

### چکیده

تشخیص خودکار و برداشت دقیق زمان ورود فازهای لرزه‌ای در تعیین مکان رویداد زلزله و تجزیه و تحلیل در سیستم‌های تشخیص زود هنگام زلزله دارای اهمیت ویژه‌ای است. در حال حاضر یکی از فرایندهای متداول برای شناسایی شروع فازهای لرزه‌ای روش دستی می‌باشد. این کار توسط یک تحلیلگر انجام می‌شود که به بررسی لرزه‌نگاشت می‌پردازد و سپس زمان شروع فازهای  $S$  و  $P$  را تشخیص می‌دهد. این روش بسیار وقت‌گیر و تحت تأثیر نظر یا تجربه شخصی کاربر می‌باشد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌های حجیم تولید شده در شبکه‌های لرزه‌نگاری ارائه یک الگوریتم خودکار و قابل اطمینان ضروری است. از این رو در این مطالعه یک الگوریتم خودکار برای تعیین و قرائت زمان رسید فاز  $P$  از ترکیب نسخه حداکثر هم‌پوشانی تبدیل موجک گسسته<sup>۱</sup> و روش تشخیص لبه<sup>۲</sup> و برای تعیین زمان رسید فاز  $S$  از ترکیب این نسخه از تبدیل موجک (MODWT) و روش خود برگشتی<sup>۳</sup> ارائه شده است. جهت ارزیابی الگوریتم‌های فاز خوانی، زمین لرزه ۱۳۹۶/۰۸/۲۱ سرپل ذهاب با بزرگای  $M_w = 7.3$  مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از قرائت موج  $P$  با برداشت‌های دستی و روش STA/LTA و برداشت‌های حاصل از موج  $S$  تنها با برداشت‌های دستی مقایسه شده‌اند. الگوریتم‌های فاز خوانی خودکار نتایج قابل قبولی را نشان می‌دهند.

**واژگان کلیدی:** تبدیل موجک، برداشت فاز، زمان رسید، زلزله، موج  $P$  و  $S$ ، STA/LTA.

## تعیین فازهای $S$ و $P$ با استفاده از حداکثر هم‌پوشانی تبدیل موجک گسسته (مطالعه موردی زمین لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب)

محمد شکری کاوه

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک- زلزله‌شناسی، گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

رضا منصوری (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، s.r.mansouri@pgu.ac.ir

احمد کشاورز

استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

### ۱- مقدمه

لرزه‌ای ثبت شده است. برای مثال روش‌های خودبرگشتی بر این فرض استوار هستند که لرزه‌نگاشت را می‌توان به صورت محلی با پنجره‌های زمانی با طول ثابت تقسیم‌بندی کرد؛ که در روند خودبرگشتی هر پنجره به صورت مستقل مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بر اساس این فرض از ترکیب روش خودبرگشتی و معیارهای دیگر برای تشخیص فاز  $P$  و  $S$  استفاده شده است [۸-۹]. روش‌های دیگر مانند STA/LTA، نظریه منطق فازی، آمار مرتبه بالاتر و تبدیل موجک برای تعیین زمان رسید فاز لرزه‌ای نیز تعریف شده‌اند. با توجه به اینکه پیشرفت‌های قابل توجهی در تئوری و جنبه‌های ریاضی روش‌های تشخیص خودکار فاز وجود دارد، اما هنوز یک روش جامع که دقت مورد نیاز را برای مطالعات لرزه‌ای به‌خوبی و با انواع داده‌های لرزه‌ای نشان دهد ارائه نشده است.

تعیین زمان رسید موج‌های  $P$  و  $S$  برای کاربردهای لرزه‌نگاری از جمله برای تشخیص محل زلزله و توموگرافی لرزه‌ای دارای اهمیت ویژه‌ای است. از آنجا که برای مطالعات مکان‌یابی و توموگرافی، معمولاً به اطلاعات ادغام شده از چندین شبکه لرزه‌نگاری نیاز است، لذا زمان رسید بسیار قابل اطمینان، دقیق و منسجم یک نیاز اساسی محسوب می‌شود. در بسیاری از مطالعات زلزله‌شناسی مانند تعیین کانون زلزله [۱-۴]، تجزیه و تحلیل مکانیسم چشمه [۵] توموگرافی لرزه‌ای [۶] تصویربرداری از مخازن هیدروکربنی [۷] برداشت‌های دقیق هم‌زمان زمان رسید موج‌های  $P$  و  $S$  مورد نیاز می‌باشد. تشخیص سریع و دقیق امواج لرزه‌ای از اهمیت زیادی در زلزله‌شناسی برخوردار است، زیرا می‌توان امواج را در نزدیکی زمان واقعی پردازش کرد. روش‌های متعددی برای تشخیص و برداشت ورودی‌های امواج مختلف

به ما اجازه می‌دهد تا به‌طور دلخواه دقت بالایی از سیگنال که برای شناسایی دقیق و بخش‌بندی اجزای مهم سیگنال مورد نیاز است را داشته باشیم [۹]. تبدیل موجک در ترکیب با الگوریتم‌های دیگر مانند تحلیل قطبش [۲۳] معیار اطلاعات آکائیک<sup>۷</sup> [۲۴] و آمار مرتبه بالاتر<sup>۸</sup> [۲۵] برای بهبود یافتن مسئله برداشت زمان رسید فاز استفاده شده است. مفید بودن موجک در تجزیه و تحلیل داده‌ها بدیهی است، به‌ویژه در زمینه زلزله‌شناسی که در آن مجموعه داده‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶]. ورودی‌های فاز لرزه‌ای توسط خواص متنوع از لرزه‌نگاشت‌های مناسب تشخیص داده می‌شوند، از قبیل محتوای فرکانسی، دامنه، خواص آماری و قطبش. در الگوریتم برداشت خودکار فاز چنین تغییراتی بر روی لرزه‌نگاشت و یا در یک تابع مشخصه<sup>۹</sup> بررسی می‌شود [۲۲، ۲۷]. تبدیل موجک امکان مطالعه‌ی تغییرات محتوای فرکانسی سیگنال را با زمان فراهم می‌سازد [۱۵]. تعیین زمان رسید فازهای اصلی، تعیین بزرگی و سایر پارامترهای کانونی رویداد زلزله و در صورت نیاز اطلاع‌رسانی به‌صورت لحظه‌ای، استفاده از روش‌های خودکار را اجتناب‌ناپذیر نموده است. هدف و رویکرد این مطالعه ارائه روشی خودکار جهت برداشت شروع فازهای  $P$  و  $S$  مبتنی بر تأثیر موجک بر تغییرات هم‌زمان دامنه، فاز و محتوای فرکانسی می‌باشد، در روش‌های سنتی تنها به یک یا دو عامل از عوامل نام‌برده پرداخته شده است.

## ۲- شیوه تحقیق

### ۲-۱- الگوریتم پیشنهادی برای برداشت زمان رسید فاز $P$

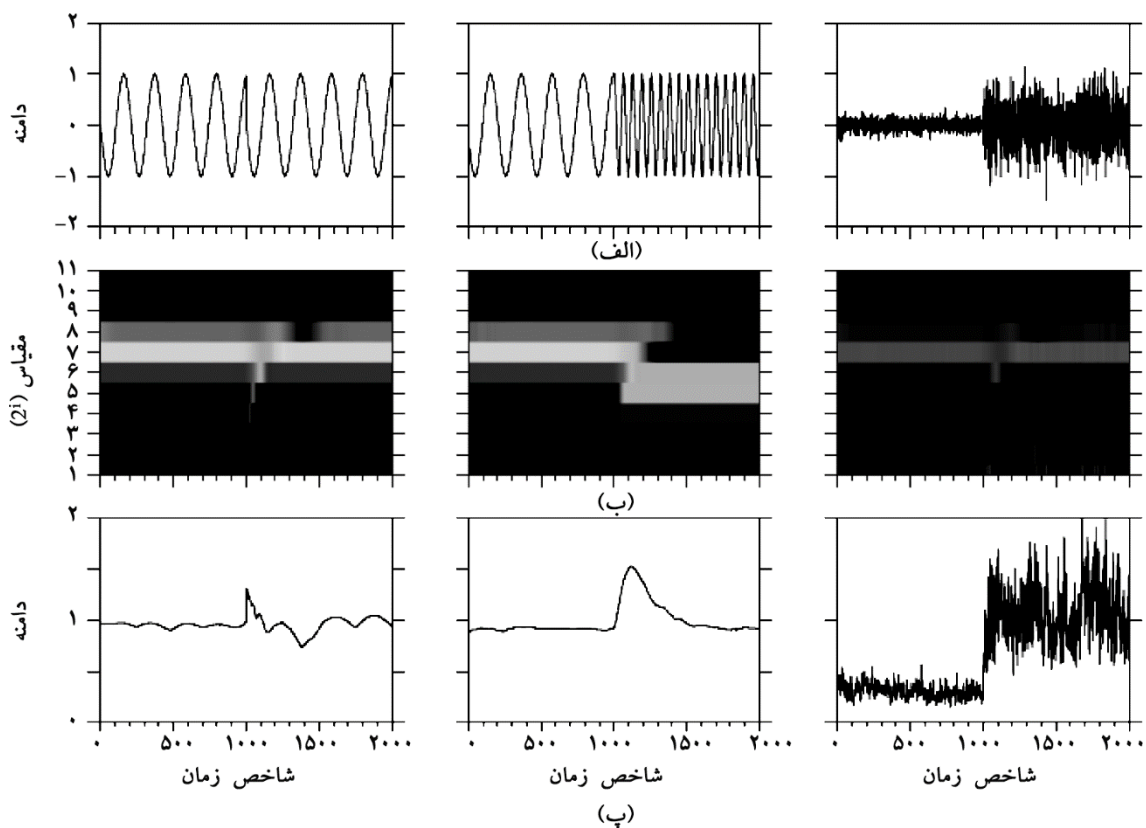
تشخیص سریع موج  $P$  در تعیین کانون زلزله، بزرگای زلزله، عمق زلزله و سیستم‌های هشدار سریع و برداشت دقیق اولین ورود موج  $P$  در توموگرافی لرزه‌ای و تصویربرداری از مخازن هیدروکربنی نقش بسزایی دارد [۷]. با توجه به حساسیت مؤلفه قائم برداشت‌های لرزه‌ای به فاز  $P$ ، از لرزه‌نگاشت‌های قائم استفاده شده است. ورود اولین موج فشاری موجب تغییراتی در دامنه، فاز و محتوای فرکانس شکل موج می‌شود. تبدیل موجک امکان تشخیص این تغییر را با تجزیه سیگنال به‌عنوان یک تابع زمان-مقیاس میسر می‌کند (شکل ۱).

تبدیلات زمان-فرکانس، مانند تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک که نشان‌دهنده‌ی زمان‌های مختلف سیگنال به‌عنوان تابعی از زمان و فرکانس شده‌اند، به‌طور گسترده در تشخیص رویدادهای لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹-۱۲]. اولین کاربرد موجک در ژئوفیزیک، برای تحلیل داده‌های نقشه‌برداری شده از زلزله بوده که در اکتشافات معدن و نفت برای تصویر گرفتن از لایه‌های زیرسطحی صخره‌ها، استفاده شده است [۱۳]. تاکنون تبدیل موجک در کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است؛ مانند بهبود وضوح داده‌های لرزه‌ای و نسبت  $S/N$  [۱۴] فشرده‌سازی داده‌های لرزه‌ای [۱۵] تشخیص موج  $P$  و  $S$  در لرزه‌نگار سه مؤلفه‌ای با اعمال تبدیل موجک گسسته<sup>۴</sup> و با استفاده از قطبش و اطلاعات دامنه در ضرایب موجک از سیگنال‌ها [۱۶] تجزیه سیگنال  $L_g$  در مقیاس‌های مختلف با استفاده از تبدیل موجک پیوسته<sup>۵</sup> جهت تعیین زمان رسید  $L_g$  [۱۷]، شناسایی و طبقه‌بندی رویدادهای لرزه‌ای [۱۵]. همچنین تبدیل موجک، تجزیه و تحلیل چندمقیاسی را برای حل مشکلات مهم زلزله‌شناسی مانند محاسبه بزرگای زلزله [۱۸] برآورد آزمونوت و تجزیه و تحلیل قطبش [۹] آنالیز موج سطحی و تشخیص سیگنال غیر محسوس [۱۹] زمان برداشت فاز  $P$  و  $S$  و حذف نوفه لرزه‌نگاشت [۱۷] را فراهم می‌کند. لئونارد [۲۰] و کولش و همکاران [۲۱] با توسعه الگوریتم برداشت خودکار فاز نشان داد که انحراف از برداشت‌کننده‌های خودکار فاز، قابل مقایسه با خطای تشخیص فاز دستی می‌باشد؛ بنابراین برداشت فاز با اجرای یک الگوریتم خودکار مناسب می‌تواند بدون هرگونه بررسی تحلیلی لرزه‌ای انجام شود.

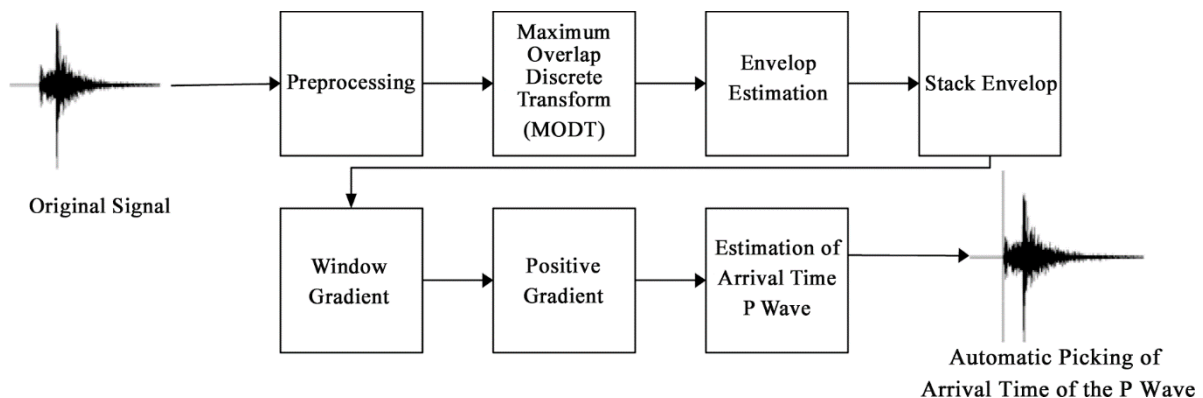
محققان در عمل اکثراً برای پردازش سیگنال‌های لرزه‌ای به‌جای تبدیل موجک پیوسته عمدتاً از تبدیل موجک گسسته به دلیل سرعت محاسبات استفاده می‌کنند [۲۲-۲۳]. تبدیل موجک در فیلتر کردن سیگنال‌های استاندارد، فشرده‌سازی و رمزگذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹، ۲۲]. یکی از خواص تبدیل موجک ثابت ماندن انرژی سیگنال در طول فرآیند تبدیل یا معکوس تبدیل موجک می‌باشد. تبدیل موجک گسسته دارای ساختاری ثابت در یک شکل دو تایی<sup>۶</sup> می‌باشد. از سوی دیگر تبدیل موجک پیوسته

مصنوعی ابتدا چندین موجک مادر دویچیز<sup>۱۲</sup>، هار<sup>۱۳</sup>، سیملت<sup>۱۴</sup>، کویفلت<sup>۱۵</sup>، میر<sup>۱۶</sup>، مورلت<sup>۱۷</sup> مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که موجک دویچیز جهت برداشت فاز P هم‌خوانی مناسب‌تری با ورودی سیگنال دارد که با مطالعات گذشته [۲۸-۳۰] هم‌خوانی دارد. شکل زیر ساختار الگوریتم پیشنهادی برای برداشت زمان رسید فاز P را نشان می‌دهد.

در مسئله برداشت فاز با استفاده از تبدیل موجک انتخاب نوع موجک بسیار مهم و مؤثر است. تقارن، هم‌خوانی<sup>۱۸</sup>، منظم بودن و تعداد درجه ممان میرایی<sup>۱۱</sup> معیارهای اصلی برای انتخاب یک تابع موجک می‌باشند. شروع ناگهانی با استفاده از یک موجک تیز و یک شروع تدریجی با یک موجک نرم بهتر شناسایی می‌شود [۲۸]. طی یک ارزیابی آماری اولیه جهت برداشت فاز P در داده



شکل (۱): نمونه‌ی مصنوعی از رفتار تبدیل موجک نسبت به تغییرات (الف) دامنه، (ب) فاز و (پ) فرکانس. به ترتیب (الف) داده مصنوعی در حوزه زمان، (ب) ضرایب تبدیل موجک به‌دست آمده با استفاده از موجک دویچیز و (پ) پوش مربوط به ضرایب تبدیل موجک تغییرات دامنه، فاز و فرکانس را نشان می‌دهد. تغییرات در اطراف نمونه ۱۰۰۰ رخ داده است.



شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی برای برداشت زمان رسید فاز P.

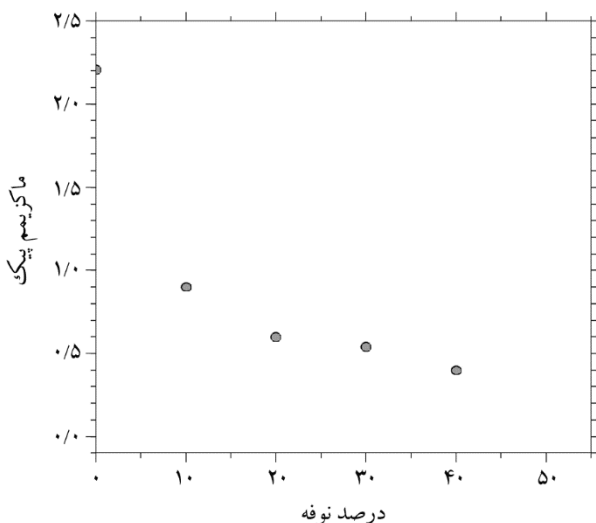
مختلف اعمال شده است. نویز اعمالی در این مطالعه نوفه سفید بوده و سیگنال به نوفه به صورت زیر تعریف می شود:

$$S/N = \frac{rms_s}{rms_s} \quad (4)$$

در اینجا  $rms$  معرف ریشه میانگین مجذور می باشد.  $s$  و  $n$  پنجره های مشابهی هستند که  $s$  پنجره سیگنال بعد از زمان رسید زمان ورود موج  $P$  می باشد؛ و  $n$  پنجره نوفه قبل از زمان ورود موج  $P$  می باشد. با توجه به آزمایش های صورت گرفته می توان نشان داد با افزایش نوفه امکان تشخیص زمان رسید کاهش می یابد. نوفه اعمال شده در این روش از نوع نوفه رندم و دارای طیف سفید می باشد. در مطالعه برداشت فاز با استفاده از داده مصنوعی نسبت سیگنال به نوفه تا ۲/۵ کاهش یافته است (جدول ۱ و شکل ۳).

جدول (۱): ماکزیمم بیکها و تفاوت در زمان رسیده ها با نسبت سیگنال به نوفه متفاوت.

$\Delta t$	Max-peak	%Noise
۰	۲/۲۳	۰
۰	۰/۹	۱۰
۰	۰/۶	۲۰
-۰/۰۱	۰/۵۴	۳۰
۰	۰/۴	۴۰



شکل (۳): ماکزیمم بیک مقادیر مشتق مثبت ER با درصد نوفه های مختلف که با افزایش درصد نوفه یک روند کاهشی را نشان می دهد.

در این مطالعه محاسبه زمان رسید فاز  $P$  با استفاده از اعمال تبدیل روی داده های مورد نظر و محاسبه پوش ضرایب تبدیل موجک در هر مقیاس و بر انباشش آنها و در نهایت محاسبه گرادیان با استفاده از پنجره های متحرک به دست آمده است. تمامی محاسبات صورت گرفته بر روی داده های خام با سرعت نمونه برداری ۵۰ هرتز اعمال شده است. جهت بهبود زمان برداشت موج  $P$  مشتق مثبت زمانی محاسبه شده است. منظور از مشتق مثبت زمانی همان مشتق زمانی است که فقط مقادیر مثبت آن در نظر گرفته می شود [۳۱]. بدین ترتیب ابتدا برای در نظر گرفتن تغییرات چند مقیاسی از لرزه نگاشت یک تابع مشخصه تعریف می شود؛ بنابراین  $CF$  با انباشته سازی چند مقیاسی از پوش ضرایب تبدیل موجک به صورت زیر محاسبه شده است [۳۲]:

$$CF(\alpha) = \sum_{\alpha=1}^{n_a} |E(\alpha, \tau) \xrightarrow{\text{for}} \tau = 1, \dots, n \quad (1)$$

در این رابطه  $\alpha$  و  $\tau$  به ترتیب پارامترهای انتقال، مقیاس و تعداد مقیاس هستند.  $E = (\alpha, \tau)$  تابع پوش از ضرایب تبدیل موجک ایستا برای مقیاس  $\alpha$  می باشد؛ و به صورت زیر تعریف می شود:

$$E(\alpha) = \sum_{\tau=1}^n \sqrt{w_s(\alpha, \tau)^2 + \overline{w}_s(\alpha, \tau)^2} \quad (2)$$

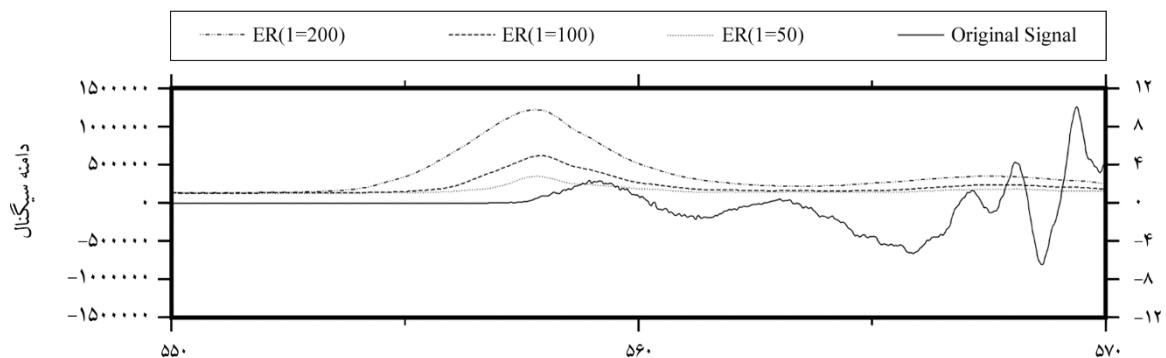
که در این رابطه  $\overline{w}_s$  تبدیل هیلبرت از ضرایب تبدیل موجک است. گرادیان گیری با استفاده از دو پنجره متوالی، تابع  $CF$  و رابطه (۱) به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$ER(\tau) = \frac{\sum_{i=\tau}^{\tau+1} CF(i)}{\sum_{i=\tau}^{\tau-1} CF(i)} \quad (3)$$

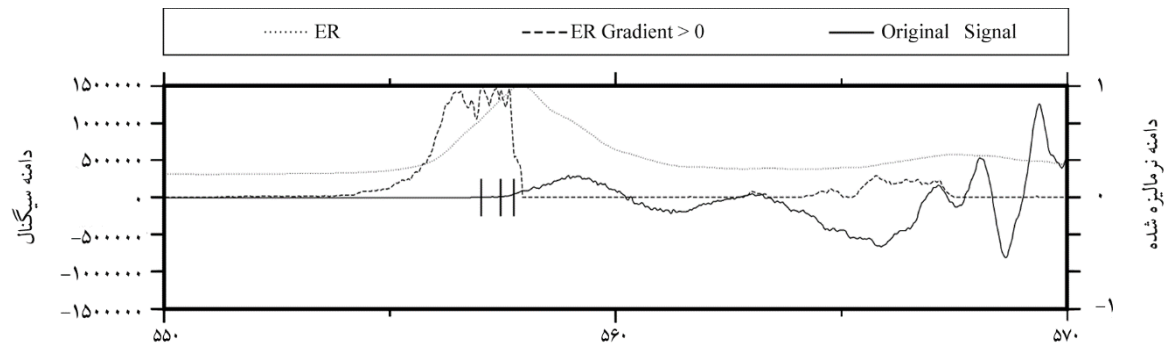
که در آن  $l$  طول پنجره انرژی تابع مشخصه قبل و بعد از نقطه آزمون در  $\tau$  است که معادل محاسبه لبه به روش کنی [۳۳] می باشد. ابتدا در این مطالعه، الگوریتم پیشنهادی جهت آزمایش و صحت کارایی بر روی داده های مصنوعی اعمال گردیده است. الگوریتم پیشنهادی بر روی تک تک تریس های مصنوعی با نوفه های مختلف با سطح نوفه  $S/N$  متفاوت و موجک های

معیار مناسبی برای تعیین زمان رسید امواج P در زلزله‌های کوچک باشد؛ و با در نظر گرفتن طول پنجره بلند (تعداد نمونه‌ها ۳ برابر  $f_s$ ) برای گرادیان، دامنه ER افزایش می‌یابد ولی ممکن است باعث ایجاد افزایش خطا در تعیین زمان رسید شود و همچنین این افزایش طول پنجره باعث می‌شود که رویدادهای کوچک نادیده گرفته شوند. از این رو طول پنجره توصیه شده در این مطالعه ۱۰۰ نمونه برای سرعت نمونه‌برداری ۵۰ هر تری می‌باشد (شکل‌های ۴ تا ۶).

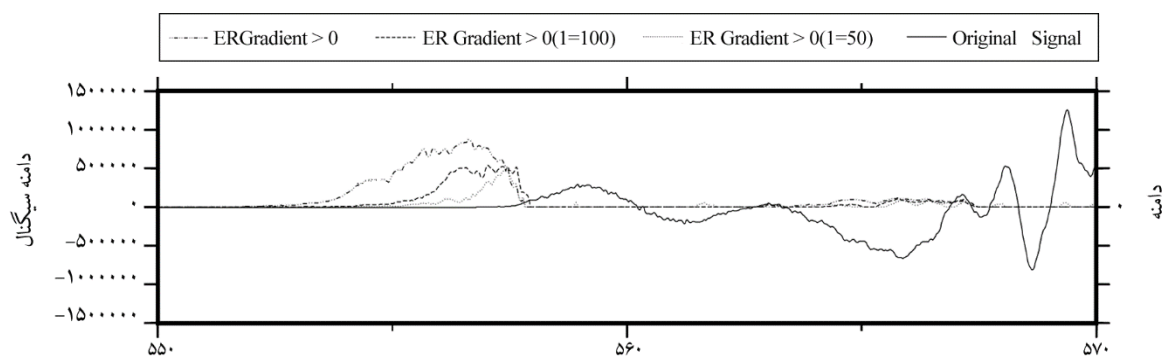
بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته برداشت زمان رسید موج P در این مطالعه به طول پنجره زمانی گرادیان بستگی دارد، به طوری که با داشتن یک پنجره کوتاه الگوریتم نسبت به تغییرات جانبی در لرزه‌نگاشت حساس خواهد بود. لذا در نظر گرفتن یک پنجره کوتاه (تعداد نمونه‌ها کوچک‌تر از  $f_s$ ) باعث تولید ماکزیم‌های محلی زیادی خواهد شد که ممکن است در تشخیص زمان رسید واقعی فاز P خطا ایجاد کند؛ اما از طرف دیگر می‌تواند



شکل (۴): ER با طول پنجره‌های مختلف، با افزایش طول پنجره دامنه ER افزایش می‌یابد.



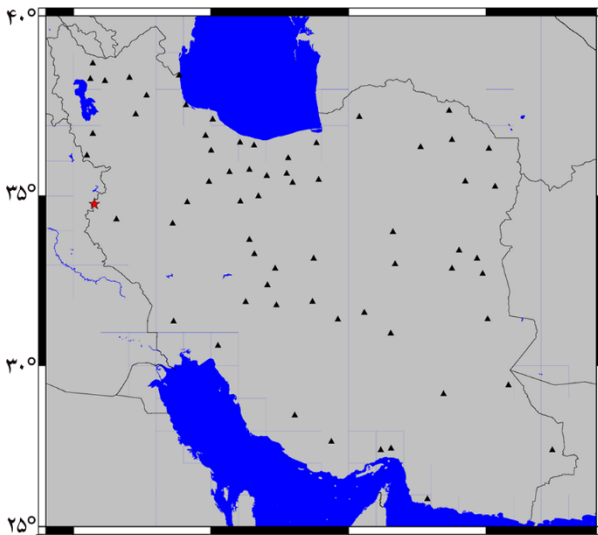
شکل (۵): زمان ماکزیمم ER و مشتق ER، همان‌طور که می‌بینید ماکزیمم ER دارای یک تأخیر بعد از برداشت دستی است. سمت چپ دامنه سیگنال را نشان می‌دهد و سمت راست دامنه نرمالیزه شده ER و مشتق ER را نشان می‌دهد. خطوط عمودی کوتاه به ترتیب از راست به چپ مربوط به ماکزیمم مشتق ماکزیمم مشتق ER، برداشت دستی و ماکزیمم ER.



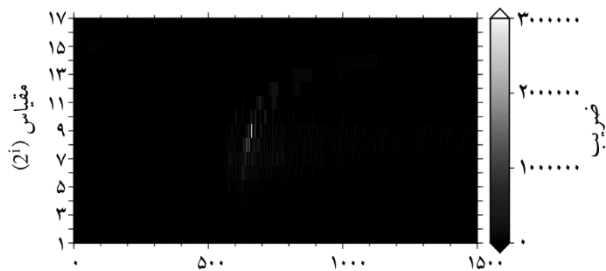
شکل (۶): ماکزیمم مشتق ER برای پنجره‌های با اندازه‌های متفاوت.

شده است (شکل های ۱۳ و ۱۴).

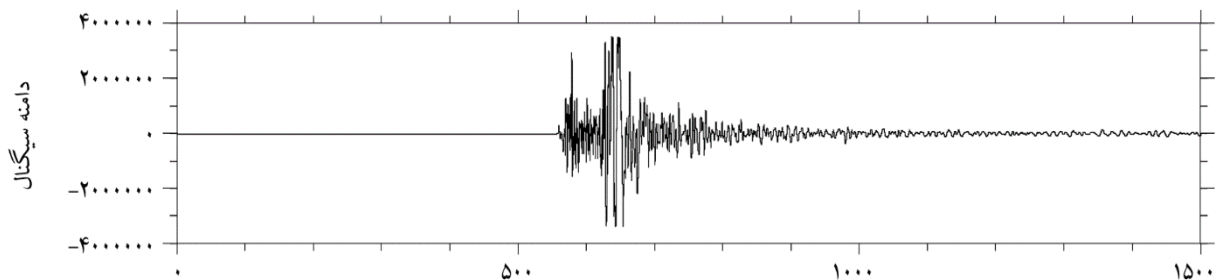
به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهاد شده با یک روش خودکار مرجع شناخته شده برداشت فاز، نتایج این روش بر روی مجموعه داده های فوق الذکر با نتایج به دست آمده از روش STALTA



شکل (۷): توزیع ایستگاه های (مثلث ها) شبکه مرکز لرزه نگاری کشوری که زلزله (ستاره قرمز) آبان ماه ۱۳۹۶ کرمانشاه با بزرگی  $M_w = 7/3$  را ثبت کرده اند (جدول پیوست).



شکل (۸): ضرایب تبدیل موجک محاسبه شده برای شکل موج ثبت شده در ایستگاه CSN با استفاده از تبدیل موجک ایستا. محورهای افقی و عمودی به ترتیب زمان و مقیاس تبدیل موجک را نشان می دهند.



شکل (۹): سری زمانی از سیگنال اصلی مؤلفه عمودی مربوط به ایستگاه CSN. فاصله رومرکزی این ایستگاه ۴۳۱ کیلومتر می باشد.

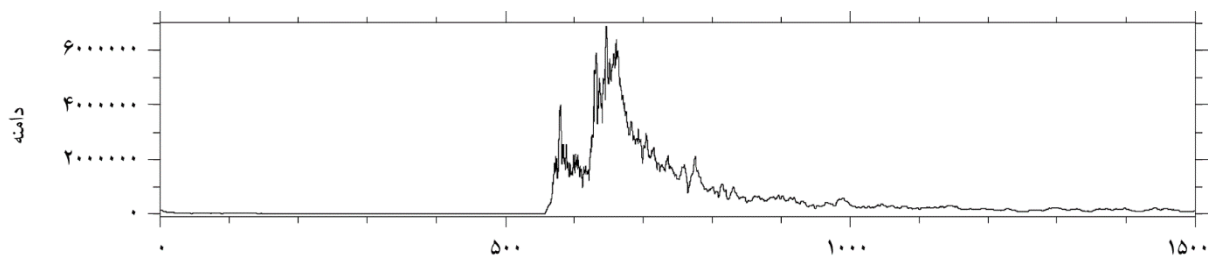
ماکزیمم  $ER$  دارای یک تأخیر زمانی بعد از زمان رسید واقعی است و این تأخیر شامل یک جهش رو به جلو نسبت به زمان رسید فاز است (شکل ۴) همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود ماکزیمم پیک  $ER$  بعد از زمان برداشت دستی می باشد. به منظور کاهش این تأخیر و بهینه کردن زمان رسید از  $ER$  مشتق مثبت گرفته شده است:

$$t_p = \max\left(\frac{dER}{dt}\right)^+ \quad (5)$$

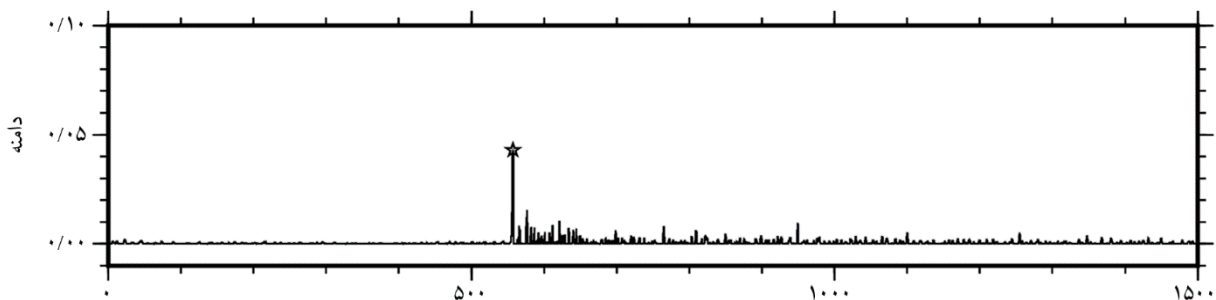
در معادله بالا، + نشان دهنده ی مشتق زمانی مثبت است. پس ماکزیمم مشتق زمانی  $ER$  نشان دهنده ی زمان رسید فاز  $P$  می باشد (شکل های ۵ و ۶).

داده های طبیعی این مطالعه شکل موج های مربوط به زلزله ۱۳۹۶/۰۸/۲۱ (۱۲ نوامبر ۲۰۱۷) از گله کرمانشاه با بزرگی  $M_w = 7/3$  (شکل ۷). مجموعه داده ها مربوط به زلزله اصلی شامل ۲۵۷ نگاشت می باشند که به منظور برداشت زمان رسید موج  $P$  ۶۰ مؤلفه عمودی نگاشت ها انتخاب و مورد بررسی قرار گرفتند. شرط انتخاب این تریس ها عدم گاف زمانی در شکل موج ها، عدم اشباع دامنه های شان و قابلیت برداشت دستی فاز  $P$  جهت مقایسه می باشد. پس از انتخاب داده ها، متوسط  $18$  و روند خطی  $19$  از آنها حذف گردید.

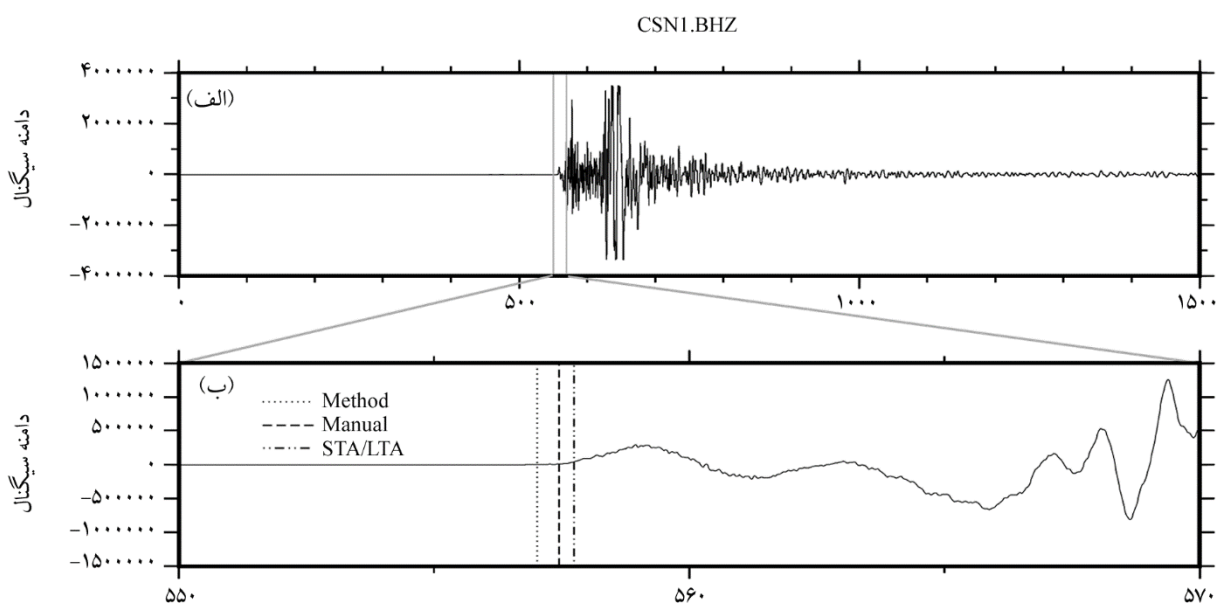
جهت برداشت موج  $P$  با استفاده از تبدیل موجک، موجک مادر دایجیز انتخاب و نتایج برداشت آن با برداشت دستی و روش STALTA ارزیابی شده است. روش پیشنهادی بر روی یک سیگنال به صورت کامل انجام شده است (شکل های ۸ تا ۱۲) و دو نمونه برداشت نهایی از زمان رسید موج  $P$  نیز نشان داده



شکل (۱۰): انباشته‌سازی از پوش‌های به‌دست آمده از ضرایب تبدیل موجک ایستا در مقیاس‌های مختلف.



شکل (۱۱): مشتق مثبت از ضرایب ایجاد شده از مشتق پنجره‌های متوالی. ستاره ماکزیمم پیک را نشان می‌دهد.

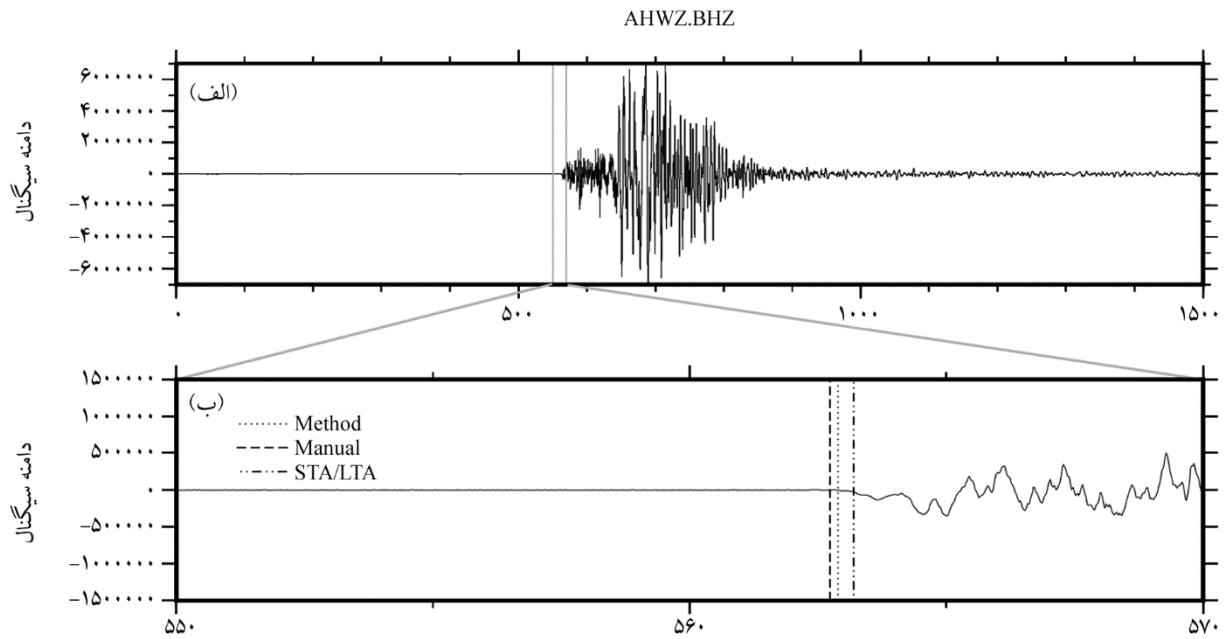


شکل (۱۲): (الف) مؤلفه عمودی سیگنال اصلی ایستگاه CSN1 و (ب) نسخه بزرگ‌نمایی شده در اطراف زمان ورود موج P برداشت روش ما قبل از برداشت دستی است (نقطه چین) برداشت روش STA/LTA با یک تأخیر بعد از برداشت دستی می‌باشد.

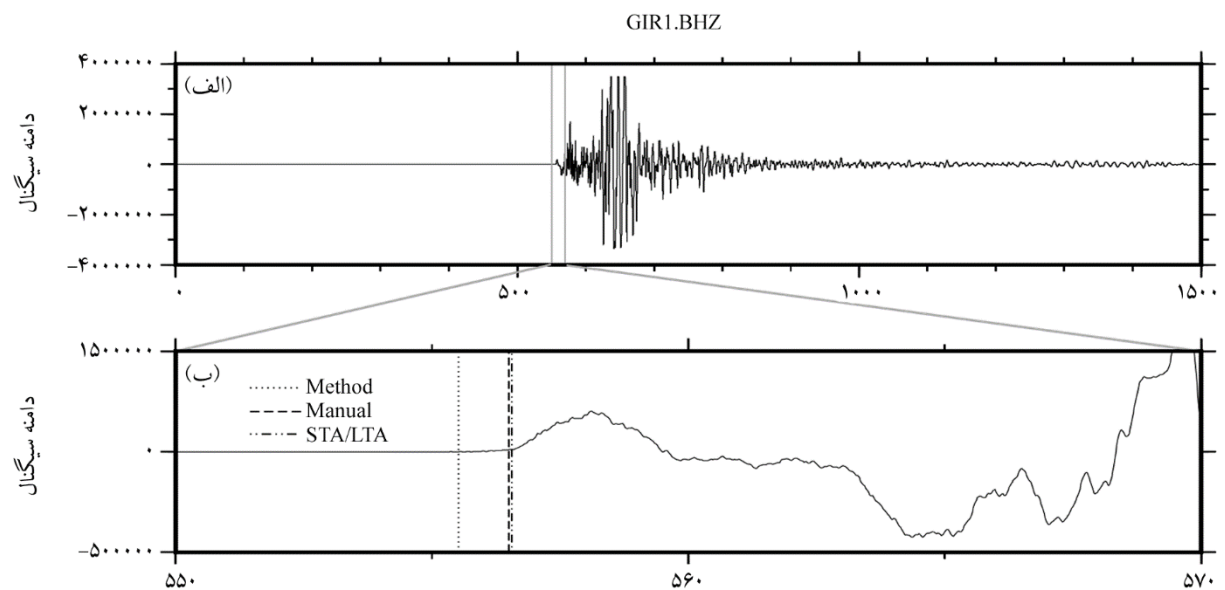
مقایسه شده است. انتخاب طول پنجره نقش قابل توجهی در عملکرد الگوریتم STA/LTA دارد. یک پنجره STA که خیلی کوتاه است، منجر به برداشت نوسانات نوفه خواهد شد. از سوی دیگر، اگر پنجره LTA بیش از حد طولانی باشد، رویدادهای کوچک نادیده گرفته می‌شوند. از این رو، انتخاب طول پنجره در

STA و LTA بستگی به مشخصه فرکانس سیگنال دارد. به‌طور کلی انتخاب پنجره در الگوریتم STA/LTA باید طولانی‌تر از چند دوره سیگنال قابل تشخیص باشد، درحالی که بهینه طول پنجره LTA باید طولانی‌تر از چند پریود نوسانات نویز باشد. طبق مطالعات هان [۳۴] در این مطالعه اندازه پنجره STA پیشنهادی

مقایسه شده است. انتخاب طول پنجره نقش قابل توجهی در عملکرد الگوریتم STA/LTA دارد. یک پنجره STA که خیلی کوتاه است، منجر به برداشت نوسانات نوفه خواهد شد. از سوی دیگر، اگر پنجره LTA بیش از حد طولانی باشد، رویدادهای کوچک نادیده گرفته می‌شوند. از این رو، انتخاب طول پنجره در



شکل (۱۳): نسخه بزرگنمایی شده از برداشت‌های حاصل از روش‌های دستی، STA/LTA و روش پیشنهادی برای ایستگاه AHWZ.BHZ.



شکل (۱۴): نسخه بزرگنمایی شده از برداشت‌های حاصل از روش‌های دستی، STA/LTA و روش پیشنهادی برای ایستگاه GIR1.BHZ.

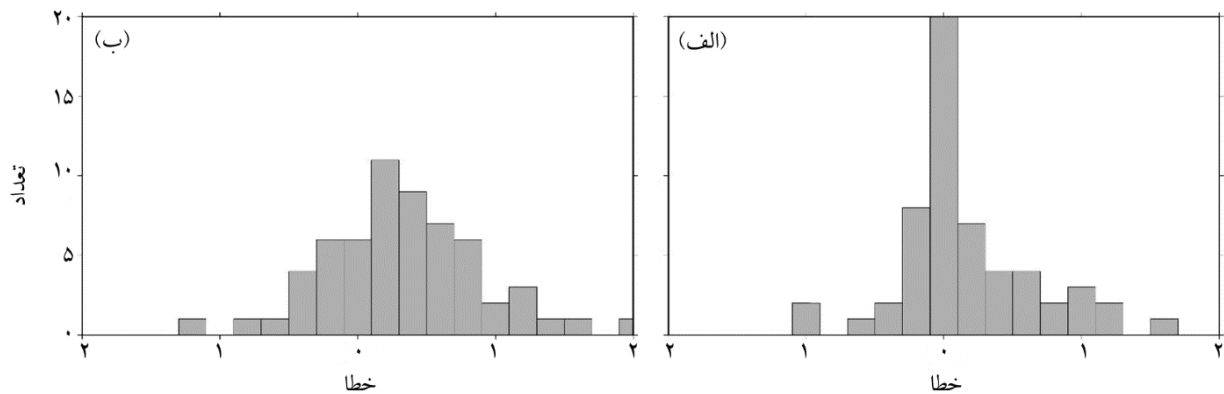
می‌تواند این گونه خلاصه شود که برای ۶۰ مؤلفه عمودی ثبت شده، در اغلب موارد، زمان شروع فاز  $P$  که توسط روش پیشنهادی شناسایی شده در مقایسه با STA/LTA به برداشت تحلیلی نزدیک‌تر است. در برخی موارد هم برداشت‌های روش پیشنهادی در این مطالعه با برداشت‌های دستی و STA/LTA مشابه بود (جدول ۲ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳).

$0.5 \times f_s$  و اندازه پنجره LTA برابر  $0.5 \times f_s$  می‌باشد که  $f_s$  فرکانس نمونه‌برداری است. در روش پیشنهادی تبدیل موجک اکثر برداشت‌ها قبل از برداشت‌های تحلیلی هستند در حالی که برداشت‌های مرتبط با STA/LTA بعد از برداشت دستی هستند (جدول ۲). مقایسه کلی نتایج حاصل از روش پیشنهادی در این مطالعه و روش STA/LTA در مجموعه داده‌های ذکر شده



جدول (۲): چند نمونه از برداشت‌های زمان شروع فاز P مربوط به ایستگاه‌های مختلف.

شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
ایستگاه	HAGD	JASK	QAMS	GAR	LAS	RAM	SAD	RAZ	KBAM	SBZV	TBJM	TEG	TEH	AFRZ	LHJ2
تحلیلگر	۵۴۲/۱۲	۶۸۶/۹۸	۵۷۰/۱۲	۵۸۲/۱۷	۵۸۴/۹	۵۹۰/۲	۶۰۲/۴۸	۵۵۲/۴۳	۶۷۰/۲	۶۳۹/۳	۶۶۸/۴	۶۵۳/۸۲	۵۶۸/۷۵	۶۵۵/۲۶	۵۶۱/۶۵
روش	۵۴۳/۳۶	۶۸۷/۳۷	۵۷۰	۵۸۲/۴	۵۸۴/۹	۵۸۹/۹	۶۰۲/۴۸	۵۵۱/۴۸	۶۷۰/۰۴	۶۳۹/۳۳	۶۶۸/۴	۶۵۳/۸۲	۵۶۸/۷۸	۶۵۵/۲۶	۵۶۱/۳۸
STA/LTA	۵۴۴/۰۲	۶۸۷/۲۲	۵۷۰/۶۴	۵۸۲/۶۶	۵۸۵/۶۶	۵۹۰/۰۶	۶۰۳/۹۴	۵۵۲	۶۷۱/۰۴	۶۳۸/۵۲	۶۶۷/۹	۶۵۴/۱۸	۵۶۸/۳۲	۶۵۵/۶	۵۶۲/۵۴
فاصله	۳۰۹	۱۵۲۴	۵۳۰	۶۳۹	۶۵۸	۶۹۸	۸۰۲	۳۸۶	۱۳۵۰	۱۰۸۶	۱۳۲۷	۱۲۱۷	۵۳۲	۱۲۲۹	۴۷۰



شکل (۱۵): هیستوگرام خطای برداشت بین (الف) برداشت‌های دستی با روش پیشنهادی و (ب) برداشت دستی با روش STA/LTA برای ۶۰ نمونه.

با  $P$  به  $S$  در یک مرز مشترک ممکن است به‌عنوان اولین زمان رسید موج  $S$  به‌اشتباه تفسیر شوند. یکی از مزایای برداشت زمان رسید دقیق از موج  $S$ ، تعیین مکان دقیق و قابل اطمینان از زلزله می‌باشد. همچنین تعیین سرعت موج  $S$  پارامتر کلیدی برای محاسبه نسبت پواسون است. موج  $S$  همیشه نسبت به زمان رسید موج  $P$  در ایستگاه‌ها تأخیر دارد و مقدار این تأخیر بستگی به فاصله رومرکزی و مدل سرعتی زمین دارد [۳۵]. در این مطالعه با استفاده از ادغام کردن تبدیل موجک ایستا و مدل  $AR$  زمان رسید موج  $S$  برآورد شده است. برای تشخیص زمان رسیدن موج  $S$  در این تحقیق فرضیه‌های زیر در نظر گرفته شده است:

۱. محدوده فرکانسی موج  $S$  و  $P$  متفاوت بوده، موج  $S$  دارای محتوای فرکانسی بیشتری می‌باشد.
۲. دامنه موج  $S$  از موج  $P$  بزرگ‌تر بوده و در زمان رسیدن موج  $S$ ، در یک بازه زمانی کوچک، اندازه موج دریافتی تغییرات بزرگی دارد.
۳. تشخیص زمان رخداد موج  $S$  در مؤلفه‌های  $E$  و  $N$  دارای دقت بیشتری نسبت به مؤلفه  $Z$  می‌باشد.

در نهایت برای ارزیابی خطای برداشت، برداشت‌های روش پیشنهادی با برداشت‌های روش STA/LTA در ۶۰ نمونه نگاشت از یک زلزله با برداشت دستی مقایسه شده است. خطای بین برداشت دستی و برداشت خودکار دارای توزیع گاوسی با متوسط صفر می‌باشد ولی شایان‌ذکر است این توزیع همراه با تغییرات جانبی به سمت مثبت می‌باشد که این نشان‌دهنده تأخیر در تشخیص زمان رسید فاز با استفاده از این روش است که یک خطای سیستمی قابل تصحیح است. میانگین خطای برداشت و انحراف معیار در روش ما به ترتیب  $۰/۰۱$  ثانیه و  $۰/۲۲$  ثانیه بود و این مقادیر برای روش STA/LTA به ترتیب  $۰/۳$  ثانیه و  $۱/۳۸$  ثانیه بود (شکل ۱۵).

## ۲-۲- الگوریتم پیشنهادی برای برداشت زمان رسید فاز S

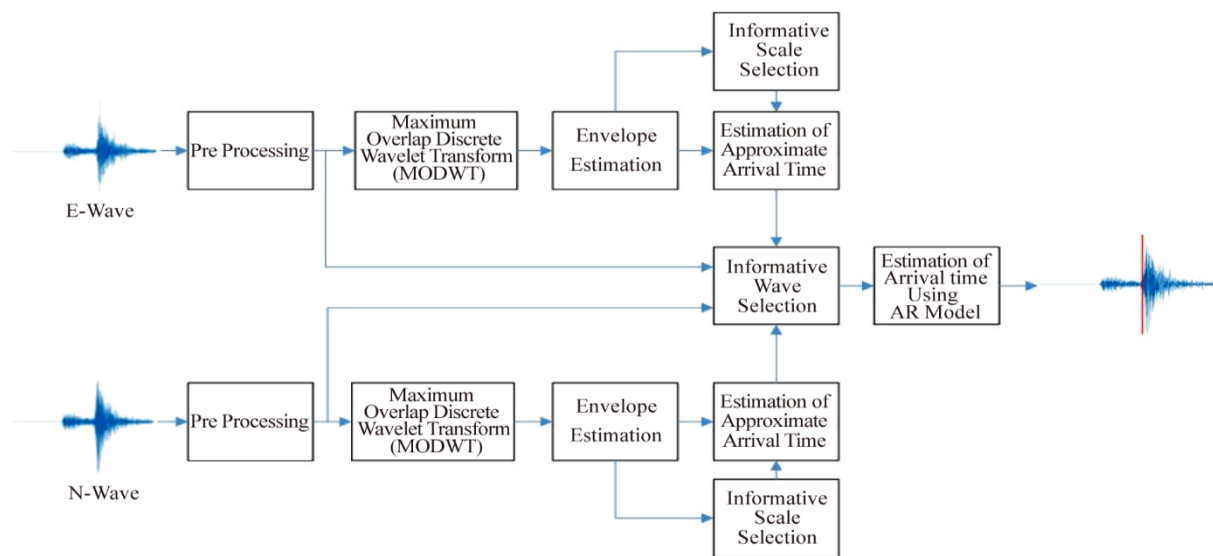
موج  $S$  معمولاً روی مؤلفه‌های افقی  $E$  و  $N$  برداشت می‌شود، زیرا فاز  $S$  یک موج برشی با حرکت ذرات در جهت عرضی می‌باشد؛ بنابراین دامنه آن در مؤلفه عرضی بیشتر است. شروع موج  $S$  بر روی لرزه‌نگاشت معمولاً در پس‌زمینه گدای موج  $P$  قرار دارد. این نکته قابل‌ذکر است که فازهای تبدیل شده  $S$  به  $P$

به صورت مجزا بررسی می گردد.

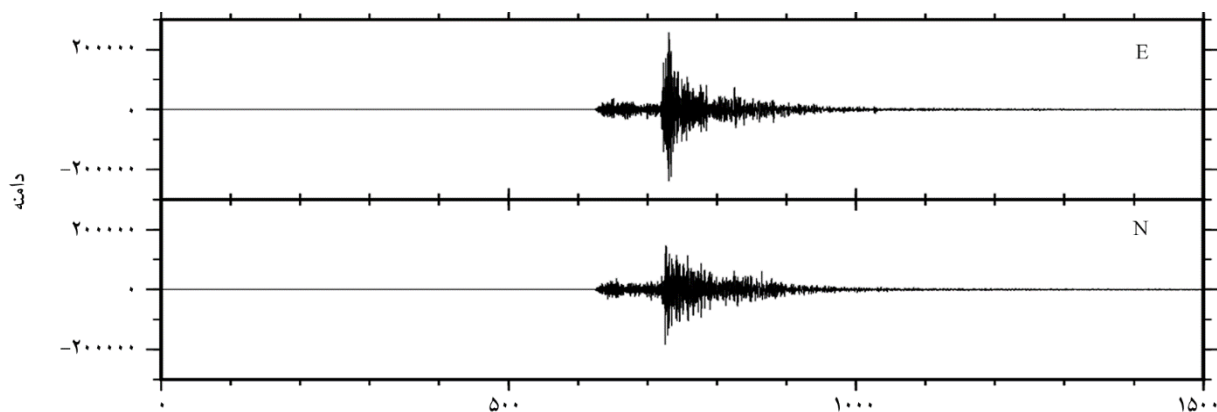
### ۲-۱-۲-۲- مرحله پیش پردازش

در این مرحله با توجه به فرض اول، ابتدا از یک فیلتر پایین گذر برای تضعیف اثر موج  $P$  استفاده شده است. فیلتر استفاده شده در این تحقیق، فیلتر  $FIR$  حداقل مرتبه طراحی شده با روش پارکس-مک کلان<sup>۲۰</sup> است. پارامترهای طراحی این فیلتر، فرکانس در باند گذر  $2/5$  هرتز، فرکانس در باند قطع  $3/5$  هرتز، تضعیف در باند قطع و  $5\text{db}$  ریپل در ناحیه گذر است. این مقادیر بر اساس بزرگی زلزله، فاصله زلزله از ایستگاه تنظیم شده است. در ادامه مؤلفه های  $E$  و  $N$  با  $E(t)$  و  $N(t)$  و سیگنال های متناظر پیش پردازش شده آنها با  $\tilde{E}(t)$  و  $\tilde{N}(t)$  نشان داده می شود (شکل ۱۷).

با توجه به فرضیه اول، در این تحقیق در ابتدا با فیلتر کردن محدوده فرکانسی مربوط به موج  $S$  توسط یک فیلتر پایین گذار، تأثیر موج در مؤلفه های دریافتی تضعیف می گردد. در مرحله بعد، با توجه به فرضیه دوم، زمانی که مؤلفه دریافتی بزرگ ترین دامنه را دارد، تخمین زده می شود. با توجه به اینکه معمولاً زمان رسیدن موج  $S$  مدت زمان کوتاهی قبل از زمان ماکزیمم پیک می باشد، در مرحله آخر با استفاده از یک مدل  $AR$  زمان نهایی رسیدن موج  $S$  در یک پنجره زمانی کوتاه قبل از زمان پیک ماکزیمم جستجو شده و بهینه می گردد. ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، با توجه به فرض سوم، در این تحقیق از دو مؤلفه  $E$  و  $N$  برای تخمین زمان رسیدن موج  $S$  استفاده شده است. در ادامه هر بخش الگوریتم



شکل (۱۶): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای برداشت زمان رسید موج  $S$ .

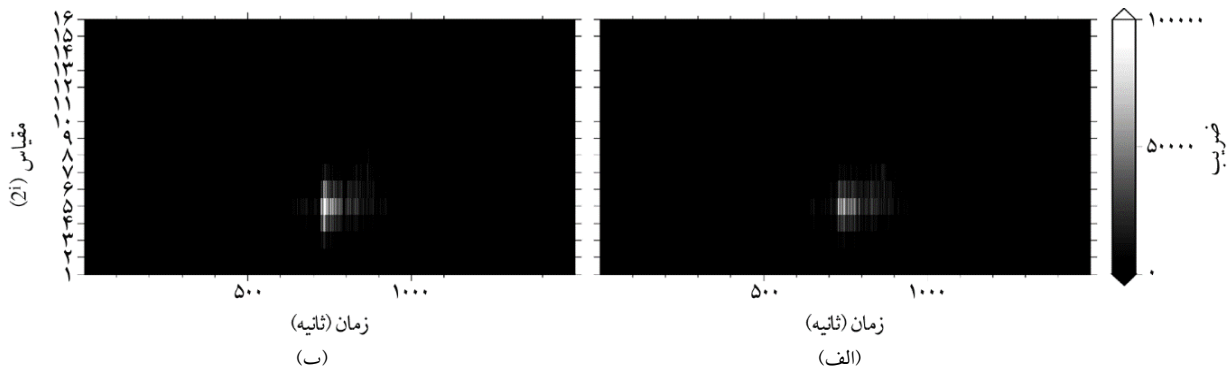


شکل (۱۷): مؤلفه های  $E$  و  $N$  جهت برداشت زمان رسید موج  $S$  پس از پیش پردازش.

بین آنها زیر بانندی که دارای ماکزیمم پیک بزرگ‌تری باشد برای ادامه تحلیل مناسب‌تر است. در واقع فرض شده است که زمان رسیدن موج S در این زیرباند به دلیل دارا بودن انرژی بیشتر در آن لحظه، به صورت دقیق‌تری قابل تشخیص است. البته همان‌طور که گفته شد، بعد از چند نوسان از لحظه رسیدن موج S، مؤلفه‌های E و N به مقدار حداکثر دامنه می‌رسد. اگرچه زمان وقوع حداکثر دامنه در زیرباندها به سادگی قابل محاسبه است، اما این زمان، با یک تأخیر پس از زمان رسیدن موج S اتفاق می‌افتد. در این تحقیق تخمین اولیه زمان رسیدن موج S، زمان وقوع اولین مینیمم محلی کوچک‌تر از نصف دامنه ماکزیمم به‌عنوان آستانه و قبل از زمان پیک ماکزیمم فرض شده است. فرض کنید  $\tilde{E}_k^D(t)$  و  $\tilde{N}_k^D(t)$  نشان‌دهنده‌ی پوش زیرباندهای K ام باشند. همان‌طور که گفته شد، برای تخمین اولیه زمان رسیدن موج S، سیگنال‌های پوشی که دارای ماکزیمم پیک بزرگ‌تری باشند انتخاب می‌گردند. در ادامه پوش این دو زیر باند انتخاب شده برای دو مؤلفه E و N با  $\hat{E}_e^D(t)$  و  $\hat{N}_n^D(t)$  نشان داده می‌شود (شکل ۱۸). اگر  $t_e^{\max}$  و  $t_n^{\max}$  به ترتیب زمان رخداد ماکزیمم پیک این دو پوش باشند، تخمین اولیه زمان رسیدن موج S به صورت زیر است [۳۶]:

$$tS_e = \left\{ t \left| \frac{d\hat{E}_e^D(t)}{dt} = 0, t = \operatorname{argmin}_{t'} |t' - t_e^{\max}| \right. \right\} \quad (۸)$$

$$tS_n = \left\{ t \left| \frac{d\hat{N}_n^D(t)}{dt} = 0, t = \operatorname{argmin}_{t'} |t' - t_n^{\max}| \right. \right\} \quad (۹)$$



شکل (۱۸): ضرایب تبدیل موجک به دست آمده برای مؤلفه E (الف) و مؤلفه N (ب). حداکثر مقدار دامنه ضرایب در مقیاس ۲<sup>۵</sup> مشاهده می‌شود.

پس از این مرحله تخمین زمان رسیدن موج S در دو مرحله انجام می‌شود. در ابتدا با استفاده از تبدیل موجک ایستا یک زمان تخمینی اولیه محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه مدت زمان کمی بعد از زمان رسیدن موج S دامنه سیگنال حداکثر می‌شود، در این مرحله سعی می‌شود تخمین اولیه در اندک زمانی قبل از زمان پیک ماکزیمم باشد. در مرحله بعد با استفاده از یک مدل AR تخمین نهایی زمان رسیدن موج S محاسبه می‌گردد.

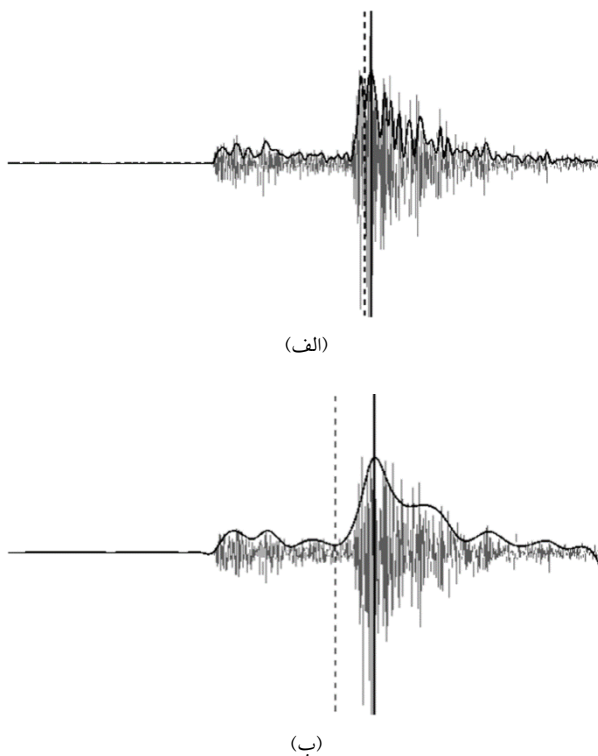
### ۲-۲-۲- تخمین اولیه زمان رسیدن موج S با استفاده از تبدیل موجک

در این تحقیق از سیگنال تا حداکثر سطح ممکن تبدیل MODWT گرفته می‌شود. سپس زیرباند مربوط به سطحی که حداکثر دامنه ضرایب در آن قرار دارد انتخاب می‌شود. اگر N طول سیگنال دریافتی باشد، حداکثر سطح تبدیل MODWT برابر است با:  $K = \lceil \log_2(N) \rceil$  بنا بر این سیگنال دریافتی به K زیرباند جزئیات سیگنال و یک زیرباند تقریب سیگنال به صورت زیر (معادله‌های ۶ و ۷) تجزیه می‌شود که طول هر زیر باند با طول سیگنال (N) برابر است.

$$\tilde{E}(t) = \sum_{k=1}^K \tilde{E}_k^D(t) + \tilde{E}_k^A(t) \quad (۶)$$

$$\tilde{N}(t) = \sum_{k=1}^K \tilde{N}_k^D(t) + \tilde{N}_k^A(t) \quad (۷)$$

در این رابطه  $\tilde{E}_k^D(t)$  و  $\tilde{N}_k^D(t)$  زیرباندهای k ام جزئیات و  $\tilde{E}_k^A(t)$  و  $\tilde{N}_k^A(t)$  زیرباند تقریب سیگنال‌های پیش پردازش شده E و N می‌باشند. با توجه به اینکه اطلاعات زمان رسیدن موج S در زیرباندهای جزئیات، با دقت بیشتری وجود دارد، از



شکل (۱۹): تخمین پوشش با دو مقدار (الف) طول  $L$  کوچک و (ب) طول  $L$  بزرگ.

در این مرحله دو تخمین  $tS_e$  و  $tS_n$  برای زمان رسیدن موج  $S$  به دست آمده است. در مرحله بعد با استفاده از یک مدل  $AR$  برای یکی از سیگنال‌های  $\tilde{E}(t)$  یا  $\tilde{N}(t)$ ، تخمین نهایی زمان رسیدن موج  $S$  محاسبه می‌شود. انتخاب یکی از دو سیگنال با استفاده از معیار واریانس به صورت زیر انجام می‌شود.

$$J(\tilde{E}(t)) = \text{var}(\tilde{E}_{tS_e}(t)) + \text{var}(\tilde{E}_{tS_n}(t))$$

$$\tilde{E}_{tS_e}(t) = \tilde{E}(t) \quad t = tS_e - w, \dots, tS_e + w$$

$$\tilde{E}_{tS_n}(t) = \tilde{E}(t) \quad t = tS_n - w, \dots, tS_n + w$$
(۱۱)

$$J(\tilde{N}(t)) = \text{var}(\tilde{N}_{tS_e}(t)) + \text{var}(\tilde{N}_{tS_n}(t))$$

$$\tilde{N}_{tS_e}(t) = \tilde{N}(t) \quad t = tS_e - m, \dots, tS_e + m$$

$$\tilde{N}_{tS_n}(t) = \tilde{N}(t) \quad t = tS_n - m, \dots, tS_n + m$$
(۱۲)

این دو معیار نشان‌دهنده‌ی واریانس سیگنال‌های  $\tilde{E}(t)$  و  $\tilde{N}(t)$  در یک پنجره زمانی به طول دو متر اطراف زمان‌های  $tS_e$  و  $tS_n$  است ( $m$  معرف طول پنجره زمانی می‌باشد). هر

بنابراین در این مرحله دو تخمین اولیه برای زمان رسیدن موج  $S$  به دست می‌آید. این زمان‌ها با توجه به رابطه بالا وابسته به الگوریتم استخراج پوش می‌باشد. در این تحقیق برای تخمین پوش از روش درون‌یابی با توابع Spline در محل ماکزیمم‌های محلی استفاده شده است. با توجه به اینکه از لحظه رسیدن موج  $S$  تا زمان وقوع پیک ماکزیمم، چندین نوسان وجود دارد، استفاده از تمام ماکزیمم‌های محلی باعث ایجاد خطای زیادی در تخمین رابطه بالا می‌شود. در واقع در صورت استفاده از تمام ماکزیمم‌های محلی  $tS$  و  $t^{max}$  تقریباً برابر خواهند بود. برای افزایش فاصله بین آنها، از هر  $L$  ماکزیمم محلی یک نمونه باقی می‌ماند و بقیه حذف می‌شوند. با این کار شکل پوش سیگنال نرم‌تر شده و اختلاف  $tS$  و  $t^{max}$  بیشتر می‌شود. البته در صورتی که مقدار  $L$  بزرگ باشد، خطای تخمین زمان  $t^{max}$  و در نتیجه  $tS$  افزایش خواهد یافت. در صورت کوچک بودن  $L$  اختلاف  $tS$  و  $t^{max}$  کم بوده و تخمین  $tS$  مناسب نخواهد بود. در این تحقیق مقدار  $L$  برابر با ۱۰۰ نمونه در نظر گرفته شده است و پوش سیگنال در هر زیربازه از زمان، توسط یک تابع Spline به صورت زیر درون‌یابی می‌گردد.

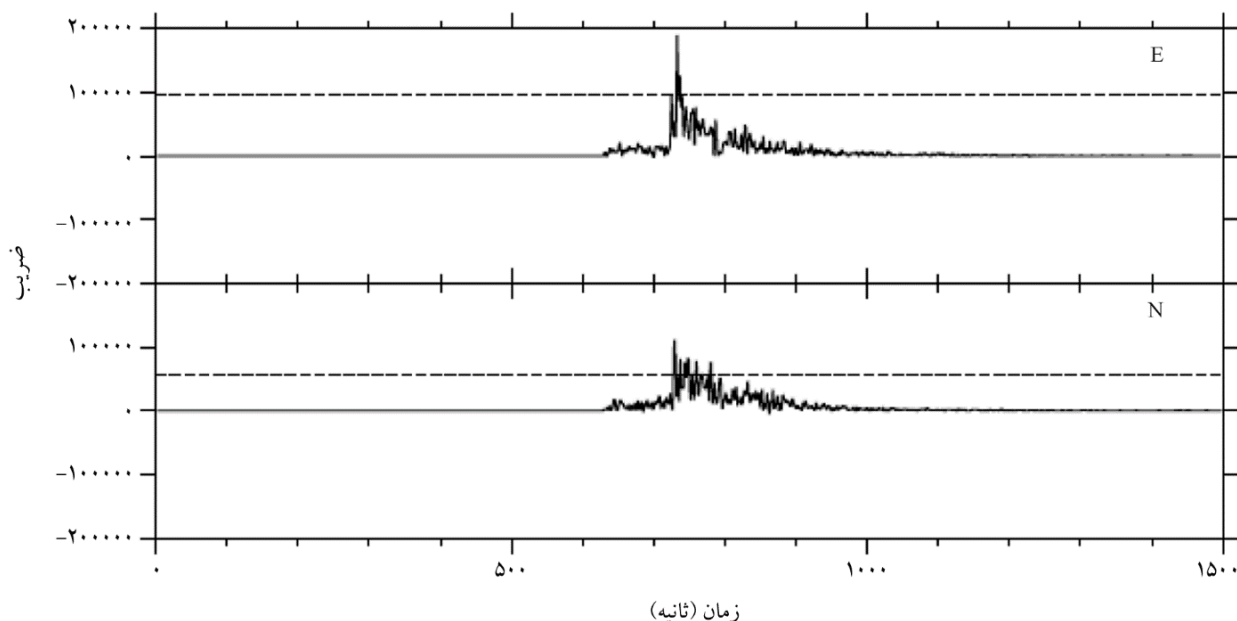
$$C(t) = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad (۱۰)$$

ضرایب  $a$  تا  $d$  با استفاده از ماکزیمم‌های محلی تخمین زده می‌شوند. در شکل (۱۹) برای دو مقدار متفاوت  $L$  تخمین اولیه برای زمان رسیدن موج  $S$  (خط چین) نشان داده شده است. در این شکل‌ها زمان وقوع ماکزیمم پیک با خط سیاه پررنگ نشان داده شده است. در شکل (۱۹-الف) به‌ازای یک مقدار  $L$  کوچک و (۱۹-ب) به‌ازای یک مقدار  $L$  بزرگ است. همان‌طور مشاهده می‌شود در شکل (۱۹-الف)، فاصله بین خط چین و خط سیاه پررنگ کم و در شکل (۱۹-ب) زیاد است. در هر دو شکل، تخمین زمان رسیدن  $S$  مناسب نیست. در این مرحله از تحقیق، سعی بر یافتن تخمینی از زمان رسیدن موج  $S$  است که بعد از زمان رسید واقعی و قبل از زمان رخداد حداکثر پیک باشد. بنابراین مقدار  $L$  استفاده شده در شکل (۱۹-الف) برای این منظور مناسب‌تر است.

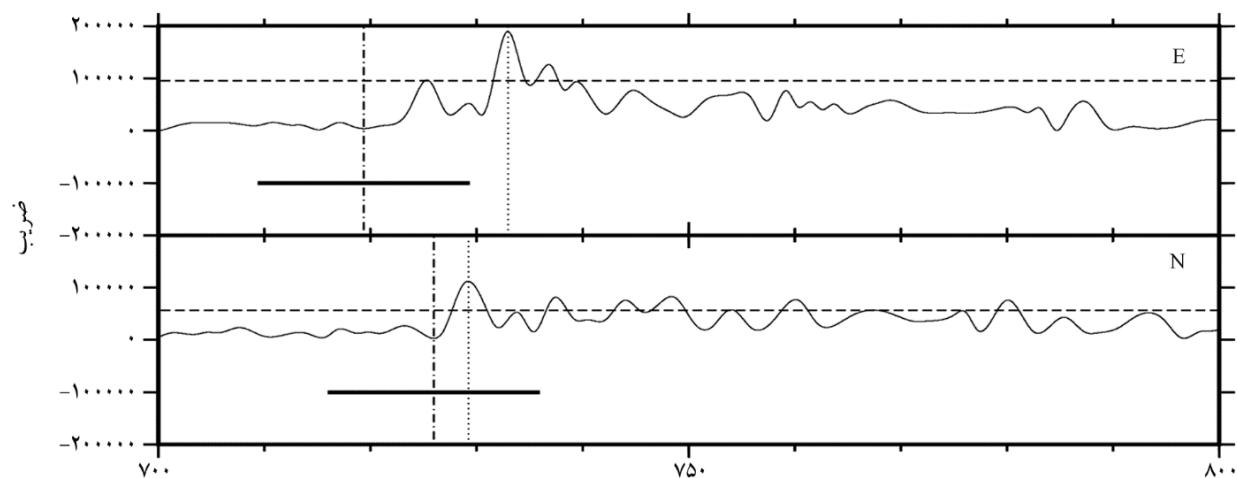
قبلاً ذکر شد مؤلفه  $E$  برای ادامه تحلیل انتخاب می‌شود.

۲-۳- تخمین نهایی زمان رسید موج  $S$  با استفاده از مدل  $AR$  در این مرحله با فرض اینکه  $t_S$  محاسبه شده از مراحل قبل، به اندازه یک پنجره زمانی به طول  $W$  قبل از زمان واقعی رسیدن موج  $S$  می‌باشد، با استفاده از یک مدل  $AR$  تخمین نهایی زمان رسیدن موج  $S$  محاسبه می‌گردد.

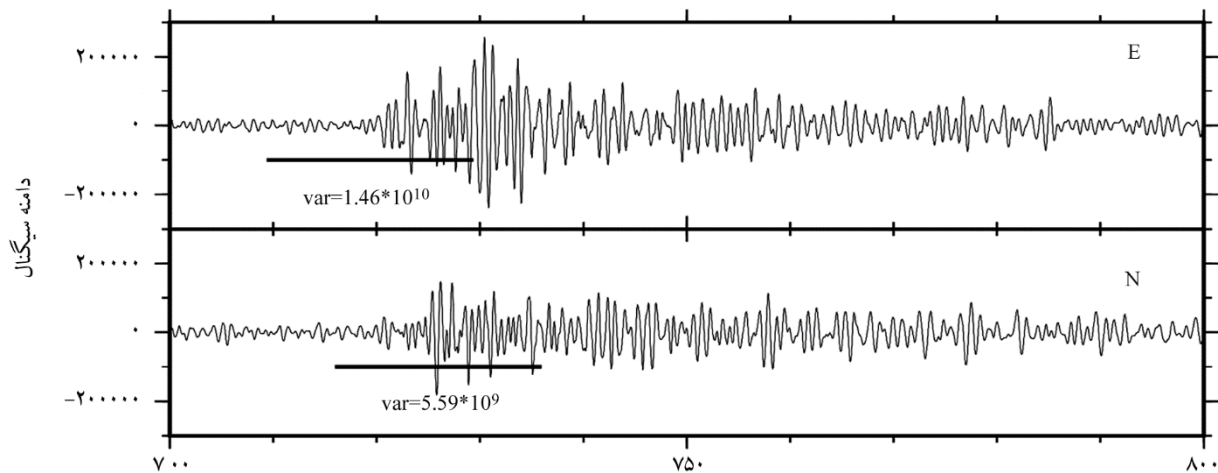
سیگنالی که دارای واریانس بیشتری باشد، به عنوان سیگنال دارای اطلاعات مفید بیشتر (به نوعی نشان‌دهنده‌ی نسبت سیگنال به نویز مطلوب‌تر است) برای مرحله بعد انتخاب می‌گردد (به عنوان مثال؛ شکل‌های ۲۰ تا ۲۲) که در ادامه با  $y(t)$  و تخمین اولیه زمان رسیدن موج  $S$  با  $t_S$  نشان داده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲۲) مشاهده می‌کنید واریانس مربوط به مؤلفه  $E$  بیشتر از مؤلفه  $N$  می‌باشد، لذا همان‌طور که



شکل (۲۰): پوش مربوط به ضرایب تبدیل موجک در مقیاس  $۳^۵$  مؤلفه‌های  $E$  و  $N$ . خط چین افقی مربوط به نصف ماکزیمم پیک می‌باشد.



شکل (۲۱): نسخه بزرگنمایی شده شکل (۲۰) در اطراف زمان رسید موج  $S$ . خط نقطه‌چین عمودی ماکزیمم پیک را نشان می‌دهد و خط عمودی خط چین - نقطه چین اولین مینیمم محلی که مرتبط با نصف ماکزیمم می‌باشد. خط کوتاه افقی ضخیم پنجره تعیین شده برای محاسبه واریانس از شکل موج اصلی برای تعیین دقیق‌تر موج  $S$  در مراحل بعدی است.



شکل (۲۲): واریانس محاسبه شده مربوط به مؤلفه‌های E و N. خط کوتاه افقی طول پنجره زمانی در اطراف زمان رسید موج S می‌باشد. مؤلفه‌ای که دارای واریانس بیشتری باشد به عنوان مؤلفه غالب برای برداشت زمان رسید موج S انتخاب می‌شود.

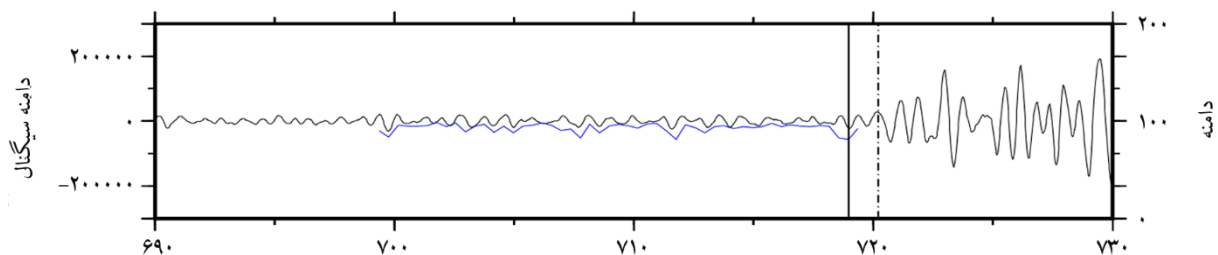
$$C(t_n) = 100 \times \left( 1 - \frac{\|y_{t_n}(t) - \hat{y}_{t_n}(t)\|}{\|y_{t_n}(t) - \bar{y}_{t_n}(t)\|} \right) \quad t_n = tS - W, \dots, tS \quad (14)$$

در این رابطه  $y_{t_n}(t)$  و  $\hat{y}_{t_n}(t)$  به ترتیب مقدار اصلی و مقدار تخمین زده شده با مدل AR سیگنال  $y(t)$  در بازه  $t = t_n - W, \dots, t_n + W$  می‌باشند.  $\bar{y}_{t_n}(t)$  متوسط  $y_{t_n}(t)$  است. در این تحقیق فرض شده است که در لحظه رسیدن موج S محتوای فرکانسی سیگنال تغییر کرده و دامنه آن شروع به افزایش می‌کند. در واقع در این لحظه، واریانس سیگنال در حوزه زمان افزایش می‌یابد. با توجه به این تغییرات فرض شده است که خطای تخمین مدل AR در پنجره زمانی اطراف زمان رسیدن موج S، دارای خطای بیشتر نسبت به پنجره‌های زمانی دیگر خواهد بود. با توجه به این فرض، تخمین نهایی زمان رسیدن موج S از رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

برای این منظور در هر زمان  $t \in (tS - W, tS)$  از این پنجره زمانی یک مدل AR به صورت زیر برای سیگنال تخمین زده می‌شود [۳۷].

$$y(t_n) = \sum_{i=1}^m a_i y(t_{n-i}) + v(t_n) \quad t_n = t - w, \dots, t + w \quad (13)$$

در واقع برای یک پنجره زمانی به طول  $2w$  در اطراف هر  $t \in (tS - W, tS)$  یک مدل AR با مرتبه  $m$  تخمین زده می‌شود (به عنوان مثال؛ شکل ۲۳). در این رابطه  $v_n$  نویز سفید گوسی با متوسط صفر و واریانس  $\sigma^2$  بوده و  $E[v_n y_m] = 0$   $n > m$  و نمونه‌های سیگنال می‌باشد. در این تحقیق برای تخمین ضرایب  $a_i$  از روش Yule-Walker استفاده شده است. هر چه مرتبه  $m$  بیشتر باشد، دقت مدل افزایش می‌یابد. دقت مدل AR در این تحقیق با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است.



شکل (۲۳): مدل AR اعمال شده بر روی سیگنال (خط آبی). خط پرتک عمودی برداشت مربوط به روش پیشنهادی را نشان می‌دهد، و خط عمودی خط چین - نقطه چین برداشت دستی را نشان می‌دهد. مقیاس سمت چپ مربوط به دامنه سیگنال و مقیاس سمت راست مربوط به دامنه مدل AR می‌باشد.

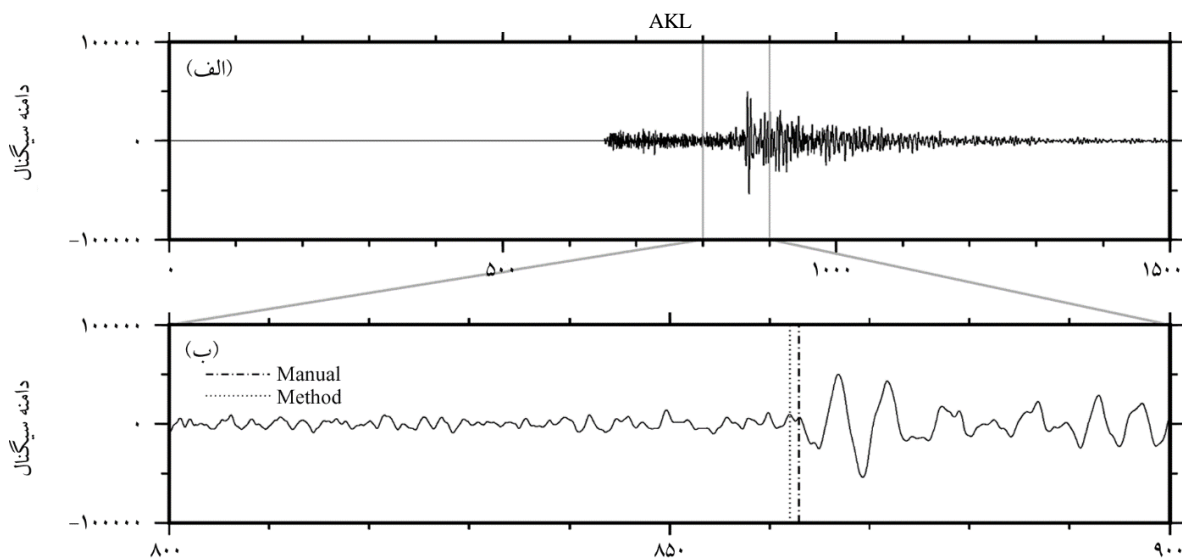
برداشت‌های زمان رسید موج S با برداشت‌های دستی مقایسه شده است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که در اکثر موارد، برداشت‌های روش پیشنهادی قبل از برداشت‌های دستی می‌باشد (رجوع شود به جدول ۳ و شکل‌های ۲۴ و ۲۵).

$$tS_f = \underset{t_n}{\operatorname{argmin}} C(t_n) \quad t_n = tS - W, \dots, tS \quad (15)$$

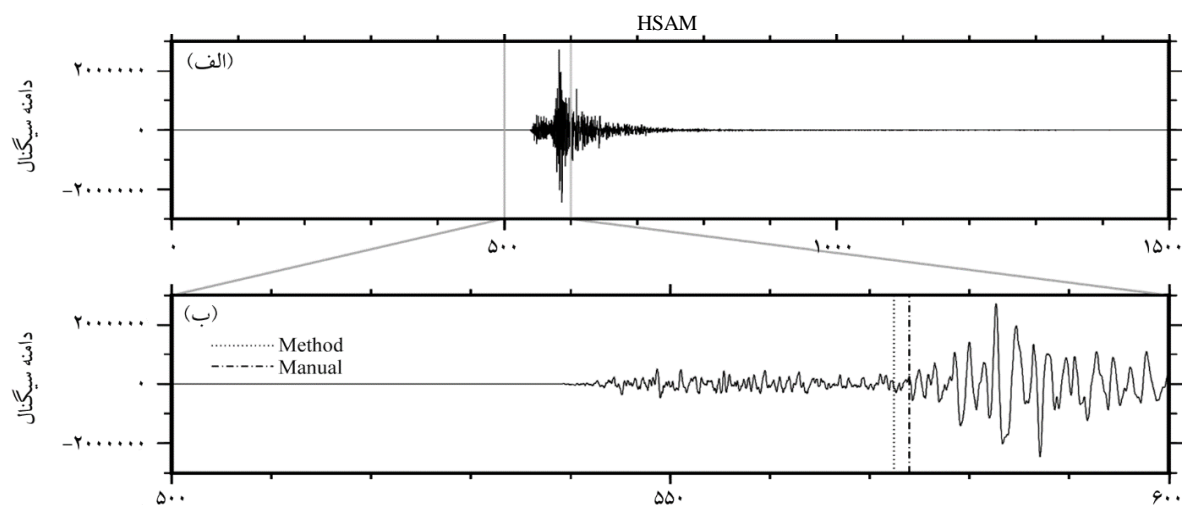
در این رابطه  $tS_f$  مُعرف برداشت نهایی از زمان رسید موج S می‌باشد. داده‌های مربوط به این بخش نیز داده‌های مربوط به بخش P می‌باشد. در این مطالعه به منظور ارزیابی روش پیشنهادی

جدول (۳): چند نمونه از برداشت‌های مربوط به زمان شروع موج S در ایستگاه‌های مختلف.

شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
ایستگاه	LARI	JASK	QAMS	TBHD	GENO	LHJ2	NHDN	ZHCN	JIR1	QIR1	AKL	TNSJ	TPRV	AFRZ	MON
تحلیلگر	۸۶/۳	۹۹/۱	۶۲/۸۶	۸۸/۱۶	۹۰/۰۴	۶۲/۸	۸۹/۵۶	۱۰۱/۷۸	۶۱/۹۲	۷۲	۸۶/۳	۷۹/۰۲	۷۹/۴۶	۹۱/۵	۸۸/۲۲
روش	۸۵/۸۶	۹۸/۶۸	۶۳/۱۴	۸۸/۰۸	۹۰/۵۶	۶۳/۰۸	۹۰/۵۶	۱۰۰/۹۸	۶۱/۲۲	۷۱/۶۸	۸۶/۲	۷۸/۹۴	۷۹/۳۶	۹۱/۶	۸۹/۱



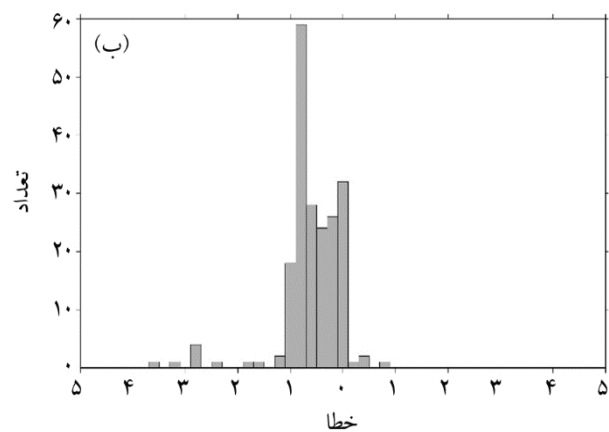
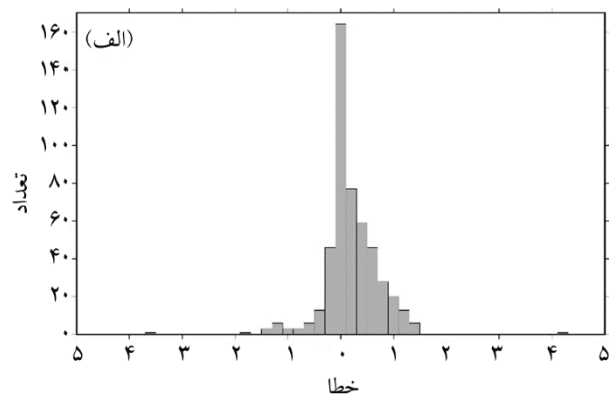
شکل (۲۴): برداشت زمان رسید فاز S مربوط به یک سیگنال رکورد شده توسط ایستگاه AKL. نقطه چین برداشت مربوط به روش پیشنهادی و خط چین - نقطه چین برداشت مربوط به دستی را نشان می‌دهد.



شکل (۲۵): مشابه شکل (۲۴) برای ایستگاه HSAM.

امواج لرزه‌ای و تعیین زمان ورود آنها می‌باشد. در این مطالعه از تبدیل موجک ایستا جهت شناسایی و برداشت زمان رسید موج  $P$  استفاده شده است. این تبدیل نسبت به تبدیل موجک معمولی سریع‌تر می‌باشد و به‌طور طبیعی نسبت به نویز و تغییرات ناگهانی حساس است. لذا می‌توان از این نسخه تبدیل موجک جهت پیدا کردن تغییرات دامنه، فاز و فرکانس در سیگنال‌های لرزه‌ای استفاده کرد. در این مطالعه یک روش خودکار برداشت فاز لرزه‌ای جهت برداشت امواج  $P$  و  $S$  ارائه و این الگوریتم بر روی نگاشت‌های مربوط به زلزله ۱۳۹۶/۸/۲۱ از گله کرمانشاه اعمال شد. با استفاده از روش پیشنهادی جهت برداشت موج  $P$  بر روی داده‌های مصنوعی با نسبت سیگنال به نویز مختلف پارامترهای موجود در برداشت خودکار تست گردید و از نتایج به دست آمده در فازخوانی داده‌های واقعی استفاده شد. سپس نتایج برداشت مربوط به روش پیشنهادی با برداشت‌های مربوط به روش  $STA/LTA$  و برداشت‌های دستی مقایسه گردید که نشان‌دهنده دقت این روش برداشت نسبت به برداشت دستی و روش خودکار  $STA/LTA$  می‌باشد. نتایج نشان داد پارامتر مهم مورد استفاده در برداشت زمان رسید موج  $P$  طول پنجره گرادیان می‌باشد که یک پارامتر قابل تنظیم است. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته طول پنجره بهینه توصیه شده در این مطالعه ۱۰۰ نمونه (معادل ۲ ثانیه) در ایستگاه‌های باند کوتاه ( $SH$ ) و باند پهن ( $BH$ ) می‌باشد، که در تمامی نگاشت‌های مورد استفاده سرعت نمونه‌برداری برابر با ۵۰ هرتز بوده است. در طی این مطالعه سعی شد با استفاده از مشتق مثبت  $ER$  مشکل تأخیر زمانی مربوط به برداشت زمان حل شود که این به‌منظور تشخیص زمان رسید واقعی فاز مناسب می‌باشد. این نتیجه را می‌توان برای بهبود الگوریتم‌های دیگر که دارای تأخیر زمانی هستند به‌کار برد. از طرف دیگر برای برداشت زمان رسید موج  $S$  در این مطالعه تبدیل موجک با مدل  $AR$  ادغام شده است. به‌گونه‌ای که تعیین زمان رسید فاز  $S$  در دو مرحله صورت گرفته است، ابتدا با استفاده از تبدیل موجک ایستا یک تخمین اولیه از زمان رسید به‌دست آمده و در مرحله بعد با استفاده از مدل  $AR$  زمان رسید

در انتها جهت اعتبارسنجی برای بزرگ‌گام‌های مختلف، روش پیشنهادی بر روی تعداد قابل توجهی از زلزله‌های خوشه کرمانشاه (بیش از ۲۰ زلزله) که پارامتر زمین‌لرزه‌های مورد نظر توسط نیسن و همکاران [۳۸] مورد مطالعه قرار گرفته است، مورد آزمون قرار گرفت. برداشت‌های مربوط به شروع موج  $P$  بر روی ۵۰۰ نگاشت یاد شده صورت گرفته که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان خطا و انحراف از معیار برای فاز  $P$  ۰/۱۵ و ۰/۱۱ می‌باشد. و برداشت‌های مربوط به شروع موج  $S$  که بر روی ۲۰۰ نگاشت انجام شد، دارای میزان خطا و انحراف از معیار برای فاز  $S$  ۰/۵۹- و ۰/۶۲ می‌باشد (شکل ۲۶).



شکل (۲۶): هیستوگرام خطای برداشت بین برداشت‌های دستی با روش پیشنهادی برای (الف) موج  $P$  و (ب) موج  $S$ ، برای ۲۰ زمین‌لرزه در منطقه سرپل ذهاب.

### ۳- نتیجه‌گیری

تبدیل موجک یک روش مؤثر در پردازش سیگنال‌های لرزه‌ای می‌باشد، یکی از کاربردهای مؤثر آن شناسایی



- Seismic Network Operations*, 209-219, Springer, Berlin, Heidelberg.
6. Bondár, I. and Storchak, D. (2011) Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophysical Journal International*, **186**(3), 1220-1244.
  7. Hardebeck, J.L. and Shearer, P.M. (2002) A new method for determining first-motion focal mechanisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**(6), 2264-2276.
  8. Zhao, D., Hasegawa, A., and Horiuchi, S. (1992) Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **97**(B13), 19909-19928.
  9. Oye, V. and Roth, M. (2003) Automated seismic event location for hydrocarbon reservoirs. *Computers and Geosciences*, **29**(7), 851-863.
  10. Zhang, H., Thurber, C., and Rowe, C. (2003) Automatic P-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(5), 1904-1912.
  11. Stollnitz, E.J., DeRose, T.D., DeRose, A.D., and Salesin, D.H. (1996) *Wavelets for Computer Graphics: Theory and Applications*. Morgan Kaufmann.
  12. Kulesh, M., Holschneider, M., and Diallo, M.S. (2008) Geophysical wavelet library: Applications of the continuous wavelet transform to the polarization and dispersion analysis of signals. *Computers and Geosciences*, **34**(12), 1732-1752.
  13. Botella, F., Rosa-Herranz, J., Giner, J.J., Molina, S., and Galiana-Merino, J.J. (2003) A real-time earthquake detector with prefiltering by wavelets. *Computers and Geosciences*, **29**(7), 911-919.
  14. Capilla, C. (2006) Application of the Haar wavelet transform to detect microseismic signal arrivals. *Journal of Applied Geophysics*, **59**(1), 36-46.
  15. Struzik, Z.R. (2001) Wavelet methods in (financial) time-series processing. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **296**(1-2), 307-319.
- نهایی موج  $S$  محاسبه شده است. جهت ارزیابی نتایج برداشت با برداشت دستی مقایسه شده است. نتایج برداشت‌های فازهای  $P$  و  $S$  توسط تبدیل موجک نشان‌دهنده‌ی عملی بودن این روش بر روی داده‌های زمان واقعی با دقت و سرعت لازم می‌باشد. در انتها لازم به ذکر می‌باشد که تمامی الگوریتم‌های ارائه شده جهت تشخیص فاز لرزه‌نگاشت‌های یک یا سه مؤلفه‌ای یک ایستگاه بوده‌اند، اما پیشنهاد می‌شود تشخیص فاز لرزه‌ای بر اساس لرزه‌نگاشت‌های یک زلزله در چند ایستگاه که به مراتب دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر می‌باشد مورد مطالعه قرار گیرد.
- ### تشکر و قدردانی
- از شبکه مرکز لرزه‌نگاری کشور جهت دسترسی به داده‌های مورد استفاده در این پژوهش کمال تشکر را داریم. تمامی تصاویر با نرم‌افزار GMT تولید شده است.
- ### مراجع
1. Colak, Ö.H., Destici, T.C., Arman, H., and Cerezci, O. (2009) Detection of P-and S-wave arrival times using the discrete wavelet transform in real seismograms. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, **34**(1A), 79-89.
  2. Dghais, A.A.A. and Ismail, M.T. (2013) A comparative study between discrete wavelet transform and maximal overlap discrete wavelet transform for testing stationarity. *Int J. Math. Comput. Sei. Eng.*, **7**, 1184-1188.
  3. Billings, S.D., Sambridge, M.S., and Kennett, B.L.N. (1994) Errors in hypocenter location: picking, model, and magnitude dependence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(6), 1978-1990.
  4. Engdahl, E.R., van der Hilst, R., and Buland, R. (1998) Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**(3), 722-743.
  5. Horiuchi, S. (2003) Automatic hypocenter location at times of extremely high seismic activity. In *Methods and Applications of Signal Processing in*

27. Tibuleac, I.M. and Herrin, E.T. (1999) An automatic method for determination of Lg arrival times using wavelet transforms. *Seismological Research Letters*, **70**(5), 577-595.
28. Daubechies, I. (1992) *Ten Lectures on Wavelets* (Vol. 61). Siam.
29. Addison, P.S. (2005) Wavelet transforms and the ECG: a review. *Physiological measurement*, **26**(5), R155.
30. Bogiatzis, P. and Ishii, M. (2015) Continuous wavelet decomposition algorithms for automatic detection of compressional-and shear- wave arrival times. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**(3), 1628-1641.
31. Langet, N., Maggi, A., Michelini, A., and Brenguier, F. (2014) Continuous kurtosis-based migration for seismic event detection and location, with application to piton de la fournaise volcano, la réunioncontinuous kurtosis-based migration for seismic event detection and location. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **104**(1), 229-246.
32. Mousavi, S.M., Horton, S.P., Langston, C.A., and Samei, B. (2016) Seismic features and automatic discrimination of deep and shallow induced-micro earthquakes using neural network and logistic regression. *Geophysical Journal International*, **207**(1), 29-46.
33. Canny, J. (1987) 'A computational approach to edge detection'. In: *Readings in Computer Vision*, 184-203, Morgan Kaufmann.
34. Han, L. (2010) *Microseismic Monitoring and Hypocenter Location* (Doctoral Dissertation, University of Calgary).
35. Gomberg, J.S., Shedlock, K.M., and Roecker, S.W. (1990) The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **80**(6A), 1605-1628.
36. Ouali, M.A., Ghanai, M., and Chafaa, K. (2018) Upper envelope detection of ECG signals for baseline wander correction: a pilot study. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, **26**(2), 803-816.
37. Ohtsu, K., Peng, H., and Kitagawa, G. (2015) 'Time series analysis through AR modeling'. In:
16. Kanasewich, E.R. (1981) *Time Sequence Analysis in Geophysics*. University of Alberta.
17. Karamzadeh, N., Doloei, G.J., and Reza, A.M. (2013) Automatic earthquake signal onset picking based on the continuous wavelet transform. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **51**(5), 2666-2674.
18. Aki, K. and Richards, P.G. (2002) *University Science Books*. Sausalito, California.
19. Lervik, J.M., Rosten, T., and Ramstad, T.A. (1996, September) Subband seismic data compression: optimization and evaluation. *1996 IEEE Digital Signal Processing Workshop Proceedings*, 65-68.
20. Leonard, M. (2000) Comparison of manual and automatic onset time picking. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**(6), 1384-1390.
21. Kulesh, M., Diallo, M.S., Holschneider, M., Kurennaya, K., Krüger, F., Ohrnberger, M., and Scherbaum, F. (2007) Polarization analysis in the wavelet domain based on the adaptive covariance method. *Geophysical Journal International*, **170**(2), 667-678.
22. Mallat, S.G. (1989) A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, **7**, 674-693.
23. Ahmed, A.M.L.S., Sharma, M.L., and Sharma, A. (2007) Wavelet based automatic phase picking algorithm for 3-component broadband seismological data. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **9**(1-2), 15-24.
24. Allen, R.V. (1978) Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **68**(5), 1521-1532.
25. Gendron, P., Ebel, J., and Manolakis, D. (2000) Rapid joint detection and classification with wavelet bases via Bayes theorem. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**(3), 764-774.
26. Akram, J. and Eaton, D.W. (2016) A review and appraisal of arrival-time picking methods for downhole microseismic data Arrival-time picking methods. *Geophysics*, **81**(2), KS71-KS91.

Dyadic	۶- دوتایی
Akaike Information Criterion	۷- معیار اطلاعات آکائیک
Higher-Order Statistics	۸- آمار مرتبه بالاتر
Characteristic Function	۹- تابع مشخصه
Support	۱۰- هم‌خوانی
Vanishing Moments	۱۱- ممان میرایی
Daubechies	۱۲- دوپیچیز
Haar	۱۳- هار
Symlet	۱۴- سیملت
Coiflets	۱۵- کویفلت
Meyer	۱۶- میر
Morlet	۱۷- مورلت
Mean	۱۸- متوسط
Trend	۱۹- روند خطی
Parks-McClellan	۲۰- پارکس - مک کلان

*Time Series Modeling for Analysis and Control*, 7-56, Springer, Tokyo.

38. Nissen, E., Ghods, A., Karasözen, E., Elliott, J.R., Barnhart, W.D., Bergman, E.A., Hayes, G.P., Jamal-Reyhani, M., Nemati, M., Tan, F., and Abdalnaby, W. (2019) The 12 November 2017 Mw 7.3 Ezgeleh-Sarpol Zahab (Iran) Earthquake and Active Tectonics of the Lurestan Arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.*, **124**(2), 2124-2152.

### واژه‌نامه

- ۱- حداکثر هم‌پوشانی تبدیل موجک گسسته  
 ۲- تشخیص لبه  
 ۳- خود برگشتی  
 ۴- تبدیل موجک گسسته (DWT)  
 ۵- تبدیل موجک پیوسته

### پیوست

پیوست (۱): ۶۲ برداشت از زمان شروع فاز P مربوط به ایستگاه‌های مختلف (BH (Broad Band High-Gain Station), SH (Short Period Station)).

No	Station	Station Type	Analyst	Method	STA/LTA	Distance
1	GAS1	BH	563.58	563.93	564.82	486
2	HAGD	BH	542.12	543.36	544.02	309
3	JASK	BH	686.98	687.37	687.22	1524
4	LAR1	BH	640.95	642.49	641.78	1137
5	MAHB	BH	530.3	530.92	530.5	221
6	QAMS	SH	570.12	570	570.64	530
7	BAF	SH	623.8	624.86	624.58	978
8	GAR	SH	582.17	582.4	582.66	639
9	DAH	SH	666.15	667.25	666.96	1322
10	LAS	SH	584.9	584.9	585.66	658
11	RAM	SH	590.2	589.9	590.06	698
12	SAD	SH	602.48	602.48	603.94	802
13	RAZ	SH	552.43	551.48	552	386
14	ABH1	BH	581.42	581.96	581.9	625
15	KBAM	BH	670.2	670.04	671.04	1350
16	SBZV	BH	639.3	639.33	638.52	1086
17	TBHD	BH	656.6	657.25	657.1	1227
18	TBJM	BH	668.4	668.4	667.9	1327
19	TBZ	SH	549.8	549.44	549.82	387
20	QCNT	BH	509.95	509.74	510.14	420
21	SDS1	BH	521.58	521.84	523.15	155
22	GENO	BH	659.32	660.35	660.34	1285
23	MEH	SH	614.42	615.26	615.39	907

ادامہ پوسٹ (۱)

No	Station	Station Type	Analyst	Method	STA/LTA	Distance
24	TEG	SH	653.82	653.82	654.18	1217
25	ZEF	SH	582.12	582.76	582.7	642
26	THE	BH	568.75	568.78	568.32	532
27	AFRZ	BH	655.26	655.26	655.6	1229
28	AHWZ	BH	562.8	562.8	563.2	468
29	LHJ2	BH	561.65	561.38	562.54	470
30	NHDN	BH	674.6	674.6	674.72	1382
31	SHB	SH	550.45	549.92	549.92	390
32	GHG	BH	513.38	513.1	512.1	89
33	MHD	SH	560.21	560.24	560.42	458
34	JIR1	BH	556.52	555.52	556.56	423
35	QIR1	SH	623.47	623.6	624.1	981
36	FIR	BH	538.22	538.22	583.16	643
37	AKL	SH	651.55	651.92	651.22	1190
38	KLST	BH	568.18	568.18	568.8	517
39	KLH	SH	573.73	573.56	574.08	560
40	ALA	SH	586.1	586.34	586.36	655
41	GLO	SH	598.5	598.5	598.3	754
42	EMG	SH	651.9	651.9	652.16	1194
43	DMV	SH	575.05	575.18	575.02	577
44	ANAR	BH	597.16	597.16	597	755
45	TNSJ	BH	627.06	627.06	627.04	999
46	ANJ	SH	595.67	595.65	596.04	745
47	BNB	BH	662.06	662.42	662.54	1309
48	MND	BH	615.94	615.94	615.7	908
49	MON	SH	664.74	664.74	666	1293
50	QOM	SH	563	563	563.1	484
51	TPRV	BH	630.12	630.12	630.76	1026
52	SRVN	BH	721.02	721.32	721.38	1780
53	ZRDN	BH	638	639.08	638.5	1091
54	MRD	BH	557.3	557.34	557.17	473
55	SRB	SH	549.86	554.86	549.98	379
56	HRS	SH	554.64	554.76	554.76	410
57	BRJ	BH	557.88	557.88	579.3	602
58	VRN	BH	570.86	571.6	572	546
59	CSN1	BH	557.45	557.02	557.74	431
60	HSAM	BH	536.8	536.58	536.72	268
61	HSH	SH	541.85	541.88	541.78	312
62	MYA	SH	666.36	666.34	666.06	1308

## Determination of P and S Phase Using Maximum Overlap of Discrete Wavelet Transform (A Case Study on 2017 Sarpol-e Zahab Earthquake)

Mohammad Shokri Kaveh<sup>1</sup>, Raza Mansouri<sup>2\*</sup>, and Ahmad Keshavarz<sup>3</sup>

1. M.Sc. Graduate, Department of Geophysics, Faculty of Science, Persian Gulf University, Bushehr, Iran
2. Assistant Professor, Department of Geophysics, Faculty of Science, Persian Gulf University, Bushehr, Iran,  
\*Corresponding Author, email: reza.mansuori@gmail.com
3. Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Automatic seismic phase picking algorithms are one of the current research topics and have special significance in seismic data processing requirements. One of the most fundamental tasks in seismology is the identification arrival time of seismic phases such as the compressional or P-wave, transversal or S-wave, Rayleigh-wave, Love-wave, reflected and refracted wave from boundary layers must be identified. Seismic phase arrival time identification enables scientists to derive important geophysical and seismological information, such as the geotectonic settings, structure of the earth's interior, seismicity of an area and seismic hazard assessment. Traditionally, these quantities were measured manually by human experts, but as seismic networks have grown worldwide, such tasks have been increasingly taken up by automated algorithms. because seismic network or even a single station operating continuously at high sampling frequency produces an enormous amount of data, processing of such a volume of waveforms manually is very time-consuming and requires considerable manpower. In addition, due to human error, incorrect detection of the phase can affect future studies. Therefore, it is needed to an alternative more efficient, faster, and accurate method that reduces the human, financial and time costs and also decreases the probability of errors. Hence, in recent decades, significant efforts have been made to develop automatic phase picking methods.

Wavelet transform is a tool in the analysis of nonstationary signals such as the seismic signal. This is due to the ability of the wavelet transform to resolve features at various scales. In particular, there are two types of wavelet transforms, orthogonal as discrete wavelet transform (DWT) and non-orthogonal as maximal overlap discrete wavelet transform (MODWT). DWT is useful in decomposing time series data into an orthogonal set of components with different frequencies. Whereas MODWT is a variant of DWT that can handle any sample size. The smooth and detail coefficients of MODWT multiresolution analysis are associated with zero phase filters and produces a more asymptotically efficient wavelet variance estimator than the DWT. Working in the wavelet domain allows multiresolution analysis of the waveform, and provides the means to distinguish the phase arrival from random or systematic noise. In this work, we take advantage of the wavelet transform properties and define characteristic functions to detect P- and S-wave arrivals. The version of the maximum overlap discrete wavelet transform (MODWT) is used to determine and picking the arrival time of the P and S phases. The methodology of this study is divided into two parts: the first part is about the determination of the P arrival time obtained by processing the stacked envelop of the wavelet transform coefficients. The second part is determining the S arrival time, the automatic S-phase detection algorithm that we present in this paper is a combination of wavelet transform (WT) and AR model. The estimation of arrival time of the S wave is done in two steps. At first, an initial estimation of arrival time is calculated using the MODWT transform. In the next step, the final estimation of the S wave arrival time is calculated using an AR model.

Method is tested on a significant number of Kermanshah cluster earthquakes. The results of automatic phase picker algorithm in this study have been compared with the STA/LTA method to assess the accuracy.

**Keywords:** Wavelet Transform, Phase Picking, Arrival Time, Earthquake, P and S wave, STA/LTA.