تزی و دامنه حداکثر ۰/۵ سانتی متر دارد که مطابق رابطه (۱۹) است. زاویه انتشار موج ریلی پس رونده ۵۹/۸۰۳ به دست آمده است، که مقدار این زاویه در ایجاد سیگنال مصنوعی ۶۰ درجه لحاظ شده بود. بنابراین، موج ریلی پس رونده و زاویه استخراج شده با استفاده از الگوریتم II، تطابق مناسبی با شرایط اولیه لحاظ شده در تولید سیگنال مصنوعی دارند. مؤلفه های N, E, V

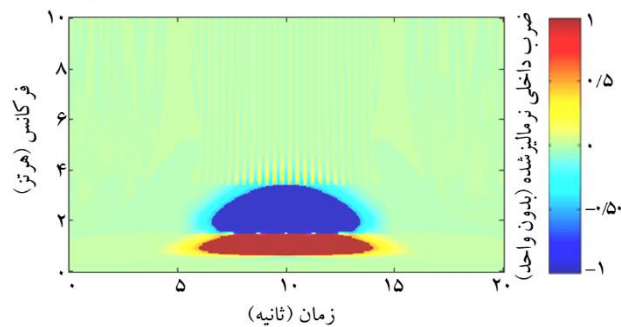
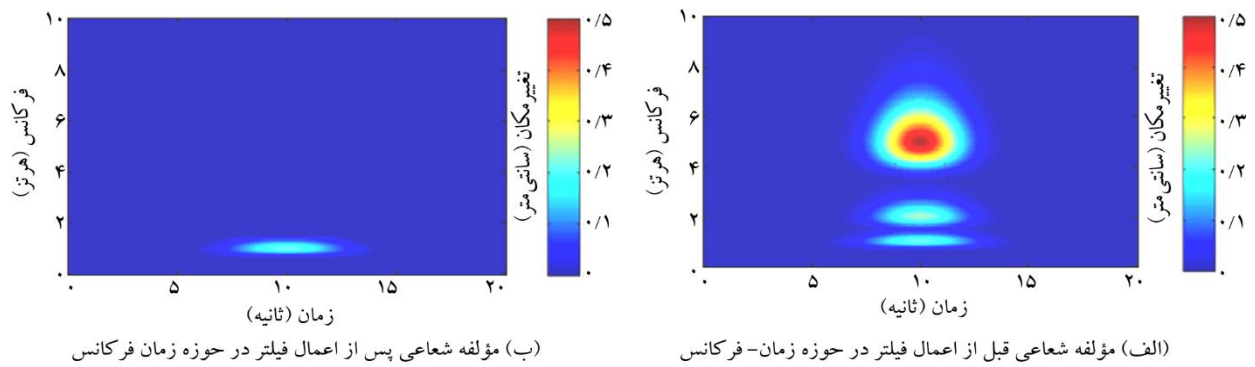




شکل (۱۰): امواج ریلی پس‌رونده.



شکل (۱۱): امواج ریلی پس‌رونده استخراج شده.



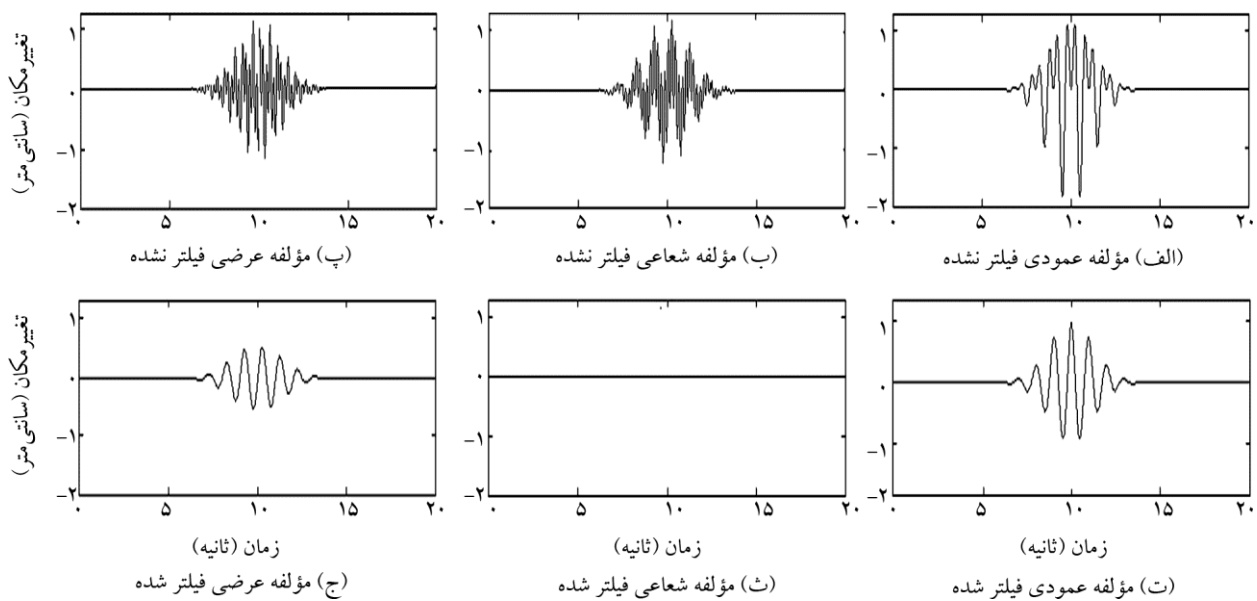
شکل (۱۲): امواج ریلی پیش‌رونده.

روابط (۱۸) تا (۲۰)، مؤلفه‌های عرضی امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده باید صفر باشند که با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۳) مشاهده می‌شود که دامنه این مؤلفه‌ها در طول زمان صفر است. مؤلفه‌های  $N$ ,  $E$ ,  $V$  امواج ریلی پیش‌رونده استخراج شده، در شکل (۱۴) آورده شده است.

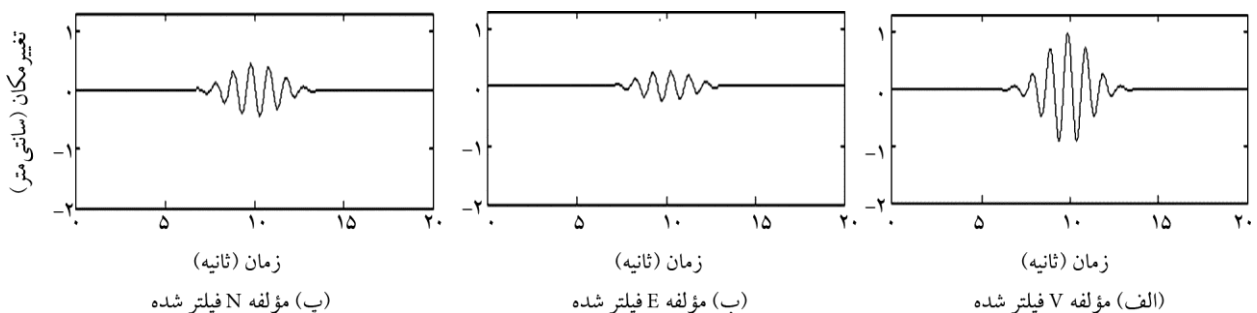
### ۲-۳- ارزیابی الگوریتم‌های I و II با استفاده از لرزه‌نگار واقعی

همان‌طور که مشاهده شد، تحلیل‌های صورت گرفته برای استخراج امواج ریلی از امواج مصنوعی (الگوریتم I و II)، از دقت بالایی برخوردار بودند. امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده شتاب‌نگاشت‌های پس‌لرزه زلزله چی چی در مرجع [۱۷] استخراج و ارائه شده است. برای اطمینان بیشتر از صحت تحلیل‌های صورت

با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که محدوده قرمز رنگ ضرب داخلی نرمالایز شده (NIP) که مقدار ۱ می‌باشد، در فرآیند استخراج امواج ریلی پیش‌رونده تغییر کرده است. محدوده قرمز رنگ، محدوده‌ای با فرکانس میانگین ۱ هرتز را نشان می‌دهد که در واقع همان فرکانسی است که بر اساس روابط (۱۸) تا (۲۰)، موج ریلی پیش‌رونده ایجاد شده است و باید استخراج گردد. مؤلفه‌های  $T$ ,  $R$  و  $V$  اولیه و امواج ریلی پیش‌رونده فیلتر شده، در شکل (۱۳) آورده شده‌اند. با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که سیگنال‌های عمودی و شعاعی استخراج شده به ترتیب فرکانس ۱ هرتز و دامنه ۱ سانتی‌متر و فرکانس ۱ هرتز و دامنه ۰/۵ سانتی‌متر دارند، که دقیقاً مطابق روابط (۱۸) تا (۲۰) می‌باشد. زاویه انتشار امواج ریلی پیش‌رونده ۱۵۰/۰۹۷۲ محاسبه شده است، که تقریباً با زاویه اعمال شده در ایجاد سیگنال مصنوعی برابر است. بر اساس



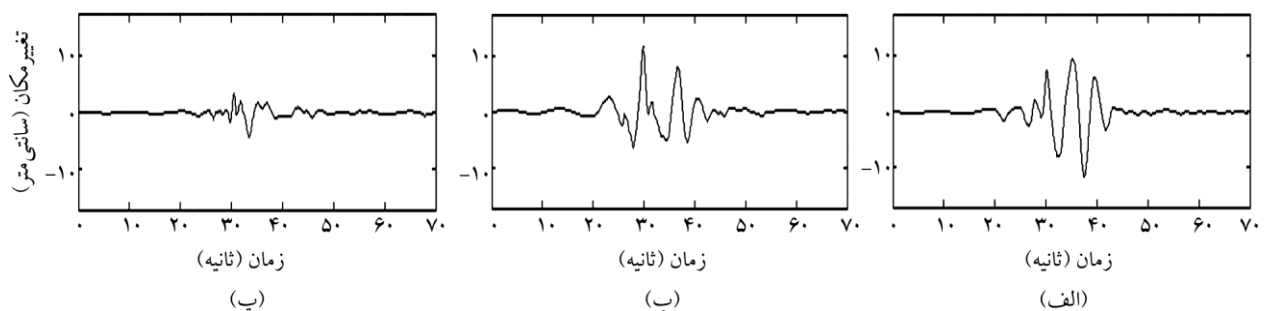
شکل (۱۳): امواج ریلی پیش‌رونده.



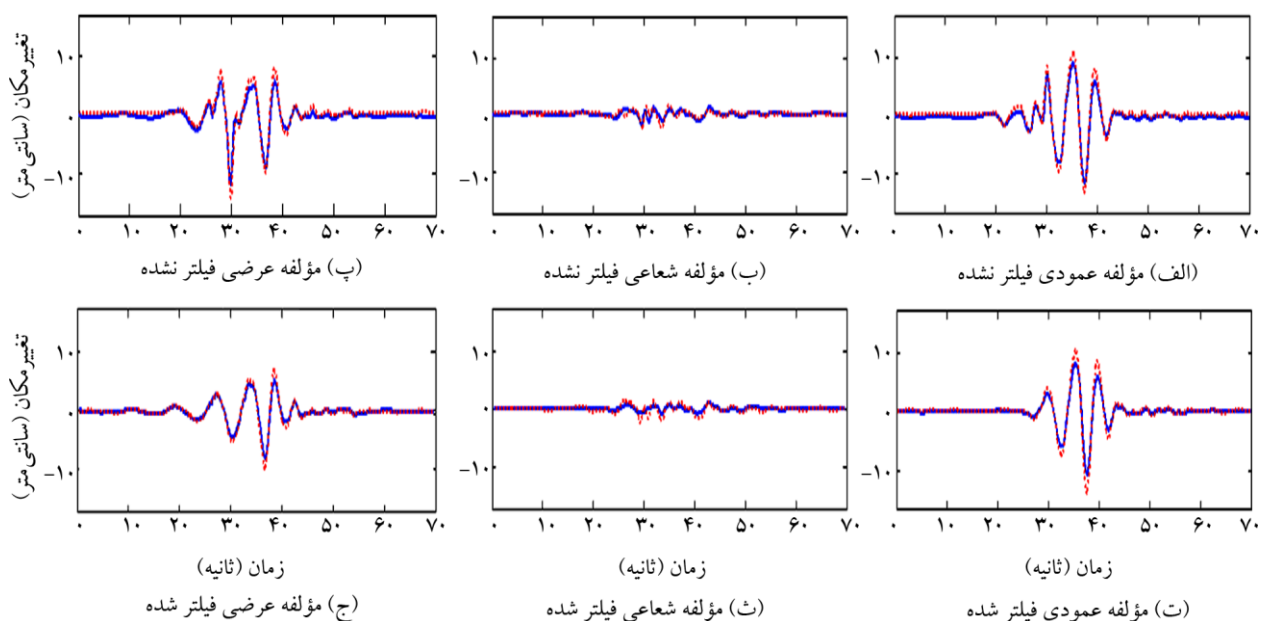
شکل (۱۴): امواج ریلی پیش‌رونده.

امواج ریلی شتاب‌نگاشت زلزله چی چی (ایستگاه TCU116)، با استفاده از الگوریتم I استخراج شده و در شکل (۱۸) با خط توپر نشان داده شده است. ترکیب امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده شتاب‌نگاشت زلزله چی چی که با استفاده از الگوریتم II استخراج شده، در شکل (۱۸) با خط چین نشان داده شده است. در بخش قبل با مقایسه نتایج مرجع [۱۷] و نتایج حاصل از الگوریتم II، از صحت الگوریتم II اطمینان حاصل شد. حال با توجه به شکل (۱۸) و مقایسه خروجی‌های حاصل از الگوریتم I و II، مشاهده می‌شود که الگوریتم I در استخراج امواج ریلی، عملکرد مناسبی دارد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از تحلیل سیگنال‌های مصنوعی و زلزله چی چی و مقایسه‌های صورت گرفته، از صحت تحلیل‌های انجام شده اطمینان حاصل شده است. در نتیجه هر یک از الگوریتم‌های I و II را می‌توان برای استخراج امواج ریلی استفاده نمود.

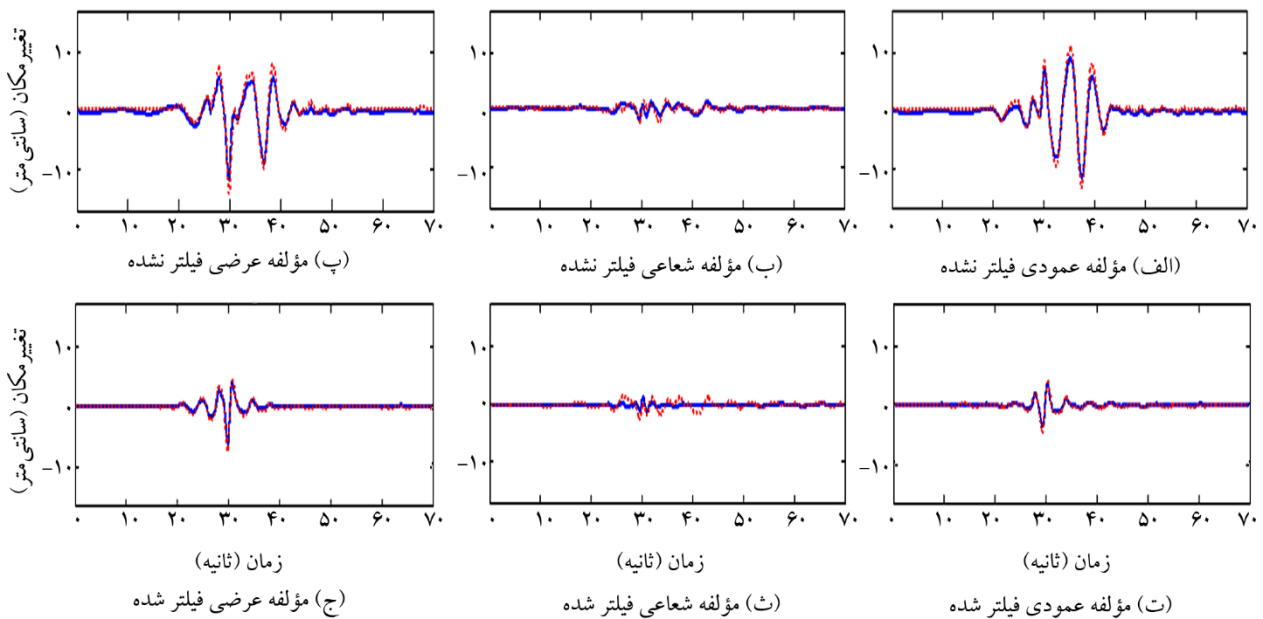
گرفته در مطالعه حاضر، امواج ریلی یکی از شتاب‌نگاشت زلزله چی چی با استفاده از الگوریتم II استخراج شده و با نتایج ارائه در مرجع [۱۷]، مقایسه شده است. سه مؤلفه تاریخچه زمانی تغییر مکان ایستگاه TCU116 پس‌لرزه زلزله چی چی (۱۹۹۹) در شکل (۱۵) نشان داده شده است. بر اساس الگوریتم II امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده، از سه مؤلفه مذکور استخراج شده و نتایج در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) آورده شده‌اند. با توجه به شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که داده‌های استخراج شده، مشابه نتایج ارائه شده توسط مز-فاجاردو و همکاران [۱۷] هستند. در مطالعه حاضر، زاویه انتشار امواج ریلی پس‌رونده ۲۵۷/۲۰۰۹ درجه و امواج ریلی پیش‌رونده ۲۸۲/۶۹۲۹ درجه به‌دست آمده است که این مقادیر در مرجع [۱۷]، به ترتیب ۲۵۷/۹۹۲۶ و ۲۸۲/۶۹۷۶ درجه محاسبه شده‌اند.



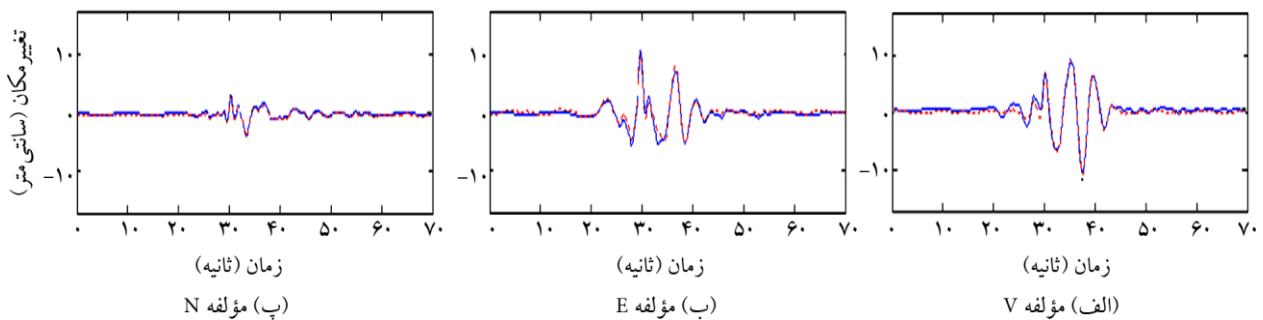
شکل (۱۵): مؤلفه‌های N, E, V تغییر مکان- زمان پس‌لرزه زلزله چی چی. (الف) V، (ب) E و (پ) N.



شکل (۱۶): امواج ریلی پس‌رونده (خط توپر نتایج مطالعه حاضر، خط چین نتایج مطالعه مز-فاجاردو و همکاران [۱۷]).



شکل (۱۷): امواج ریلی پیش‌رونده (خط توپر نتایج مطالعه حاضر، خط چین نتایج مطالعه مزا- فاجاردو و همکاران [۱۷]).



شکل (۱۸): امواج ریلی استخراج شده از شتاب‌نگاشت زلزله چی چی (خط توپر الگوریتم I، خط چین الگوریتم II).

جدول (۱): مشخصات زلزله‌های تحلیل شده.

فاصله گسل- ایستگاه (کیلومتر)	مدت زمان (ثانیه)	بزرگی (ریشر)	سال (میلادی)	ایستگاه	زلزله
۱/۷۹	۱۴۳	۷/۳۶	۱۹۷۸	طبس	طبس
۰/۰۵	۶۷	۶/۶	۲۰۰۳	بم	بم
۱۲/۵۵	۵۴	۷/۳۷	۱۹۹۰	ابهر	منجیل

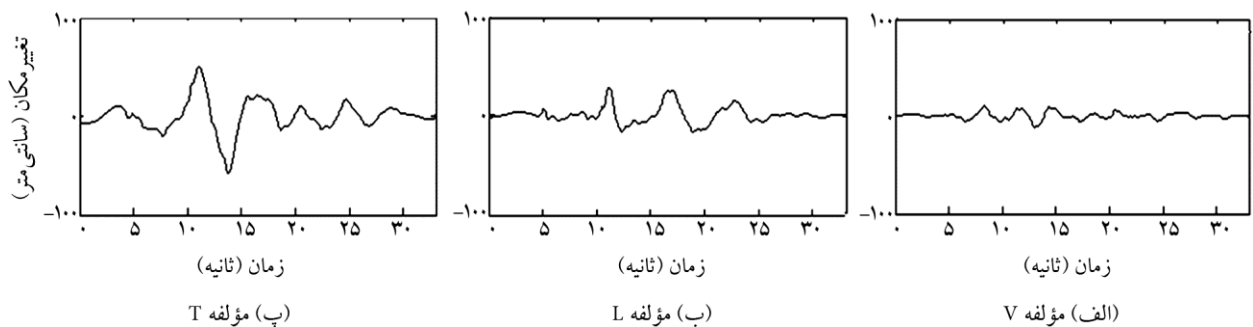
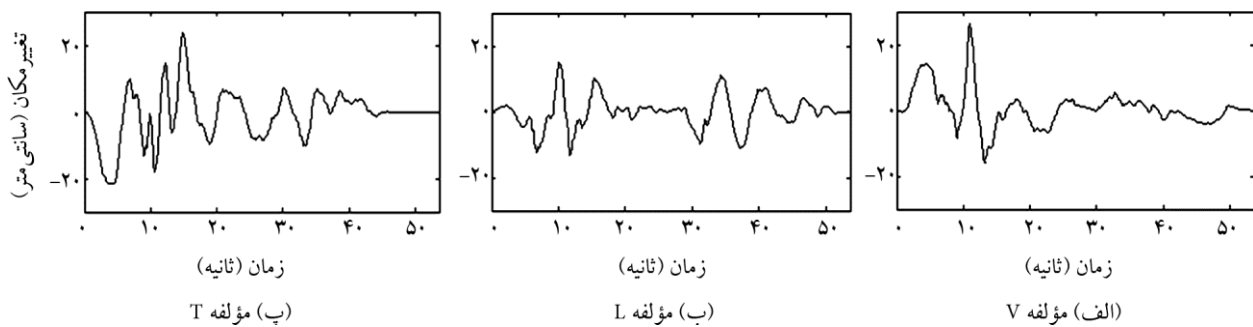
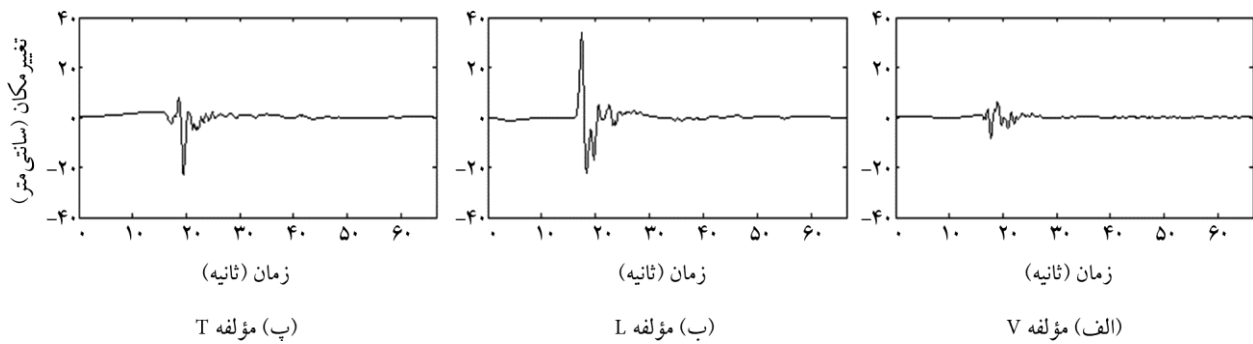
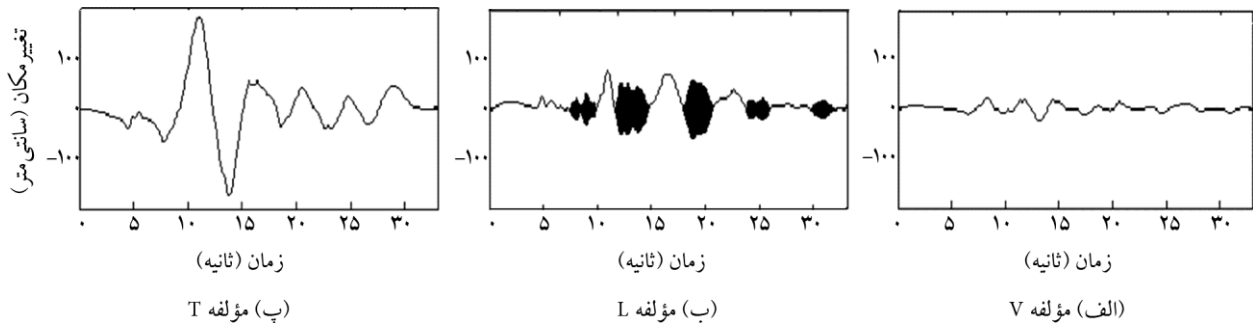
#### ۴- استخراج امواج سطحی زلزله‌های ایران

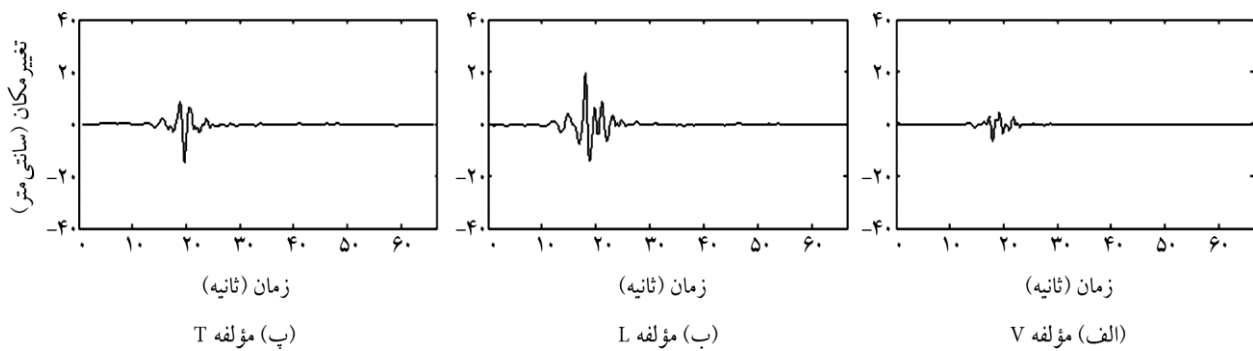
تاکنون مطالعه‌ای جهت استخراج امواج سطحی شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های ایران صورت نگرفته است. در مطالعه حاضر، امواج ریلی با استفاده از الگوریتم I و امواج ریلی پس‌رونده، پیش‌رونده و زاویه انتشار این امواج با استفاده از الگوریتم II از زلزله‌های طبس، بم و منجیل استخراج و نتایج ارائه شده است. مشخصات زلزله‌های مورد استفاده، در جدول (۱) آورده شده است.

فاصله زمانی شتاب‌نگاشت‌ها و بازه فرکانسی مورد استفاده در تبدیل‌های موجک پیوسته و تبدیل استوکول در جدول (۲) آورده شده است. سه مؤلفه (L, T, V) تغییر مکان- زمان زلزله‌های طبس، بم و منجیل، به ترتیب در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) آورده شده است. با استفاده از الگوریتم I، از سه مؤلفه تغییر مکان- زمان زلزله‌های مذکور، امواج ریلی براساس پارامتر بیضوی استخراج شده و در شکل‌های (۲۲) تا (۲۴) ارائه شده‌اند.

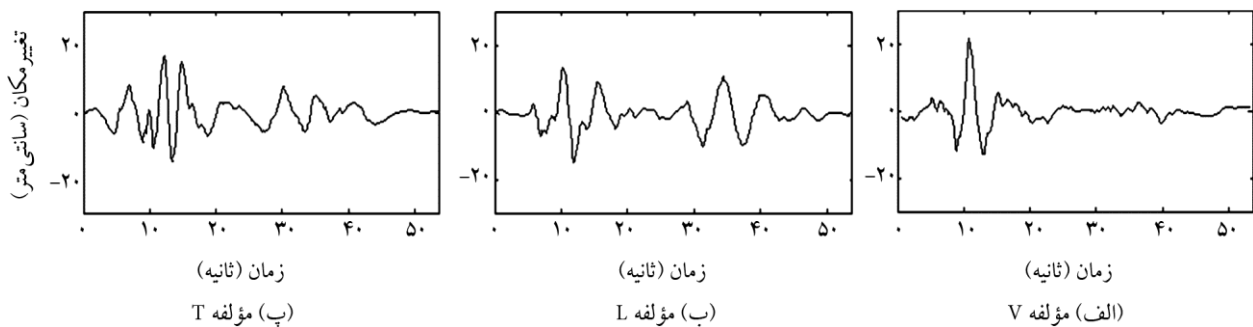
جدول (۲): بازه زمانی و فرکانسی زلزله‌های طبس، بم و منجیل.

زلزله	بازه زمانی (ثانیه)	بازه فرکانسی تبدیل استوکول (فرکانس)	بازه فرکانسی تبدیل موجک پیوسته (هرتز)
طبس	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۰۸
بم	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵
منجیل	۰/۰۲	۰/۰۱۸	۰/۰۰۸



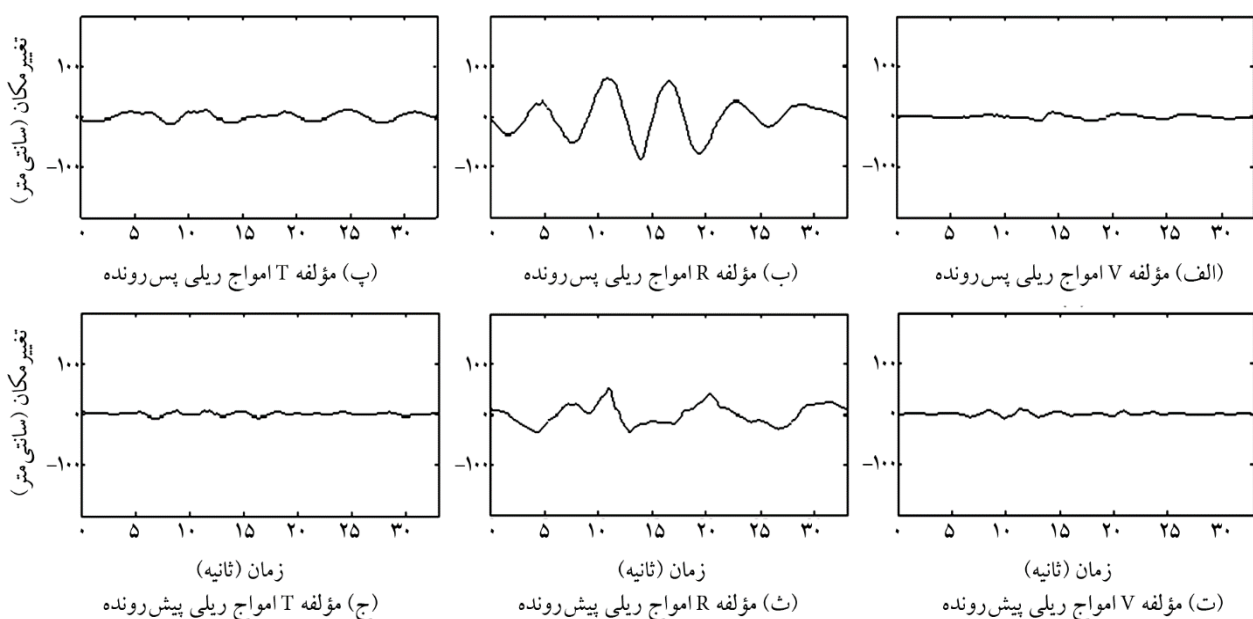


شکل (۲۳): امواج ریلی استخراج شده از زلزله بم با استفاده از الگوریتم I.

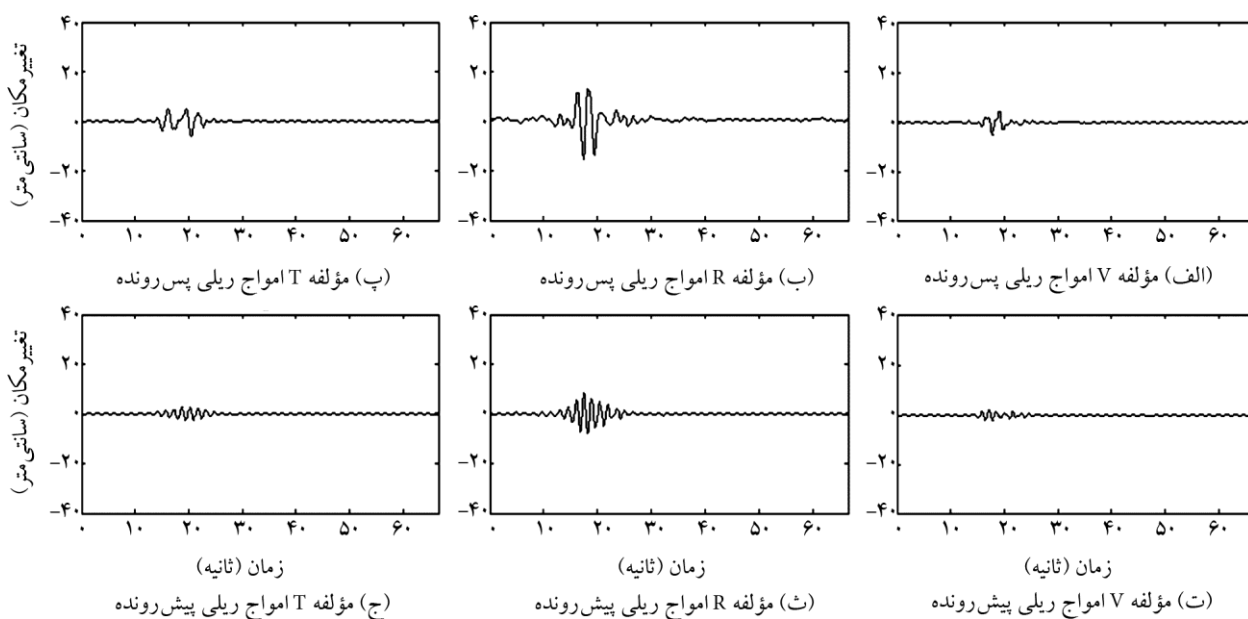


شکل (۲۴): امواج ریلی استخراج شده از زلزله منجیل با استفاده از الگوریتم I.

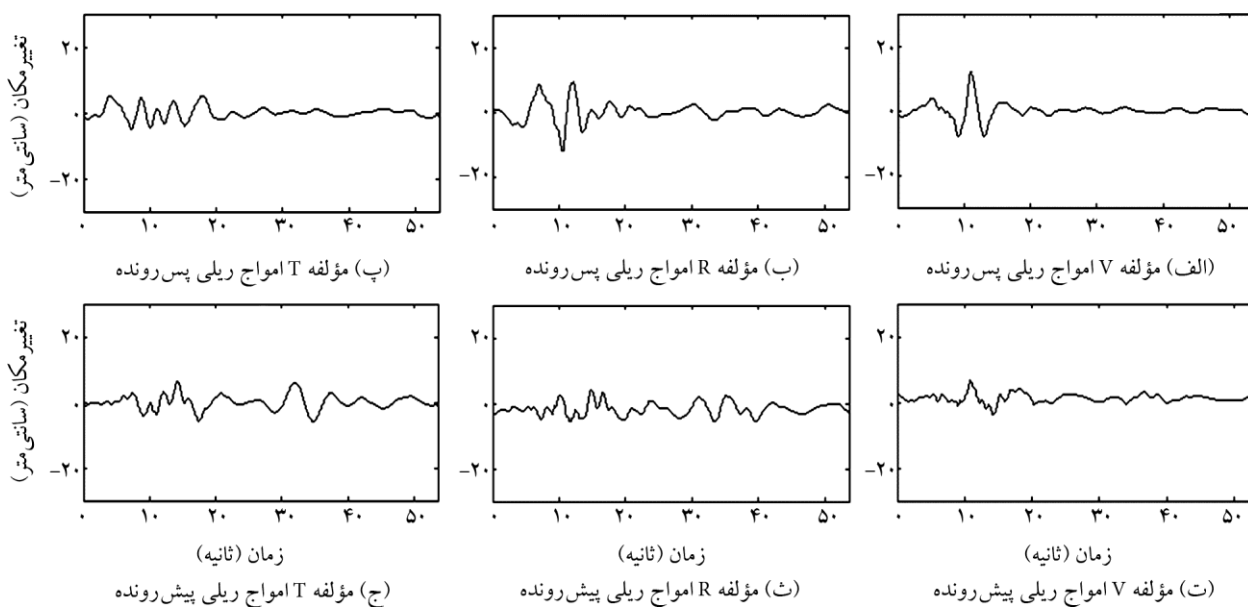
با استفاده از الگوریتم I امواج ریلی پس رونده و پیش رونده زلزله های مذکور تفکیک نشده اند. جهت تفکیک امواج ریلی پس رونده و پیش رونده از شتاب نگاشت زلزله های مذکور و استخراج جهت انتشار امواج II از الگوریتم II استفاده شده است. مؤلفه های R, T, V امواج ریلی پس رونده و پیش رونده با استفاده از الگوریتم II از زلزله های طبس، بم و منجیل استخراج شده و نتایج به ترتیب در شکل های (۲۵) تا (۲۷) و زاویه انتشار این امواج در جدول (۳) آورده شده است.



شکل (۲۵): امواج ریلی استخراج شده از زلزله طبس با استفاده از الگوریتم II.



شکل (۲۶): امواج ریلی استخراج شده از زلزله بم با استفاده از الگوریتم II.



شکل (۲۷): امواج ریلی استخراج شده از زلزله منجیل با استفاده از الگوریتم II.

جدول (۳): زاویه انتشار امواج ریلی زلزله‌های طبس، بم و منجیل.

زاویه ساعتگرد انتشار نسبت به مؤلفه طولی (درجه)		زلزله
امواج ریلی پیش‌رونده	امواج ریلی پس‌رونده	
۳۴۴/۳۱۲۲	۲۸/۶۳۴۵	طبس
۱۲۶/۲۶۹۳	۷۳/۸۰۱۶	بم
۲۲/۵۴۸۷	۳۱۵/۶۰۳۱	منجیل

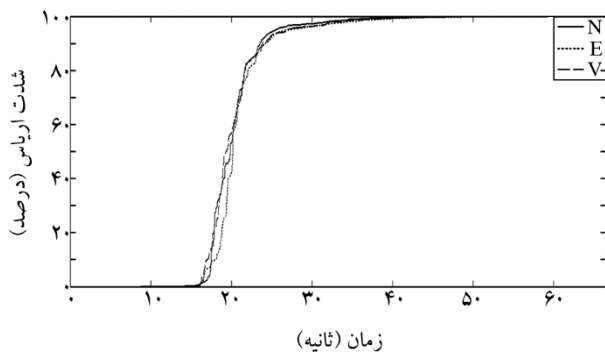
جابه‌جایی حداکثر مؤلفه‌های N, E, V زلزله‌های طبس، بم و منجیل، قبل و بعد از اعمال فیلتر در جدول (۴) آمده که مشاهده حرکت بیضوی ناشی از زلزله بیشتر از حرکت خطی می‌باشد. می‌شود امواج ریلی سهم زیادی از تغییر مکان زلزله دارند، یعنی

جدول (۴): حداکثر جابه‌جایی مؤلفه‌های  $L$ ,  $T$ ,  $V$  امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده استخراج شده و نسبت این امواج به حداکثر جابه‌جایی فیلتر نشده زلزله‌های طبس، بم و منجیل.

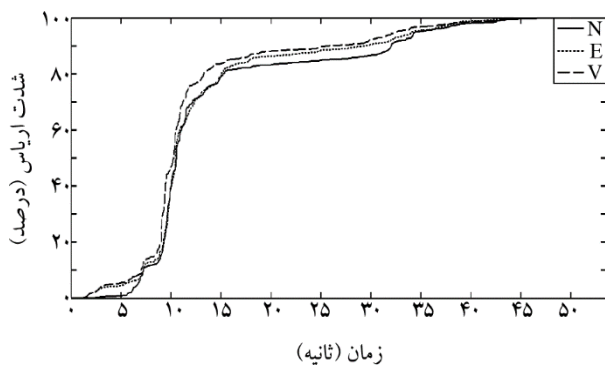
زلزله		حداکثر جابه‌جایی $L$ (سانتی‌متر)		حداکثر جابه‌جایی $T$ (سانتی‌متر)		حداکثر جابه‌جایی $V$ (سانتی‌متر)	
		پیش‌رونده	پس‌رونده	پیش‌رونده	پس‌رونده	پیش‌رونده	پس‌رونده
طبس	قبل از فیلتر	۳۳/۹۱		۲۳/۱۳		۸/۵۲	
	بعد از فیلتر	۸/۲۸	۱۵/۴۳	۳/۹۹	۱۱/۴۳	۲/۲۸	۵/۱۳
	نسبت جابه‌جایی	۰/۲۴۴	۰/۴۵۵	۰/۱۷۲	۰/۴۹۴	۰/۲۶۷	۰/۶۰۲
بم	قبل از فیلتر	۳۷/۵۰		۹۳/۵۶		۱۲/۲۷	
	بعد از فیلتر	۲۳/۳۵	۱۷/۴۷	۱۱/۱۸	۳۱/۷۶	۳/۱۷	۴/۹۸
	نسبت جابه‌جایی	۰/۶۲۲	۰/۴۶۵	۰/۱۱۹	۰/۳۳۹	۰/۲۵۸	۰/۴۰۵
منجیل	قبل از فیلتر	۱۴/۸۶		۲۳/۷۹		۲۶/۱۱	
	بعد از فیلتر	۶/۰۸	۹/۳۰	۶/۵۳	۱۰/۰۴	۷/۵۵	۱۲/۲۷
	نسبت جابه‌جایی	۰/۴۰۹	۰/۶۲۵	۰/۲۷۴	۰/۴۲۲	۰/۲۸۹	۰/۴۶۹

تخلیه انرژی در طول زمان براساس شدت اریاس ارائه شده است. شدت اریاس کل سیگنال با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a(t)^2 dt \quad (21)$$



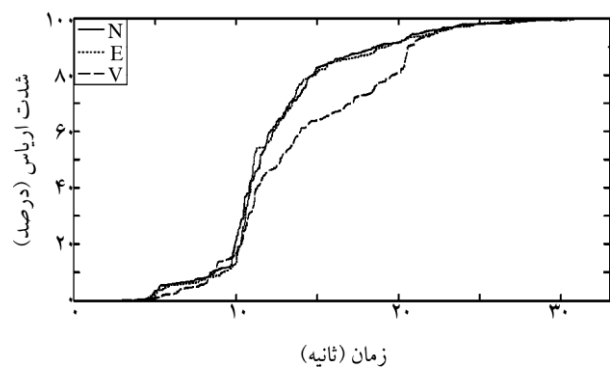
شکل (۲۹): تخلیه انرژی امواج ریلی سه مؤلفه شتاب‌نگاشت زلزله بم در طول زمان.



شکل (۳۰): تخلیه انرژی امواج ریلی سه مؤلفه شتاب‌نگاشت زلزله منجیل در طول زمان.

با مقایسه امواج ریلی پیش‌رونده و امواج ریلی پس‌رونده نتیجه می‌شود که معمولاً دامنه امواج ریلی پس‌رونده بیشتر از امواج ریلی پیش‌رونده است. به عبارت دیگر، در شتاب‌نگاشت‌ها، سهم امواج ریلی پس‌رونده بیشتر از امواج ریلی پیش‌رونده بوده، در نتیجه امواج ریلی پس‌رونده نسبت به امواج ریلی پیش‌رونده مخرب‌تر می‌باشند.

همچنین با مقایسه نسبت تغییر مکان حداکثر امواج ریلی استخراج شده، به تغییر مکان حداکثر شتاب‌نگاشت فیلتر نشده سه زلزله طبس، بم و منجیل مشاهده می‌شود که سهم امواج ریلی در این سه زلزله متفاوت است. در این مطالعه نحوه تخلیه انرژی امواج ریلی در طول زمان، برای سه مؤلفه شتاب‌نگاشت زلزله‌های طبس، بم و منجیل تهیه و در شکل‌های (۲۸) تا (۳۰) آورده شده است.



شکل (۲۸): تخلیه انرژی امواج ریلی سه مؤلفه شتاب‌نگاشت زلزله طبس در طول زمان.



2. Flinn, E.A. (1965) Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion. *Proc. IEEE*, **53**, 1874-1876.
3. Montalbetti, J.F. and Kanasevich, E.R. (1970) Enhancement of teleseismic body phases with a polarization filter. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **21**, 119-129.
4. Vidale, J.E. (1986) Complex polarization analysis of particle motion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**, 1393-1405.
5. Morozov, I.B. and Smithson, S.B. (1996) Instantaneous polarization attributes and directional filtering. *Geophysics*, **61**, 872-881.
6. Simons, R.S. (1968) A surface wave particle motion discrimination process. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 629-637.
7. Samson, J.C. and Olson, J.V. (1980) Some comments on the descriptions of the polarization states of waves. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **61**, 115-129.
8. Diallo, M.S., Kulesh, M., Holschneider, M., and Scherbaum, F. (2005) Instantaneous polarization attributes in the time-frequency domain and wavefield separation. *Geophysical Prospecting*, **53**, 723-731.
9. Diallo, M.S., Kulesh, M., Holschneider, M., Scherbaum, F., and Adler, F. (2006) Characterization of polarization attributes of seismic waves using continuous wavelet transforms. *Geophysics*, **71**, V67-V77.
10. Kulesh, M., Diallo, M.S., Holschneider, M., Kurennaya, K., Kruger, F., Ohrnberger, M., et al. (2007) Polarization analysis in the wavelet domain based on the adaptive covariance method. *Geophysical Journal International*, **170**, 667-78.
11. Kulesh, M., Holschneider, M., and Diallo, M.S. (2008) Geophysical wavelet library applications of continuous wavelet transform to the polarization and dispersion analysis of signals. *Computers and Geosciences*, **34**, 12, 1732-52.
12. Anant, K. and Dowla, F. (1997) Wavelet transform methods for phase identification in three-component seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**, 1598-612.

## ۵- نتیجه گیری

شتاب‌نگاشت‌های زلزله، متشکل از امواج حجمی و سطحی می‌باشد. امواج سطحی به دو نوع امواج ریلی و لاو تقسیم می‌گردد که در این مطالعه به استخراج امواج ریلی پرداخته شد. در این مطالعه از دو الگوریتم متفاوت، برای استخراج امواج ریلی از سه مؤلفه شتاب‌نگاشت در حوزه زمان-فرکانس استفاده شد. کد نویسی الگوریتم‌های مورد استفاده، در زبان برنامه‌نویسی متلب صورت گرفت. با استفاده از امواج ریلی استخراج شده، از سیگنال‌های مصنوعی و پس‌لرزه زلزله چی‌چی، از صحت تحلیل‌های صورت گرفته اطمینان حاصل شد. امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده از سه مؤلفه زلزله‌های طبس، بم و منجیل استخراج و باهم مقایسه شد. نتایج حاصل از مقایسه دو الگوریتم مورد استفاده و امواج ریلی استخراج شده از زلزله‌های مذکور به شرح زیر می‌باشد.

۱. در صورتی که نیازی به تفکیک امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده نباشد می‌توان از الگوریتم I استفاده کرد. استفاده از الگوریتم I نسبت به الگوریتم II ساده‌تر بوده و از سرعت محاسبات بالاتری برخوردار می‌باشد. ولی در صورتی که نیاز به تفکیک امواج ریلی پس‌رونده و پیش‌رونده باشد، حتماً باید از الگوریتم II استفاده شود.
۲. امواج ریلی نسبت به سایر امواج، سهم بیشتری از شتاب‌نگاشت زلزله داشته و در نتیجه، قطبیدگی بیضوی ناشی از زلزله، بیشتر از قطبیدگی خطی می‌باشد.
۳. دامنه امواج ریلی پس‌رونده معمولاً بیشتر از امواج ریلی پیش‌رونده می‌باشد.
۴. در زلزله‌ها و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مختلف، سهم امواج ریلی از شتاب‌نگاشت‌ها متفاوت می‌باشد. نسبت تغییر مکان حداکثر امواج ریلی استخراج شده، به شتاب‌نگاشت فیلتر نشده، در زلزله منجیل بیشتر از زلزله طبس و بم می‌باشد.

## مراجع

1. Salvador, Bahaia (1999) *Seismic Surface Waves*. Instituto de Fisica, Instituto de Geociencias.

13. Galiana-Merino, J.J., Rosa-Herranz, J., Jauregui, P., Molina, S., and Giner, J. (2007) Wavelet transform methods for azimuth estimation on local three-component seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(3), 793-803.
14. Galiana-Merino, J.J., Parolai, S., and Rosa-Herranz, J. (2011) Seismic wave characterization using complex trace analysis in the stationary wavelet packet domain. *Soil Dynam. Earthq. Eng.*, **31**(11), 1565-1578.
15. D'Auria, L., Giudicepietro, F., Martini, M., Orazi, M., Peluso, R., and Scarpatò, G. (2010) Polarization analysis in the discrete wavelet domain: an application to volcano seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(2), 670-683.
16. Pinnegar, C.R. (2006) Polarization analysis and polarization filtering of three-component signals with the time-frequency S transform. *Geophys. J. Int.*, **165**, 596-606.
17. Meza-Fajardo, K.C., Papageorgiou, A.S., and Semblat, J.-F. (2015) Identification and extraction of surface waves from three-component seismograms based on the normalized inner product. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**, 210-229.
18. Stockwell, R.G., Mansinha, L., and Lowe, R. (1996) Localization of the complex spectrum: the S transform. *IEEE Trans. Signal Process*, **44**(4), 998-1001.

#### واژه‌نامه

Dispersive	۱- پراکنده
Polarization	۲- قطبیدگی
Continuous Wavelet Transform	۳- تبدیل موجک پیوسته
Discrete Wavelet Transform	۴- تبدیل موجک گسسته
Stockwell Transform	۵- تبدیل استوکول
Retrograde	۶- پس‌رونده
Prograde	۷- پیش‌رونده
Matlab	۸- متلب
Gaussian Window	۹- پنجره گاسین
Normalized Inner Product	۱۰- ضرب داخلی نرمالایز شده

## Extracting Rayleigh Waves of Iran Earthquakes from Three-Component Signals in Time-Frequency Domain

Pouya Naghshin<sup>1\*</sup>, Hadi Bahadori<sup>2</sup>, and Abbass Eslami Haghight<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran,  
\*Corresponding Author, email: Pouya.naghshin@gmail.com

2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Rayleigh waves can be more destructive in comparison with other types of waves during earthquakes. Identification and extraction of Rayleigh waves from seismic records can be more exactly performed in time-frequency domain. In the present study, continuous wavelet transform and Stockwell transform have been used to transfer three-components of seismic signals to time-frequency domain. Rayleigh waves can be extracted based on elliptical characteristics of these waves. On the other hand, retrograde and prograde Rayleigh waves and their propagation azimuth can be separately extracted with phase transferring of vertical component as well as normalized inner product technique. In the present study, the mentioned two algorithms have been programmed. Accuracy of the methods has been verified with using synthetic and Chi-Chi earthquake data. Finally, Rayleigh waves and their seismic parameters have been extracted from Tabas, Bam and Manjil earthquake records. Rayleigh waves of the earthquakes have been analyzed and compared with using different seismic parameters. According to the results, retrograde Rayleigh waves are more predominant in comparison with prograde Rayleigh waves in earthquake signals.

### Introduction

Extraction of Rayleigh waves is one of the important tasks in seismology and applied geophysics due to their destructive effects. A lot of study has been conducted in order to develop an effective method for the extraction of Rayleigh waves. Most of these methods have been presented based on the ellipticity characteristics of Rayleigh waves. Each of them has their advantages and disadvantages. In this study, two techniques have been investigated, programmed and compared with each other.

### Methodology and Approaches

Rayleigh waves have been extracted from three-component signals in time-frequency domain in both of the investigated methods. In the first algorithm, continuous wavelet transform has been used to transfer three components of signals from time to time-frequency domain. However, Stockwell transform has been used to perform this approach in the second algorithm. Stockwell transform retains the absolute phase of each localized frequency component, the characteristic of which is required in the second algorithm for time-frequency transform. On the other hand, Rayleigh waves have been extracted based on the instantaneous reciprocal ellipticity and phase difference in the first and the second algorithms, respectively. The most important advantages of the second algorithm is that retrograde and prograde Rayleigh waves and their propagation azimuth can be separately extracted while it is not possible in the second algorithm.

In this study, both of these algorithms have been clearly illustrated by flowcharts and programmed in Matlab. Synthetic signals and Chi-Chi earthquake signals have been used for verification. After verification, results of both algorithms have been compared, and finally they have been employed in extracting Rayleigh waves of Tabas, Bam and Manjil earthquakes. Finally, maximum displacements of Rayleigh waves and total earthquake signals have been investigated and compared in these three earthquakes. In addition, energy discharge of extracted Rayleigh waves during the earthquakes have been investigated.

### Results and Conclusions

Results of the study showed that the first algorithm can be effectively used if there is not required to extract retrograde and prograde Rayleigh waves and also their propagation azimuth separately. It is due to the fact that the algorithm is simpler and faster in comparison with the second algorithm. However, the second algorithm should be employed on the condition that the extraction of retrograde and prograde Rayleigh waves and their propagation azimuth have been required. In addition, it has been concluded that Rayleigh waves have more energy in earthquake signals compared to other types of waves. Consequently, elliptical polarization is more than linear polarization in earthquakes. In comparison of retrograde and prograde Rayleigh waves, it has been concluded that retrograde Rayleigh waves have more energy and therefore they can be more destructive. Finally, it has been resulted that ratio of Rayleigh waves are different in earthquakes. Induced displacement by Rayleigh waves in Manjil earthquake was more than Bam and Tabas earthquakes.

**Keywords:** Rayleigh Waves, Time-Frequency Domain, Three-Component Signal, Matlab, Stockwell Transform, Continuous Wavelet Transform.