



An Automated Method for Picking the Fundamental Mode Dispersion Curve and Reliably Estimating the Phase Velocity of This Mode in Surface Waves

Mohammadyan, F.¹  | Siahkoochi, H. R.¹ 

1. Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: faruqmohammadyan@ut.ac.ir

(Received: 27 Dec 2025, Revised: 1 Feb 2026, Accepted: 15 April 2026, Published online: 30 May 2026)

Summary

Surface waves are type of seismic waves that provide valuable information about near-surface Earth structures in seismic studies, particularly non-invasive seismic surveys with geological, engineering, and earthquake engineering objectives. One of the main challenges in surface wave analysis is the extraction of dispersion curves, which represent the relationship between the phase velocities and corresponding frequency components. Conventional methods for extracting these curves are often done manually via point-wise picking by the user, which, in addition to being time-consuming, increases the possibility of erroneous identifying of the desired dispersion mode.

In this study, an automatic method for identifying dispersion curves is presented. The method automatically finds the optimal path along the fundamental dispersion mode through intelligent search and extracts the dispersion curve. An important feature of this algorithm is its simplicity and lack of need for complex configurations, such that it can search for the dispersion curve based on the position of local energy maxima in the phase-velocity spectrum without user involvement through two different search strategies so called low-frequency search strategy and high-frequency search strategy with minimum manual adjustments. Additionally, in the low-frequency search strategy, resolution limits based on survey profile length have been incorporated as a stopping criterion for the algorithm. This constraint ensures that the final dispersion curve is confined to a frequency that is physically measurable and reliable, and prevents the algorithm from deviating toward erroneous points at low frequency part. The proposed algorithm, by utilizing abovementioned two strategies, is capable of automatically and accurately picking of the fundamental mode dispersion curve.

The efficiency of the proposed method has been evaluated by applying it on synthetic and real seismic data. According to the results obtained from synthetic data, the proposed method possesses high accuracy in automatically identifying of dispersion curves, even in the presence of severe noise. In clean (noise-free) data, the mean square error between the theoretical dispersion curve and the dispersion curve picked by the proposed method was 6.3 (m/s)^2 , and the maximum relative error was 1.8%. For comparison of the propose method, and to demonstrate the efficiency of the proposed method, an automatic peak-value picking method was also used to extract the fundamental mode dispersion curves, where the mean square error between the theoretical dispersion curve and the picked one was 161830 (m/s)^2 and the corresponding maximum relative error was 116%, indicating the significant superiority of the proposed method over automatic peak-value picking technique. Furthermore, under stronger noise conditions with a signal-to-noise ratio of -25 dB the mean square error obtained by the proposed method was 156 (m/s)^2 and the maximum relative error was 6.9%, which still maintains considerably higher accuracy compared to the automatic peak-value picking method. The proposed method can significantly reduce the runtime and improves the accuracy of dispersion curve extraction as well as shear-wave velocity distribution model estimation.

Keywords: Surface waves, Automatic picking, Dispersion curve, Shear-wave velocity model.

Cite this article: Mohammadyan, F., & Siahkoochi, H. R. (2026). An Automated Method for Picking the Fundamental Mode Dispersion Curve and Reliably Estimating the Phase Velocity of This Mode in Surface Waves. *Journal of the Earth and Space Physics*, 52(1), 33-43. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.408599.1007745>

E-mail: (1) hamid@ut.ac.ir



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.408599.1007745>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

روشی خودکار برای گزینش منحنی پاشش مد پایه و برآورد قابل اعتماد سرعت فاز این مد در امواج سطحی

فاروق محمدیان^۱ | حمیدرضا سیاه کوهی^۱

۱. گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: faruqmohammadyan@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶، بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۱۱/۱۶، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۳/۹)

چکیده

امواج سطحی یکی از انواع امواج لرزه‌ای هستند که در مطالعات لرزه‌های مخصوصاً لرزه‌نگاری غیرتهاجمی با اهداف زمین‌شناختی، مهندسی و مهندسی زلزله، اطلاعات ارزشمندی درباره ساختار زیرسطحی زمین فراهم می‌کنند. یکی از چالش‌های اصلی تحلیل این امواج، استخراج منحنی‌های پاشش است که رابطه بین سرعت فاز و فرکانس را نشان می‌دهد. روش‌های مرسوم اغلب دستی و زمان‌بر بوده و احتمال خطا در تشخیص مد پاشش موردنظر را افزایش می‌دهند.

در این پژوهش، روشی خودکار برای شناسایی منحنی‌های پاشش ارائه شده است. این روش با جست‌وجوی هوشمند، مسیر بهینه را در امتداد مد پاشش مورد نظر پیدا می‌کند. الگوریتم پیشنهادی با دو راهبرد جست‌وجوی فرکانس پایین و فرکانس بالا، منحنی پاشش را بر اساس بیشینه‌های محلی انرژی در طیف سرعت فاز استخراج می‌کند. در راهبرد فرکانس پایین، حد تفکیک‌پذیری بر اساس طول پروفیل (فاصله بین اولین و آخرین گیرنده) تعیین می‌شود تا از انحراف الگوریتم به نقاط اشتباه جلوگیری شود.

توانمندی روش با داده‌های مصنوعی و واقعی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که در داده تمیز، میانگین توان دو خط $6/3 (m/s)^2$ و حداکثر خطای نسبی $1/8\%$ است، در حالی که روش انتخاب خودکار قله‌ها میانگین توان دو خط $161830 (m/s)^2$ و خطای نسبی 116% داشت. در داده آغشته به نوفه (نسبت سیگنال به نوفه 25 -دسی‌بل)، روش پیشنهادی میانگین خطای $156 (m/s)^2$ و خطای نسبی $6/9\%$ حاصل کرد که برتری قابل توجهی نسبت به روش مقایسه‌ای نشان می‌دهد. این روش می‌تواند زمان پردازش را کاهش بدهد و دقت تحلیل منحنی پاشش و برآورد مدل سرعت موج برشی را افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: امواج سطحی، انتخاب خودکار، منحنی پاشش، مدل سرعت موج برشی.

۱. مقدمه

لی و سولومون، (۱۹۷۹). از آنجایی که توزیع سرعت موج برشی اطلاعات حیاتی برای زمینه‌های مختلفی از جمله اکتشاف منابع هیدروکربنی و معدنی (یانگ و همکاران، ۲۰۱۲)، کاهش خطرات ژئوتکنیکی (ایلماز و همکاران، ۲۰۰۶) و مهندسی عمران (نظریان و همکاران، ۱۹۸۳؛ فوتی و همکاران، ۲۰۱۱) در اختیار ما قرار می‌دهد، امواج سطحی اهمیت روزافزونی در زمینه‌های فوق دارند.

روش‌های مختلفی برای استفاده از امواج سطحی جهت بررسی توزیع سرعت موج برشی توسعه یافته است. در میان

امروزه لرزه‌نگاری غیرتهاجمی با امواج سطحی یکی از روش‌های کلیدی در ژئوفیزیک نزدیک سطح است. در انتشار این امواج، فرکانس‌های مختلف سرعت فازهای متفاوتی دارند که به این ویژگی پاشش گفته می‌شود. پاشش امواج سطحی عمدتاً توسط توزیع سرعت موج برشی محیطی که امواج سطحی در آن منتشر می‌شوند، کنترل می‌شود. به همین خاطر است که بررسی منحنی پاشش این امواج از روش‌های پرکاربرد در تخمین توزیع سرعت موج برشی محیط است (آکی و ریچاردز، ۱۹۸۰؛

استناد: محمدیان، فاروق و سیاه کوهی، حمیدرضا (۱۴۰۵). روشی خودکار برای گزینش منحنی پاشش مد پایه و برآورد قابل اعتماد سرعت فاز این مد در امواج سطحی. مجله فیزیک

زمین و فضا، ۵۲(۱)، ۳۳-۴۳. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.408599.1007745>

رایانامه: hamid@ut.ac.ir (۱)



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2026.408599.1007745>

امواج سطحی ضروری است ولی هنوز این امکان وجود دارد که با داشتن طیف سرعت قابل اعتماد، باز درستی مدل سرعت موج برشی تخمین زده شده شک برانگیز باشد. این امر می تواند برخاسته از خطا در تشخیص مدهای پاشش موجود در طیف سرعت باشد. معمولاً طیف های سرعت همه مدهای پاشش را شامل می شوند و در مواردی به خاطر پیچیدگی های زمین شناختی موجود در منطقه مورد مطالعه این مدها در هم ادغام یا خیلی به هم نزدیک می شوند (بوآگا و همکاران، ۲۰۱۳). روش مرسوم برای تشخیص مدهای پاشش، بررسی چشمی طیف سرعت فاز و شناسایی قله های انرژی پیوسته به عنوان منحنی پاشش است. این رویکرد، اگرچه ساده است، اما زمان بر و وابسته به کاربر بوده و می تواند منجر به ناسازگاری نتایج بین کاربرهای مختلف شود. دقت منحنی های پاشش انتخاب شده، به ویژه در حضور منحنی های پاشش چندمندی، بر قابلیت اعتماد نتایج تأثیرگذار است (گائو و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین، توسعه روش های خودکار برای انتخاب منحنی های پاشش ضروری است تا کارایی پردازش داده های امواج سطحی و دقت تخمین مدل سرعت برشی را افزایش دهد.

در سال های اخیر پیشرفت های یادگیری ماشین، راه حل های نوینی برای انتخاب خودکار منحنی ها ارائه کرده است. برای مثال، روتا و همکاران (۲۰۲۱) از الگوریتم خوشه بندی فضایی مبتنی بر چگالی استفاده کردند، در حالی که وانگ و همکاران (۲۰۲۱) مدل مخلوط گاوسی سه بعدی را پیشنهاد دادند. همچنین، هو و همکاران (۲۰۲۵) مسئله را به بخش بندی تصویر تبدیل کرده و از جنگل تصادفی استفاده کردند. علاوه بر این، روش های مبتنی بر شبکه های عصبی عمیق مانند U-Net (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰)، DisperNet (دانگ و همکاران، ۲۰۲۱) و Res-Unet++ (سانگ و همکاران، ۲۰۲۲) نیز برای استخراج دقیق منحنی پاشش از داده های نوفه دار توسعه یافته اند.

در این مقاله، رویکردی مشابه لیو و همکاران (۲۰۲۴) برای انتخاب خودکار و سازگار منحنی های پاشش پیشنهاد شده

روش های امواج سطحی توسعه یافته، روش تحلیل طیفی امواج سطحی (استوکی و همکاران، ۱۹۹۴) و تحلیل چندکاناله امواج سطحی (پارک و همکاران، ۱۹۹۹؛ پارک و میلر، ۲۰۰۸؛ می و همکاران، ۲۰۱۷) به طور گسترده ای به کار می روند. در این روش ها، منحنی های پاشش امواج سطحی از رکوردهای لرزه ای استخراج شده و سپس از طریق وارون سازی کمترین مربعات یا الگوریتم های وارون سازی تصادفی برای تخمین توزیع سرعت موج برشی زیر سطحی استفاده می شوند. در سال های اخیر، روش های امواج سطحی غیرفعال به عنوان مکمل بسیار مهمی برای روش های مرسوم امواج سطحی با استفاده از چشمه های فعال توسعه یافته اند (بهم و اسنایدر، ۲۰۱۳؛ بنسن و همکاران، ۲۰۰۷؛ دامیکو و همکاران، ۲۰۰۸؛ ناکاتا و همکاران، ۲۰۱۱). در روش های امواج سطحی غیرفعال، نوفه های لرزه ای محیطی ثبت و پردازش می شود تا امواج سطحی آنها استخراج شوند. سپس طیف سرعت فاز محاسبه می شود تا برای تخمین توزیع سرعت موج برشی وارون سازی شوند. از آنجایی که نیازی به منبع انرژی فعال نیست، روش های سطحی غیرفعال به ویژه برای مناطق مسکونی و حساس از نظر وجود شریان های حیاتی، مزیت دارند و برای تصویرسازی و پایش دائمی مناسب هستند.

صحت و دقت مدل به دست آمده برای توزیع سرعت موج برشی از تحلیل امواج سطحی با هر کدام از روش های نامبرده شده در بالا شدیداً وابسته به میزان درستی طیف سرعت فاز به دست آمده از رکوردهای لرزه ای است. روش های متعددی برای استخراج طیف سرعت فاز امواج سطحی توسعه یافته است از جمله تبدیل Tau-P (مک مکان و یدلین، ۱۹۸۱)، تبدیل $f-k$ (گابریلز و همکاران، ۱۹۸۷)، روش جابه جایی فاز (پارک و همکاران، ۱۹۹۹)، الگوریتم برانباشت مایل تجزیه شده فرکانسی (شیا و همکاران، ۲۰۰۷)، تبدیل رادون خطی با تفکیک پذیری بالا (لو و همکاران، ۲۰۰۸) و روش تبدیل عدد موج برداری (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ یانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ هو و همکاران، ۲۰۲۰).

هرچند داشتن طیف سرعت فاز قابل اعتماد برای تحلیل

لرزه‌ای هم به کار برد.

۲-۱. تعیین نقطه شروع

برای پیاده سازی روش، انتخاب نقطه شروع ضروری است. انتخاب اشتباه ممکن است منجر به انتخاب مد بالاتر یا نوفه شود. بنابراین، نقطه شروع باید در موقعیتی انتخاب شود که انرژی مد پایه پایدار و پیوسته است. به طور کلی، فرکانس شروع را می‌توان به دلیل پایداری نسبی سرعت فاز در محدوده فرکانس‌های پایین بر روی یک فرکانس پایین تنظیم کرد. اگر نقطه آغاز انتخاب نشود الگوریتم از فرکانس غالب داده به عنوان فرکانس شروع استفاده می‌کند.

۲-۲. راهبرد جست‌وجوی فرکانس پایین و بالا

در اینجا دو راهبرد جست‌وجوی متفاوت به نام‌های راهبرد جست‌وجوی فرکانس پایین و راهبرد جست‌وجوی فرکانس بالا توسعه داده شده است.

- راهبرد جست‌وجوی فرکانس پایین: ابتدا باید فرکانسی به عنوان فرکانس شروع انتخاب کرد یا فرکانس غالب را به عنوان فرکانس شروع در نظر گرفت. سپس روی منحنی انرژی سرعت‌های فاز مربوط به فرکانس شروع، نقطه مربوط به بیشینه انرژی به عنوان نقطه شروع جست‌وجو انتخاب می‌شود. فرکانس مجاور فرکانس شروع را (به سمت فرکانس‌های پایین) انتخاب و منحنی انرژی سرعت‌های فاز آن را نیز رسم می‌کنیم (شکل ۱-الف). در راهبرد جست‌وجوی فرکانس پایین در منحنی دوم به دنبال دو کمینه محلی در اطراف سرعت فاز انتخاب شده در منحنی اول گشته و آنها را انتخاب می‌کنیم. این دو کمینه به عنوان مرزهای جست‌وجو عمل خواهند کرد. سپس، بیشینه محلی بین این دو کمینه به عنوان سرعت فاز برای فرکانس مجاور انتخاب خواهد شد. در ادامه فرایند، این نقطه جدید به عنوان نقطه شروع برای ادامه جست‌وجو در فرکانس پایین بعدی می‌شود و این فرایند تا رسیدن به پایین‌ترین فرکانس تکرار می‌شود.

است که منحنی پاشش را بر اساس موقعیت بیشینه‌های محلی انرژی در طیف سرعت فاز جست‌وجو می‌کند، با این تفاوت که در فرکانس‌های پایین، حد تفکیک پذیری بر اساس طول پروفیل برای توقف الگوریتم در نظر گرفته شده است تا از تولید نتایج نادرست در فرکانس‌های پایین جلوگیری کند. این روش به نمونه‌های آموزشی نیاز ندارد و پایداری خوبی برای به کارگیری روی طیف سرعت فاز داده‌های نزدیک سطح با نسبت سیگنال به نوفه پایین دارد. در ادامه با اعمال روش پیشنهادی روی داده‌های مدل مصنوعی و میدانی، پایداری و کارآمدی آن سنجیده می‌شود.

۲. شیوه پژوهش

هدف این پژوهش تعیین خودکار نقاطی از طیف سرعت فاز هست که در هر کدام از آنها جفت فرکانس و سرعت فاز انتخاب شده متعلق به بیشینه انرژی طیف سرعت فاز در یکی از مدهای پاشش است. به بیان دیگر برای هر فرکانس، سرعت فازی را پیدا کنیم که مد پاششی مورد نظر به ازای آن انرژی بیشینه داشته باشد. در این مطالعه ما طیف سرعت فاز را برای داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده با روش جابه جایی فاز (پارک و همکاران، ۱۹۹۹) محاسبه و استخراج کردیم. کد این روش در محیط متلب با استفاده از رابطه (۱) تدوین شد.

$$U(\omega, c_k) = \sum_{j=1}^{n_x} e^{(i\frac{\omega}{c_k})} \cdot \frac{d(\omega, x_j)}{|d(\omega, x_j)|} \quad (1)$$

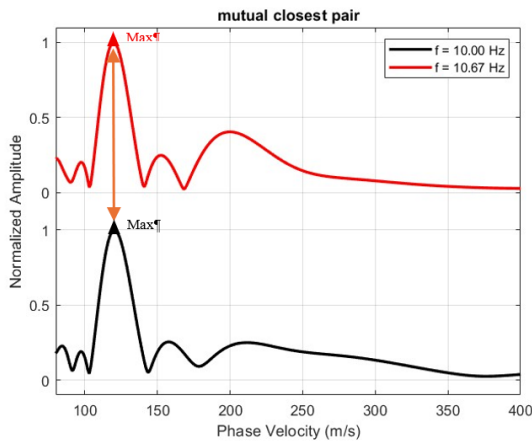
که در آن $U(\omega, c_k)$ طیف سرعت فاز (جمع فازهای نرمال شده در تمام گیرنده‌ها برای هر سرعت آزمایشی c_k در هر فرکانس ω)، x_j دورافت گیرنده j ام، $d(\omega, x_j)$ طیف فوریه داده‌های لرزه‌ای در موقعیت j ام و n_x تعداد گیرنده‌ها می‌باشد.

شایان ذکر است که روش پیشنهادی قابل استفاده برای منحنی پاشش به دست آمده از هر نوع موج سطحی (ریلی یا لاولو) و داده‌های لرزه‌ای حاصل از زمین لرزه و چشمه‌های فعال و غیرفعال است. همچنین می‌توان برای گزینش مد اصلی در طیف سرعت گروه استخراج شده از رکوردهای

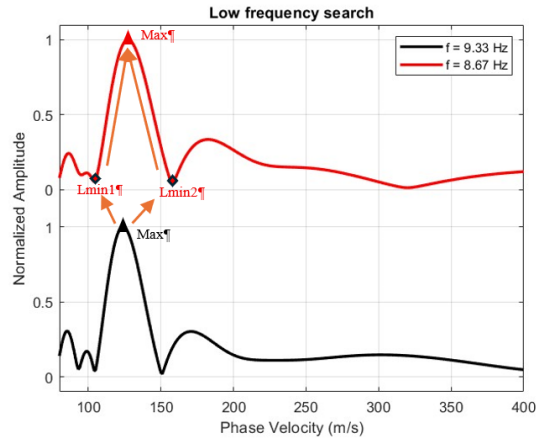
ابتدا، در روی منحنی انرژی سرعت‌های فاز مربوط به فرکانسی که مجاور فرکانس شروع (به سمت فرکانس‌های بالا) انتخاب شده، نزدیک‌ترین بیشینه محلی به سرعت فاز فعلی شناسایی می‌شود. سپس، نزدیک‌ترین بیشینه محلی به این گزینه‌ی پیشنهادی در منحنی فرکانس شروع تعیین می‌شود. اگر این نقطه همان سرعت فاز فرکانس شروع باشد، این دو نقطه را نزدیک‌ترین جفت بیشینه‌های محلی می‌نامیم. در این حالت، گزینه‌ی پیشنهادی پذیرفته می‌شود و به عنوان سرعت فاز در آن فرکانس و نقطه شروع جدید برای ادامه جست‌وجو به سمت فرکانس‌های بالاتر استفاده می‌شود (شکل ۱-ب). در صورت عدم تطابق متقابل، الگوریتم سرعت فاز فعلی را حفظ می‌کند (شکل ۱-پ) و به جست‌وجو در فرکانس‌های بعدی ادامه می‌دهد تا جایی که تطابق متقابل دوباره برقرار شود. برای مثال، اگر تطابق در فرکانس‌های ۳۶/۶۷، ۳۷/۳۳ و ۳۸ هرتز رخ ندهد، الگوریتم به جست‌وجو ادامه می‌دهد تا این که در فرکانس ۳۸/۶۷ هرتز تطابق متقابل برقرار شود و جست‌وجو از آن نقطه از سر گرفته شود (شکل ۱-ت). جست‌وجوی فرکانس بالا با رسیدن به بالاترین فرکانس متوقف می‌شود. در نهایت، گزینش منحنی پاشش مد پایه با تعیین مقدار منحنی به کمک درون‌یابی در نقاط فرکانسی که در آنها گزینشی صورت نگرفته (به دلیل رد شدن توسط الگوریتم در فرایند گزینش) تکمیل شده و به شکل یک منحنی پیوسته درمی‌آید.

یکی از محدودیت‌های فیزیکی در جست‌وجوی خودکار منحنی‌های پاشش به سمت فرکانس‌های پایین، رابطه طول‌موج با طول پروفیل لرزه‌نگاری است. وقتی طول‌موج از طول پروفیل لرزه‌ای بزرگ‌تر شود، آرایه دیگر نمی‌تواند یک سیکل کامل از موج ریلی را نمونه‌برداری کند و در نتیجه انرژی پاشش در این ناحیه فاقد اعتبار فیزیکی خواهد بود. حداکثر طول‌موج قابل اندازه‌گیری توسط گیرنده‌ها تقریباً برابر است با $\lambda_{max} \approx (n_{Rec} - 1) \times \Delta x$ که در آن n_{Rec} تعداد گیرنده‌ها و Δx فاصله بین گیرنده‌ها می‌باشد. به همین دلیل در الگوریتم این شرط توقف اعمال شده است و به محض این که سرعت فاز انتخاب شده در فرکانس جاری از مقدار λ_{max}/f بیشتر یا مساوی شود یعنی $C \geq \lambda_{max}/f$ جست‌وجوی فرکانس پایین متوقف می‌شود. این شرط باعث می‌شود منحنی پاشش نهایی تنها در ناحیه‌ای قرار گیرد که از نظر فیزیکی قابل اندازه‌گیری و قابل اعتماد است و از انحراف الگوریتم به سمت نقاط اشتباه در فرکانس‌های بسیار پایین جلوگیری می‌کند (پارک و کارنواله، ۲۰۱۰).

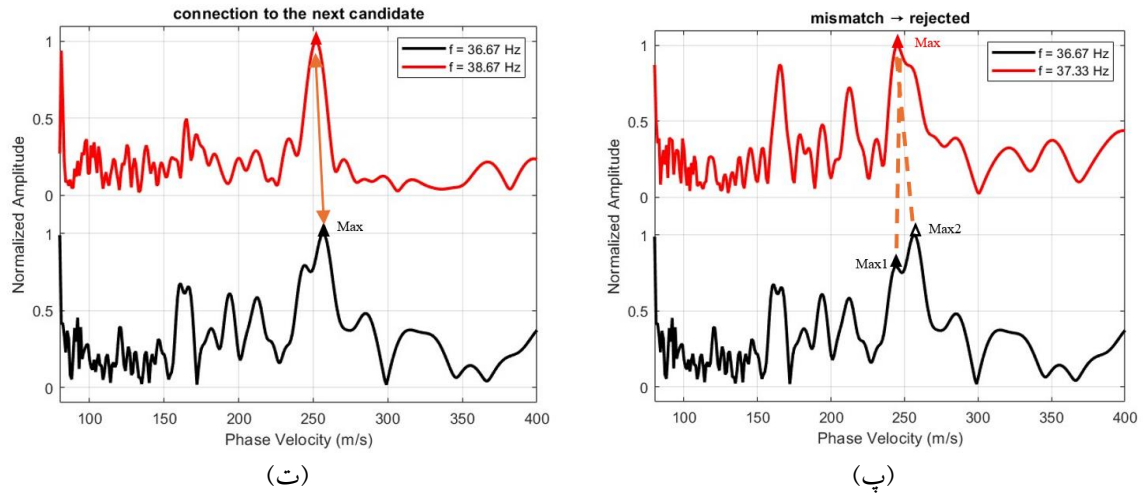
– راهبرد جست‌وجوی فرکانس بالا: در این بخش الگوریتم جست‌وجو از مفهوم جفت بیشینه‌های متقابل نزدیک استفاده می‌کند. این مرحله تضمین می‌کند تا جست‌وجو از مسیر درست بیشینه انرژی‌ها خارج نشود. چون جست‌وجو در بخش فرکانس بالای طیف سرعت فاز به دلیل حضور نوفه و تأثیر منحنی پاشش مدهای بالاتر نسبتاً پیچیده است.



(ب)



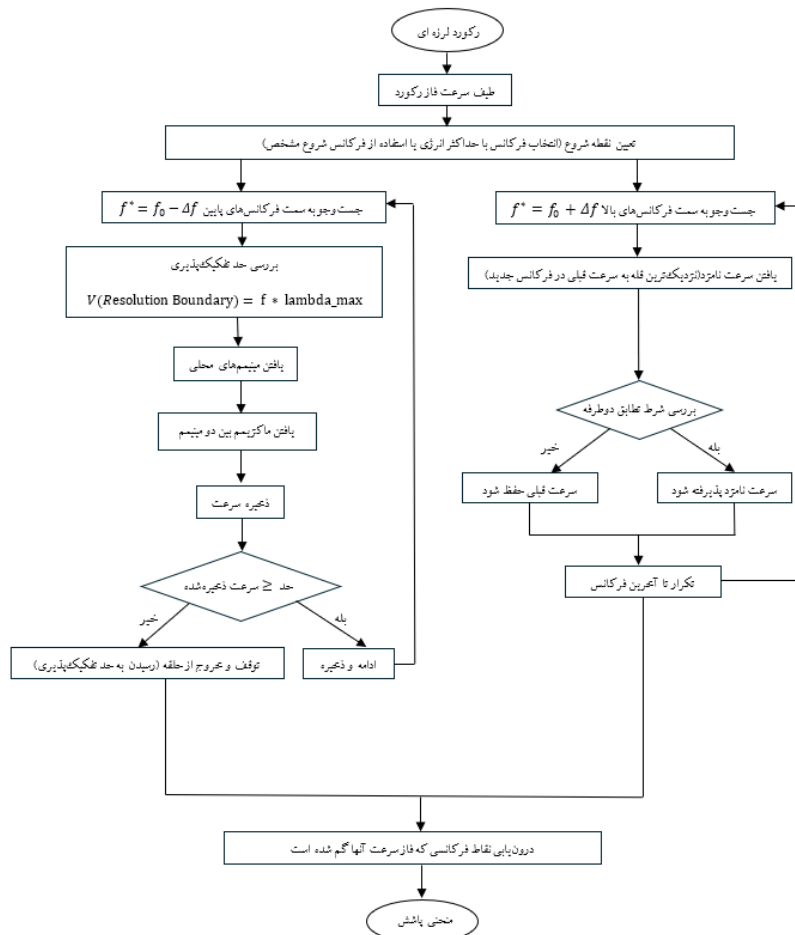
(الف)



شکل ۱. منحنی‌های انرژی سرعت فاز در فرکانس‌های مختلف حاصل از داده واقعی به کار رفته در این مطالعه (جزئیات داده‌برداری در متن مقاله آمده). (الف) منحنی‌های انرژی سرعت فاز در فرکانس‌های ۹/۳۳ هرتز و ۸/۶۷ هرتز؛ (ب) منحنی‌های انرژی سرعت فاز در فرکانس‌های ۱۰ هرتز و ۱۰/۶۷ هرتز؛ (پ) منحنی‌های انرژی سرعت فاز در فرکانس‌های ۳۷/۳۳ هرتز و ۳۶/۶۷ هرتز؛ (ت) منحنی‌های انرژی سرعت فاز در فرکانس‌های ۳۸/۶۷ هرتز و ۳۶/۶۷ هرتز.

الگوریتم به کار رفته در روش پیشنهادی با بهره‌بردن از این دو راهبرد متفاوت برای محدوده‌های فرکانس پایین و بالا قادر است به‌طور خودکار و دقیق منحنی پاشش مد پایه را استخراج کند. شکل (۲) فلوجارت کلی این الگوریتم را نشان می‌دهد که مراحل اصلی انتخاب خودکار منحنی پاشش را شامل می‌شود.

الگوریتم به کار رفته در روش پیشنهادی با بهره‌بردن از این دو راهبرد متفاوت برای محدوده‌های فرکانس پایین و بالا قادر است به‌طور خودکار و دقیق منحنی پاشش مد پایه را



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم به کار رفته در روش پیشنهادی.

۳. ارزیابی عملکرد روش

۳-۱. مدل مصنوعی

۳-۱-۱. مدل سازی داده‌های مصنوعی

برای ارزیابی کارآمدی روش پیشنهادی روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی، یک مجموعه داده مصنوعی برای مدل زمین سه لایه فرضی با ویژگی‌هایی مطابق جدول ۱ تولید شد.

جدول ۱. پارامترهای مدل زمین شناسی.

پارامتر	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	نیم فضا
ضخامت (m)	۲	۴	۷	-
چگالی (gcm^{-3})	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹
سرعت موج تراکمی (ms^{-1})	۷۰۰	۱۰۰۰	۱۶۰۰	۲۰۰۰
سرعت موج برشی (ms^{-1})	۳۵۰	۵۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰

در این شبیه‌سازی از موجک ریکر با فرکانس مرکزی ۲۰ هرتز به‌عنوان چشمه لرزه‌ای استفاده شد. از ۶۸ گیرنده با فاصله ۳ متری (فاصله چشمه از گیرنده اول هم ۳ متر می‌باشد) از یکدیگر استفاده شد و محدوده فرکانسی ۰ تا ۸۰ هرتز با گام فرکانسی ۰/۵ هرتز در نظر گرفته شد.

برای شبیه‌سازی رکورد لرزه‌ای، می‌توان از دو شیوه برای تولید لرزه نگاشت مصنوعی برای مدل زمین فرضی استفاده کرد. روش اول مبتنی بر حل معادله موج کشسان به‌روش تفاضل متناهی (ویریوکس، ۱۹۸۶) است و روش دوم در محیط برنامه‌نویسی متلب در حوزه فوریه و از طریق ترکیب مؤلفه‌های فرکانسی تشکیل‌دهنده موج سطحی با استفاده از اطلاعات فرکانس و سرعت‌های فاز متناظر آنها انجام می‌شود (اوگنکوفو و ساچی، ۲۰۲۱). در این مطالعه از روش دوم استفاده شده است.

در روش دوم برای مدل فرضی انتخاب شده، مؤلفه‌های فرکانسی و سرعت‌های فاز متناظرشان با به‌کارگیری روش تابع انتقال معرفی شده توسط چن (۱۹۹۳) به‌دست آمد. از امتیازات روش چن این است که در این روش ناپایداری روش‌های قبلی (مانند تامسون (۱۹۵۰)، هاسکل (۱۹۵۳) و ابوزینا (۱۹۷۹)) برای حل مسئله در حضور مؤلفه‌های

بزرگ فرکانسی برطرف شده است. از آنجا که در داده‌های امواج سطحی در مقیاس مهندسی حضور مؤلفه‌های فرکانسی بزرگ امواج سطحی اجتناب‌ناپذیر است، استفاده از روش چن (۱۹۹۳) منحنی‌های پاشش درست‌تری را برای مدل‌های زمین‌شناختی سطحی به‌دست می‌دهد.

همچنین برای شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌تر و آزمایش پایداری روش در برابر نوفه، نوفه تصادفی گوسی با نسبت سیگنال به نوفه ۲۵- دسی بل (شکل ۴-الف) به رکوردهای لرزه‌ای مصنوعی (شکل ۳-الف) اضافه شده است و طیف سرعت فاز آن (شکل ۴-ب) محاسبه شد.

مد پایه منحنی پاشش انتخاب شده با روش پیشنهادی بر روی طیف سرعت فاز داده مصنوعی تمیز (۳-الف) و آغشته به نوفه (۴-الف) در شکل‌های (۳-ب) و (۴-ب) رسم شده است (خط‌چین سیاه). در شکل‌های (۳-پ) و (۴-پ) منحنی پاشش تئوری به‌دست آمده به روش چن (۱۹۹۳)، که برای ساخت داده مصنوعی از آن استفاده شده (خط آبی)، و منحنی پاشش انتخاب شده بر اساس روش پیشنهادی (خط‌چین قرمز) آمده است. همچنین منحنی به‌دست آمده از روش انتخاب خودکار قله‌ها (خط سیاه) را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی حتی در حضور نوفه شدید به‌خوبی توانسته منحنی پاشش را پیش‌بینی کند. در مقابل منحنی انتخاب شده به روش انتخاب خودکار قله‌ها، به‌شدت پراکنده بوده و مدهای بالا را هم شامل می‌شود و عملاً غیرقابل استفاده است، در حالی که منحنی استخراج شده به روش پیشنهادی بسیار نزدیک به منحنی تئوری باقی می‌ماند.

برای بررسی کمی کارایی روش پیشنهادی، میانگین توان دو خط‌های دو منحنی پاشش و حداکثر خطای نسبی میان منحنی‌ها با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه شدند:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{pick}(f_i) - C_{theo}(f_i))^2 \quad (2)$$

$$\delta = \text{Max} \left(\left| \frac{C_{pick} - C_{theo}}{C_{theo}} \right| \right) \quad (3)$$

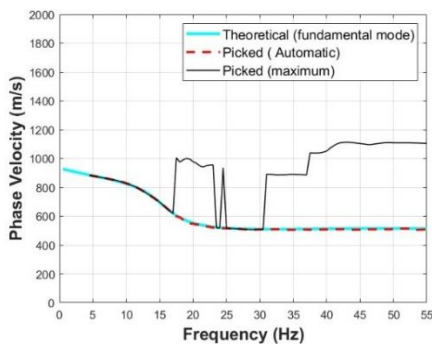
که در آن C_{pick} و C_{theo} به ترتیب سرعت فاز پیک شده و تئوری را نشان می‌دهند و n تعداد فرکانس‌های (f) به‌کار رفته در مقایسه است. بر اساس رابطه‌های (۲) و (۳)، به‌طور

آمریکا استفاده شده است. این مجموعه شامل رکوردهای امواج سطحی با چشمه فعال در ۱۰ ایستگاه لرزه‌ای در ایالت کالیفرنیا است. داده‌ها به صورت آرایه خطی ۴۸ کاناله با فاصله گیرنده‌ها (از نوع سرعت نگار) ۱/۵ متر (فاصله چشمه از گیرنده اول هم ۱/۵ متر) و فاصله نمونه برداری زمانی ۰/۰۰۰۲۵ ثانیه ثبت شده‌اند. این داده‌ها در قالب SEG2 در دسترس هستند (یونگ، ۲۰۲۱). پس از محاسبه طیف سرعت فاز داده‌های واقعی با استفاده از روش جابه‌جایی فاز، روش پیشنهادی بر روی آن اعمال شد و منحنی مد پایه برای این داده انتخاب شد (شکل ۵ و شکل ۶). نتایج نشان داد که روش پیشنهادی توانسته است مد پایه را با موفقیت گزینش کند. در اینجا روش پیشنهادی بدون تعیین فرکانس شروع به کار رفت و به جای آن از فرکانس غالب داده استفاده شد.

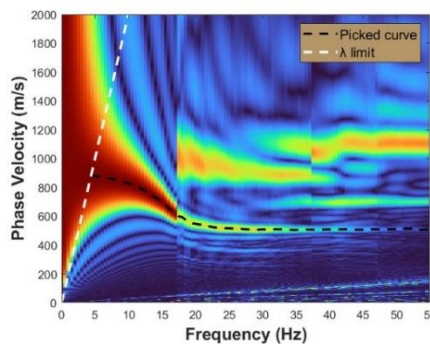
خاص، در داده تمیز، میانگین توان دو خط‌های منحنی پاشش تئوری و منحنی پاشش انتخاب شده توسط روش پیشنهادی تنها $6/3(m/s)^2$ و حداکثر خطای نسبی ۱/۸٪ به دست آمد، در حالی که این مقادیر برای روش انتخاب خودکار قله‌ها به ترتیب $161830(m/s)^2$ و ۱۱۶٪ به دست آمد که غیر قابل استفاده است. همچنین در شرایط نوفه قوی‌تر با نسبت سیگنال به ۲۵- دسی‌بل میانگین توان دو خطا توسط روش پیشنهادی $156(m/s)^2$ و حداکثر خطای نسبی ۶/۹٪ حاصل شد که همچنان دقت به مراتب بالاتری نسبت به انتخاب روش انتخاب خودکار قله‌ها دارد.

۲-۳. داده‌های میدانی

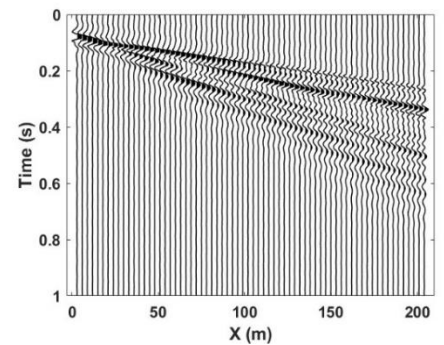
برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی روی داده‌های واقعی، از مجموعه داده عمومی سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده



(ب)

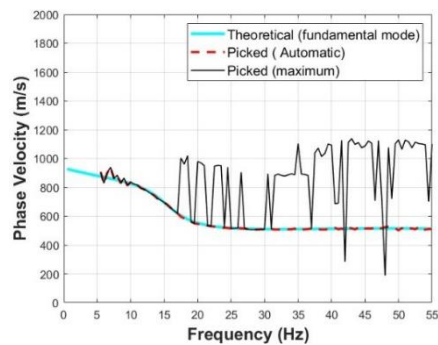


(ب)

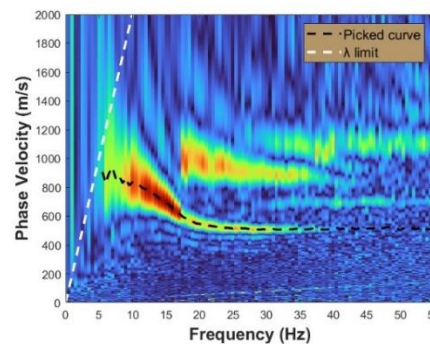


(الف)

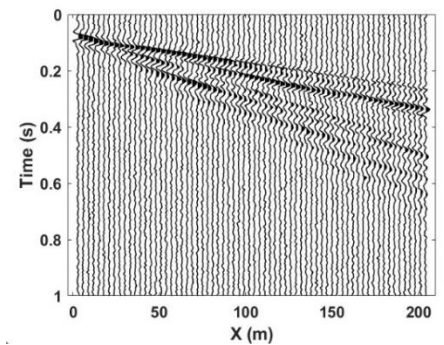
شکل ۳. (الف) رکورد لرزه‌ای مصنوعی تمیز؛ (ب) طیف سرعت فاز رکورد لرزه‌ای در (الف) (خط چین سفید حد تفکیک و خط چین سیاه مد اصلی گزینش شده بر اساس روش پیشنهادی را مشخص می‌کند). (پ) مقایسه منحنی پاشش مد پایه به روش پیشنهادی (خط چین قرمز)، مد پایه به روش انتخاب قله‌ها (خط سیاه) و منحنی پاشش تئوری (خط آبی).



(ب)

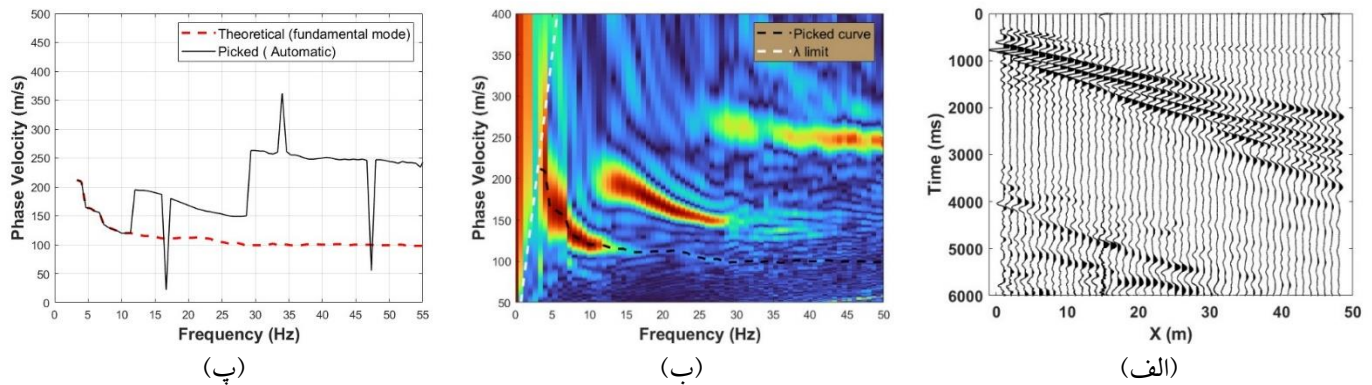


(ب)

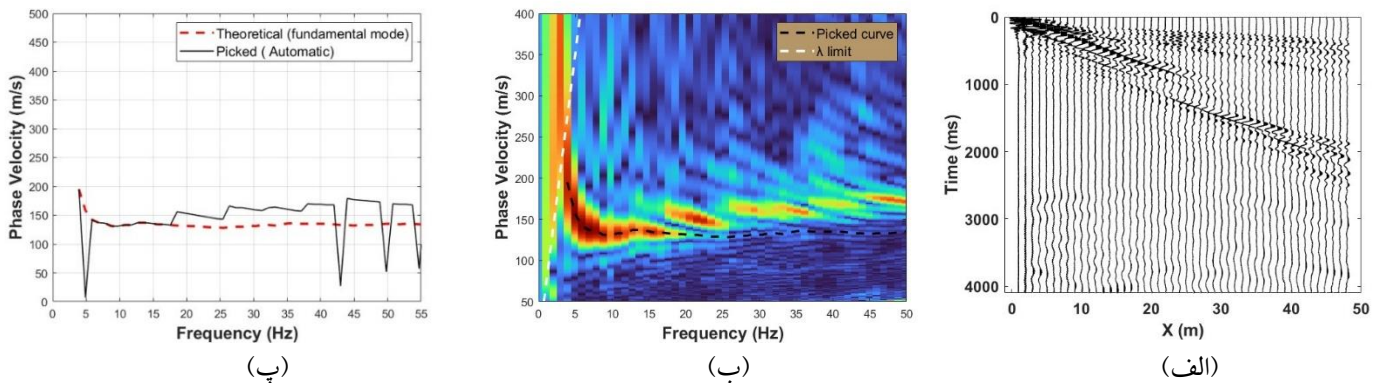


(الف)

شکل ۴. (الف) رکورد لرزه‌ای مصنوعی با نسبت سیگنال به نوفه ۲۵- دسی‌بل؛ (ب) طیف سرعت فاز رکورد لرزه‌ای در (الف) (خط چین سفید حد تفکیک و خط چین سیاه مد اصلی گزینش شده بر اساس روش پیشنهادی را مشخص می‌کند). (پ) مقایسه منحنی پاشش مد پایه به روش پیشنهادی (خط چین قرمز)، مد پایه به روش انتخاب خودکار قله‌ها (خط سیاه) و منحنی پاشش تئوری (خط آبی).



شکل ۵. (الف) رکورد لرزه‌ای واقعی AGC شده؛ (ب) طیف سرعت فاز به همراه مد پایه انتخاب شده به روش پیشنهادی؛ (پ) مقایسه منحنی پاشش مد پایه به روش پیشنهادی (خط چین قرمز) و مد پایه به روش انتخاب قله‌ها (خط سیاه) رکورد لرزه‌ای واقعی.



شکل ۶. (الف) رکورد لرزه‌ای واقعی AGC شده؛ (ب) طیف سرعت فاز به همراه مد پایه انتخاب شده به روش پیشنهادی؛ (پ) مقایسه منحنی پاشش مد پایه به روش پیشنهادی (خط چین قرمز) و مد پایه به روش انتخاب قله‌ها (خط سیاه) رکورد لرزه‌ای واقعی.

۴. بحث

پایین مناسب بوده و با اعمال شرط حد تفکیک پذیری مبتنی بر طول پروفیل، از انتخاب نقاط نامعتبر در فرکانس‌های بسیار پایین جلوگیری می‌کند. نتایج ارائه شده در این مقاله حاصل بخش اول از پژوهشی است که هدف آن گزینش مد پایه و مدهای بالاتر در طیف سرعت فاز است. بخش ارائه شده از پژوهش اصلی در این مقاله تنها انتخاب خودکار منحنی پاشش مد پایه رکوردهای لرزه‌ای را شامل می‌شود. روش پیشنهادی قابل استفاده برای منحنی پاشش به دست آمده از هر نوع موج سطحی (ریلی یا لائو) و داده‌های لرزه‌ای حاصل از زمین لرزه و چشمه‌های فعال و غیرفعال است. همچنین می‌توان برای گزینش مد پایه در طیف سرعت گروه استخراج شده از رکوردهای لرزه‌ای هم به کار برد.

در روش پیشنهادی تنها با تنظیم فرکانس شروع می‌توان به انتخاب کاملاً خودکار منحنی پاشش دست یافت و نیازی به دخالت پارامترهای دیگر در مقایسه با روش انتخاب خودکار قله‌ها ندارد. روش انتخاب خودکار قله‌ها دارای خطای بسیار بالا بوده و عملاً غیرقابل استفاده است. روش پیشنهادی خطای میانگین توان دو و خطای نسبی پایینی دارد که نشان‌دهنده برتری چشمگیر در دقت و پایداری آن است. علاوه بر این، برخلاف روش‌های یادگیری ماشین که نیازمند مجموعه داده‌های آموزشی بزرگ و تنظیمات پیچیده هستند، روش حاضر بدون نیاز به آموزش قبلی و با حجم محاسباتی بسیار کم برای داده‌های نزدیک سطح و داده‌های با نسبت سیگنال به نوفه

۵. نتیجه گیری

پارامترهای اضافی استخراج می کند که به طور قابل توجهی کارایی انتخاب را بهبود می دهد و از تأثیر عوامل انسانی جلوگیری می کند. بطور یقین صحت و دقت به دست آمده درانتخاب منحنی پاشش تأثیر بسزایی در تخمین مدل سرعت برشی خواهد داشت. روش پیشنهادی قابل استفاده برای طیف سرعت فاز و طیف سرعت گروه به دست آمده از هر نوع موج سطحی (ریلی یا لاو) و داده های لرزه ای حاصل از زمین لرزه و چشمه های فعال و غیرفعال است.

مراجع

- Abo-Zena, A. (1979). Dispersion function computations for unlimited frequency values. *Geophysical Journal International*, 58(1), 91-105.
- Aki, K., & Richards, P. (1980). *Quantitative seismology*. W. H. Freeman and Company.
- Behm, M., & Snieder, R. (2013). Love waves from local traffic noise interferometry. *The Leading Edge*, 32(6), 628-632.
- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., Shapiro, N. M., & Yang, Y. (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3), 1239-1260.
- Boaga, J., Cassiani, G., Strobbia, C. L., & Vignoli, G. (2013). Mode misidentification in Rayleigh waves: Ellipticity as a cause and a cure. *Geophysics*, 78(4), EN17-EN28.
- Chen, X. (1993). A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space. *Geophysical Journal International*, 115(2), 391-409.
- D'Amico, V., Picozzi, M., Baliva, F., & Albarello, D. (2008). Ambient noise measurements for preliminary site-effects characterization in the urban area of Florence, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(3), 1373-1388.
- Dong, S., Li, Z., Chen, X., & Fu, L. (2021). DisperNet: An effective method of extracting and classifying the dispersion curves in the frequency-Bessel dispersion spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(6), 3420-3431.
- Foti, S., Parolai, S., Albarello, D., & Picozzi, M. (2011). Application of surface-wave methods for seismic site characterization. *Surveys in Geophysics*, 32(6), 777-825.
- Gabriels, P., Snieder, R., & Nolet, G. (1987). In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves. *Geophysical Prospecting*, 35(2), 187-196.
- Gao, L., Xia, J., Pan, Y., & Xu, Y. (2016). Reason and condition for mode kissing in MASW method. *Pure and Applied Geophysics*, 173(5), 1627-1638.
- Haskell, N. A. (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media: Bull. Seis. Soc. Am.
- Hu, M., Pan, Y., Wang, T., & Wang, Y. (2025). Automatic picking of surface-wave dispersion curves with an image segmentation method. *Journal of Applied Geophysics*, 233, 105615.
- Hu, S., Luo, S., & Yao, H. (2020). The frequency-Bessel spectrograms of multicomponent cross-correlation functions from seismic ambient noise. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8), e2020JB019630.
- Lee, W. B., & Solomon, S. C. (1979). Simultaneous inversion of surface-wave phase velocity and attenuation: Rayleigh and Love waves over continental and oceanic paths. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69(1), 65-95.
- Liu, H., Li, J., & Hu, R. (2024). Automatic and adaptive picking of surface-wave dispersion curves for near-surface application. *Journal of Applied Geophysics*, 221, 105282.
- Luo, Y., Xia, J., Miller, R. D., Xu, Y., Liu, J., & Liu, Q. (2008). Rayleigh-wave dispersive energy imaging using a high-resolution linear Radon transform. *Pure and Applied Geophysics*, 165(5), 903-922.
- McMechan, G. A., & Yedlin, M. J. (1981). Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics*, 46(6), 869-874.
- Mi, B., Xia, J., Shen, C., Wang, L., Hu, Y., & Cheng, F. (2017). Horizontal resolution of multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 82(3), EN51-EN66.
- Nakata, N., Snieder, R., Tsuji, T., Larner, K., & Matsuoka, T. (2011). Shear wave imaging from

- traffic noise using seismic interferometry by cross-coherence. *Geophysics*, 76(6), SA97-SA106.
- Nazarian, S., Stokoe II, K. H., & Hudson, W. R. (1983). *Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems* (No. 930).
- Oghenekohwo, F., & Sacchi, M. D. (2021). Transform-domain noise synthesis and normal moveout-stack deconvolution approach to ground roll attenuation. *Geophysics*, 86(1), V15-V22.
- Park, C. B., & Carnevale, M. (2010). Optimum MASW survey—revisit after a decade of use. In *GeoFlorida 2010: advances in analysis, modeling & design* (pp. 1303-1312).
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- Park, C. B., & Miller, R. D. (2008). Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW). *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 13(1), 1-11.
- Rovetta, D., Kontakis, A., & Colombo, D. (2021). Application of a density-based spatial clustering algorithm for fully automatic picking of surface-wave dispersion curves. *The Leading Edge*, 40(9), 678-685.
- Song, W., Feng, X., Zhang, G., Gao, L., Yan, B., & Chen, X. (2022). Domain adaptation in automatic picking of phase velocity dispersions based on deep learning. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(6), e2021JB023389.
- Stokoe, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A., & Roesset, J. M. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method. In *Geophysical characterization of sites* (pp. 15-25).
- Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*, 21(2), 89-93.
- Virieux, J. (1986). P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 51(4), 889-901.
- Wang, J., Wu, G., & Chen, X. (2019). Frequency-Bessel transform method for effective imaging of higher-mode Rayleigh dispersion curves from ambient seismic noise data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(4), 3708-3723.
- Wang, Z., Sun, C., & Wu, D. (2021). Automatic picking of multi-mode surface-wave dispersion curves based on machine learning clustering methods. *Computers & Geosciences*, 153, 104809.
- Xia, J., Xu, Y., & Miller, R. D. (2007). Generating an image of dispersive energy by frequency decomposition and slant stacking. *Pure and Applied Geophysics*, 164(5), 941-956.
- Yang, C., Wang, Y., & Lu, J. (2012). Application of Rayleigh waves on PS-wave static corrections. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(1), 90-97.
- Yang, Z., Chen, X., Pan, L., Wang, J., Xu, J., & Zhang, D. (2019). Multi-channel analysis of Rayleigh waves based on vector wavenumber transformation method (VWTM). In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 21).
- Yilmaz, O., Eser, M., & Berilgen, M. (2006). A case study of seismic zonation in municipal areas. *The Leading Edge*, 25(3), 319-330.
- Yong, A. K. (2021). Array-based Surface-wave Active-or Passive-source Recordings at 10 Seismic Station Sites in California. *US Geological Survey (USGS) Data Release*, 1094.
- Zhang, X., Jia, Z., Ross, Z. E., & Clayton, R. W. (2020). Extracting dispersion curves from ambient noise correlations using deep learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(12), 8932-8939.