



دوره 6، شماره ۲، ۱۳۹۹، صفحات ۲۷۵-۲۸۷ (DOI): 10.22044/JRAG.2020.9125.1270) شناسه دیجیتال



شناسایی و استخراج امواج ریلی از شتابنگاشتهای سه مولفهای براساس مشخصات قطبیدگی در حوزه زمان-فرکانس

پویا نقشین^۱°، هادی بهادری^۲ و عباس اسلامی حقیقت^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران ۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران ۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹

* نویسنده مسئول مکاتبات: pouya.naghshin@gmail.com

چکیدہ	واژگان کلیدی
معمولا در زمینلرزهها، امواج سطحی تغییر مکانهای بیشتری نسبت به امواج حجمی در سطح زمین ایجاد میکنند. از طرف	
دیگر، تغییر مکان ناشی از امواج ریلی به صورت بیضی میباشد. در نتیجه، امواج ریلی اثرات مخربتری نسبت به سایر امواج	
بر روی سازههای واقع در سطح زمین دارند. بنابراین، یکی از وظایف مهم در لرزهشناسی و ژئوفیزیک کاربردی، شناسایی و	
استخراج امواج سطحی به خصوص امواج ریلی میباشد. مطالعات متعددی به این منظور صورت گرفته است. در بشتر مطالعات،	
شناسایی و استخراج امواج سطحی صرفاً در حوزه زمان و یا حوزه فرکانس انجام شده است. البته با توجه به محدودیتهای	
موجود در حوزه زمان یا فرکانس، در مطالعات اخیر، شناسایی امواج سطحی در حوزه ترکیبی زمان-فرکانس صورت گرفته	امواج ريلي
است. تبدیلهای متعددی برای انتقال سیگنالها به حوزه زمان-فرکانس معرفی شده است. با توجه به این که شتابنگاشتهای	شتابنگاشت سه مولفهای
زلزله غير ايستا و نامنظم مىباشند؛ دقت استخراج امواج از سيگنالها بسيار وابسته به تبديل زمان-فركانس مورد استفاده	حوزه زمان-فرکانس
است. در این مطالعه، از تبدیل موجک پیوسته فشردهسازی همزمان (SSCWT)، برای انتقال سیگنال به حوزه زمان-فرکانس	تبديل موجک پيوسته فشردهسازی همزمان
استفاده شده است. این تبدیل از تباین بیشتری نسبت به سایر تبدیلها برخوردار میباشد و پراکندگی این تبدیل نسبت به	مشخصات قطبيدكى
سایر تبدیلها کمتر است. در این مطالعه به منظور استخراج امواج ریلی از شتابنگاشتهای سه مولفهای هر ایستگاه، از	متلب
مشخصه اصلی امواج ریلی که حرکت بیضوی میباشد؛ استفاده شده است. پارامتر مورد استفاده برای استخراج امواج ریلی،	
نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی میباشد. بدین منظور از نرمافزار متلب برای کدنویسی روش ارائه شده استفاده شده	
است. در این مقاله، ابتدا با استفاده از یک سیگنال مصنوعی غیر ایستا، اهمیت تبدیل ذکر شده، نسبت به سایر تبدیلها	
ارزیابی شده است. سپس سیگنالهای مصنوعی سه مولفهای ایجاد شدهاند؛ که صحت تحلیلها بر اساس آنها ارزیابی شده	
است. در نهایت، پس از اطمینان از صحت الگوریتم و کدها، امواج ریلی چند زلزله واقعی استخراج و ارائه شده است.	

۱- مقدمه

امواج ناشی از زمین لرزه، دادههای مهمی از لایهبندی محیطی که در آن منتشر شدهاند؛ را در بردارند. از طرفی دیگر، تغییر مکانی که امواج مختلف در سطح زمین ایجاد می کنند؛ متفاوت است. بنابراین شناسایی و استخراج انواع موج از لرزهنگارها از اهمیت زیادی برخوردار میباشد. امواج براساس تمرکز انرژی به دو دسته کلی امواج حجمی و سطحی تقسیم میشوند. همچنین براساس نوع حرکت، امواج حجمی به دو نوع امواج فشاری و برشی و امواج سطحی به دو نوع ریلی و لاو تقسیم می گردند. امواج فشاری، برشی عبارت دیگر، حرکت ناشی از امواج فشاری، برشی و لاو به صورت خطی در جهتهای مختلف و حرکت ناشی از امواج ریلی به صورت بیضوی قطبیده می شوند. به میباشد. به دلیل نوع حرکت و انرژی بالای امواج ریلی مشاسایی و استخراج میباشد. به دلیل نوع حرکت و انرژی بالای امواج ریلی، شناسایی و استخراج این امواج اهمیت زیادی دارد.

از اواخر قرن بیستم، بیشتر مطالعات برای شناسایی امواج سطحی از شتابنگاشتهای زلزله در حوزه زمان-فرکانس صورت گرفته است. در این مطالعات از تبدیل های مختلفی برای انتقال سیگنال ها به حوزه زمان-فرکانس استفاده شده است. تبدیلهای موجک پیوسته (Continuous Wavelet Transform)، موجک گسسته (Wavelet) Transform) و استوكول (Stockwell) به ترتيب در مطالعات (Transform et al., 2005; Diallo et al., 2006; Kulesh et al., 2007; Kulesh Anant and Dowla, 1997; Galiana-Merino et) .(et al., 2008 (al., 2007; D'Auria et al., 2010; Galiana-Merino et al., 2011 و (Pinnegar, 2006; Meza-Fajardo et al., 2015) مورد استفاده قرار گرفته است. در تحلیلهای زمان-فرکانسی نوع تبدیل تأثیر بسزایی در دقت محاسبات دارد. در سال ۲۰۱۱، تبدیل موجک فشردهسازی همزمان ۱ ارائه شد (Daubechies et al., 2011). این روش باعث متمرکز شدن و کاهش پراکندگی سیگنالها در حوزه زمان-فرکانس می گردد. از روش فشردهسازی همزمان و سایر تبدیلها برای افزایش تفکیک پذیری در بیشتر مطالعات پردازش سیگنال در زمینههای مختلفی شامل زمین شناسی، مهندسی برق و ... استفاده شده است (Abdzadeh-Ziabari and G. Shayesteh,)

1 SynchroSqueezed Wavelet Transform

2 Chichi

روشهای متعددی برای استخراج امواج ریلی از شتابنگاشتهای سه مولفهای ارائه شده است. با توجه به غیرایستایی و پیچیدگی شتابنگاشتهای زلزلهها، در این مطالعه به منظور افزایش دقت تحلیل، از تبدیل موجک پیوسته فشردهسازی همزمان (SSCWT) برای استخراج امواج ریلی در حوزه زمان-فرکانس از شتابنگاشتهای سه مولفه ای استفاده شده است. در این مطالعه پس از انتقال سه مولفه تغییر مکان به حوزه زمان-فرکانس با تبدیل مذکور، از پارامتر نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ، برای فیلتر کردن امواج ریلی استفاده شده است. کدنویسی و تحلیل الگوریتم معرفی شده، در نرمافزار متلب انجام شده است. به منظور بررسی دقت تبدیل مورد استفاده در این مطالعه نسبت به سایر تبدیلها، یک سیگنالی مصنوعی غیر ایستا ایجاد شد و خروجیهای تبدیلهای مختلف با هم مقایسه شدند. در این تحقیق، صحت تحلیلها با استفاده از یک سیگنال مصنوعی سه مولفهای ارزیابی شده است. در نهایت امواج ریلی از سیگنال مصنوعی سه مولفهای ارزیابی شده است. در نهایت امواج ریلی از ستخراج و بررسی شدهانی سرپل ذهاب، بم، چیچی ۲ و لوما پریتا۳

۲- الگوريتم

.(2011

برای استخراج امواج ریلی از سیگنالهای سه مولفهای، ابتدا هر سه مولفه با استفاده از تبدیلی به حوزه زمان-فرکانس انتقال داده می شود. دقت تبدیل زمان-فرکانس در تحلیلهای سیگنالی اهمیت زیادی دارد. روشهای مختلفی برای افزایش تفکیک پذیری سیگنال در حوزه زمان-فرکانس ارائه شده است (مهدوی و همکاران ۱۳۹۸، مهدوی و همکاران ۱۳۹۸، ملائی و همکاران ۱۳۹۲، علائی و همکاران ۱۳۹۵، گودرزی و همکاران ۱۳۹۷) که در این تحقیق از تبدیل موجک پیوسته فشرده شده، همزمان استفاده شده است. این تبدیل بر پایه تئوری تجزیه مود تجربی (EMD) میباشد (Daubechies et al., 2011). تبديل موجك پيوسته فشرده شده همزمان، تبديل زمان-فركانسي بر اساس تبديل موجك پيوسته ميباشد؛ که همانند تئوری تجزیه مود تجربی، قابلیت تجزیه سیگنال به توابع مود ذاتی را دارد. تبدیل موجک پیوسته انرژی سیگنال را حول فرکانس لحظهای سیگنال اصلی پراکنده میکند. در تبدیل موجک پیوسته فشرده شده همزمان، به منظور متمرکز کردن انرژی حول فرکانس لحظهای، فشردهسازى ضرايب بدست آمده از تبديل موجك پيوسته براساس فركانس لحظهای صورت می گیرد (Goltashi et al., 2015). این فرآیند باعث افزایش تمرکز و تفکیک پذیری در تصویر صفحه زمان-فرکانس می گردد. با افزایش تفکیک پذیری و تمرکز در سیگنالهای چند مولفهای امکان تفکیک مدهای مختلف امواج با دقت بالا فراهم می گردد.

در این مطالعه، از تبدیل موجک پیوسته فشردهسازی همزمان مطابق روابط ۱ تا ۳ برای انتقال تابع x(t) به حوزه زمان-فرکانس استفاده شده است.

3 Loma Prieta

$$W_{x}(a,b) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\Psi}(\frac{t-b}{a}) dt$$

$$w(a,b) = -iW_{x}(a,b)^{-1} \frac{\partial W_{x}(a,b)}{\partial b}$$

$$T_{x}(w_{l},b) = \Delta w^{-1} \sum_{a_{k}:|w(a_{k},b)-w_{l}| \leq \frac{\Delta w}{2}} W_{x}(a_{k},b) a_{k}^{-\frac{3}{2}} \Delta a_{k}$$

(1)

در این رابطهها، $\Psi(t)$ موجک مادر، a فاکتور مقیاس، d متغیر انتقال (معرف زمان)، $\Psi_x(a,b)$ خروجی تبدیل موجک پیوسته در زمان d و فرکانس a، (a,b) فرکانس لحظهای، W_l فرکانس تعریف شده در تبدیل موجک پیوسته فشردهسازی همزمان و $T_x(w_l,b)$ خروجی نهایی بدست آمده از تبدیل موجک پیوسته فشردهسازی همزمان در حوزه زمان-فرکانس میباشد. برای اطمینان از تباین این تبدیل نسبت به سایر تبدیلها، همانند مطالعات پیشین (*Thakur et al., 2014*) از یک سیگنال غیرایستا به صورت رابطه ۲ و *Error! Reference source not found.*

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره۶، شماره ۲، ۱۳۹۹.

شده است. این سیگنال با استفاده از دو تبدیل موجک پیوسته و موجک پیوسته فشردهسازی همزمان به حوزه زمان-فرکانس منتقل شده و نتایج در Error! Reference source not found. آمده است. با مقایسه نتایج مشاهده میشود؛ که دامنه فرکانسی SSCWT بسیار کمتر و متمرکزتر از CWT میباشد. به عبارت دیگر، با استفاده از روش فشردهسازی همزمان از پراکندگی فرکانسی تبدیل موجک پیوست کاسته شده است.

(۲) $S(t) = cos(2\pi(0.2t^{2.3} + 2sin(2t) + 9t))$ (۲) با انتقال مولفههای سیگنال به حوزه زمان-فرکانس، خروجی تبدیل ماتریسی از اعداد مختلط خواهد بود. هر درایه ماتریس، معرف تابعی نمایی در هر زمان و فرکانسی میباشد. با استفاده از روابط ارائه شده در مطالعات پیشین (*Pinnegar, 2006*)، میتوان نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی (φ) را در هر زمان و فرکانسی طبق روابط ۳ تا ۸ محاسبه کرد. این نسبت همان حرکت بیضوی سه بعدی است؛ که در اثر سه مولفه سیگنال ایحاد شده است.



$$a(\tau, f) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A(\tau, f) + \sqrt{B(\tau, f)^2 + B(\tau, f)^2}}$$
(%)
$$b(\tau, f) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A(\tau, f) - \sqrt{B(\tau, f)^2 + B(\tau, f)^2}}$$
(Y)
$$b(\tau, f) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A(\tau, f) - \sqrt{B(\tau, f)^2 + B(\tau, f)^2}}$$
(Y)

$$\varphi(\tau, f) = \frac{\dot{b}(\tau, f)}{a(t, f)} \tag{A}$$

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

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

$$(f)$$

(٣)

$$C(\tau, f) = -2(R_{N(\tau, f)}. I_{N(\tau, f)} + R_{E(\tau, f)}. I_{E(\tau, f)} + R_{V(\tau, f)}. I_{V(\tau, f)}$$
(Δ)

در این روابط $R_{x(\tau,f)}$ و $I_{x(\tau,f)}$ به ترتیب معرف قسمت حقیقی و موهومی

سیگنال x در زمان τ و فرکانس f میباشد. با استفاده از روابط π -۸، در هر زمان و فرکانسی یک مقدار برای پارامتر کمی حرکت بیضوی (ϕ) بدست میآید. مقدار این پارامتر عددی بین صفر و یک میباشد؛ که عدد یک نشانگر حرکت دایروی و عدد صفر نشانگر حرکت خطی میباشد. اگر مقدار این پارامتر به صفر نزدیک باشد قطبیدگی در آن زمان و فرکانس به حرکت خطی متمایل بوده و این نوع حرکت در اثر امواج لاو و حجمی ایجاد میشود. در صورتیکه مقدار پارامتر به ۱ نزدیک باشد قطبیدگی در آن زمان و فرکانس بیضوی بوده که این حرکت در اثر امواج ریلی ایجاد میگردد. حال با استفاده از مقدار پارامتر ϕ ، که معرف کمی انواع موج میباشد، هر سه مولفه سیگنال در حوزه زمان-فرکانس برای استخراج امواج ریلی به صورت رابطه ۹ فیلتر میگردند.

$$X(\tau, f) = \begin{cases} X(\tau, f) & \varphi(\tau, f) \ge 0.5 \\ 0 & \varphi(\tau, f) < 0.5 \end{cases}$$
(9)

پس از فیلتر کردن حرکات بیضوی در حوزه زمان-فرکانس، هر سه مولفه (الف)

سیگنال با استفاده از معکوس تبدیل موجک پیوسته فشردهسازی همزمان، از حوزه زمان-فرکانس به حوزه زمان برگردانده میشود. سیگنالهای سه مولفهای حاصل شده فقط حرکتهای بیضوی را ایجاد میکنند؛ که این حرکتها در اثر امواج ریلی ایجاد و ثبت شدهاند.

۳- صحتسنجی

معمولا در مباحث پردازش سیگنالهای لرزهای، صحت روشهای ارائه شده با استفاده از سیگنالهای مصنوعی ارزیابی می گردد. در این مطالعه نیز ارزیابی صحت الگوریتم با استفاده از یک سیگنال سه مولفهای انجام شده است. دو حرکت هارمونیک افقی و عمودی با فرکانس یکسان، زمانی که به اندازه ۹۰ درجه اختلاف فاز داشته باشند حرکت دایروی و بیضوی در صفحه ایجاد میکنند (شکل ۳). در صورتی که این دو حرکت اختلاف فاز نداشته باشند حرکت آنها در صفحه به صورت خطی خواهد بود.



شکل ۳: نحوه تشکیل حرکت بیضوی در یک صفحه در اثر حرکتهای هارمونیکی عمود بر هم، الف) حرکت سینوسی افقی با فاز اولیه ۹۰- درجه، ج) حرکت صفحهای ایجاد شده در اثر دو حرکت سینوسی هم فرکانس با اختلاف فاز ۹۰ درجه

براساس نحوه ایجاد حرکت بیضوی و خطی، سیگنال مصنوعی سه مولفهای پنجرهای با فرکانس ۱، ۲ و ۵ هرتز به صورت شکل ۴ برای ایجاد سیگنال را ایجاد کردهایم که هر دو نوع حرکت را ایجاد کنند. از سه سینوس مصنوعی استفاده شده است.



شکل ۴:سینوس پنجرهای، الف) ۱هر تزی، ب) ۲هر تزی، ج) ۵ هر تزی

سه مولفه x، y و z طبق رابطههای ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به همراه ۵ درصد نویز به صورت شکل ۵ ایجاد می گردند. در این رابطهها S، S۱ و S5 به ترتیب سینوسهای پنجرهای ۱، ۲ و ۵ هرتزی و S۱ سینوس پنجرهای ۱ هرتزی با فاز اولیه ۹۰- درجه می باشد. این سه مولفه سیگنال طوری ساخته شده اند که در صفحه x-y حرکت با قطبیدگی خطی با فرکانس ۵ هرتز، در صفحه y-z با قطبیدگی بیضوی با فرکانس ۱ هرتز ایجاد گردد. به عبارت دیگر، ترکیب

اΣ در راستای محور x و ⁻I در راستای محور z حرکت بیضوی را در صفحه x-z ایجاد میکنند که هدف استخراج این موج ریلی در صفحه مذکور می-باشد.

$$x(t) = (\sqrt{2}/2) S_5(t) + S_1(t)$$
(1.)
$$x(t) = (\sqrt{2}) S_5(t) + (0.0) S_5(t)$$
(1.)

$$y(t) = (\sqrt{2}) S_5(t) + (0.9) S_2(t)$$
(11)

$$z(t) = (1.5) \hat{z}^{-}(t) + (1.2) S_2(t)$$
(13)

$$z(t) = (1.5) \hat{s}_1(t) + (1.2) \hat{s}_2(t) \tag{11}$$



شکل ۵:سیگنال مصنوعی ایجاد شده طبق روابط ۱۰–۱۲ و هودوگرام قطبیدگی خطی و بیضوی، الف) مولفه x، ب) مولفه y، ج) مولفه z، د) قطبیدگی خطی در صفحه y-x، ه) قطبیدگی بیضوی در صفحه x-z، و) قطبیدگی خطی در صفحه y-z

شده است. همانطور که انتظار می فت، سیگنال استخراج شده برای امواج ریلی در راستای X حرکت سینوسی با فرکانس ۱ هرتز و دامنه حداکثر یک سانتیمتر بوده و در راستای Z حرکت سینوسی با فرکانس ۱ هرتز و دامنه حداکثر ۱/۵ سانتیمتر می باشد. همان طور که مشاهده می گردد حرکتی در راستای y وجود ندارد. بنابراین همان طور که نشان داده شد الگوریتم ارائه شده توانایی استخراج موج ریلی مستتر در مولفه های یک سیگنال مصنوعی را دارد. بر اساس الگوریتم ارائه شده، امواج ریلی از سه مولفه سیگنال مصنوعی استخراج میگردد. به این صورت که، ابتدا مولفههای X، y و Z با استفاده از روابط شماره ۱–۱، ۱–۲، ۱–۳ به حوزه زمان–فرکانس منتقل شده، سپس با استفاده از روابط ۳ تا ۸ پارامتر (τ, f) محاسبه میگردد. با استفاده از رابطه ۹، مولفههای X، y و Z در حوزه زمان–فرکانس براساس پارامتر کمی حرکت بیضوی $((\tau, f))$ فیلتر میگردند و در نهایت این سه مولفه از حوزه زمان–فرکانس، با استفاده از معکوس تبدیل موجک پیوسته فشردهسازی همزمان به حوزه زمان منتقل میگردند که نتایج حاصل در شکل ۶ آورده



شکل ۶: امواج ریلی استخراج شده از سیگنال مصنوعی، الف) مولفه x، ب) مولفه y، ج) مولفه z

به منظور اطمینان از عملکرد مناسب الگوریتم ارائه شده در تحلیل دادههای لرزهای واقعی، از نتایج مطالعات پیشین (Meza-Fajardo et) 2015 استفاده شده است. در مطالعه مذکور، دادههای لرزهای پس لرزه زلزله چیچی تحلیل و امواج ریلی آنها استخراج گردیدهاند. در این مطالعه از دادههای لرزهای ایستگاه TCU116 برای مقایسه نتایج بدست آمده از الگوریتم معرفی شده در مطالعه حاضر با نتایج مطالعه محققان مذکور

استفاده شده است. سه مولفه تغییر مکان ثبت شده در ایستگاه TCU116 در شکل ۷ آمده است. امواج ریلی استخراج شده از این سه مولفه با استفاده از الگوریتم حاضر و نتایج ارائه شده در مطالعه پیشین در شکل ۸ آمده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود؛ که نتایج تطابق مناسبی با هم دارند.



شکل ۸: امواج ریلی استخراج شده از ایستگاه TCU116 پس لرزه چیچی (خط آبی نتایج مطالعه 2015 Meza-Fajardo et al., پس لرزه چیچی (خط آبی نتایج مطالعه کا شده با استفاده از الگوریتم مطالعه حاضر)، الف) مولفه N، ب) مولفه E، مولفه V.

۴- استخراج امواج ریلی از شتابنگاشتهای زلزله

پس از اطمینان از صحت الگوریتم ارائه شده، به استخراج امواج ریلی از شتابنگاشتهای زلزله پرداخته شده است. شتابنگاشتهای ثبت شده در زمین لرزهها تابع پارامترهای بسیاری از جمله نوع گسلش، انرژی آزاد شده، فاصله و عمق کانون زلزله، توپوگرافی و لایهبندی منطقه میباشد؛ که مشارکت انواع امواج براساس این پارامترها در زلزلههای مختلف تغییر میکند. بنابراین در این مطالعه، امواج ریلی از شتابنگاشتهای چهار زلزله

مختلف شامل زلزلههای سرپل ذهاب، بم، چیچی و لوماپریتا بر اساس الگوریتم ارائه شده در این مقاله استخراج و نتایج ارائه شده است. مولفههای N E ، N و V مربوط به تغییر مکان-زمان چهار زلزله سرپل ذهاب، بم، چیچی و لوماپریتا به ترتیب در شکل ۹۳ ۲۱ و مشخصات این سه زلزله در جدول ۱ آمده است.



شکل ۱۰: سیگنال تغییرمکان زمان زلزله بم، الف) مولفه N، ب) مولفه E، مولفه V.

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره۶، شماره ۲، ۱۳۹۹.



شکل ۱۲: سیگنال تغییرمکان زمان زلزله لوماپریتا، الف) مولفه N، ب) مولفه E. مولفه V.

فاصله گسل-	مدت زمان	بزرگی	سال	ا ۳۰۰	41.1.
ایستگاه (km)	(ثانيه)	(ریشتر)	(میلادی)	ایستانه	رترته
٣٩	۱۰۰	٧/٣	7.14	SPZ	سرپل ذهاب
•/•۵	۶۲	۶/۶	۲۰۰۳	بم	بم
٣/١٢	٩٠	٧/٦٢	١٩٩٩	CHY028	چىچى
٣/٨۵	78	۶/۹۳	19, 19	BRAN	لوماپريتا

جدول ۱: مشخصات زلزلههای سرپلذهاب، بم، چیچی، لوماپریتا.

مقایسه سیگنالهای زلزله (شکل) و امواج ریلی استخراج شده (شکل ، شکل ، شکل و شکل) مشاهده می گردد؛ که سهم امواج ریلی در این چهار زلزله متفاوت می باشد. امواج ریلی این چهار زلزله با استفاده از الگوریتم معرفی شده، استخراج و به ترتیب در شکل ۱۳، شکل ، شکل و شکل آورده شده است. این سیگنالها در واقع سیگنالهایی هستند که حرکت بیضوی با نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ حداقل ۰/۵ را در محیط سه بعدی ایجاد میکنند. با



شکل ۱۳: امواج ریلی استخراج شده از زلزله سرپلذهاب، الف) مولفه N، ب) مولفه E، ج) مولفه V



شکل ۱۴: امواج ریلی استخراج شده از زلزله بم، الف) مولفه N، ب) مولفه E، ج) مولفه V.

نقشین و همکاران، شناسایی و استخراج امواج ریلی از شتابنگاشتهای سه مولفهای ...، صفحات ۲۷۵-۲۸۷.



شکل ۱۶: امواج ریلی استخراج شده از زلزله لوماپریتا، الف) مولفه N، ب) مولفه E، ج) مولفه V.

شدت آریاس معیاری برای سنجش بزرگی حرکت زمین است؛ که با استفاده از رابطه ۱۳ محاسبه میگردد.

$$I_A = \frac{\Pi}{2g} \int_0^{T_d} a(t)^2 dt \tag{17}$$

در این مطالعه به منظور مقایسه کمی سهم امواج ریلی در این چهار زلزله، از پارامتر شدت آریاس و تغییر مکان حداکثر استفاده شده است. مقادیر تغییر مکان حداکثر و شدت آریاس برای مولفههای N E و V هر یک از چهار زلزله (. *Error! Reference source not found* تا ۱۲) و امواج ریلی استخراج شده (شکل تا ۱۶) در جدول و ۳ آمده است. بر اساس این جداول، امواج ریلی به طور میانگین حدود نصف کل انرژی زلزله را به خود اختصاص دادهاند و مابقی انرژی زلزله به صورت امواج فشاری، برشی و لاو منتشر شده است. بنابراین در زلزلههای مورد بررسی، امواج ریلی بیشترین

سهم انرژی زلزله را دارا میباشند. نسبت انرژی امواج ریلی به انرژی کل زلزله بم در مولفههای ۸۲، E، ۷ به ترتیب ۱۹۵۵، ۱۹۲۳ و ۱۹/۱ میباشد. همان طور که مشاهده میشود در زلزله بم و سرپل ذهاب سهم انرژی امواج ریلی در مولفه قائم بسیار قابل توجه میباشد؛ که در زلزلههای لوماپریتا و چیچی به اینصورت نمیباشد. مشارکت سه مولفه زلزله چیچی در ایجاد امواج ریلی تقریبا یکسان میباشد و در زلزله لوماپریتا مولفه E بیشترین یک زلزله در حالت کلی متغیر میباشد. به عبارت دیگر، مشارکت هر مولفه سیگنال در ایجاد امواج مختلف متفاوت است. همچنین با مقایسه شدت آریاس و تغییر مکان حدکثر در زلزلههای مختلف مشاهده میشود؛ که سهم امواج ریلی در این چهار زلزله متفاوت است. همچنین با مقایسه شدت زلیاس و تغییر مکان حدکثر در زلزلههای مختلف مشاهده میشود؛ که سهم امواج ریلی در این چهار زلزله متفاوت بوده به طوری که سهم امواج ریلی امواج ریلی در این میبان به ترتیب در زلزلههای چیچی، سرپل ذهاب، بم و

تغییر مکان حداکثر مولفه V (cm)	تغییر مکان حداکثر مولفه E (cm)	تغییر مکان حداکثر مولفه N (cm)	زلزله/مولفه
۹/۱۱	۲ • /۳ •	۳۱/۱۶	سرپل ذهاب
۶/۴۱	٧/۴٧	۱۱/۲۰	امواج ريلي سرپل ذهاب
		. 1800	نسبت تغييرمكان حداكثر
• / Y •	•// 7	ریلی به کل سیگنال	امواج ریلی به کل سیگنال
٨/۵١	22/12	۳۳/۹۲	نم
۶/۰۱	٩/٩۵	18/54	امواج ريلي بم
()()	/ ic w	11 C A	نسبت تغييرمكان حداكثر
•/•1		•///	امواج ریلی به کل سیگنال
۲ • /۶ ۱	۲۰/۲۸	۲۷/۸۶	چىچى
۱۰/۳۱	٧/٧٨	۱۳/۴۸	امواج ریلی چیچی
•/۵•	۰ /۳۸	۰/۴۸	نسبت تغييرمكان حداكثر

جدول ۲: تغییر مکان حداکثر مولفههای E ،N و V زلزلههای بم، چیچی و لوماپریتا قبل و بعد از استخراج امواج ریلی

			امواج ریلی به کل سیگنال
۴/۲۱	۵/۰۴	٨/١٠	لوما پريتا
۲/۰ ۱	٣/٣۵	٣/٩٣	امواج ريلى لوما پريتا
•/۴٧	• 88	•/۴٩	نسبت تغییرمکان حداکثر امواج ریلی به کل سیگنال

جدول ۳: شدت آریاس مولفههای E ،N و V زلزلههای بم، چیچی و لوماپریتا قبل و بعد از استخراج امواج ریلی

شدت آرياس مولفه V	شدت آریاس	شدت آریاس مولفه N		
(m / s)	مولفه E (m/s)	(m / s)	ز لز له /مولقه	
١/١٨	۵/۱۰	۴/۲۰	سرپل ذهاب	
• /88	۲/۳۰	۲/•۵	امواج ریلی سرپل ذهاب	
۰/۵۶	۰/۴۵	۰/۴۸	نسبت شدت آریاس امواج ریلی به کل سیگنال	
٠/٢۴	۰/۸۵	١/٦٢	نم	
•/\۵	•/4•	۰/۸۹	امواج ريلي بم	
۰/۶۱	٠/۴٧	•/۵۵	نسبت شدت آریاس امواج ریلی به کل سیگنال	
۲/۰ ۱	٣/۴٠	۴/۹۳	چىچى	
۰/٨۶	۱/۴۳	۲/۲۲	امواج ریلی چیچی	
۰/۴۳	•/47	٠/۴۵	نسبت شدت آریاس امواج ریلی به کل سیگنال	
•/18	• /۳ ۱	۰/۵۳	لوماپريتا	
•/•٨	• / ۲ ۲	۰/۲۸	امواج ريلي لوماپريتا	
٠/۴٩	• / ٧ •	۰/۵۳	نسبت شدت آریاس امواج ریلی به کل سیگنال	

در شکل نحوه تخلیه انرژی امواج ریلی و کل شتابنگاشت زلزله بم بر اساس شدت آریاس آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود شیب منحنی انرژی کل زلزله در مولفه N نسبت به مولفه های E و V کمتر بوده که نشانگر تخیله کندتر انرژی در مولفه N نسبت به مولفه های E و Vمی باشد. از طرف دیگر شیب منحنی انرژی امواج ریلی در مولفه عمودی نسبت به مولفه های افقی کمتر بوده که در نتیجه آن، مولفه عمودی انرژی امواج ریلی در زمان موثر با سرعت کمتری تخلیه شده است. همچنین اختلاف شیب منحنیهای انرژی امواج ریلی و کل زلزله در یک مولفه نشان

میدهد، که پراکندگی امواج مختلف در مدت زمان موثر زلزله بیشتر میباشد؛ که این اختلاف در مولفه عمودی زلزله بم بیشترین مقدار را داراست. درجدول ۴ زمان موثر زلزله بم و نیز امواج ریلی مستخرج شده از آن آمده است؛ که این مقادیر براساس اختلاف زمان مابین ۹۵ درصد و ۵ درصد شدت آریاس حساب شده است. همانطور که مشاهده می گردد، در مولفههای افقی زمان موثر کل زلزله بیشتر از زمان موثر امواج ریلی می باشد؛ در حالی که در مولفه عمودی زمان موثر امواج ریلی از زمان موثر کل زلزله



شکل ۱۷: تغییرات انرژی شتاب نگاشت-زلزله بم در طول زمان (خط آبی انرژی کل زلزله، خط قرمز انرژی امواج ریلی)، الف) مولفه N مولفه E ، مولفه V.

$(\mathbf{s})\mathbf{V}$ زمان مؤثر مولفه	زمان مؤثر مولفه E (s)	زمان مؤثر مولفه N (s)	زلزله/مولفه
V/T)	٨/۶٨	٧/٧١	بم
۸/۴۳	٨/٦	۶/۰۳	امواج ریلی بم

جدول ۴: زمان موثر در زلزله بم.

wavelet domain based on the adaptative covariance method. Geophysical Journal International, 170:667-78.

- Kulesh M, Holschneider M, Diallo MS., 2008. Geophysical wavelet library: applications of continuous wavelet transform to the polarization and dispersion analysis of signals, Computers & Geosciences, 34-12; 1732-52.
- Anant K, Dowla F., 1997. Wavelet transform methods for phase identification in three-component seismograms. Bulletin of the Seismological Society of America, 87: 1598–612.
- Galiana-Merino JJ, Rosa-Herranz J, Jauregui P, Molina S, 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.
- L. D'Auria, F. Giudicepietro, M. Martini, M. Orazi, R. Peluso, and G. Scarpato. 2010. Polarization Analysis in the Discrete Wavelet Domain: An Application to Volcano Seismology. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 100, No. 2, pp. 670–683.
- Galiana-Merino, J. J., S. Parolai, and J. Rosa-Herranz., 2011. Seismic wave characterization using complex trace analysis in the stationary wavelet packet domain, Soil Dynam. Earthq. Eng. 31, no. 11, 1565–1578.
- 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.
- Meza-Fajardo, K. C., Papageorgiou, A. S., & Semblat, J. F. (2015). Identification and extraction of surface waves from threecomponent seismograms based on the normalized inner product. Bulletin of the Seismological Society of America, 105(1), 210-229.
- Daubechies, I., Lu, J., & Wu, H. T. (2011). Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool. Applied and computational harmonic analysis, 30(2), 243-261.
- Gholtashi, S., Nazari Siahsar, M. A., RoshandelKahoo, A., Marvi, H., & Ahmadifard, A. (2015). Synchrosqueezing-based Transform and its Application in Seismic Data Analysis. Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, 4(4), 1-14.
- Abdzadeh-Ziabari, H., & Shayesteh, M. G. (2011). Robust timing and frequency synchronization for OFDM systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 60(8), 3646-3656.
- MATLAB and Statistics Toolbox Release 2012b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- Daubechies, I Lu, J.F, 2011, Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool. Appl. Comput. Harmon. Anal., 30, 243–261.
- Thakur, G. The Synchrosqueezing transform for instantaneous spectral analysis, Computer Science, Mathematics, 2014.
- مهدوی، ۱.، روشندل کاهو، ۱.، رداد، م.، سلیمانی منفرد، م.، نجاتی کلاته، ع.، ۱۳۹۸،
- کاربرد بیشینهی محلی تبدیل فشرده شدهی همزمان در تحلیل طیفی
- دادههای لرزمای، اولین همایش ملی پردازش سیگنال و تصویر در ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

در این مقاله به شناسایی و استخراج امواج ریلی از شتابنگاشتهای سه مولفهای در حوزه ترکیبی زمان-فرکانس پرداخته شد. با توجه به اینکه شتابنگاشتهای زلزله غیرایستا می باشند و نوع تبدیل زمان-فرکانس در دقت استخراج امواج ریلی بسیار تأثیر گذار میباشد، در روش ارائه شده در این مطالعه از تبدیل موجک پیوسته فشردهسازی همزمان شده استفاده گردید. به منظور اثبات اهمیت تبدیل مذکور از یک سیگنال مصنوعی استفاده شد که بر اساس نتایج ارائه شده تبدیل موجک پیوسته فشردهسازی همزمان نسبت به تبدیل موجک پیوسته پراکندگی کمتری داشته و متمرکزتر میباشد. این مزیت در شتابنگاشتهای زلزله از اهمیت بسیاری برخوردار است. به منظور ارزیابی صحت الگوریتم، یک موج ریلی مستتر در سیگنال مصنوعی استخراج گردید. در ادامه با استفاده از این الگوریتم امواج ریلی از شتابنگاشتهای چهار زلزله سرپلذهاب، بم، چیچی و لوماپریتا استخراج گردید. براساس امواج ریلی استخراج شده از سه زلزله مشاهده گردید که که در زلزلههای مذکور، امواج ریلی نسبت به سایر امواج سهم بیشتری از شتابنگاشتها را به خود اختصاص دادهاند. همچنین سهم امواج ریلی در این چهار زلزله یکسان نمی باشد. براساس نتایج ارائه شده، مشاهده گردید که مشارکت سه مولفه شتابنگاشتها در ایجاد امواج ریلی در زلزلههای مختلف متفاوت است. همچنین نحوه تخلیه انرژی و زمان موثر در امواج ریلی و کل زلزله در هر یک از مولفههای زلزله مقادیر متفاوتی را بدست میدهد.

۶- منابع

۵- نتیجهگیری

- Flinn, E.A., 1965. Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion, Proc. IEEE, 53, 1874–1876.
- Simons, R.S., 1968. A surface wave particle motion discrimination process, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 629–637.
- Montalbetti, J.F. & Kanasewich, E.R., 1970. Enhancement of teleseismic body phases with a polarization filter, Geophys. J. R. astr. Soc., 21, 119–129.
- Samson, J.C. & Olson, J.V., 1980. Some comments on the descriptions of the polarization states of waves, Geophys. J. R. astr. Soc., 61, 115–129.
- Vidale, J.E., 1986. Complex polarization analysis of particle motion, Bull. Seism. Soc. Am., 76, 1393–1405.
- Morozov, I.B. & Smithson, S.B., 1996. Instantaneous polarization attributes and directional filtering, Geophysics, 61, 872–881.
- Diallo, M.S., Kulesh, M., Holschneider, M., Scherbaum, F., 2005. Instantaneous polarization attributes in the time–frequency domain and wave field separation. Geophysical Prospecting 53, 723–731.
- Diallo, M.S., Kulesh, M., Holschneider, M., Scherbaum, F., Adler, F., 2006. Characterization of polarization attributes of seismic waves using continuous wavelet transforms. Geophysics 71, V67–V77.
- Kulesh M, Diallo MS, Holschneider M, Kurennaya K, Kruger F, Ohrnberger M, et al., 2007. Polarization analysis in the

ملائی، ف.، روشندل کاهو، ۱.، تخمچی، ب.، گودرزی، ع.، حسینی، م.، ۱۳۹۲، ارتقا قدرت تفکیک دادههای لرزهای با استفاده از فشرده سازی تبدیل موجک گسسته، ماهنامه علمی -ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۰۴.

نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، دوره6، شماره ۲، ۱۳۹۹.

- علائی، ن، روشندل کاهو، ا، کامکار روحانی، ا، ۱۳۹۵، بهبود قدرت تفکیک قائم لرزهای با استفاده از خاصیت مقیاس کردن زمانی تبدیل فوریه، نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی.
- گودرزی، ع.، ملایی، ف.، ۱۳۹۷، افزایش توان تفکیک داده های لرزه ای با استفاده از تبدیل موجک گسسته مختلط، نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی.



(JRAG) 2020, VOL 6, NO 2 (DOI): 10.22044/JRAG.2020.9125.1270



Identification and extraction of Rayleigh waves from three-component accelerometers based on polarization characteristics in time-frequency domain

Pouya Naghshin^{1*}, Hadi Bahadori² and Abbas Eslami Haghighat³

PhD Student, School of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran
 Associate professor, School of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran
 Assistant professor, School of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 27 November 2019; Accepted: 18 May 2020

Corresponding author: pouya.naghshin@gmail.com

Keywords	Extended Abstract
Rayleigh waves	Summary
Three-component accelerometers	Usually surface waves, compared to other types of waves, cause more
Time-frequency domain	displacements on ground surface. In addition, Rayleigh waves create
Synchrosqueezed continuous	elliptical motions. Consequently, Rayleigh waves have the most destructive
wavelet transform	effects on structures located on ground surface. Therefore, identification and
Polarization characteristics	extraction of surface waves, especially Rayleigh waves, are among the most
MATLAB	important tasks in seismology and applied geophysics. Many studies have
	been carried out on this topic. In most cases, identification and extraction of
	surface waves are carried out entirely in time domain or entirely in frequency
	domain. Since these kinds of studies have some limitations, recent studies

on surface waves have been carried out in time-frequency domain. Recently, new time-frequency transforms have been presented to transfer signals from time domain to time-frequency domain. Earthquake signals are nonstationary, thus precision of extracting surface waves from signals depends noticeably on time-frequency transform. In this study, synchrosqueesed continuous wavelet transform has been used to transfer signals to time-frequency domain. This transform has higher resolution than other transforms, and also, it is less dispersive than other transforms in time-frequency domain. In this study, the main polarization characteristic of Rayleigh waves, which is elliptical motion, has been used to filter and extract Rayleigh waves from three-component accelerometers. Reciprocal ellipticity parameter has been used as the polarization characteristic parameter. MATLAB software package has been used for programming and analysis in this study. First, significance of the mentioned transform compared to other transforms has been investigated by a synthetic signal. Then, a three-component signal has been created and the presented algorithm in this study has been verified by it. Finally, Rayleigh waves from several real signals have been extracted.

Introduction

In surface wave studies, especially in extracting surface waves from signals in time-frequency domain, the resolution and concentration of signals, and consequently, precision of extracted waves in time-frequency domain depend significantly on the type of time-frequency transform. For this study, synchrosqueesed continuous wavelet transform has been used to transfer signals to time-frequency domain.

Methodology and Approaches

Three components of a signal have been transferred to time-frequency domain using the synchrosqueesed continuous wavelet transform. Then, reciprocal ellipticity parameter has been calculated in time-frequency domain. Three components of the signal have been filtered based on the reciprocal ellipticity parameter, and eventually, three components of the signal have been transferred to time domain by reverse synchrosqueesed continuous wavelet transform. The presented algorithm has been verified by extracting hidden Rayleigh waves from the three-component synthetic signal used in this study. Finally, Rayleigh waves from Bam, Chichi and Loma-Prieta earthquakes have been extracted and investigated.

Results and Conclusions

In this paper, it has been shown that the used transform has significant resolution and it can improve precision of

2020, VOL 6, NO 2

surface waves extraction. It has been concluded that Rayleigh waves have the most energy in earthquakes and Rayleigh waves in three components of accelerometers have different energy contribution. Moreover, energy contribution of Rayleigh waves can differ in earthquakes. According to the results obtained from this study, it is higher in the Bam earthquake in comparison with ChiChi and Loma-Prieta earthquakes.