

## محاسبات سرعت فاز و سرعت گروه با استفاده از نگاشت‌های دوره بلند

محمدکمال قاسم‌العسکری\*

دانشگاه صنعت نفت، دانشکده مهندسی نفت اهواز، صندوق پستی ۶۳۴۳۱

(دریافت مقاله: ۸۲/۲/۳۱، پذیرش مقاله: ۸۴/۳/۱۰)

### چکیده

در این بررسی داده‌های زمین‌لرزه‌های دوره بلند تحلیل شد و برای محاسبه سرعت گروه و سرعت فاز مورد استفاده قرار گرفت. نگاشت‌های سه مؤلفه‌ای زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ کازرون در ایران که پایگاه ایلیا (ILPA) شبکه بین‌المللی زلزله‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران ثبت کرده بود و همچنین نگاشت‌های دوره بلند زمین‌لرزه سنت‌هلنا (بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶) در دو ایستگاه زلزله‌نگاری KON اسپانیا و TOL نروژ مورد بررسی قرار گرفت و برای محاسبات سرعت گروه و سرعت فاز از آن‌ها استفاده شد. نگاشت‌های یادشده که با دستگاه‌های زلزله‌نگار دوره بلند ثبت شده‌اند پس از تصحیحات لازم (تصحیح برای دستگاه‌ها و تصحیح انحراف محور) با روش طیفی و تحلیلی در صفحه بسامد-زمان پردازش شدند و فازهای امواج سطحی از آنها جداسازی شد. با استفاده از تحلیل طیفی محاسبات سرعت گروه و سرعت فاز بین پایگاه‌های یادشده، برای هر کدام از نگاشت‌ها با برنامه‌ای خودکار صورت گرفت و منحنی‌های پاشیدگی فازهای امواج سطحی از نگاشت‌های مربوط محاسبه شدند. نتایج به‌دست آمده از محاسبات سرعت گروه و سرعت فاز نگاشت‌های سه مؤلفه‌ای پایگاه ایلیا نشان می‌دهد که سرعت فاز بین سه پایگاه شماره ۱ و ۲ و ۷ از سرعت گروه محاسبه شده در هر سه پایگاه کمتر است (پاشیدگی وارون، inverse dispersion) و نگاشت‌های زلزله بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶ یک نوع پاشیدگی نرمال (normal dispersion) را نشان می‌دهد. به‌علاوه سرعت فاز محاسبه شده بین مؤلفه‌های قائم سه پایگاه ایلیا با بسامد امواج سطحی افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. در صورتی که سرعت فاز محاسبه شده بین مؤلفه‌های افقی سه پایگاه (شرقی-غربی و شمالی-جنوبی) با بسامد امواج سطحی کاهش می‌یابد. این گونه رفتار در منحنی‌های پاشیدگی نشان می‌دهد که سرعت فاز امواج برشی بر حسب عمق کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. به‌علت عبور امواج سطحی از رشته کوه‌های زاگرس در امتداد رومرکز زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ کازرون نسبت به پایگاه ایلیا بیشترین مقدار انرژی بسته‌ای مدهای بالایی امواج سطحی حذف شده است (به‌علت پدیده‌های تکنونیک شدید). به‌علاوه عبور امواج سطحی از دو ناحیه با اختلاف امپدانس کاملاً متفاوت (آب به خشکی و بالعکس) مدهای بالایی امواج سطحی از نگاشت‌های زلزله ۲۷ آوریل ۱۹۸۶ در دو ایستگاه KON و TOL انرژی بسته‌ای خود را کاملاً از دست داده‌اند و ضعیف شده‌اند و به همین دلیل روی صفحه بسامد-زمان کمتر ظاهر شده‌اند. لذا هر قدر فاصله پایگاه‌ها از کانون زمین‌لرزه بیشتر باشد تراکم امواج سطحی با طول موج زیاد یا تناوب بلند به نسبت زیادتر خواهد بود و اطلاعات به‌دست آمده از عمق‌های بیشتری امکان‌پذیر است. از طرف دیگر خطا در محاسبات سرعت گروه و سرعت فاز از نگاشت‌های اصلی با پیروی بلند افزایش می‌یابد. با کاربرد الگوریتم‌های عرضه شده می‌توان نسبت این گونه خطاها را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: نگاشت‌های دوره بلند، سرعت گروه، سرعت فاز، جداسازی امواج سطحی لاو و ریلی

### ۱ مقدمه

معمولاً گیرنده‌ها با ترتیب خاصی در نزدیکی یکدیگر و یا در یک راستا قرار داده می‌شوند (در مقایسه با طول موج) و این که ضمناً چشمه با باند بسامدهای ثابتی عمل می‌کند، محاسبه سرعت فاز با مقایسه دو نقطه از فاز ثابت بین حداقل دو لرزه‌نگاشت امکان‌پذیر است. لذا سرعت فاز نسبت تفاوت فاصله دو لرزه‌نگاشت به تفاوت زمان انتشار فاز مشخصی از امواج سطحی است. ولی در زلزله‌شناسی برای تعیین سرعت فاز از نگاشت‌ها چند مشکل وجود

امواج سطحی در اثر انتشار در محیط‌های پاشیده با لایه‌بندی نامتجانس زمین تغییر شکل می‌دهند و تغییر شکل آنها تابع مختصات مکانی و حدود بسامد مربوط است. به دیگر سخن سرعت امواج سطحی در اثر عبور از لایه‌های زمین با بسامد تغییر می‌کند. به‌علت همین پدیده پاشیدگی، دو نوع سرعت را می‌توان به امواج سطحی نسبت داد که با بسامد، زمان تناوب، عدد موج و یا طول موج رابطه دارند. در لرزه‌شناسی اکتشافی به‌علت این که

شد. در مرحله بعدی با روش عرضه شده در این مقاله منحنی‌های پاشیدگی فازهای امواج سطحی از نگاشت‌های زمین‌لرزه ثبت شده در سه پایگاه ایلیا محاسبه شد.

## ۲ مفهوم سرعت فاز و سرعت گروه

در محیط پاشیده (dispersive medium) سرعت بیشینه پالس همان سرعت گروه است.

$$U(\omega) = \frac{d\omega}{dk} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{k_2 - k_1} \quad (1)$$

به‌طور کلی اگر در رابطه فوق  $\omega = kc$  را قرار دهیم و از آن مشتق بگیریم خواهیم داشت.

$$U(\omega) = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(kc)}{dk} = c + k \frac{dc}{dk} \quad (2)$$

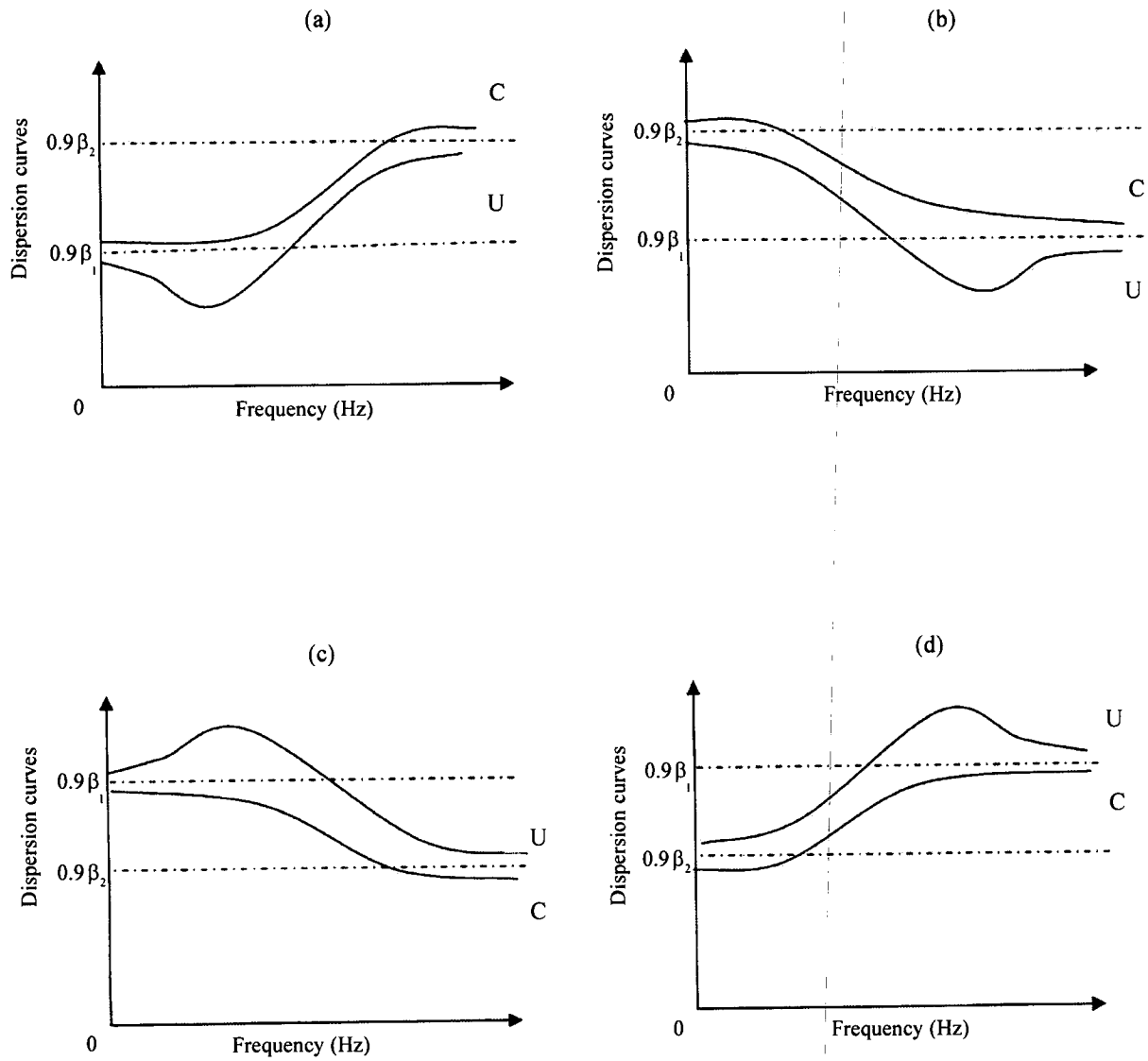
اگر سرعت فاز  $c$  تابع طول موج نباشد ( $\frac{dc}{dk} = 0$ ) سرعت گروه معادل سرعت فاز است. بنابراین در محیط همگن، تفاوتی بین سرعت فاز و سرعت گروه وجود ندارد. ولی در محیط پاشیده اگر سرعت فاز بیشتر از سرعت گروه باشد، پاشیدگی را نرمال (normal dispersion) و اگر سرعت فاز کم‌تر از سرعت گروه باشد، پاشیدگی را وارون (inverse dispersion) گویند.

نویف و شواب (۱۹۶۸) پیشنهاد کردند که تغییر فاز منبع زمین‌لرزه با استفاده از پارامترهای منبع و محیط انتشار امواج در اطراف کانون سطحی زمین‌لرزه قابل محاسبه است.

با استفاده از دو پایگاه می‌توان سرعت فاز و سرعت گروه را محاسبه کرد. کلیز- بروک (۱۹۸۹) نشان داد که سرعت فاز امواج سطحی از نگاشت‌های زمین‌لرزه چند پایگاه که در یک راستا هستند قابل محاسبه است.

دارد: اول پایگاه‌ها ممکن است نسبت به یکدیگر فاصله زیادی داشته باشند و یا در یک راستا نباشند (با مقایسه با کانون زمین‌لرزه). دوم منبع زمین‌لرزه با باند بسامدهای متفاوتی عمل می‌کند و سوم قرائت فاز مشخصی از روی نگاشت‌های اصلی گاهی با خطا همراه است. همچنین در لرزه‌شناسی اکتشافی به علت این که زمان آزاد شدن انرژی از منبع معلوم است، اگر زمان ورود حداکثر پوش موج در محل گیرنده معلوم باشد به سادگی می‌توان سرعت گروه را محاسبه کرد، ولی در لرزه‌شناسی برای تعیین سرعت گروه از نگاشت‌های زلزله چند مشکل وجود دارد: اول این که زمان آزاد شدن انرژی از منبع زمین‌لرزه کاملاً معلوم نیست، دوم کانون عمقی از زمین‌لرزه با روش‌های متداول دقیقاً قابل محاسبه نیست، سوم جداسازی فازهای امواج سطحی از نگاشت‌های زلزله گاهی با خطا همراه است. با مراجعه به شکل ۱ می‌توان چهار نوع طبقه‌بندی برای تعریف پاشیدگی امواج سطحی در نظر گرفت که با تحلیل نگاشت‌های دوره بلند به دست می‌آیند.

ساتو (۱۹۵۵) روش دو پایگاهی را برای محاسبه سرعت فاز از نگاشت‌های زمین‌لرزه پیشنهاد کرد. پرس (۱۹۵۶) روش سه پایگاهی را ابداع نمود. مزیت روش سه پایگاهی در ایجاد شبکه زلزله‌نگاری برای محاسبه دقیق‌تر سرعت فاز است. روش سه پایگاهی آکی (۱۹۶۱) برای پایگاه‌های بیشتری تعمیم یافت. بلوچ و هیلز (۱۹۶۸) با محاسبه همبسته‌نگارها (همبستگی عرضی) بین دو پایگاه زلزله‌نگار سرعت فاز و سرعت گروه را به دست آوردند. اغلب همبستگی عرضی لرزه‌نگاشت‌های دو پایگاه باعث افزایش نوفه در همبسته‌نگار می‌شود و محاسبات سرعت فاز و سرعت گروه را با خطا مواجه می‌کند. لذا در این مقاله، تحلیل طیفی بسامد- زمان در صفحه‌ای با فیلتر شناور (قاسم‌العسکری، ۱۳۷۴) صورت گرفت و امواج سطحی لاو و ریلی از نگاشت‌های زمین‌لرزه جداسازی



شکل ۱. طبقه‌بندی منحنی‌های امواج پاشیده.

- (a). امواج دارای پاشیدگی نرمال افزایشی (normal-forward)
- (b). امواج دارای پاشیدگی نرمال کاهش‌ی (normal-reverse)
- (c). امواج دارای پاشیدگی وارون کاهش‌ی (inverse-reverse)
- (d). امواج دارای پاشیدگی وارون افزایشی (inverse-forward)

ژئوفیزیک دانشگاه تهران آن را با الگوریتم‌های یادشده پردازش شده به صورت زیر بررسی می‌شوند:

در شکل ۲-۲ نقشه و محل استقرار سه پایگاه ایلیا مشخص شده است. پایگاه شماره ۱ در حکم پایگاه مرجع برای محاسبات سرعت فاز انتخاب شد، زیرا با کانون زمین‌لرزه و پایگاه شماره ۲ در یک راستا قرار دارند.

مشخصات زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ و مشخصات هر کدام از پایگاه‌های ایلیا به ترتیب در شکل‌های ۲-۲b، ۲-۲c و ۲-۲d نشان داده شده‌اند. با استفاده از این اطلاعات می‌توان مشخصات زمان وقوع، موقعیت کانون زمین‌لرزه و جهت انتشار امواج را نسبت به پایگاه‌ها مشخص کرد. طبق گزارش مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ در ساعت ۲ و ۴۹ دقیقه و ۵۲/۹ ثانیه با زمان تأخیر متوسطی معادل ۱۰۵ ثانیه در پایگاه‌های سه مؤلفه‌ای ایلیا با تناوب بلند (شکل ۲-۲e) ثبت شد. بزرگی این زمین‌لرزه در مقیاس امواج تراکمی نشان داد که کانون زلزله با زاویه ۱۶ درجه جنوب شرقی پایگاه و در منطقه کازرون واقع بوده است. در شکل ۳، مؤلفه‌های قائم شرقی - غربی و شمالی - جنوبی در سه پایگاه شماره ۱، ۲ و ۷ نشان داده شده است. در شکل ۴، مراحل پردازش نگاشت مؤلفه قائم پایگاه شماره ۱ در حکم پایگاه مرجع آورده شده است. در شکل ۴-۲a مؤلفه قائم نگاشت اصلی زلزله سوم مه ۱۹۹۵ قبل از هرگونه تصحیحات نشان داده شده است. نگاشت زلزله مذکور پس از تصحیح طیف فاز با استفاده از بسامد پاسخ دستگاه زلزله‌نگار و حذف شیفت ثابت و تصحیح برای انحراف محور در شکل ۴-۲b آورده شده است. شکل ۴-۲c چگالی طیف توان نشان داده شده است تا حدود بسامد امواج سطحی مشخص شود. در شکل ۴-۲d با استفاده از پنجره‌ای دوبعدی امواج سطحی در صفحه‌ای برحسب تناوب جداسازی شده است. در مرحله بعدی امواج سطحی جدا شده از مرحله قبل در محدوده سرعت گروه نمونه‌برداری شد (شکل ۴-۲a) و

ضمناً روشن ساخت که ضریب میرایی محیط از نگاشت‌های زمین‌لرزه با استفاده از حداقل دو نگاشت از دو ایستگاه مجاور امکان‌پذیر است. بنابراین با استفاده از دو نگاشت دو ایستگاه می‌توان نوشت. (بن - منهن و همکاران، ۱۹۶۵).

(۳)

$$\gamma(\omega) = \ln[A(\omega, \theta, r_2) / A(\omega, \theta, r_1)] / (r_2 - r_1)$$

در معادله فوق  $A(\omega, \theta, r)$  طیف دامنه امواج سطحی مربوط به دو ایستگاه لرزه‌نگاری است که در یک راستا واقع‌اند. لرزه‌نگارها باید از دو نوع مختلف باشند که در این صورت با استفاده از ضریب میرایی محیط  $\gamma(\omega)$  و سرعت گروه  $U(\omega)$ ، فاکتور  $Q$  قابل محاسبه است.

$$Q^{-1} = 2\gamma(\omega)U(\omega) / \omega \quad (۴)$$

ضریب میرایی محیط را با استفاده از سه ایستگاه می‌توان به صورت دقیق‌تر محاسبه کرد.

$$\gamma(\omega) = \ln[\bar{A}] / (r_3 - r_1) \quad (۵)$$

که در آن

$$\bar{A} = [A(\omega, \theta, r_2) \cdot A(\omega, \theta, r_3)] / [A(\omega, \theta, r_1) \cdot A(\omega, \theta, r_2)]$$

اگر رابطه (۵) را در رابطه (۴) قرار دهیم در این صورت فاکتور  $Q$  با استفاده از سه پایگاه قابل محاسبه است. در این مقاله از الگوریتم فوق برای محاسبه سرعت فاز و سرعت گروه با سه ایستگاه استفاده شده است.

۳ پردازش لرزه‌نگاشت‌های زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ کازرون

مراحل جداسازی امواج سطحی و محاسبات سرعت گروه و سرعت فاز از نگاشت‌های زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ که سه پایگاه زلزله‌نگاری شماره ۱، ۲ و ۷ (ایلیا) مؤسسه

دو پایگاه پردازش و جداسازی شد. نگاشت‌های یادشده که دو پایگاه لرزه‌نگاری رقمی با دوره بلند آن‌ها را ثبت کرده‌اند، پس از تصحیحات برای دستگاه‌های لرزه‌نگاری به ترتیب در شکل‌های a-7 و a-8 داده شده‌اند. مشخصات دستگاه‌ها و مختصات زمین‌لرزه ۲۷ آوریل ۱۹۸۶ اقیانوس اطلس در شکل‌های b-7 و b-8 آورده شده است.

در مرحله اول هر کدام از نگاشت‌های TOL و KON مورد پردازش قرار گرفتند و با روش تحلیلی بسامد- زمان امواج سطحی از آنها جداسازی شد. بدین معنی که ابتدا طیف تحلیلی نگاشت‌ها را به دست آوردیم و سپس طیف‌ها c-8 و c-8 در محدوده بسامدهای هر کدام از نگاشت‌ها محاسبه شد. طیف‌های حاصل از این مرحله را به حوزه بسامد- زمان انتقال دادیم و با استفاده از فیلتر مخصوصی به نام فیلتر شناور که پنجره‌اش در بسامد ثابتی با زمان تغییر می‌کند، امواج را شناسایی و جداسازی نمودیم. این عمل چندین بار تکرار شد تا امواج سطحی کاملاً از پیکره نگاشت‌های زمین‌لرزه مجزا شد. طیف‌های جداشده با روش معکوس به حوزه بسامد و سپس به حوزه زمان تبدیل شد.

شکل‌های d-7 و d-8 به همان ترتیب که امواج لاو را از پیکره نگاشت‌های TOL و KON جداسازی نمودیم در صفحه دوبعدی بسامد- زمان طیف امواج ریلی را، نیز شناسایی و جداسازی کردیم. نگاشت امواج ریلی مربوط به پایگاه TOL در شکل a-9 و نگاشت امواج ریلی مربوط به پایگاه KON در شکل c-9 نشان داده شده‌اند. برای مقایسه امواج ریلی و لاو طیف بسامد- زمان برای هر کدام از پایگاه‌های TOL (شکل b-9) و KON (شکل d-9) نشان داده شده است. در مرحله دوم با استفاده از نگاشت‌های جداشده لاو و ریلی محاسبات سرعت گروه و سرعت فاز صورت گرفت. نتایج این گونه محاسبات در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این مرحله ابتدا

سپس در صفحه بسامد- زمان با استفاده از فیلتر شناور، جداسازی امواج سطحی صورت گرفت (شکل b-6). بدین ترتیب امواج سطحی پس از چندین مرحله پردازش به دست آمد (شکل c-5). در مرحله بعد با روش مشابهی نگاشت اصلی مؤلفه قائم پایگاه شماره ۷ که با پایگاه شماره ۱ نسبت به کانون سطحی زمین‌لرزه (رومرکز) تقریباً در یک راستا هستند، پردازش شدند. در این مرحله امواج سطحی تا حد امکان جداسازی شد. با توجه به این که سرعت گروه در پایگاه شماره ۱ به خوبی مشخص شده (شکل a-5) می‌توان با استفاده از روش پاشیدگی به جای مانده (کلیز- بروک، ۱۹۸۹) سرعت فاز امواج سطحی بین دو پایگاه شماره ۱ و ۷ را محاسبه کرد (شکل a-6). در شکل b-6 سرعت گروه از مؤلفه‌های قائم سه پایگاه (منحنی‌ها شماره ۱، ۲ و ۷) محاسبه شده‌اند. در این جا با استفاده از روش فوق سرعت فاز امواج سطحی بین نگاشت‌های سه پایگاه شماره ۱، ۲ و ۷ به دست آمده‌اند (منحنی شماره ۱۲۷). در شکل c-6 با روش مشابهی سرعت گروه از مؤلفه‌های شرقی- غربی در سه پایگاه و سرعت فاز امواج سطحی بین سه پایگاه شماره ۱، ۲ و ۷ محاسبه شد. در شکل d-6 سرعت گروه از مؤلفه‌های شمالی- جنوبی در سه پایگاه و سرعت فاز امواج سطحی بین سه پایگاه شماره ۱، ۲ و ۷ نیز محاسبه شده‌اند. مقایسه و نحوه پردازش نگاشت‌ها در نتیجه‌گیری آورده شده است.

#### ۴ پردازش لرزه‌نگاشت‌های زمین‌لرزه بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶

مراحل جداسازی امواج سطحی از نگاشت‌های دو پایگاه لرزه‌نگاری (TOL و KON) مربوط به زمین‌لرزه بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶ از شبکه استاندارد جهانی (WWSSN) مورد بررسی قرار گرفت و محاسبات سرعت فاز و سرعت گروه امواج سطحی (لاو و ریلی) دو نگاشت از داده‌های

۳- تحلیل طیفی نگاشت‌های اصلی زمین‌لرزه در پنجره زمان تناوب مناسب‌ترین روش مستقیم برای برآورد اولیه سرعت گروه محسوب می‌شود (شکل‌های ۵-۵a، b-۵ و d-۴).

۴- در صورتی که سرعت گروه در یک پایگاه دقیقاً معلوم باشد با روش پاشیدگی به‌جای مانده می‌توان سرعت فاز بین دو یا چند پایگاه را به دقت محاسبه کرد (شکل ۶).

۵- شکل ظاهری منحنی‌های پاشیدگی امواج سطحی به تعداد مدهای موجود در آنها بستگی دارد هر قدر تعداد مدهای موجود در امواج سطحی بیشتر باشند تغییرات سرعت فاز نسبت به بسامد بیشتر است (شکل ۶-a).

۶- سرعت گروه محاسبه شده در بیشتر موارد از سرعت فاز نگاشت‌های پایگاه‌های ایلیا بیشتر است (پاشیدگی‌های وارون در شکل ۶).

۷- سرعت فاز در محدوده بسامد انطباق منحنی‌های پاشیدگی سرعت گروه واقع است (شکل ۶).

۸- به‌علت این که داده‌های زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ کازرون نوعی پاشیدگی وارون را نشان می‌دهند (شکل ۶) می‌توان نتیجه گرفت که در این منطقه سرعت امواج برشی نسبت به عمق کاهش می‌یابد.

۹- در پاشیدگی وارون کاهشی معمولاً سرعت فاز با افزایش بسامد کاهش می‌یابد ولی سرعت گروه بیشتر از سرعت فاز است (شکل‌های ۶-c و ۶-d).

۱۰- در پاشیدگی وارون افزایشی مؤلفه‌های قائم دو پایگاه، معمولاً سرعت فاز با بسامد افزایش می‌یابد ولی سرعت گروه بیشتر از سرعت فاز است (شکل ۶-a).

۱۱- سرعت فاز محاسبه شده بین مؤلفه‌های قائم سه پایگاه ایلیا با بسامد امواج سطحی افزایش می‌یابد (پاشیدگی وارون افزایشی) (شکل‌های ۶-a و ۶-b).

منحنی‌های سرعت فاز از نگاشت‌های اصلی دو پایگاه TOL و KON که در یک راستا قرار دارند، به‌طریقه برون‌یابی به‌دست آمد (شکل ۱۰-a). با انتخاب منحنی‌های شماره ۱ و ۲، (در شکل ۱۰-a) محاسبات سرعت فاز صورت گرفت که در شکل ۱۰-b نشان داده شده است. در شکل ۱۰-b نیز منحنی‌های پاشیدگی سرعت گروه برای هر کدام از نگاشت‌های محاسبه شده است. در شکل ۱۰-c منحنی‌های سرعت گروه از نگاشت‌های امواج لاو و ریلی به‌دست آمده‌اند و منحنی شماره ۲ در حکم تابع متوسط در محاسبات سرعت فاز مورد استفاده قرار گرفت. منحنی‌های پاشیدگی سرعت فاز در محدوده بسامد امواج لاو و ریلی در شکل ۱۰-d واقع‌اند. در شکل ۱۰-d منحنی‌های پاشیدگی سرعت فاز برای هر کدام از نگاشت‌های پایگاه‌های TOL و KON محاسبه شده‌اند. مقایسه و نحوه پردازش نگاشت‌ها در نتیجه‌گیری آورده شده است.

## ۵ نتیجه‌گیری

باتوجه به محاسبات سرعت گروه و سرعت فاز امواج سطحی سه پایگاه سه مؤلفه‌ای شبکه ایلیا و پردازش دو نگاشت دوره بلند زلزله بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶ از شبکه استاندارد جهانی، می‌توان نتایج را به نحو زیر خلاصه کرد

۱- در شکل ۳-a پاشیدگی وارون افزایشی (inverse-dispersion) امواج سطحی دارای قطارهای کوتاهی از امواج پراکنده‌اند، زیرا در چنین شرایطی میرایی محیط انتشار به حداکثر می‌رسد و دامنه به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد (شکل ۶-a).

۲- در شکل ۳-b نگاشت‌های زلزله سوم مه ۱۹۹۵ کازرون به‌علت عبور امواج سطحی از رشته کوه‌های زاگرس در امتداد پایگاه ایلیا بیشترین انرژی بسته‌ای مدهای بالایی حذف شده‌اند.

## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و آقای مهندس احمد سدیدخوی به خاطر در اختیار قرار دادن نگاشت‌های زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ پایگاه ایلبا و همچنین از سرکار خانم نهضت مرادی و سرکار خانم فریبا خلیلی که این مقاله را ویراستاری کردند تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

قاسم‌العسکری، م. ک.، ۱۳۷۴، محاسبات سرعت فاز و سرعت گروه از نگاشت‌های زلزله به روش طیف تحلیلی بسامد- زمان، مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، جلد سوم، صفحه ۱۹۲۷.

- Aki, k., 1961, Crustal structure in Japan from the phase velocity of Rayleigh waves. Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo University, 39, 255-283.
- Bloch, S., and Hales, A. L., 1968, Surface wave dispersion: Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1021.
- Ben-Menahem, A. S., Smith, W., and Teng, T. L., 1965, A procedure for source studies from spectrums of long period seismic body waves: Bull. Seism. Soc. Am., 55, 203-235.
- Keilis-Borok V. I., 1989, Seismic surface waves in laterally inhomogeneous Earth, Kluwer Publ. House Dordereht.
- Knopoff, L., and Schwab. F., 1968, Surface waves calculation for earthquake records: J. Geophys. Res., 73, 755.
- Press, F., 1956, Determination of crustal structure from phase velocity of Rayleigh waves. Part I. southern California: Bull. Seism. Soc. Am., 67, 1647-1658.
- Sato. Y., 1955, Analysis of dispersion surface waves. Bull. Earthq. Inst., Tokyo University, 33, 33-48.

۱۲- در پاشیدگی نرمال (normal dispersion) امواج سطحی دارای قطارهای طولی از امواج پراکنده و پیشینه دامنه معمولاً در حداقل سرعت گروه واقع است (شکل‌های ۷-a، ۸-a و ۱۰-b).

۱۳- برای نگاشت‌های زلزله بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶ سنت هلنا در اقیانوس اطلس که در دو پایگاه نروژ و اسپانیا ثبت شده‌اند به علت عبور امواج سطحی از دو ناحیه با اختلاف امپدانس کاملاً متفاوت (آب به خشکی و بالعکس) مدهای بالایی امواج برشی، انرژی بسته‌ای خود را از دست داده‌اند و ضعیف شده‌اند (شکل‌های ۷ و ۸).

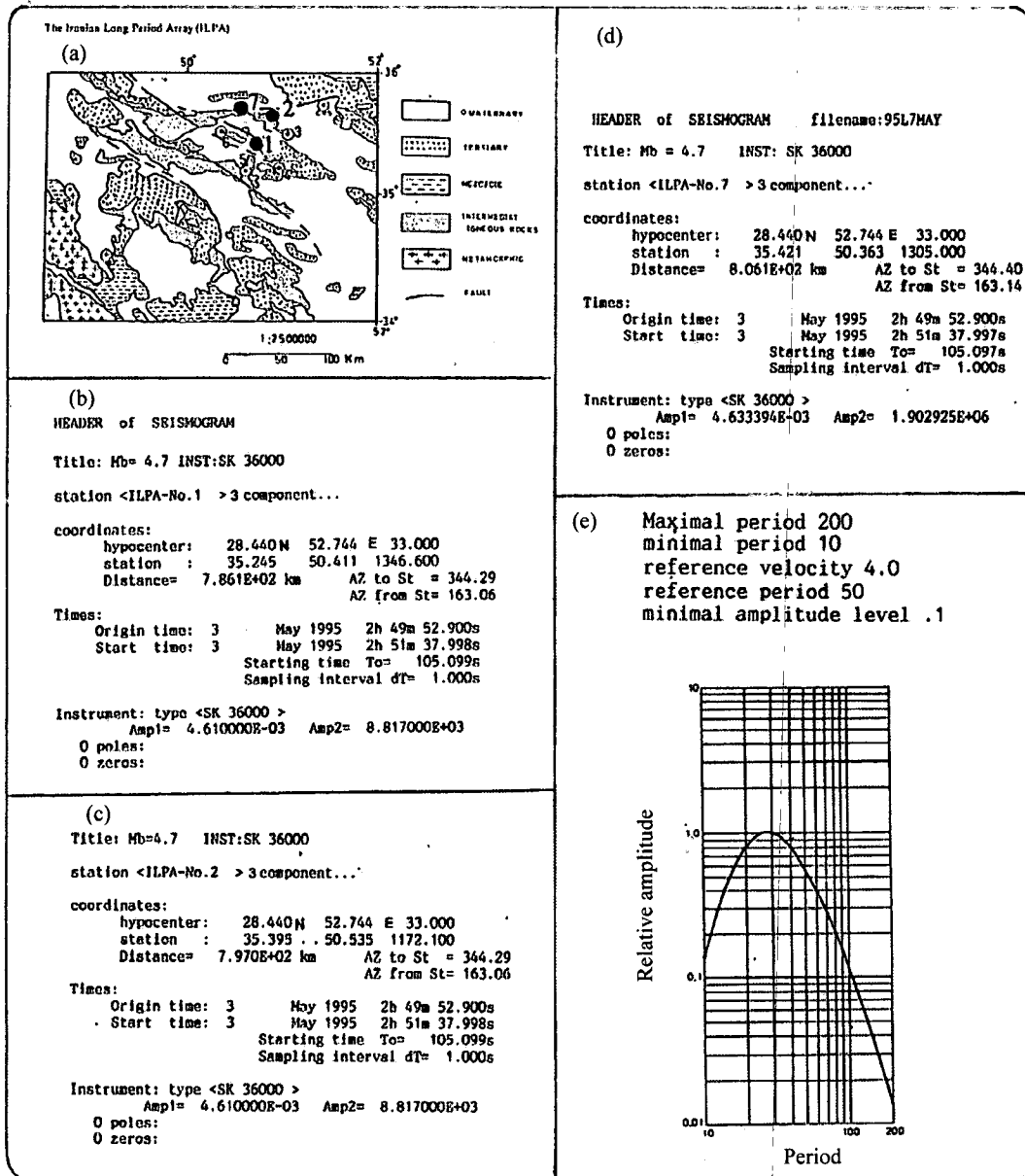
۱۴- جداسازی امواج سطحی در صفحه طیف تحلیلی بسامد- زمان بر حسب تناوب مناسب‌تر است. زیرا می‌توان در مقیاس وسیع‌تری امواج سطحی را تشخیص داد و جداسازی نمود (شکل‌های ۴-d، ۵-a و ۵-b، ۹-b و ۹-d).

۱۵- سرعت فاز امواج سطحی ممکن است بیشتر از سرعت گروه باشد (پاشیدگی‌های نرمال در شکل ۱۰-b).

۱۶- برای زمین‌لرزه بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶ سرعت گروه امواج لاو بیشتر از سرعت گروه امواج ریلی است (شکل ۱۰-c).

۱۷- به علت این که داده‌های زمین‌لرزه بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶ نوعی پاشیدگی نرمال را نشان می‌دهند (شکل ۱۰-b) می‌توان نتیجه گرفت که در این منطقه، سرعت امواج برشی نسبت به عمق افزایش می‌یابد.

۱۸- چنان که در شکل‌های ۱۰-c و ۱۰-d ملاحظه می‌شود، پاشیدگی امواج لاو نسبت به امواج ریلی بیشتر است. این موضوع نیز در شکل‌های ۹-b و ۹-d برای امواج سطحی در دو پایگاه TOL و KON در صفحه بسامد- زمان نشان داده شده است.



شکل ۲. مختصات و مشخصات زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ کازرون.

(a) موقعیت پایگاه‌های شبکه زلزله‌نگاری ایلیا (ILPA) مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

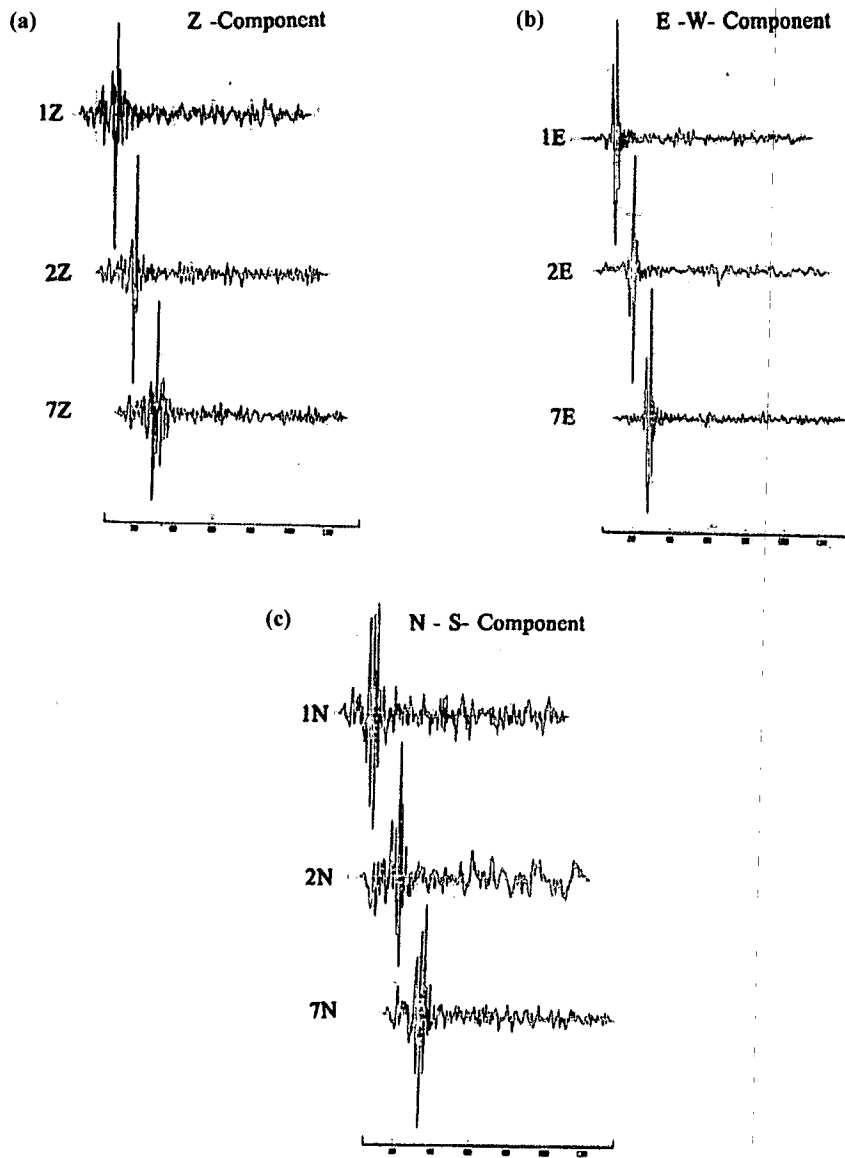
(b) مشخصات زمین‌لرزه و مختصات پایگاه شماره ۱

(c) مشخصات زمین‌لرزه و مختصات پایگاه شماره ۲

(d) مشخصات زمین‌لرزه و مختصات پایگاه شماره ۷

(e) پاسخ بسامد دستگاه زلزله‌نگار دوره بلند پایگاه ایلیا



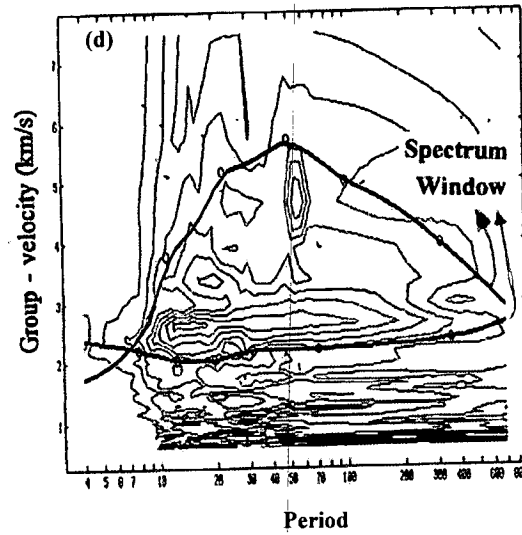
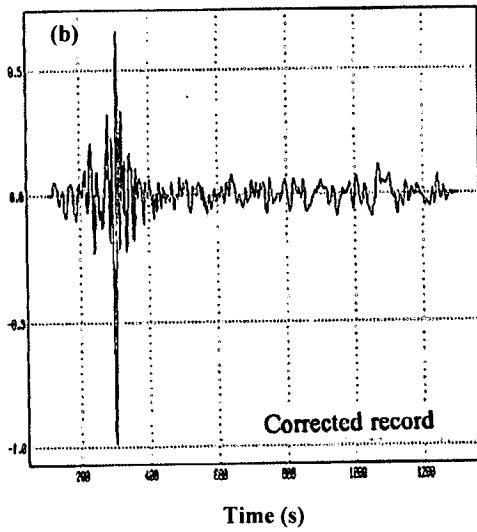
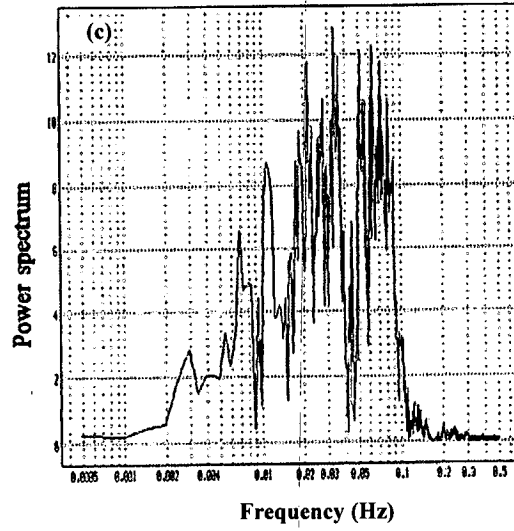
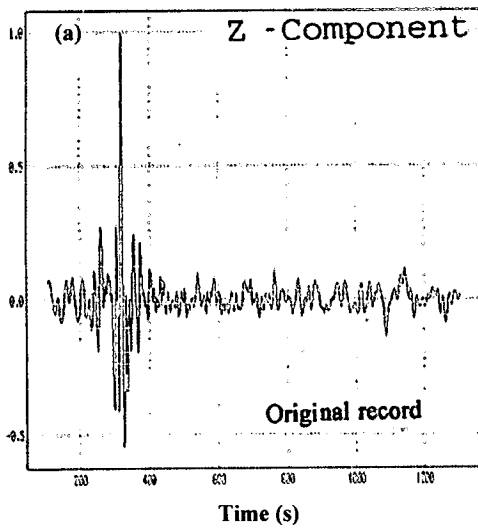


شکل ۳. نداشت‌های زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ در سه پایگاه شماره ۱، ۲، ۷ و ایلیا.

(a). مؤلفه‌های قائم سه پایگاه

(b). مؤلفه‌های شرقی-غربی سه پایگاه

(c). مؤلفه‌های شمالی-جنوبی سه پایگاه



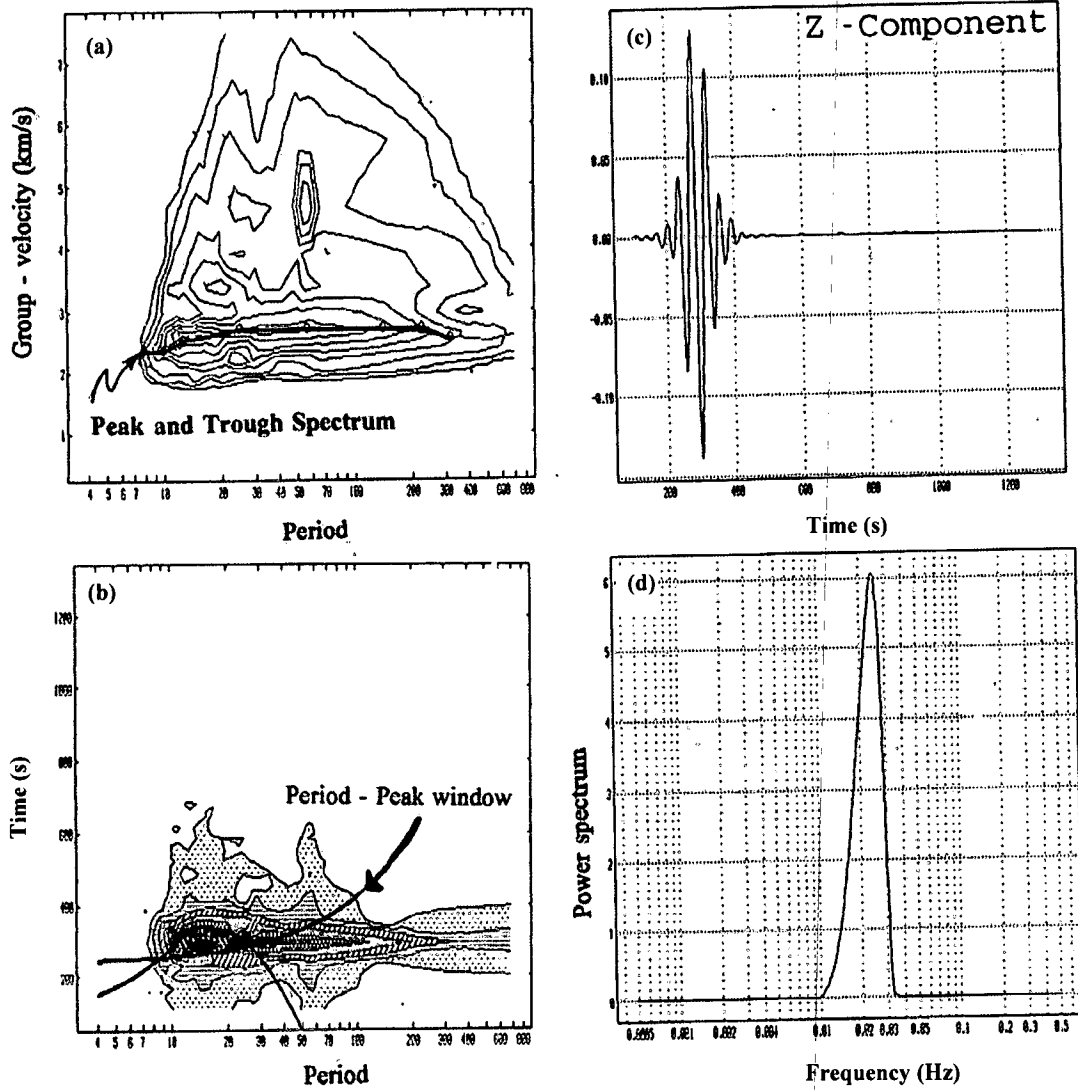
شکل ۴. پردازش نگاشت مؤلفه قائم پایگاه شماره ۱ (ایلیا).

(a). نگاشت زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵

(b). نگاشت زمین‌لرزه پس از تصحیح طیف فاز- دامنه و انحراف محور

(c). طیف توان نگاشت مؤلفه قائم

(d). طیف صفحه‌ای و انتخاب پنجره امواج سطحی



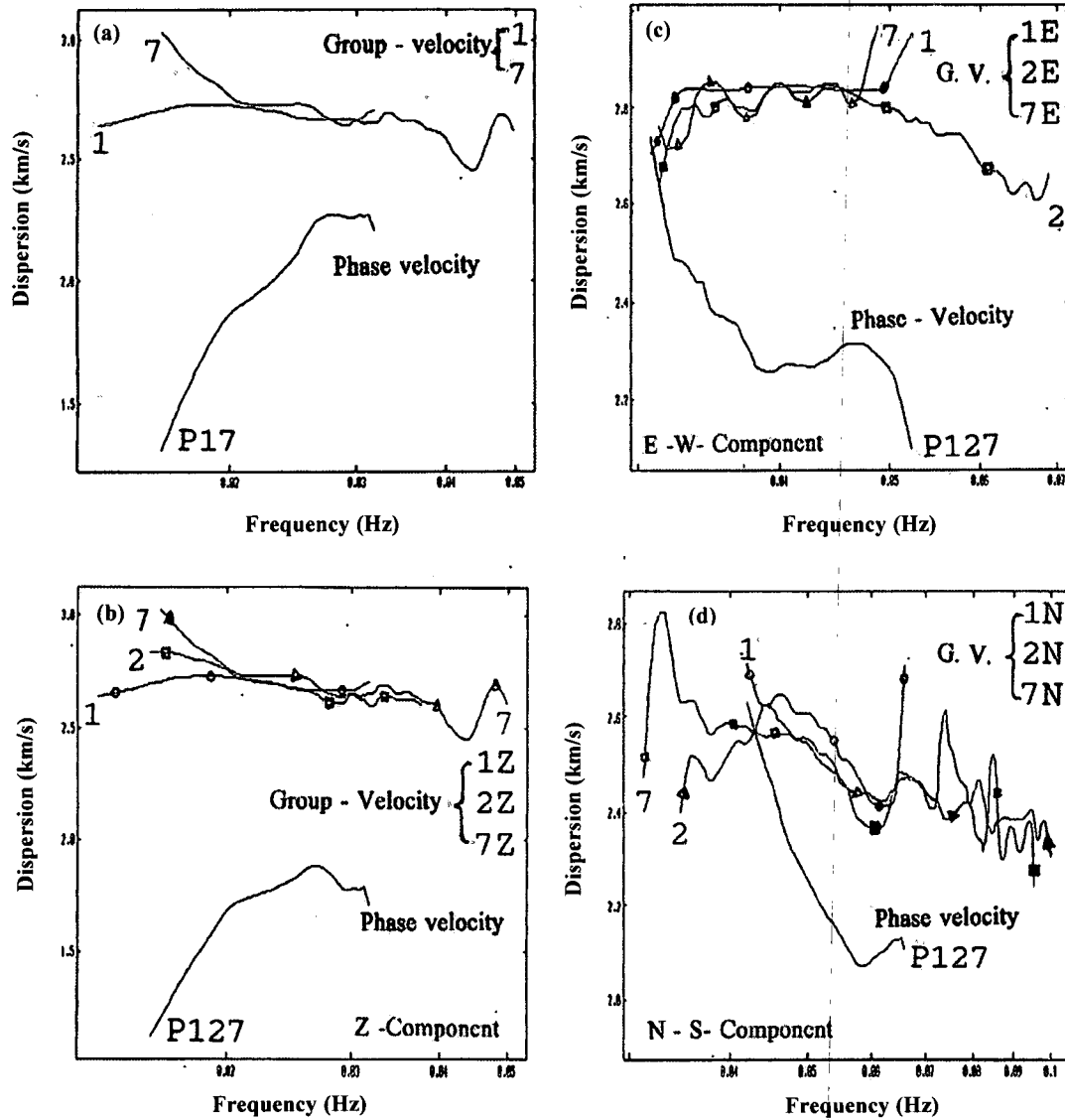
شکل 5. پردازش نگاشت مؤلفه قائم پایگاه شماره ۱ (ایلیپا).

(a) نقشه طیف صفحه‌ای امواج جدا شده

(b) جداسازی موج سطحی با استفاده از فیلتر شناور

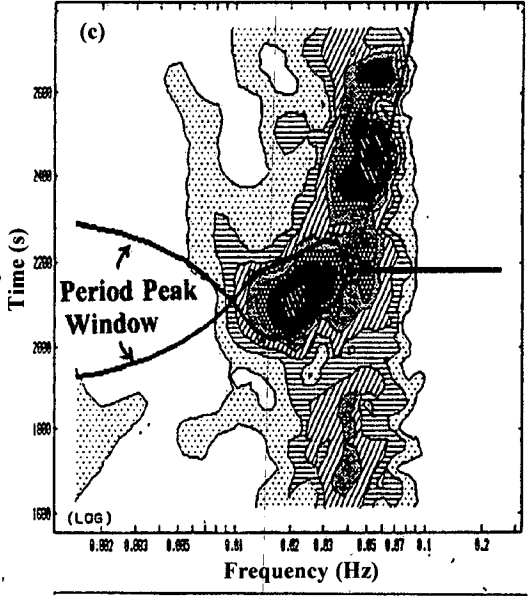
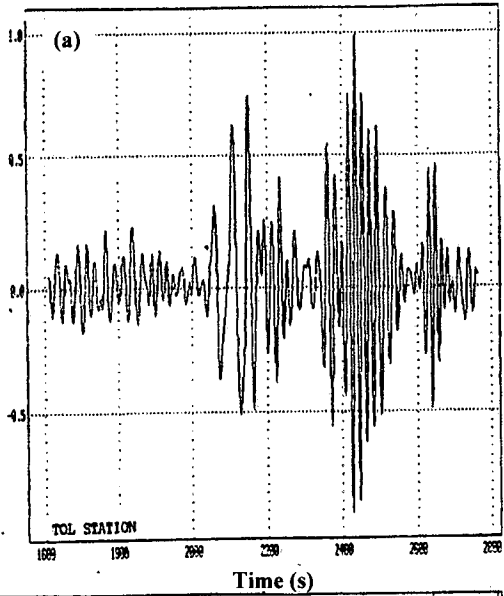
(c) نگاشت موج سطحی مؤلفه قائم پایگاه شماره ۱

(d) پنجره موج سطحی مربوط به مؤلفه قائم پایگاه شماره ۱

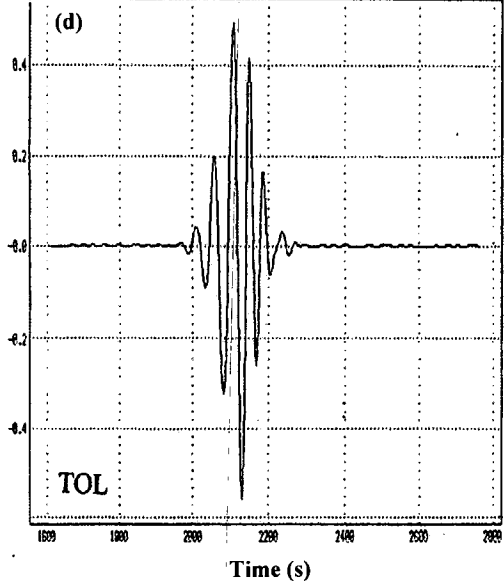


شکل ۶. محاسبات سرعت گروه و سرعت فاز از نگاشت‌های زمین‌لرزه سوم مه ۱۹۹۵ در سه پایگاه ایلیا.

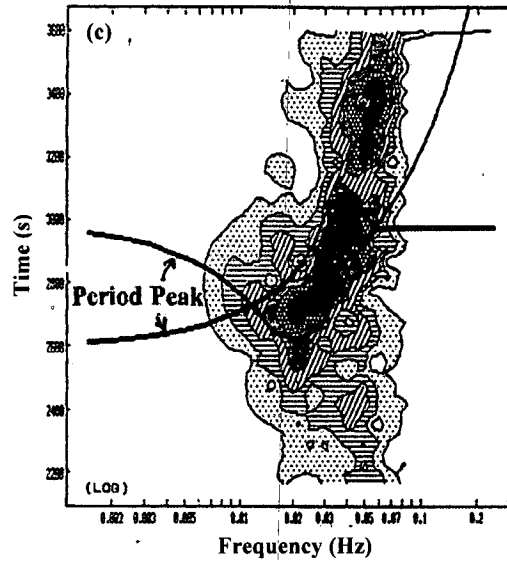
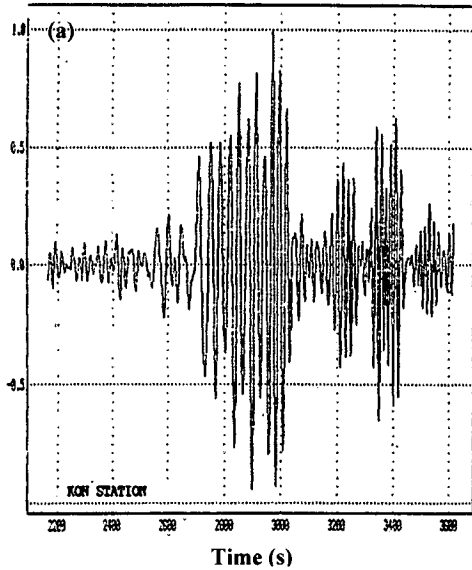
- (a) منحنی‌های پاشیدگی از مؤلفه‌های قائم دو پایگاه
- (b) منحنی‌های پاشیدگی از مؤلفه‌های قائم از سه پایگاه
- (c) منحنی‌های پاشیدگی مؤلفه‌های شرقی - غربی از سه پایگاه
- (d) منحنی‌های پاشیدگی مؤلفه‌های شمالی - جنوبی از سه پایگاه



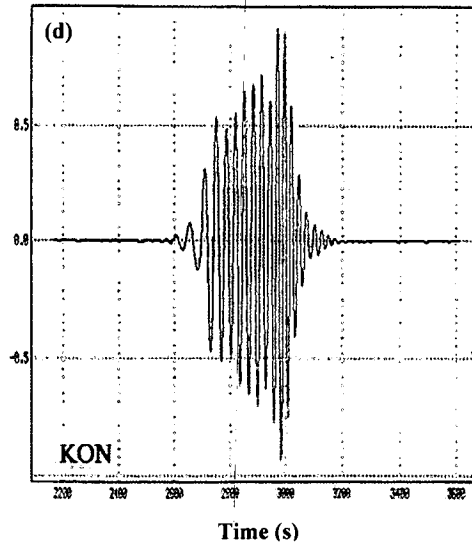
(b) HEADER of SEISMOGRAM filename: TOL  
 Title: 5.7 INST:DWSSN from SONIC  
 station:TOL > component...Z  
 coordinates:  
 hypocenter: -31.158 -13.460 10.000  
 station : 39.881 -4.048 480.000  
 Distance= 7.925E+03 km AZ to St = 7.64  
 AZ from St= 188.52  
 Times:  
 Origin time: 27 April 1986 3h 24m 6.019s  
 Start time: 27 April 1986 3h 50m 56.210s  
 Starting time To= 1610.191s  
 Sampling interval dT= 1.000s  
 Instrument: type <DWSSN LP>  
 Ampl= 2.760000E-02 Amp2= 5.000000E+02  
 11 poles:  
 1. (-3.770000E-01, 1.830000E-01)  
 2. (-3.770000E-01, -1.830000E-01)  
 3. (-6.540000E-01, 0.000000E+00)  
 4. (-2.320000E-01, 0.000000E+00)  
 5. (-2.320000E-01, 0.000000E+00)  
 6. (-2.320000E-01, 0.000000E+00)  
 7. (-3.280000E-01, 0.000000E+00)  
 8. (-3.280000E-01, 0.000000E+00)  
 9. (-3.280000E-01, 0.000000E+00)  
 10. (-2.140000E-02, 0.000000E+00)  
 11. (-2.140000E-02, 0.000000E+00)  
 5 zeros:



شکل ۷. پردازش نگاشت زمین لرزه بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶ سنت هلنا در اقیانوس اطلس.  
 (a) نگاشت زلزله در پایگاه TOL  
 (b) مختصات پایگاه زلزله نگاری TOL و مشخصات زمین لرزه بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶  
 (c) نقشه طیف صفحه‌ای بسامد- زمان با پنجره‌ای از امواج لاو  
 (d) نگاشت زمانی امواج لاو جدا شده



(b) HEADER of SEISMOGRAM filename: KON  
 Title: 5.7 INST:ASRO from SONIC  
 station <KON> component... 3  
 coordinates:  
 hypocenter: -31.158 -12.460 10.000  
 station : 59.649 9.598 216.000  
 Distance= 1.029E+04 km AZ to St = 11.48  
 AS from St= 199.67  
 Times:  
 Origin time: 27 April 1986 3h 24m 6.019s  
 Start time: 27 April 1986 4h 0m 9.449s  
 Starting time To= 2163.431s  
 Sampling interval dt= 1.000s  
 Instrument: type <ASRO LP >  
 Amp1= 4.633394E-03 Amp2= 1.902925E+06  
 14 poles:  
 1. { -2.090000E-01, 3.410000E-03 }  
 2. { -2.090000E-01, -3.410000E-03 }  
 3. { -1.290000E-01, 2.700000E-01 }  
 4. { -1.290000E-01, -2.700000E-01 }  
 5. { -3.950000E-02, 2.360000E-02 }  
 6. { -3.950000E-02, -2.360000E-02 }  
 7. { -1.590000E-01, 5.940000E-01 }  
 8. { -1.590000E-01, -5.940000E-01 }  
 9. { -6.300000E-01, 0.000000E+00 }  
 10. { -8.850000E-02, 0.000000E+00 }  
 11. { -8.360000E-01, 2.550000E-01 }  
 12. { -8.360000E-01, -2.550000E-01 }  
 13. { -5.410000E-01, 6.830000E-01 }  
 14. { -5.410000E-01, -6.830000E-01 }  
 4 zeros:



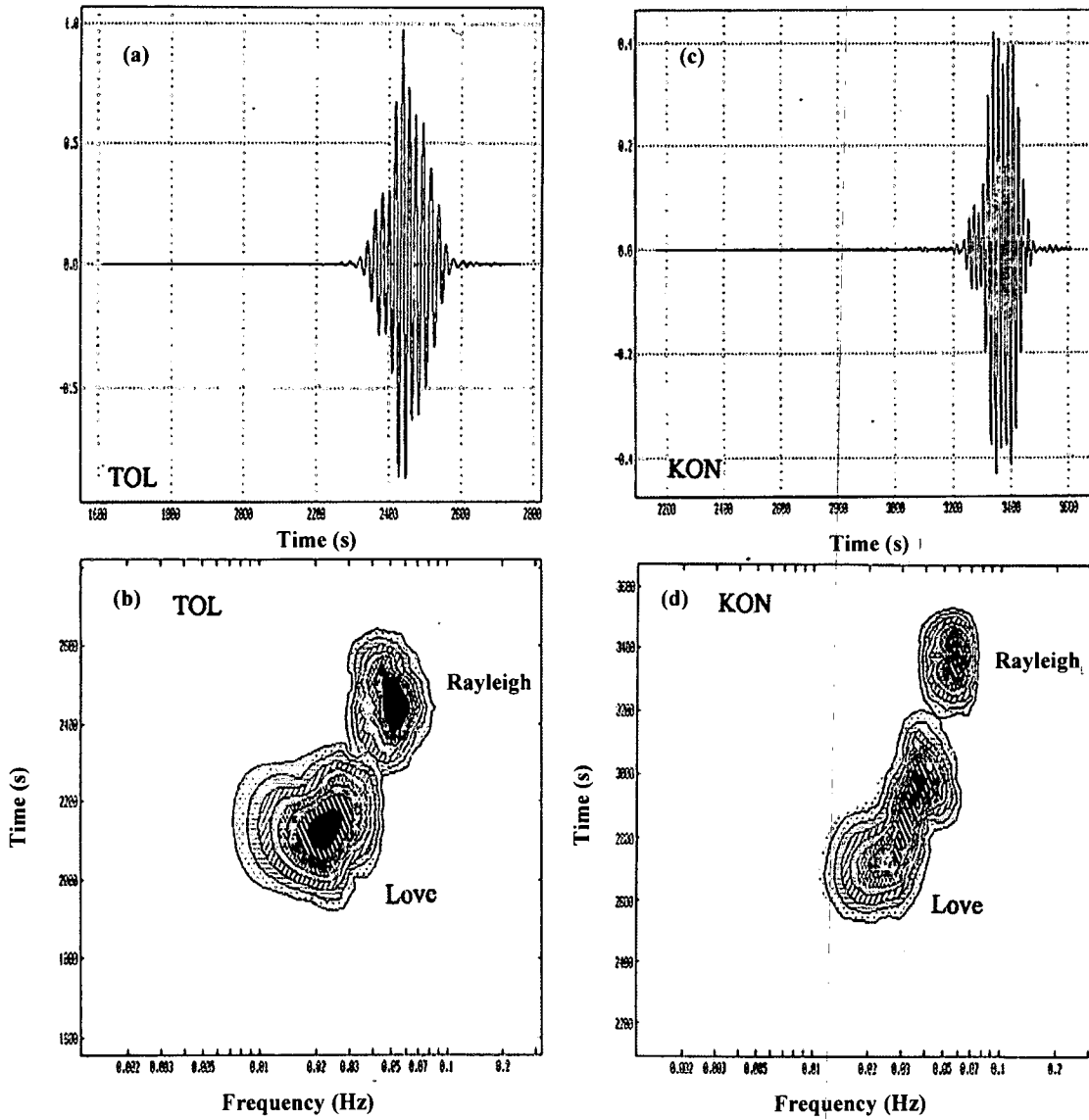
شکل ۸ پردازش نگاشت زمین‌لرزه بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶ سنت هلنا در اقیانوس اطلس.

(a) نگاشت زلزله در پایگاه KON

(b) مشخصات پایگاه زلزله‌نگاری KON و مشخصات زمین‌لرزه ۲۷ آوریل ۱۹۸۶

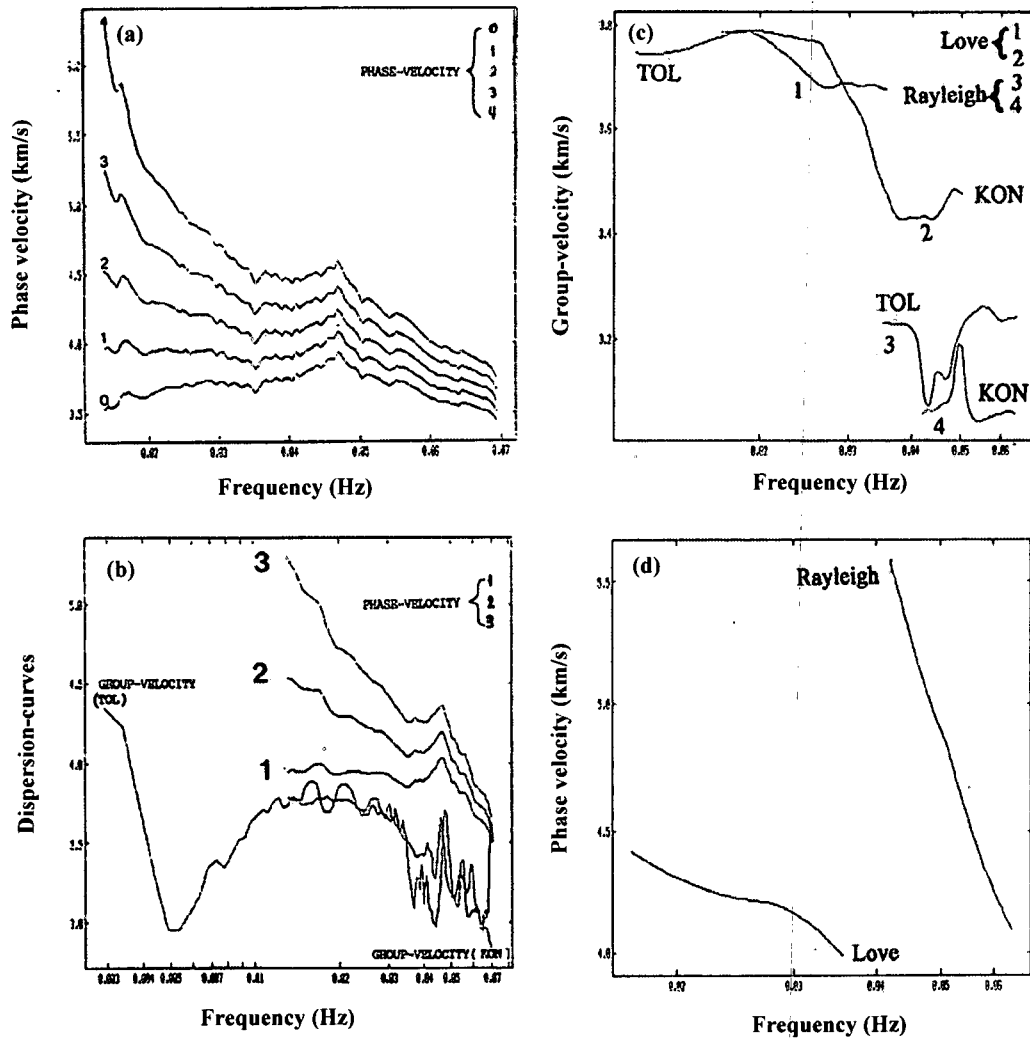
(c) نقشه طیف صفحه‌ای بسامد-زمان با پنجره‌ای از امواج لار

(d) نگاشت زمانی امواج لار جدا شده



شکل ۹. مقایسه طیف امواج لار و ریلی.

- (a). نگاشت زمانی امواج ریلی در پایگاه TOL
- (b). مقایسه طیف صفحه‌ای امواج لار و ریلی در پایگاه TOL
- (c). نگاشت زمانی امواج ریلی در پایگاه KON
- (d). مقایسه طیف صفحه‌ای امواج لار و ریلی در پایگاه KON



شکل ۱۰. محاسبات سرعت گروه و سرعت فاز از نگاشت‌های زمین‌لرزه بیست و هفت آوریل ۱۹۸۶.

(a) منحنی‌های سرعت فاز از نگاشت‌های اصلی پایگاه‌های TOL و KON با روش برون‌یابی

(b) منحنی‌های پاشیدگی از نگاشت‌های دو پایگاه فوق‌الذکر

(c) منحنی‌های سرعت گروه محاسبه شده امواج لار و ریلی در دو پایگاه

(d) منحنی‌های سرعت فاز محاسبه شده امواج لار و ریلی بین دو پایگاه