

Filtering of microtremor data with the technique of artificial reduction of sampling frequency to estimate the frequency of fundamental alluvium and the depth of engineering bedrock

Adib, A.¹  | Mousavi Anzehaee, S. M.²  | Kianoush, P.¹ 

1. Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: adib@azad.ac.ir

(Received: 6 Oct 2024, Revised: 29 Dec 2024, Accepted: 29 April 2025, Published online: 10 June 2025)

Summary

The phenomenon of resonance caused by the behavior of alluvium during an earthquake affects the occurrence of damage. This phenomenon occurs when the dominant period of alluvium is equal to the dominant period of structures (Mukhopadhyay and Bormann, 2004; Kanli et al., 2006; Kvasnička et al., 2011). Therefore, determining the dominant frequency of the soil with high certainty is particularly important and is the primary goal of this paper. The method of using microtremors to determine the site's response to earthquakes and determine the dominant frequency of the soil is of interest, and by measuring them at the ground level, information about the vibration characteristics of the soil can be obtained. (Kerh & Chu, 2002; Kianoush et al., 2023a,b; Jamshidi et al., 2024; Khoshmagham et al., 2024).

Adib et al. (2015) conducted the site classification of Ardakan City in Yazd province based on the earth's natural frequency by the microtremor data. While identifying the dynamic characteristics of the earth in this area, the level of compatibility of the land classification is suitable for the studies of the site effect based on the geotechnical, geophysical, and microtremor data with the regulations of dynamic design of buildings. Similarly, Bagheri et al. (2017) emphasized the importance of denoising seismic data to improve the quality of records, which is essential for accurate interpretation. They proposed a novel method combining frequency-offset deconvolution (FXD) and decision-based median (DBM) filtering to enhance the signal-to-noise ratio (S/N) and effectively suppress random noise.

Adib and others (Adib et al., 2015) classified the site effects using a fractal model based on the analysis of microtremor data, frequency amplification index, and vulnerability (k-g)) in the city of Meybod. Nogoshi and Igarashi (1970, 1971) improved, this classification and found four types of soil, including (1) hard soil and weak rock with a frequency of 6.2 to 8 Hz, (2) hard soil with a frequency of about 4.9 to 6.2 Hz, (3) relatively soft soil with a frequency of 2.4 to 4.9 Hz and (4) soft soil with a frequency of less than 2.4 Hz that were separated in this city (Wahba et al., 2024; Labuta et al., 2025). Bagheri and Riahi (2016, 2018) also highlighted the effectiveness of DBM filtering in seismic data processing, demonstrating its superiority in suppressing random noise and improving S/N. This classification aligns with findings by KhodAgholi and Bagheri (2020), who introduced local least squares polynomial (LLSP) smoothing to diminish seismic random noise, thereby enhancing data quality and interpretability.

The Quality of microtremor data and processing methods considerably affects the accuracy of estimating dynamic soil parameters. In this paper, an artificial sampling frequency reduction technique has been proposed for removing high-frequency perturbations from microtremor data, and a running variance method has been used to improve the automatic detection of data sections infected by local perturbations. In this method, the running variance of the signal was calculated using a sliding window. Then, the resulting variance signal was used to remove the portions of data affected by transient perturbations. The proposed methods have been applied to the data recorded for the Meybod city in the North of Yazd Province. By comparing the results of the proposed techniques and the standard methods on microtremor data in urban areas, it is clear that the proposed methods have successfully removed the effects of local transients and their redundant fluctuations such that there is no sharp amplitude variation in the residual signal. The results of the simulation confirm this claim.

Additionally, the ease of parameter setting in the running variance approach makes it superior to the ratio method. Discarding the fewer amounts of contaminated data is an effective method, especially in regions with extensive noise. This paper shows that some variations in microtremor data processes could reduce the destructive effects of local transients on them and consequently improve fundamental site frequency estimation based on the spectral ratio of microtremors. Therefore, considering the low cost of this approach, microtremor analysis can be used as a primary method for initial geotechnical studies in various regions. As a result, it increases the accuracy and degree of confidence in estimating the dominant frequency based on the spectral ratio based on the microtremors data.

Keywords: Microtremors, Fundamental Alluvium Frequency, Artificial Sampling Frequency Reduction Technique, Running Variance Method, Disturbance Removal.

Cite this article: Adib, A., Mousavi Anzehaee, S. M., & Kianoush, P. (2025). Filtering of microtremor data with the technique of artificial reduction of sampling frequency to estimate the frequency of fundamental alluvium and the depth of engineering bedrock. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(1), 17-43. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.382590.1007628>

E-mail: (1) pooria.kianoush@gmail.com (2) m_mousavi@azad.ac.ir



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.382590.1007628>

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

فیلتر کردن داده‌های خرد لرزه‌ای با تکنیک کاهش مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری برای تخمین بسامد آبرفت‌های بنیادی و عمق سنگ بستر مهندسی

احمد ادیب^۱ | سید محمد موسوی انزهایی^۲ | پوریا کیانوش^۱

۱. گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: adib@azad.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۷/۱۵، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۲/۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۳/۲۰)

چکیده

کیفیت اندازه‌گیری و روش پردازش خردلرزه‌ها تأثیر قابل توجهی بر دقت تخمین پارامترهای دینامیکی ساختگاه دارد. در این مقاله، به منظور افزایش دقت تخمین فرکانس غالب آبرفت، از تکنیک کاهش مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری و روش واریانس پیش‌رونده استفاده شده است. این روش‌ها به ویژه در مناطق شهری که تحت تأثیر اختلالات محلی قرار دارند، می‌توانند به طور مؤثری نویزهای اضافی را حذف کرده و دقت تخمین را افزایش دهند. با استفاده از پنجره لغزان، واریانس پیش‌رونده سیگنال محاسبه و از آن به عنوان پایه‌ای برای حذف محدوده داده‌هایی که تحت تأثیر اختلالات گذرا قرار گرفته‌اند، استفاده می‌شود. نتایج حاصل از اعمال این روش‌ها بر روی داده‌های خردلرزه‌ای ثبت شده در شهر میبد، نشان‌دهنده عملکرد مؤثر این تکنیک‌ها در حذف اثر اختلالات محلی و بهبود دقت تخمین فرکانس غالب آبرفت است. این مطالعه نشان می‌دهد که با تغییراتی در روش پردازش داده‌ها، می‌توان به طور قابل توجهی از اثرات مخرب اختلالات محلی کاست و فرکانس غالب زمین را با دقت بیشتری تعیین کرد. با توجه به اقتصادی بودن این روش، تحلیل خردلرزه‌ها می‌تواند به عنوان یک روش پایه‌ای در مطالعات اولیه ژئوتکنیکی در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: خردلرزه‌ها، فرکانس غالب آبرفت، تکنیک کاهش مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری، روش واریانس پیش‌رونده، حذف اغتشاش.

۱. مقدمه

می‌باشند که همواره در زمین وجود داشته و منابع مولد آنها می‌توانند عوامل طبیعی یا حاصل از فعالیت بشر باشند (ال هیلالی و همکاران، ۲۰۲۳؛ لایوتا و همکاران، ۲۰۲۵). از آنجا که این ارتعاش‌های خفیف تحت تأثیر شرایط خاک محل تغییر می‌یابند، می‌توان با اندازه‌گیری آنها در سطح زمین، اطلاعاتی راجع به مشخصه‌های ارتعاشی خاک محل (پروفیل سرعت موج برشی، فرکانس طبیعی و...) به دست آورد. با استفاده از این روش می‌توان نواحی وسیعی را در مدت کوتاه مورد بررسی قرار داد و اطلاعات ارزشمندی از ویژگی‌های حرکت نیرومند زمین را به دست آورد (کر و چو، ۲۰۰۲؛ کیانوش و همکاران، ۲۰۲۳الف؛ جمشیدی و همکاران، ۲۰۲۴؛ خوش‌مقام و همکاران، ۲۰۲۴؛ راجپوت و

رفتار آبرفت تحت تأثیر زلزله به شکل‌های مختلفی در بروز خسارت دخالت دارد. یکی از مهم‌ترین اثرهای تخریبی آن، پدیده تشدید اثر امواج در آبرفت و تقویت شتاب حرکت زمین است. پدیده تشدید زمانی رخ می‌دهد که پریود غالب آبرفت با پریود غالب سازه‌ها برابر باشد (موخودپای و بورمانن، ۲۰۰۴؛ کانلی و همکاران، ۲۰۰۶؛ کواسنیچکا و همکاران، ۲۰۱۱). از این رو، تعیین فرکانس غالب خاک با قطعیت بالا برای ارزیابی ریسک زلزله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و هدف اصلی این مقاله است. روش استفاده از خردلرزه‌ها به منظور تعیین واکنش محل در برابر زلزله و تعیین فرکانس غالب خاک، به علت سادگی و اقتصادی بودن مورد توجه می‌باشد. خردلرزه‌ها ارتعاش‌های خفیف زمین با دامنه حدود ۱ تا ۱۰ میکرون

استناد: ادیب، احمد؛ موسوی انزهایی، سید محمد و کیانوش، پوریا (۱۴۰۴). فیلتر کردن داده‌های خرد لرزه‌ای با تکنیک کاهش مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری برای تخمین بسامد آبرفت‌های بنیادی و عمق سنگ بستر مهندسی. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۱(۱)، ۱۷-۴۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.382590.1007628>

رایانامه: (۱) pooria.kianoush@gmail.com (۲) m_mousavi@azad.ac.ir

همکاران، ۲۰۲۵).

از آنجا که رفتار آبرفت تحت تأثیر زلزله می‌تواند به شکل‌های مختلفی در بروز خسارت دخالت داشته باشد، نیاز به روش‌های دقیق و کارآمد برای تخمین فرکانس غالب آبرفت و عمق سنگ بستر احساس می‌شود. در این راستا، استفاده از خردلرزه‌ها به عنوان ابزاری برای تحلیل دینامیکی خاک و تعیین فرکانس غالب، به‌ویژه در مناطق شهری که تحت تأثیر اختلالات محلی قرار دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در تحقیقات پیشین، روش‌های مختلفی برای تخمین فرکانس غالب آبرفت و ارزیابی اثرات محلی ارائه شده است. به عنوان مثال، ناکامورا (۱۹۸۹) با استفاده از نسبت طیف فرکانس مؤلفه افقی به مؤلفه قائم (HVSr) خردلرزه‌ها در ساختگاه‌ها، اثر منشأ را از اثر ساختگاه تفکیک کرد. از این روش به‌طور گسترده‌ای در مطالعات اثر ساختگاه استفاده شده است (ریپل و همکاران، ۱۹۹۸؛ گوسار، ۲۰۰۷) در جنوب فرانسه نشان دادند که فرکانس‌های غالب به‌دست آمده به روش ناکامورا با نتایج شبیه‌سازی عددی یک بعدی همخوانی خوبی داشته و پیشنهاد کردند برای انجام عملیات ریزپهنه‌بندی یک ناحیه، روش عددی و ریزارتعاش با هم ترکیب شوند.

تولادهار (۲۰۰۲) با اندازه‌گیری خردلرزه‌ها در ۱۵۰ نقطه از سطح شهر بانکوک پیروید غالب را با روش HVSr (H/V) تعیین و نشان داد که مقادیر پیروید غالب، انطباق مناسبی با زمین‌شناسی منطقه دارد. در ادامه، محققین دیگری از جمله: (تزکان و همکاران، ۲۰۰۲؛ اوکادا، ۲۰۰۳؛ پارولای و گالینا-میرینو، ۲۰۰۶؛ آپوستولیدیس و همکاران، ۲۰۰۶؛ لومباردو و همکاران، ۲۰۰۶؛ گوسار، ۲۰۰۷؛ زهاریا و همکاران، ۲۰۰۸) نیز از خردلرزه‌ها و روش ناکامورا در مطالعات اثر ساختگاه استفاده کرده‌اند.

در حال حاضر این موضوع که فرکانس پیک HVSr، فرکانس غالب رسوبات را نشان می‌دهد، به‌طور

گسترده‌ای پذیرفته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد (هاونیث، ۲۰۰۴؛ گوسار، ۲۰۰۷). هر چند فرکانس‌های بالاتر از فرکانس غالب ممکن است لزوماً میرا نشوند و با فرکانس‌های تشدید ساختمان همپوشانی داشته باشند. بنابراین فرکانس اساسی تشدید حاصل از نسبت H/V باید به عنوان فرکانس مرزی پایینی بزرگ‌نمایی ساختگاه در نظر گرفته شود و شاید فقط مربوط به ساختارهای سطحی باشد (پارولای و همکاران، ۲۰۰۴؛ دلگادرو و همکاران، ۲۰۲۱؛ عباس و همکاران، ۲۰۲۵).

ادیب (۱۳۹۵) طبقه‌بندی ساختگای شهر اردکان در استان یزد بر مبنای فرکانس طبیعی زمین مبتنی بر داده‌های خرد لرزه‌ای را انجام و ضمن شناسایی ویژگی دینامیکی زمین در این گستره، سطح سازگاری طبقه‌بندی زمین متناسب با مطالعات اثر ساختگاه بر مبنای داده‌های ژئوتکنیکی، ژئوفیزیکی و خردلرزه‌ها با آیین‌نامه‌های طراحی دینامیکی ساختمان‌ها را نشان داد و پیشنهاد بهبود طبقه‌بندی زمین، را علاوه بر اطلاعات سرعت موج برشی بر اساس داده‌های خردلرزه‌ها را ارائه کرد. نتایج تحلیل ساختگاه و فرکانس طبیعی زمین حاصل از این داده‌ها در محل گمانه‌ها، به تغییراتی در طبقه‌بندی نوع زمین مطابق با آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران در این شهر انجامید.

ادیب و همکاران (۲۰۱۵) طبقه‌بندی اثر ساختگاه با استفاده از مدل فراکتالی در شهر میبد بر اساس تحلیل داده‌های خردلرزه‌ای، شاخص تقویت فرکانس و آسیب‌پذیری (k-g) را انجام، طبقه‌بندی نوگوشی و ایگراشی (۱۹۷۰)، (۱۹۷۱) را بهبود داده و ۴ نوع خاک (۱) خاک سخت و سنگ ضعیف با فرکانس ۶/۲ تا ۸ هرتز، (۲) خاک سفت با فرکانس حدود ۴/۹ تا ۶/۲ هرتز، (۳) خاک نسبتاً نرم با فرکانس ۲/۴ تا ۴/۹ هرتز و (۴) خاک نرم با فرکانس کمتر از ۲/۴ هرتز را در این شهر از هم تفکیک کردند.

نحوه جمع‌آوری داده‌های خردلرزه‌ای و عملیات فیلتر کردن آنها تأثیر بسزایی در دقت برآورد پارامترهای دینامیکی خاک دارد. در این راستا، باقری و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی روش‌های نوین برای کاهش نویز در

داده‌های لرزه‌ای پرداخته و نشان دادند که ترکیب فیلتر DBM و FX deconvolution می‌تواند به‌طور مؤثری نویزهای تصادفی را کاهش دهد و کیفیت داده‌ها را بهبود بخشد. روش کاهش فرکانس نمونه‌برداری مصنوعی برای حذف اغتشاشات فرکانس بالا برای بهبود تشخیص خودکار استفاده شده است، این روش فرکانس بنیادی را با دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌های رایج تخمین می‌زند و یکی از سریع‌ترین رویکردها است (سونگ و همکاران، ۲۰۲۱، کشاورز فرج‌خواه و همکاران، ۲۰۲۴). متأسفانه، اثرات اغتشاشات گذرا محلی بر داده‌های خردلرزه‌ای، عدم قطعیت را افزایش می‌دهد، در این زمینه خداحلی و باقری (۲۰۲۰) از روش LLSP smoothing برای کاهش نویزهای تصادفی استفاده کردند و نشان دادند که این روش می‌تواند به‌طور مؤثری کیفیت داده‌ها را حفظ کند. لذا در تخمین بسامد بنیادی برای حل این مشکل، روش همجوشی داده بیزی برای تخمین فرکانس استفاده و نتایج حاصل از پنجره‌های داده‌های مختلف با هم مقایسه شد، در نتیجه فرکانس بنیادی با دقت بیشتر و با عدم قطعیت کمتر به‌دست آمد، مزیت این روش عدم نیاز به فیلتر اضافی برای حذف آن است، این روش برای داده‌های خردلرزه ثبت‌شده در شهر میبد به‌کار گرفته شد و مقایسه بین نتایج این رویکرد و نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های دیگر نشان می‌دهد که روش پیشنهادی عملکرد بهتری دارد و به راحتی قابل است (موسوی انزهایی و همکاران، ۲۰۱۸؛ حسینی و همکاران، ۲۰۲۳ الف و ب؛ ادیب و کیانوش، ۲۰۲۵).

جمع‌آوری داده‌های مناسب خردلرزه عاری از اثر منابع آشفتگی و اختلالات محلی شرط لازم برای گرفتن نتیجه مناسب است، باقری و ریاحی (۲۰۱۶، ۲۰۱۸) نیز به بررسی روش‌های مختلف برای حذف نویزهای موجود در داده‌ها پرداخته و نشان دادند که فیلتر DBM می‌تواند به‌طور مؤثری نویزهای تصادفی را کاهش دهد. حذف اثر آشفتگی و اختلال‌های محلی از داده‌ها هم به‌صورت دستی (با رؤیت سیگنال حاصل از داده‌های خردلرزه‌ها) و هم به‌صورت اتوماتیک انجام می‌گیرد. استفاده از نسبت

STA/LTA که بیشتر برای حذف داده‌های اضافی و به‌منظور کاهش حجم داده‌های ذخیره شده در ثبت سیگنال‌های زمین‌لرزه استفاده می‌شود، یکی از روش‌های متداول برای حذف اتوماتیک اثر اختلال‌های محلی در داده‌های خردلرزه است (هاونیت، ۲۰۰۴؛ وهبا و همکاران، ۲۰۲۴). از نقاط ضعف این روش، تنظیم پارامترها و انتخاب آستانه برای تشخیص داده‌های خراب از داده‌های سالم است (ترنکوسزی، ۲۰۱۲)، برای حل این مشکل تحقیق‌های زیادی با روش‌های مختلف انجام شده از جمله: شبکه‌های عصبی مصنوعی (جنتیلی و میشلین، ۲۰۰۶؛ کیانوش و همکاران، ۲۰۲۳ ب و ج؛ افتخاری و همکاران، ۲۰۲۴)، روش‌های بر پایه موجک (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ ورا رودریگز، ۲۰۱۱)، روش آماری رده بالاتر (ساراگیوتیس و همکاران، ۲۰۰۲؛ خداحلی و باقری، ۲۰۲۰؛ کشاورز فرج‌خواه و همکاران، ۲۰۲۴)، روش AR-AIC (آکازاوا، ۲۰۰۴)، ویژگی نسبت انرژی تغییر یافته (MER) (وانگ و هان، ۲۰۰۹)، روش‌هایی بر پایه طیف‌نگاشت (ژینانتایی و همکاران، ۲۰۱۱)، بازیابی STA/LTA از طریق معکوس‌سازی با استفاده از یک محدودیت غیرخطی (ورا رودریگز و همکاران، ۲۰۱۱) و روش انطباق متقاطع (آیت لاصری و همکاران، ۲۰۱۴)، اکثر این روش‌ها به‌ندرت در رکوردهای لرزه‌ای معمول استفاده می‌شوند و در عمل خطای زیادی نشان داده‌اند (کاساراس و همکاران، ۲۰۱۵؛ لابوتا و همکاران، ۲۰۲۵). در این مقاله برای حذف نویزهای موجود در داده‌ها و بالا بردن دقت تخمین فرکانس غالب، از تکنیک کاهش مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری و روش تشخیص اتوماتیک محدوده‌های حاوی داده‌های خردلرزه نویزدار در اثر نوسان‌های حاصل از اختلال‌های گذرای محلی استفاده می‌شود. این دو روش بر روی داده‌های ثبت شده از سطح شهر میبد در شمال استان یزد اعمال شده‌اند.

در این تحقیق، نوآوری اصلی در استفاده از تکنیک کاهش مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری و روش واریانس پیش‌رونده برای بهبود دقت تخمین

غالب آبرفت را افزایش دهند. در نهایت، با توجه به اقتصادی بودن این روش‌ها و قابلیت استفاده آنها در مطالعات اولیه ژئوتکنیکی، این تحقیق می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر در ارزیابی و تحلیل دینامیکی خاک در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

در این بخش، نقش روش‌های پیشنهادی در حذف اختلالات محلی مورد بررسی قرار می‌گیرد و چگونگی اعمال این روش‌ها برای حذف اثر اغتشاش‌ها، اعوجاج و نوسانات اضافی موجود در سیگنال داده‌های خردلرزه‌ها و تشخیص اتوماتیک محدوده‌های آلوده شده برای تخمین فرکانس غالب خاک ارائه می‌شود.

در این تحقیق، مراحل پردازش داده‌ها به صورت زیر انجام می‌شود (شکل ۱):

- جمع‌آوری داده‌ها: داده‌های خردلرزه از ایستگاه‌های مختلف جمع‌آوری می‌شوند.

- فیلتر کردن داده‌ها: داده‌ها از فیلتر ضد تداخل عبور داده می‌شوند تا اثرات نویزهای محیطی کاهش یابد.

- کاهش فرکانس نمونه‌برداری: فرکانس نمونه‌برداری به صورت مصنوعی کاهش می‌یابد تا نوسانات اضافی و اختلالات محلی حذف شوند.

- محاسبه واریانس پیش‌رونده: با استفاده از پنجره‌های لغزان، واریانس سیگنال محاسبه می‌شود تا نوسانات غیرعادی شناسایی شوند.

- حذف داده‌های آلوده: داده‌های آلوده به اختلالات محلی حذف می‌شوند.

- تخمین فرکانس غالب: فرکانس غالب آبرفت با استفاده از روش‌های H/V محاسبه می‌شود.

- تحلیل نتایج: نتایج به دست آمده تحلیل و اعتبارسنجی می‌شوند.

فرکانس غالب آبرفت و عمق سنگ بستر است. این روش‌ها به ویژه در مناطق شهری که تحت تأثیر اختلالات محلی قرار دارند، می‌توانند به طور مؤثری نویزهای اضافی را حذف کرده و بدون حذف بخشی از داده‌های واقعی که در روش‌های قبلی معمول بود، دقت تخمین را افزایش دهند. با توجه به اهمیت تخمین دقیق فرکانس غالب آبرفت در طراحی سازه‌ها و ارزیابی خطر زلزله، این تحقیق می‌تواند به بهبود روش‌های موجود و افزایش دقت تخمین‌ها بر اساس داده‌های خرد لرزه‌ای کمک کند.

در این تحقیق، ما به بررسی دو روش اصلی پرداخته‌ایم: تکنیک کاهش مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری و روش واریانس پیش‌رونده. تکنیک کاهش مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری به ما این امکان را می‌دهد که با کاهش فرکانس نمونه‌برداری، نوسانات اضافی و اختلالات محلی را به طور مؤثری حذف کنیم. این روش به ویژه در شرایطی که داده‌های خردلرزه تحت تأثیر نویزهای محیطی قرار دارند، می‌تواند به بهبود دقت تخمین فرکانس غالب کمک کند.

از سوی دیگر، روش واریانس پیش‌رونده با استفاده از پنجره‌های لغزان، به ما این امکان را می‌دهد که واریانس سیگنال را محاسبه کرده و بخش‌های آلوده به اختلالات را شناسایی و حذف کنیم. این روش به ویژه در شرایطی که داده‌ها تحت تأثیر نوسانات گذرا قرار دارند، می‌تواند به طور مؤثری به بهبود کیفیت داده‌ها و دقت تخمین فرکانس غالب کمک کند.

در این مقاله، ما به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از این دو روش بر روی داده‌های خردلرزه‌ای ثبت شده در شهر میبد، واقع در استان یزد، پرداخته‌ایم. نتایج نشان می‌دهند که این روش‌ها به طور مؤثری می‌توانند اثرات مخرب اختلالات محلی را کاهش دهند و دقت تخمین فرکانس



شکل ۱. فلوچارت پردازش داده‌های خردلرزه.

۱-۲. تکنیک کاهش مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری برای حذف اعوجاج و نوسان‌های اضافی از سیگنال خردلرزه‌ها

با توجه به این که فرکانس غالب آبرفت به کمک طیف فرکانسی حاصل از تقسیم مؤلفه افقی به مؤلفه قائم (H/V) محاسبه می‌شود، استفاده از فیلتر پائین‌گذر برای حذف نوسانات فرکانس بالای موجود در سیگنال حاصل از خردلرزه‌ها (که به واسطه منبع‌ها اختلال‌های محیطی موجود و نویزی اندازه‌گیری شده بوده و حاوی اطلاعاتی در رابطه با رفتار دینامیکی قشرخاک نیست) روش مناسبی

نمی‌باشد. زیرا پس از عبور از فیلتر پایین‌گذر، نوسانات فرکانس بالای اضافی در هر دو مؤلفه افقی و قائم تضعیف و پس از انجام عملیات تقسیم، اثر آن در طیف فرکانسی H/V به حالت اول برگشته و گاهی اوقات موجب تخریب بیشتر این طیف فرکانسی در محدوده فرکانس‌های بالاتر می‌شود. این موضوع در شبیه‌سازی‌های مختلف بررسی و تأیید شده است. برای کسب نتیجه مناسب تر باید، به‌صورت مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری را که معمولاً تا چند برابر حداکثر فرکانس حاوی اطلاعات مربوط به دینامیک خاک موجود در طیف فرکانسی H/V (عاری از

داده‌های اولیه دارند ولی فرکانس نمونه‌برداری آن به $1/n$ مقدار قبلی کاهش خواهد یافت. تکرار عملیات مرحله اول در مراحل بعدی به آن دلیل است که با وجود نزدیکی زمانی داده‌های برداشت شده در مرحله اول با داده‌های برداشت شده در مراحل بعدی، اطلاعات نهفته در آنها یکسان نبوده و با هم کمی متفاوت هستند. در شبیه‌سازی انجام گرفته دیده شده که طیف فرکانسی حاصل از هر مرحله برداشت نمونه‌ها از داده‌های اصلی با طیف فرکانسی مرحله‌های دیگر کمی تفاوت دارد. لذا عدم حذف داده‌ها پس از برداشت مرحله اول داده‌ها، موجب شده که تعداد داده‌ها نسبت به داده‌های اولیه در مرحله اول کم نشود. این موضوع نیز موجب هموارتر شدن پاسخ فرکانسی و افزایش در دقت اندازه‌گیری فرکانس غالب خاک خواهد شد.

۲-۲. حذف نوسان‌های حاصل از اختلال‌های محیطی از داده‌های خردلرزه‌ای

طیف فرکانسی آبرفت باید شامل اطلاعاتی در مورد رفتار فرکانسی آبرفت و عاری از هرگونه فرکانس ناشی از منابع اختلال‌های محلی باشد. برای محاسبه فرکانس غالب، جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از دستگاه‌های مناسب مطابق دستورالعمل‌های علمی و تجربی مورد تأیید کمیته‌های تخصصی ضرورت دارد، (هاونیت، ۲۰۰۴؛ چتیلین و همکاران، ۲۰۰۸؛ کیانوش و همکاران، ۲۰۲۴ الف) با این وجود در مناطق شهری، حتی با رعایت تمامی نکات فوق به‌علت وجود منابع اختلال‌های غیر قابل پیش‌بینی، به‌دست آوردن داده‌های عاری از آلودگی کار آسانی نیست و معمولاً داده‌های جمع‌آوری شده دارای نویز هستند. تاکنون روش‌های زیادی برای حذف اثر این‌گونه نویزها، ارائه شده است. روش انتخاب مشاهده‌ای با رؤیت کردن سیگنال حاصل از داده‌های خردلرزه‌ها و تفکیک داده‌های سالم از داده‌های خراب یک روش غیراتوماتیک و متداول است. این روش مبتنی بر قدرت شناسایی الگوی فکری افراد خبره برای تفکیک داده‌های نادرست از کل داده‌ها است. از آنجاکه تغییرهای حاصل

نوسانات و اختلالات مزاحم است، را به فرکانس نمونه‌برداری کمتری کاهش داد. نسبت کاهش فرکانس نمونه‌برداری (n) بر روی نتیجه نهایی تأثیرگذار بوده و می‌تواند به‌عنوان یک پارامتر قابل تنظیم برای بهبود نتیجه استفاده شود. با این کار سیگنال نمونه‌برداری شده هموارتر و هارمونیک‌های فرکانس بالای موجود در طیف فرکانسی H/V به‌خوبی از بین خواهند رفت. پارامتر n از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (ناکامورا، ۱۹۸۹؛ بوور، ۲۰۰۳؛ کشاورز فرج‌خواه و همکاران، ۲۰۲۴).

$$[n = \frac{F_S}{F_{S1}}] \quad (1)$$

در این رابطه F_S و F_{S1} به ترتیب فرکانس نمونه‌برداری اولیه و کاهش یافته می‌باشد. قبل از کاهش فرکانس نمونه‌برداری (down sampling) برای جلوگیری از اثر مخرب پدیده تداخل طیفی (aliasing) بر روی طیف فرکانسی از فیلتر مقابله با تداخل طیفی (antialiasing filter) استفاده و حداکثر فرکانس موجود در طیف فرکانسی داده‌های خردلرزه‌ای هر سه مؤلفه را به مقدار نصف F_{S1} محدود می‌کنیم.

پس از محاسبه پارامتر n ، نمونه اول داده‌ها را از هر کدام از مؤلفه‌های EW ، NS و V برداشته و سپس $n - 1$ نمونه بعدی را رها می‌کنیم. مجدداً نمونه بعدی را برداشته و به نمونه‌های قبلی هر کدام از مؤلفه‌ها اضافه می‌کنیم. این عمل تا رسیدن به انتهای داده تکرار می‌شود. در ادامه مجدداً به ابتدای داده‌ها برگشته و بجای برداشتن نمونه اول، نمونه دوم هر کدام از مؤلفه‌ها را برداشته و آنها را در آرایه‌های جداگانه‌ای ذخیره می‌کنیم. سپس این مرحله نیز با همان ترتیب مرحله اول تا رسیدن به انتهای داده‌ها ادامه خواهد داشت. این روند به تعداد n مرتبه تکرار شده تا کل داده‌ها مورد استفاده قرار گیرند. حال برای هر مؤلفه n آرایه خواهیم داشت که در مجموع طولی معادل با

از اغتشاش‌ها در سیگنال حاصل از داده‌های خردلرزه‌ها ممکن است به حدی نامحسوس باشد (ادیب و کیانوش، ۲۰۲۵؛ عباس و همکاران، ۲۰۲۵) که نتوان آن‌را به‌صورت چشمی تشخیص و حذف کرد، این روش نمی‌تواند از کارایی مناسبی برخوردار باشد. در روش اتوماتیک از الگوریتم تریگر (trigger) برای تشخیص استفاده می‌شود. این ایده قبلاً در پردازش سیگنال‌های زمین لرزه با هدف کاهش حجم داده‌های ذخیره شده استفاده شده است (ترنکوسزی، ۲۰۱۲؛ ورکوهی و همکاران، ۲۰۲۴؛ ادیب و کیانوش، ۲۰۲۵).

یکی از روش‌های اتوماتیک پر کاربرد برای حذف اثر اختلالات در سری زمانی داده‌ها، استفاده از نسبت STA/LTA است. که STA و LTA به‌ترتیب سطح میانگین دامنه سیگنال طی یک دوره زمانی کوتاه طی یک دوره زمانی طولانی‌تر است. معمولاً انرژی سیگنال لرزه‌ای تابع شاخصی است که نسبت STA/LTA بر روی آن اعمال می‌شود. در این روش به‌منظور حفظ بخش‌های پایدار سیگنال داده‌ها و حذف بخش‌های گذرا (*transients*) (بخش‌های گذرای سیگنال که اغلب تحت‌تأثیر منابع مزاحم مثل اثر گام‌ها و رفت‌وآمد نزدیک می‌باشند) آستانه‌ای تعریف شده که با استفاده از نسبت $r = STA/LTA$ مشخص می‌شود. سپس به کمک این نسبت و الگوریتم ویژه تریگر بخش‌های گذرای غیر معمول در سری زمانی مشخص و حذف می‌شوند. برای این کار باید طول پنجره برای STA مشخص شود (معمولاً حدود ۰/۵ تا ۲ ثانیه برای STA و چند ده ثانیه برای LTA) و همچنین کمترین و بیشترین مقدار r نیز باید تعیین شود (که به‌طور معمول مقداری بین ۰/۱ تا ۱۰ دارند (هاونیت، ۲۰۰۴)). در واقع این روش برای هر نقطه از داده‌ها، متوسط انرژی سیگنال در فاصله طولانی (LTA) را محاسبه کرده و با متوسط انرژی سیگنال در فاصله کوتاه (STA) مقایسه می‌کند و مبتنی بر این فرض که اختلال‌های محلی و رفتار گذرای حاصل از آنها موجب تغییر غیر معمول در r گشته و آن را از محدوده قابل قبول خارج می‌کند، عمل می‌کند. در این روش پس از محاسبه r در کل سیگنال

داده‌ها و مقایسه آن با آستانه قابل قبول می‌توان پی به محل اعمال اغتشاش و محدوده متأثر از آن در سیگنال اصلی داده‌ها برد و آن بخش از داده‌ها را از کل داده‌ها حذف کرد. یکی از مشکل‌های جدی این روش تعیین محدوده محاسبه STA و LTA و همچنین انتخاب آستانه مجاز بوده که از یک سیگنال به سیگنال دیگر متفاوت است. برای بهبود این روش تحقیقاتی انجام و تا حدودی از اشکالات آن کاسته شد (ونگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ ورا رودریگز و همکاران، ۲۰۱۱).

۲-۲-۱. روش پیشنهادی مؤلفین

روش واریانس پیش‌رونده ($Running\ variance\ RVM$) (method) به‌عنوان یک تکنیک مؤثر برای حذف اثر اختلالات محلی بر روی داده‌های خردلرزه‌ای معرفی می‌شود. این روش به‌ویژه در شرایطی که داده‌ها تحت‌تأثیر نوسانات گذرا قرار دارند، می‌تواند به‌طور مؤثری به بهبود کیفیت داده‌ها و دقت تخمین فرکانس غالب کمک کند. در این بخش، جزئیات بیشتری از این روش به‌همراه توضیحات ریاضیاتی ارائه می‌شود.

۲-۲-۲. مراحل اجرای روش واریانس پیش‌رونده

انتخاب طول پنجره: ابتدا باید طول پنجره (N) برای محاسبه واریانس انتخاب شود. این طول پنجره باید به‌گونه‌ای باشد که بتواند تغییرات نوسانات محلی را به‌خوبی شناسایی کند. به‌عنوان مثال، در این تحقیق، طول پنجره برابر با ۲۰ نمونه انتخاب شده است. محاسبه واریانس: واریانس سیگنال در هر پنجره با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (خداقلی و باقری، ۲۰۲۰؛ کیانوش و همکاران، ۲۰۲۳):

$$[Var(X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2] \quad (2)$$

که در آن:

(x_i) مقادیر سیگنال در پنجره جاری هستند.

($\bar{x}$) میانگین مقادیر سیگنال در پنجره جاری است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (رابطه (۳)) (پارولای و

میرینو، ۲۰۰۶):

$$[\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i] \quad (3)$$

حرکت پنجره: پس از محاسبه واریانس برای پنجره اول، پنجره به اندازه یک نمونه به جلو حرکت می‌کند و واریانس جدید محاسبه می‌شود. این فرایند تا انتهای سیگنال تکرار می‌شود.

شناسایی نوسانات غیرعادی: پس از محاسبه واریانس برای هر پنجره، مقادیر واریانس به‌دست‌آمده با یک آستانه مشخص مقایسه می‌شوند. اگر واریانس یک پنجره از آستانه تعیین‌شده عبور کند، آن بخش از داده‌ها به‌عنوان داده‌های آلوده شناسایی می‌شود.

حذف داده‌های آلوده: داده‌های شناسایی‌شده به‌عنوان آلوده از مجموعه داده‌ها حذف می‌شوند. این کار به‌منظور بهبود کیفیت داده‌ها و دقت تخمین فرکانس غالب انجام می‌شود.

۲-۲-۳. جزئیات ریاضیاتی

برای تعیین آستانه، می‌توان از هیستوگرام واریانس‌های محاسبه‌شده استفاده کرد. به‌عنوان مثال، می‌توانیم آستانه را به‌صورت زیر تعیین کنیم:

محاسبه هیستوگرام: هیستوگرام واریانس‌های محاسبه‌شده را ایجاد کرده و تعداد رخدادها را برای هر مقدار واریانس ثبت می‌کنیم.

انتخاب آستانه: آستانه را به‌گونه‌ای انتخاب می‌کنیم که تعداد رخدادهای کمتر از آن، به‌عنوان داده‌های سالم و تعداد رخدادهای بیشتر از آن، به‌عنوان داده‌های آلوده در نظر گرفته شوند. به‌عنوان مثال، می‌توانیم آستانه را برابر با یک پنجم حداکثر تعداد رخدادها در هیستوگرام قرار دهیم (رابطه (۴)) (ترنکوسزی، ۲۰۱۲؛ کیانوش و همکاران، ۲۰۲۳؛ د؛ کیانوش و همکاران، ۲۰۲۴؛ ب).

$$[\text{Threshold} = \frac{1}{5} \times \text{Max Count}] \quad (4)$$

تنظیم پارامتر: K برای بهبود دقت آستانه، می‌توانیم یک ضریب تصحیح (K) به آستانه اضافه کنیم. مقدار نامی این ضریب یک است و می‌تواند به‌صورت قابل تنظیم در

اختیار کاربر قرار گیرد (رابطه (۵)) (ژو و همکاران، ۲۰۲۳؛ بومر و همکاران، ۲۰۲۴).

$$[\text{Final Threshold} = K \times \text{Threshold}] \quad (5)$$

انتخاب مقدار یک پنجم به‌عنوان آستانه اولیه در روش واریانس پیش‌رونده به دلایل زیر انجام شده است:

الف) تحلیل آماری داده‌ها: توزیع داده‌ها: در بسیاری از تحلیل‌های آماری، به‌ویژه در داده‌های تجربی، معمولاً تعداد رخدادهای سالم (داده‌های بدون اختلال) بیشتر از داده‌های آلوده است. انتخاب یک پنجم به‌عنوان آستانه اولیه به این معناست که ما به دنبال شناسایی داده‌هایی هستیم که در محدوده نرمال و معمول قرار دارند و از این‌رو، احتمالاً به‌عنوان داده‌های سالم شناسایی می‌شوند.

ب) کاهش خطا در شناسایی داده‌های آلوده: جلوگیری از حذف داده‌های سالم: با انتخاب یک پنجم به‌عنوان آستانه، احتمال حذف داده‌های سالم که ممکن است به‌طور تصادفی در محدوده‌های نزدیک به آستانه قرار بگیرند، کاهش می‌یابد. این کار به حفظ داده‌های با کیفیت و کاهش خطا در تخمین فرکانس غالب کمک می‌کند.

ج) تجربه‌های قبلی و مقالات مرتبط: استفاده از مقادیر مشابه در تحقیقات پیشین: در بسیاری از مطالعات مشابه، مقادیر مشابهی برای تعیین آستانه‌ها استفاده شده است. این انتخاب بر اساس تجربیات قبلی و نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های مشابه است (باقری و ریاحی، ۲۰۱۶، ۲۰۱۸؛ باقری و همکاران، ۲۰۱۷؛ حسینی و همکاران، ۲۰۲۳ a, b).

د) انعطاف‌پذیری در تنظیم آستانه: قابلیت تنظیم: انتخاب یک پنجم به‌عنوان آستانه اولیه به‌عنوان یک نقطه شروع عمل می‌کند و می‌تواند بر اساس شرایط خاص داده‌ها و نیازهای تحقیقاتی تنظیم شود. این انعطاف‌پذیری به محققان این امکان را می‌دهد که آستانه را بر اساس ویژگی‌های خاص داده‌های خود بهینه‌سازی کنند.

ه) تجزیه و تحلیل هیستوگرام: تحلیل هیستوگرام واریانس: با استفاده از هیستوگرام واریانس‌های محاسبه‌شده، می‌توان به‌راحتی نقاطی را شناسایی کرد که در آنها تعداد رخدادها بیشتر از آستانه انتخابی است. این کار به شناسایی

داده‌های سالم و آلوده کمک می‌کند (خداقلی و باقری، ۲۰۲۰؛ کیانوش و همکاران، ۲۰۲۴ ب).

۲-۲-۴. مزایای روش واریانس پیش‌رونده

حذف مؤثر نوسانات: این روش به‌طور مؤثری نوسانات اضافی و اختلالات محلی را حذف می‌کند و سیگنال باقی‌مانده را هموارتر می‌سازد. سادگی در تنظیم پارامترها: پارامترهای این روش به‌راحتی قابل تنظیم هستند و نیاز به تنظیمات پیچیده ندارند. قابلیت انطباق با داده‌های مختلف: این روش می‌تواند به‌راحتی با انواع مختلف داده‌ها و شرایط محیطی سازگار شود. روش واریانس پیش‌رونده به‌عنوان یک تکنیک مؤثر در پردازش داده‌های خردلرزه‌ای، به‌ویژه در شرایطی که داده‌ها تحت تأثیر نوسانات گذرا قرار دارند، می‌تواند به بهبود کیفیت داده‌ها و دقت تخمین فرکانس غالب کمک کند.

در روش واریانس پیش‌رونده برای حذف اثر منبع‌های اختلال‌های محلی بر روی داده‌ها، ابتدا پنجره‌ای با طول حدود ۲۰ نمونه انتخاب و مقدار واریانس آن محاسبه و ذخیره می‌شود. سپس گامی به اندازه یک واحد به جلو برداشته شده و با انتخاب تعدادی معادل با طول پنجره قبلی مجدداً واریانس محاسبه و ذخیره می‌شود و این کار تا انتهای سیگنال داده‌ها تکرار می‌شود. در واقع در این روش به کمک پنجره لغزان، محاسبه واریانس پیش‌رونده انجام می‌گیرد. پس از این مرحله، از سیگنال واریانس پیش‌رونده برای حذف محدوده داده‌های تحت تأثیر اختلال از داده‌های اصلی استفاده می‌شود. در واقع در این روش با حرکت در طول سیگنال حاصل از داده‌ها، آن قسمت از داده‌ها که در سیگنال واریانس (انرژی) متناظر با آن تغییرات شدید و غیر قابل قبولی رخ نداده در حافظه موقت (Register) ذخیره شده و کار ادامه پیدا می‌کند و به محض مشاهده داده‌هایی که سیگنال واریانس متناظر با آن از آستانه مجاز عبور کرده باشد این روند موقتاً متوقف شده و تعداد داده‌های ذخیره شده در حافظه موقت آن شمارش می‌شود. اگر تعداد آن از حداقل مقدار از قبل تعیین شده (مثلاً ۲۰ نمونه) بیشتر شده باشد داده‌های

مربوطه پذیرفته شده و پس از ضرب آن در پنجره مناسب هم طول (مثل Cosine-tapered windows یا پنجره Hamming یا پنجره‌های مشابه دیگر که برای کاهش اثر پدیده Gibbs استفاده می‌شوند) در ناحیه موقتی (Buffer) داده‌ها ذخیره می‌شود. سپس محتوای حافظه موقت پاک و این عملیات تا رسیدن به انتهای داده‌ها مطابق روش گفته شده ادامه پیدا می‌کند.

با توجه این که تعداد داده‌های ذخیره شده خردلرزه‌ها محدود است، این روش مخصوصاً برای داده‌هایی که از آلودگی زیادی برخوردارند مفید می‌باشد. چون در صورتی که انتخاب داده‌ها همان‌طوری باشد که در روش‌های مرسوم انجام می‌گیرد، یعنی به محض مشاهده اثر اختلال‌ها در یک پنجره از داده‌ها (که از آن برای محاسبه طیف فرکانسی استفاده شده و در مقایسه با پنجره مورد محاسبه واریانس ذکر شده در روش پیشنهادی دارای طول بسیار بیشتری است)، آن بخش از داده‌ها دور ریخته شود در این صورت بخش زیادی از داده حذف شده و عملاً تعداد کمی داده باقی خواهد ماند. این در حالی است که در روش پیشنهادی پنجره مورد استفاده برای تشخیص داده‌های نامناسب با پنجره مورد استفاده برای محاسبه طیف فرکانسی متفاوت بوده و طول خیلی کمتری دارد و در صورت دور ریخته شدن داده، درصد زیادی از داده‌ها حذف نخواهد شد.

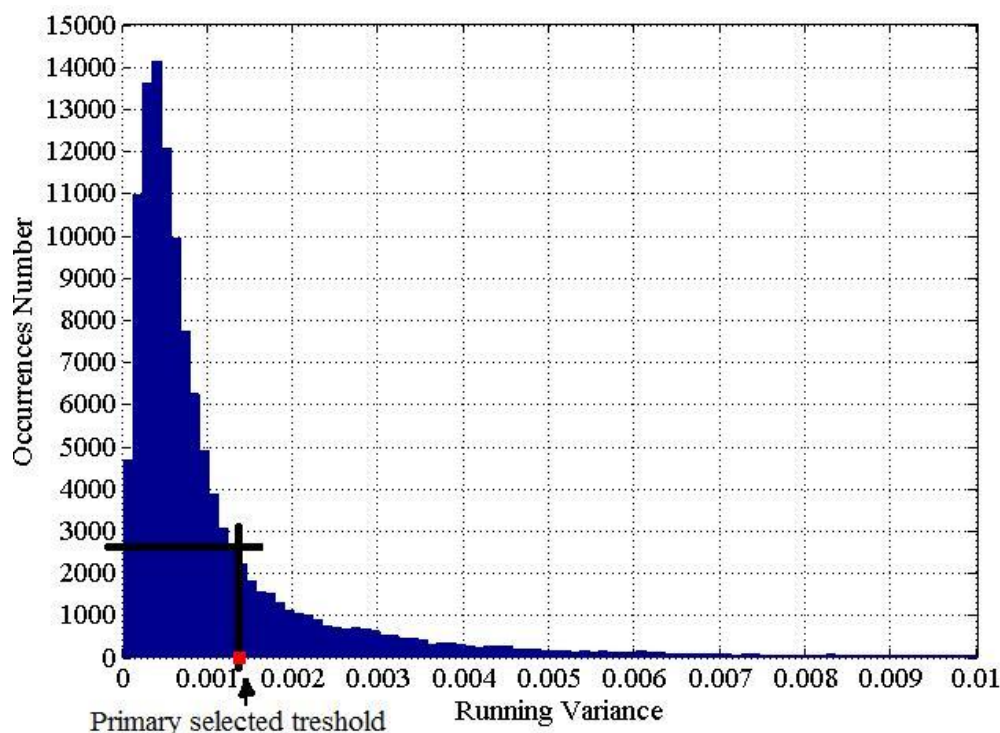
نحوه محاسبه آستانه مجاز در روش پیشنهادی (که ابهامی در روش استفاده از نسبت STA/LTA محسوب می‌شود) بدین‌صورت می‌باشد که هیستوگرام حاصل از داده‌های حاصل از محاسبه واریانس پیش‌رونده را محاسبه و بر اساس آن مطابق شکل ۲، آستانه را انتخاب می‌کنیم. مقداری از واریانس که تعداد رخداد متناظر با آن در هیستوگرام معادل با یک پنجم تعداد حداکثر رخداد در هیستوگرام باشد را به‌عنوان معیار انتخاب آستانه اولیه در نظر می‌گیریم. انتخاب مقدار یک پنجم به‌عنوان آستانه اولیه در این روش، بر اساس تحلیل‌های آماری، تجربیات قبلی و نیاز به حفظ داده‌های سالم انجام شده است. این انتخاب به محققان کمک می‌کند تا به‌طور مؤثری

تصحیح (K)، اصلاح شده و بدین ترتیب مقدار آستانه نهایی مشخص می‌شود. مقدار نامی این ضریب یک بوده و برای رسیدن به نتیجه بهتر به صورت قابل تنظیم در اختیار کاربر قرار داده می‌شود. قابل ذکر است محاسبه مقدار آستانه اولیه به صورت اتوماتیک توسط برنامه کامپیوتری انجام شده و نیاز به تنظیم آن توسط کاربر نیست، کاربر تنها مقدار ضریب تصحیح را تنظیم می‌کند.

در این اینجا فرض می‌شود محدودده‌ای از مقدار واریانس که احتمال رخداد آنها بیشتر است مربوط به داده‌های سالم و آن محدودده از واریانس که احتمال وقوع آنها کم است مربوط به تأثیر عوامل مزاحم می‌باشد. تنظیم پارامترهای این روش اعم از انتخاب طول پنجره (برای محاسبه واریانس)، حداقل طول داده‌های ذخیره شده در رجیستر موقت جهت پذیرش داده‌ها و همچنین پارامتر K ساده بوده و تقریباً به مقدار پیشنهادی در این مقاله نزدیک است. نتایج شبیه سازی‌های شده این ادعا را تأیید کرده و از لحاظ راحتی تنظیم، حکایت از برتری این روش نسبت به روش استفاده کننده از نسبت STA/LTA دارد.

داده‌های آلوده را شناسایی و حذف کنند و در عین حال از حذف داده‌های سالم جلوگیری کنند.

همان‌طوری که در شکل ۲ دیده می‌شود تعداد رخداد قبل از نقطه آستانه نسبت به تعداد آن بعد از این نقطه خیلی زیاد است. این موضوع نشان‌دهنده آن است که محدوده داده‌هایی که واریانس پیش‌رونده متناظر با آنها کمتر از آستانه اولیه است مربوط به داده‌های پر رخداد بوده و داده‌های غالب و معمول محسوب می‌شوند و همچنین داده‌های بعد از آن، جزء داده‌های کم رخداد محسوب شده و احتمالاً مربوط به حالت گذرای حاصل از اغتشاش محلی می‌باشند. نسبت یک پنجم می‌تواند با اعداد دیگر مثل یک سوم یا یک ششم و یا حتی نسبت‌های نزدیک دیگر با این مقادیر جایگزین شود. این به‌خاطر آن است که آستانه اولیه انتخاب شده نیاز به دقت خیلی زیادی ندارد و فقط باید طوری انتخاب شود که محدوده داده‌هایی با واریانس معمول را از محدوده داده‌هایی با واریانس غیر معمول جدا کند. این نسبت در نهایت با مشاهده وضعیت سیگنال نهایی و با ضرب یک ضریب



شکل ۲. هیستوگرام سیگنال واریانس پیش‌رونده.

۲-۳. تخمین فرکانس غالب و بزرگ‌نمایی آبرفت از داده‌های خردلرزه‌ای

در این مقاله از دو روش استاندارد و زمان-فرکانس برای محاسبه فرکانس غالب آبرفت استفاده شده است.

۲-۳-۱. روش استاندارد

در این روش از تبدیل فوریه سریع (FFT) برای محاسبه نسبت طیفی افقی به قائم (HVS: Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios) استفاده می‌شود (هاونیت، ۲۰۰۴)، مراحل محاسبه طیف فرکانسی متوسط (H/V) در این روش مشابه روش به کار رفته توسط (چتیلین و همکاران، ۲۰۰۸) است.

۲-۳-۲. روش زمان-فرکانس

روش تبدیل فوریه (FT) تنها زمانی به کار می‌آید که ویژگی‌های آماری یک سیگنال در طول زمان ثابت باشند چراکه تابع‌های پایه که در تبدیل فوریه به کار می‌روند در طول یک بازه زمانی بی‌نهایت بسط می‌یابند. لذا این تبدیل برای سیگنال‌های غیرایستا (که محتوای فرکانسی آنها با زمان تغییر می‌کند) مناسب نیست از این رو نمی‌توان به کمک طیف فرکانسی حاصل از این تبدیل، مؤلفه‌های فرکانسی مرتبط با سیگنال گذرای حاصل از منابع آلوده کننده محیطی (در مدت کوتاهی از زمان حضور داشته و مانند سیگنال اصلی در طول زمان وجود ندارد) را از مؤلفه‌های فرکانسی مربوط به سیگنال خردلرزه‌ها تفکیک و حذف کرد. بدین دلیل، تحقیقاتی انجام گرفته تا بتوان پیک‌های گذرای حاصل از منابع آشفستگی و اختلال‌های محلی منبع نویز محلی را از پیک مربوط به فرکانس غالب تشخیص داد. تاکنون از تبدیل‌های زمان فرکانس مانند تبدیل فوریه کوتاه‌مدت (STFT) و موجک (Wavelet) (هلوپیس و همکاران، ۲۰۰۴) علاوه بر تابع FFT استفاده شده که نتایج بهتری را ارائه می‌دهند. این تبدیل‌ها، با توجه به توانایی آنها در تعیین زمان وقوع مؤلفه‌های فرکانسی، قادر هستند پیک پایدار در طول زمان را مشخص کنند. همان‌طور که می‌دانید مفهوم تبدیل فوریه

کوتاه‌مدت برای جبران محدودیت FT در ارتباط با تحلیل زمان-فرکانس، ایجاد شد. در این تبدیل که به تبدیل Gabor هم معروف است، تابعی به اسم تابع پنجره وجود دارد که با استفاده از آن تبدیل در پنجره‌های زمانی مختلف با عرض ثابت انجام می‌شود که بدین صورت می‌توان تحلیل سیگنال را هم در زمان و هم فرکانس انجام داد. انتخاب پنجره در STFT در بسیاری از کاربردهای آن به‌عنوان مشکل جدی محسوب می‌شود زیرا انتخاب پنجره باریک تفکیک‌پذیری زمانی خوب را به همراه خواهد داشت این در حالی است که تفکیک‌پذیری فرکانسی آن خراب خواهد شد (ادیب و کیانوش، ۲۰۲۵). انتخاب پنجره پهن نیز نتیجه بر عکس خواهد داشت. تبدیل موجک علاوه بر دارا بودن قابلیت STFT، این مشکل را ندارد و وضعیت تفکیک‌پذیری را تا اندازه زیادی حل می‌کند، با این وجود چون در موضوع مورد بحث ما تفکیک‌پذیری زمان نسبت به تفکیک‌پذیری فرکانسی از اهمیت کمتر برخوردار است لذا به خاطر سادگی و حجم محاسبات کمتر، STFT به تبدیل موجک ترجیح داده شده است.

گاهی اوقات تأثیر نویزها بر روی داده‌های خردلرزه‌ها آنقدر نامحسوس است که امکان تشخیص از سیگنال زمانی و طیف فرکانسی به راحتی امکان پذیر نیست. در این حالت پیک‌های جعلی (Spurious peaks) در طیف متوسط ظاهر می‌شود. این پیک‌ها می‌تواند به اندازه کافی تأثیر گذار بوده و موجب غیرواقعی شدن نتایج شوند (ادیب و کیانوش، ۲۰۲۵). در این مقاله برای رفع این مشکل علاوه بر محاسبه H/V با استفاده از تبدیل فوریه، از تبدیل فوریه زمان کوتاه نیز استفاده شده است. نتیجه حاصل از این تبدیل یک نمودار دو بعدی است که محور افقی آن زمان و محور عمودی آن فرکانس بوده و تفاوت دامنه مؤلفه‌ای فرکانسی با تغییر رنگ نمایش داده می‌شود (رنگ سردتر دامنه کوچک و رنگ گرم‌تر دامنه بزرگ‌تر). این در حالی است که در نمودار حاصل از روش قبلی فقط مقدار دامنه هر مؤلفه بر حسب فرکانس

کوتاه‌تر دقت زمانی بهتری دارند. در این تحقیق، با توجه به نیاز به تحلیل دقیق فرکانس غالب آبرفت، طول پنجره به گونه‌ای انتخاب شده است که تعادل مناسبی بین دقت زمانی و فرکانسی برقرار کند.

۲-۴. نوسانات گذرا (Transient Noise)

نوسانات گذرا به تغییرات ناگهانی و غیرعادی در سیگنال‌های ثبت شده اشاره دارد که معمولاً به دلیل اختلالات محیطی مانند باد، ریزش باران یا فعالیت‌های انسانی مانند حرکت ماشین آلات و... ایجاد می‌شوند. این نوسانات می‌توانند تأثیر منفی بر کیفیت داده‌های خرد لرزه‌ای داشته باشند و در نتیجه دقت تخمین فرکانس غالب آبرفت را کاهش دهند. در این بخش، به توضیح بیشتر در مورد نوسانات گذرا و مشخصات آن پرداخته می‌شود.

۲-۴-۱. تعریف نوسانات گذرا

نوسانات گذرا به تغییرات سریع و غیرمستمر در سیگنال‌های لرزه‌ای اطلاق می‌شود که معمولاً به صورت پیک‌های ناگهانی یا نوسانات شدید در دامنه سیگنال ظاهر می‌شوند. این نوسانات می‌توانند ناشی از عوامل مختلفی باشند، از جمله:

فعالیت‌های انسانی: مانند ترافیک، ساخت‌وساز، یا فعالیت‌های صنعتی که می‌توانند ارتعاشات اضافی ایجاد کنند.

شرایط جوی: مانند طوفان، باران یا وزش باد که می‌توانند بر روی تجهیزات ثبت داده تأثیر بگذارند.

اختلالات محلی: مانند تغییرات ناگهانی در شرایط خاک یا وجود موانع فیزیکی که می‌توانند باعث ایجاد نوسانات غیرعادی شوند.

۲-۴-۲. مشخصات نوسانات گذرا

نوسانات گذرا معمولاً دارای ویژگی‌های زیر هستند: دامنه بالا: نوسانات گذرا معمولاً دارای دامنه‌ای بالاتر از نوسانات طبیعی خرد لرزه‌ها هستند و می‌توانند به‌طور

نمایش داده می‌شود. در نمودار حاصل از STFT (ratiogram)، پیک‌های واقعی حاصل از داده‌های خرد لرزه‌ها، پیک‌هایی هستند که به‌طور مستمر در کل دوره زمانی حضور دارند. این در حالی است که پیک‌های جعلی حاصل از عوامل مزاحم گذرا در دوره‌های کوتاهی از زمان ظاهر شده و سپس محو می‌شوند (ادیب و کیانوش، ۲۰۲۵) و بر اساس آن می‌توان برای پالایش داده‌ها از عوامل مزاحم استفاده کرد. در این روش هم برای محاسبه طیف فرکانسی H/V هر پنجره مانند روش استاندارد عمل می‌شود با این تفاوت که به جای محاسبه طیف فرکانسی، $H/V_{average}$ طیف فرکانسی H/V متناظر با هر پنجره به‌طور متوالی محاسبه و نتیجه حاصله در موقعیت متناظر در نمودار دو بعدی زمان فرکانس نمایش داده می‌شود. در این روش، پنجره‌ها از هم جدا نبوده و در بخشی از داده‌ها که مقدارش قابل تنظیم است روی هم افتادگی دارند.

در این تحقیق، از روش تبدیل فوریه کوتاه‌مدت (STFT) برای تحلیل سیگنال‌های خرد لرزه‌ای استفاده شده است. این روش به ما این امکان را می‌دهد که ویژگی‌های فرکانسی سیگنال را در طول زمان بررسی کنیم.

- نوع پنجره: برای تحلیل سیگنال، از پنجره هامینگ (Hamming window) استفاده شده است. این نوع پنجره به دلیل ویژگی‌های خاص خود در کاهش اثرات جانبی (side lobe effects) و بهبود دقت فرکانسی، به‌طور گسترده‌ای در تحلیل سیگنال‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- طول پنجره: طول پنجره در این تحقیق برابر با ۱۰۰۰ نمونه انتخاب شده است. این انتخاب به ما این امکان را می‌دهد که دقت مناسبی در تحلیل فرکانس‌ها داشته باشیم. با توجه به فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتز، طول پنجره معادل با ۵ ثانیه است.

- تأثیر طول پنجره: انتخاب طول پنجره ۱۰۰۰ نمونه به ما این امکان را می‌دهد که ویژگی‌های فرکانسی سیگنال را با دقت بیشتری تحلیل کنیم. پنجره‌های بلندتر معمولاً دقت فرکانسی بهتری را فراهم می‌کنند، در حالی که پنجره‌های

ناگهانی در سیگنال ظاهر شوند.

مدت زمان کوتاه: این نوسانات معمولاً در مدت زمان کوتاهی (چند ثانیه یا کمتر) رخ می‌دهند و پس از آن به حالت عادی برمی‌گردند.

تکرارپذیری کم: نوسانات گذرا معمولاً به‌طور مکرر و در شرایط مشابه تکرار نمی‌شوند و به همین دلیل شناسایی آنها می‌تواند چالش‌برانگیز باشد.

طیف فرکانسی گسترده: این نوسانات می‌توانند در طیف فرکانسی وسیعی وجود داشته باشند و معمولاً شامل فرکانس‌های بالا و پایین هستند.

۲-۴-۳. تأثیر نوسانات گذرا بر داده‌های خردلرزه

نوسانات گذرا می‌توانند تأثیرات زیر را بر روی داده‌های خردلرزه‌ای داشته باشند: کاهش دقت تخمین: وجود نوسانات گذرا می‌تواند باعث ایجاد پیک‌های جعلی در طیف فرکانسی H/V شود که در نتیجه دقت تخمین فرکانس غالب آبرفت را کاهش می‌دهد.

افزایش عدم قطعیت: نوسانات گذرا می‌توانند عدم قطعیت در نتایج تحلیل‌های لرزه‌ای را افزایش دهند و به‌ویژه در شرایطی که داده‌ها تحت تأثیر نویزهای محیطی قرار دارند، این مشکل بیشتر نمایان می‌شود.

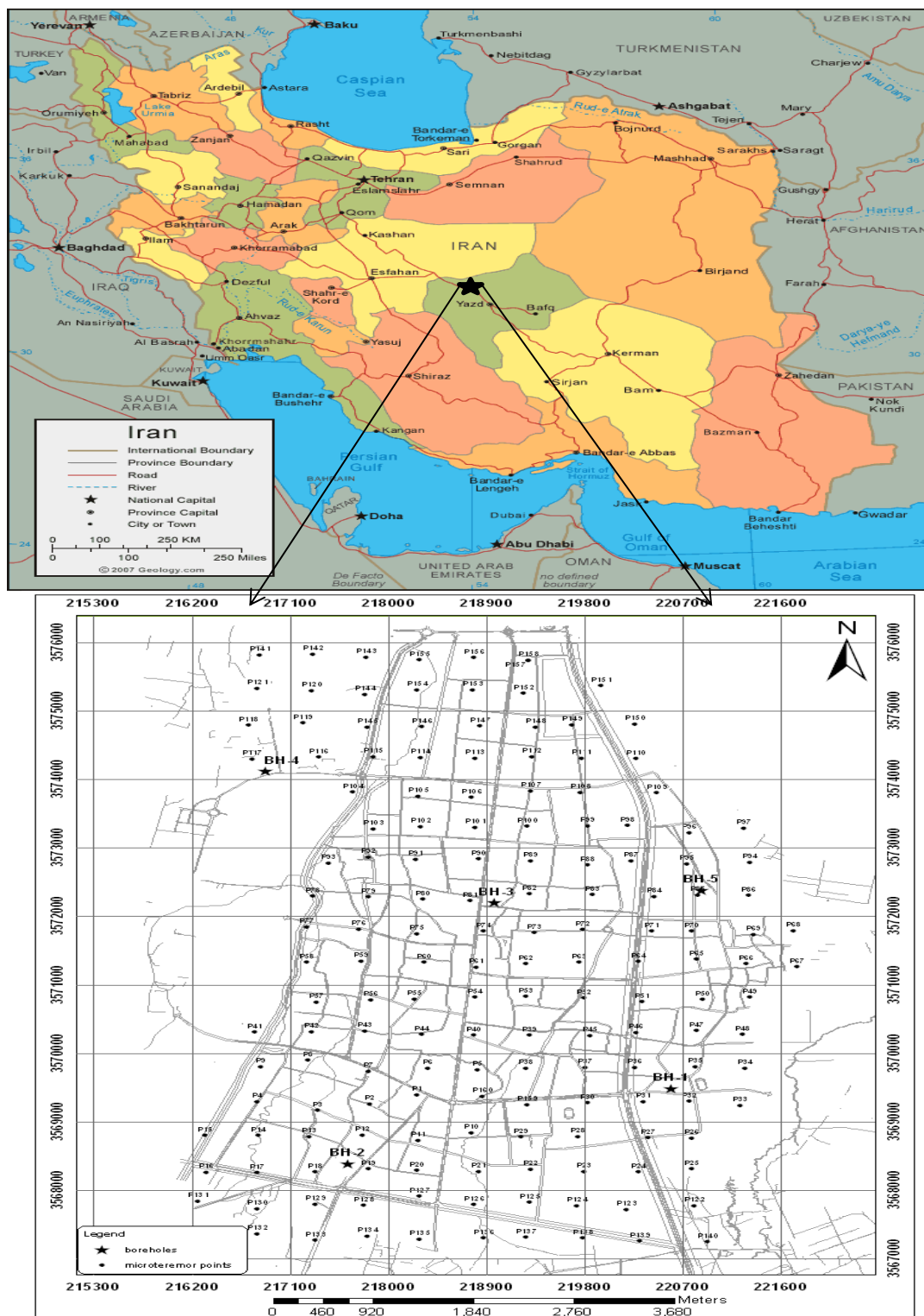
شناسایی و حذف نوسانات گذرا از داده‌های خردلرزه‌ای یک چالش مهم در پردازش داده‌ها است. با استفاده از روش واریانس پیش‌رونده، می‌توان به‌طور مؤثری این نوسانات را شناسایی و حذف کرد، که در نتیجه به بهبود کیفیت داده‌ها و دقت تخمین فرکانس غالب آبرفت کمک می‌کند. این توضیحات و مشخصات نوسانات گذرا می‌تواند به خوانندگان کمک کند تا درک بهتری از چالش‌های موجود در پردازش داده‌های خردلرزه‌ای و

اهمیت حذف این نوسانات داشته باشند.

۳. نتایج تجربی

در ابتدای این بخش دستگاه اندازه‌گیری و نحوه جمع‌آوری داده‌های خردلرزه‌ای معرفی شده و سپس با استفاده از داده‌های واقعی و نرم‌افزار MATLAB دو روش پیشنهادی "کاهش مصنوعی فرکانس نمونه‌برداری" و "واریانس پیش‌رونده" پیاده‌سازی شده‌اند. داده‌های خردلرزه‌ای در ۱۶۰ نقطه از سطح شهر میبد واقع در استان یزد (شکل ۱) که بر روی یک دشت مسطح و رسی واقع شده، برداشت شده است. بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌ها (تا عمق ۴۲ متری)، جنس غالب خاک منطقه رس و سیلت با پلاستیسیته بالا می‌باشد. تغییرات قابل توجهی در جنس خاک در سطح منطقه دیده نمی‌شود و تنها در برخی نقاط درصد سیلت و رس کم و زیاد شده است. خاک‌های رسی منطقه در بخش‌های مختلف چگالی و سختی متفاوت اما ظرفیت بارپذیری خوبی داشته و در صورت عدم وجود آب قابلیت تحمل بار متوسط ناشی از احداث سازه‌ها را دارند. به‌علاوه سرعت متوسط موج برشی تا عمق ۳۰ متری در گمانه‌ها بین ۵۷۰ تا ۶۵۰ متر بر ثانیه است.

داده‌های خردلرزه‌ها با استفاده از دستگاه لرزه‌سنج سه کاناله SL07 ساخت شرکت SARA ایتالیا با فرکانس طبیعی ۱ هرتز و میرایی ۰/۷ برای هر ایستگاه به‌طور متوسط حدود ۸ دقیقه برداشت شد (شکل ۳). این لرزه‌سنج دارای یک رقومی کننده سه کاناله ۲۴ بیتی، یک واحد پردازنده مرکزی با قابلیت ذخیره رکوردها و یک گیرنده GPS می‌باشد. در این مقاله داده‌های ۵ نقطه نزدیک یا منطبق بر ۵ گمانه انتخاب و برای تحلیل و مقایسه نتایج مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱).



شکل ۳. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شمال استان یزد و پراکندگی نقاط برداشت خرد لرزه‌ها در سطح شهر میبد.

جدول ۱. اطلاعات و فرکانس غالب محاسبه شده بر اساس پروفیل خاک، در نقاط گمانه شهر میبد.

شماره ایستگاه	$\bar{V}_S$ (m/s)	عمق سنگ بستر لرزه ای (m)	فرکانس غالب f (Hz)	پریود غالب (sec.)
P32	۵۸۵	۹۰	۶/۵	۰/۱۵۴
P18	۶۱۲	۷۰	۸/۷۴	۰/۱۱۴
P82	۶۰۰	۸۰	۷/۵	۰/۱۳۳
P117	۵۷۱	۸۲	۶/۹۶	۰/۱۴۴
P85	۶۴۷	۵۲	۱۲/۴۴	۰/۰۸۰

گزارش فقط مؤلفه های فرکانسی ای نشان داده می شوند که در این محدوده باشند. در تمام محاسبات و شبیه سازی های انجام شده در این مطالعه که با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده، تعداد نمونه های هر پنجره در محاسبات طیف فرکانسی H/V برابر ۱۰۰۰ عدد بوده و هم پوشانی داده ها در دو پنجره متوالی برابر با ۹۰ درصد طول پنجره در نظر گرفته شده است. برای هموارسازی طیف فرکانسی H/V نیز از روش هموارسازی میانگین متحرک (Moving Average) با اندازه پنجره هموارسازی معادل با ۲٪ اندازه پنجره داده ها استفاده شده است که با توجه به طول ۱۰۰۰ برای پنجره های داده در شبیه سازی های انجام شده، اندازه پنجره هموارسازی معادل با ۲۰ نمونه می باشد. در هر دو طرف پنجره هموارسازی هر سه مؤلفه از یک cosine tapering با طول ۵٪ استفاده شده است.

با وجود برداشت داده از ۱۶۰ ایستگاه از سطح شهر میبد، بررسی های انجام شده فقط برای ایستگاه های دارای گمانه انجام شده است. در این مقاله برای جلوگیری از تکرار مطالب، نتایج بررسی ایستگاه ۱۸ و ۱۱۷ به طور مفصل تشریح و نتایج ایستگاه های دیگر در جدول ۳ ارائه و نتایج حاصل از محاسبه فرکانس غالب به روش محاسباتی مبتنی بر پروفیل خاک با مقادیر به دست آمده از روش پیشنهادی با هم مقایسه شده اند.

۱-۳. تخمین فرکانس غالب و تعیین عمق سنگ بستر در این بخش، مراحل انجام کار برای تخمین فرکانس غالب آبرفت و تعیین عمق سنگ بستر با استفاده از

بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه ها و تعریف پروفیل خاک در هر گمانه (با استفاده از ضخامت، جنس، دانسیته کل و سرعت موج برشی لایه ها)، تحلیل پاسخ زمین بر با روش محاسباتی یک بعدی و بر اساس رفتار خطی معادل خاک انجام شده است. از ۷ زوج شتاب نگاشت (دو مؤلفه افقی هر شتاب نگاشت) مربوط به زلزله های مهم رخ داده در ایران به عنوان حرکت ورودی و از شتاب ماکزیمم به دست آمده از مطالعه های تحلیل خطر زلزله به عنوان شتاب ورودی در سنگ بستر نیز استفاده شد.

در جدول ۱ برخی مشخصات ژئوتکنیکی و دینامیکی نقاط مرجع، مانند عمق سنگ بستر لرزه ای، سرعت موج برشی میانگین و همچنین مقادیر فرکانس غالب محاسبه شده بر اساس ویژگی های پروفیل خاک (با استفاده از فرمول $f = \frac{V}{H}$ ، که در آن f فرکانس غالب، H ضخامت کل و $\bar{V}_S$ سرعت موج برشی میانگین پروفیل خاک می باشد) نشان داده می شود.

با توجه به سرعت موج برشی سطحی در محل گمانه ها، عمق سنگ بستر لرزه ای و جنس زمین در سطح شهر میبد، انتظار می رود که فرکانس غالب در این منطقه بین ۵-۱ هرتز باشد. لذا فرکانس غالب محاسبه شده با استفاده از تحلیل خرد لرزه ها در نقاطی قابل قبول هستند که مقداری مساوی یا بین این مقادیر را داشته باشند. از این رو در طیف فرکانسی H/V به دست آمده در تمامی نقاط، محدوده فرکانسی خارج از محدوده مذکور به عوامل مزاحم نسبت داده و بی اهمیت محسوب می شوند. از این رو در بیشتر دیاگرام های طیف فرکانسی بعدی در این

به‌عنوان مبنایی برای طراحی سازه‌ها و ارزیابی خطر زلزله در این منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۳. اعمال روش کاهش مصنوعی فرکانس

نمونه‌برداری

قبل از اعمال این روش به بررسی تأثیر فیلتر میان‌گذر بر روی دامنه مؤلفه‌های فرکانسی بالاتر از فرکانس قطع بالای این فیلتر، بر روی طیف فرکانسی H/V پرداخته شده است. برای این کار داده‌های خرد لرزه‌ای ایستگاه ۱۸ شهر میبد در مجاور یکی از گمانه‌ها انتخاب شد. در مرحله اول، طیف فرکانسی H/V این داده‌ها محاسبه و رسم شد (شکل ۴-الف). در مرحله دوم، در ابتدا مؤلفه‌های افقی (EW و NS) و قائم (V) این داده‌ها از یک فیلتر میان‌گذر با باند فرکانسی بین 0.1 هرتز تا 5 هرتز عبور داده شد و طیف فرکانسی H/V آن ترسیم شد (شکل ۴-ب). با مقایسه دو شکل (۴-الف) و (۴-ب) مشخص است که این دو شکل خیلی شبیه هم بوده و استفاده از روش مرسوم به‌کارگیری فیلتر میان‌گذر (برای تضعیف مؤلفه‌های فرکانس بالا) تأثیر مثبتی جهت حذف نوسانات فرکانس بالا در سیگنال خرد لرزه‌ها نداشته است. البته عدم اجازه عبور مؤلفه‌های فرکانس پایین موجب صفر شدن متوسط سیگنال در طول زمان شده و نقش حذف‌کننده افست از داده‌ها را ایفا می‌کند. این کار تأثیر خیلی کمی بر طیف فرکانسی داشته و ضروری به نظر نمی‌رسد. همان‌طوری که در بخش قبلی گفته شده به دست آوردن این نتیجه دور از انتظار نبوده و علت آن استفاده از اپراتور تقسیم در محاسبه طیف فرکانسی H/V و تضعیف همزمان در مؤلفه‌های افقی (H) و قائم (V) است. همچنین، انتخاب بازه فرکانسی تا 20 هرتز به‌منظور بررسی نوسانات و اختلالات فرکانس بالا نیز در نظر گرفته شده است، ضمن این که فرکانس غالب مورد مطالعه تا 5 هرتز می‌باشد.

داده‌های خرد لرزه‌ای توضیح داده می‌شود. این مراحل شامل جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها و تحلیل نتایج می‌باشد.

۱-۱-۳. جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های خرد لرزه‌ای از 160 ایستگاه مختلف در سطح شهر میبد واقع در استان یزد جمع‌آوری شد. این داده‌ها با استفاده از دستگاه لرزه‌سنج سه‌کاناله $SL07$ به مدت متوسط 8 دقیقه در هر ایستگاه ثبت شدند.

۲-۱-۳. پردازش داده‌ها

پس از جمع‌آوری داده‌ها، مراحل زیر برای پردازش و تحلیل داده‌ها انجام شد:

فیلتر کردن داده‌ها: داده‌ها از فیلتر ضد تداخل عبور داده شدند تا اثرات نویزهای محیطی کاهش یابد.

کاهش فرکانس نمونه‌برداری: فرکانس نمونه‌برداری به‌صورت مصنوعی کاهش یافت تا نوسانات اضافی و اختلالات محلی حذف شوند.

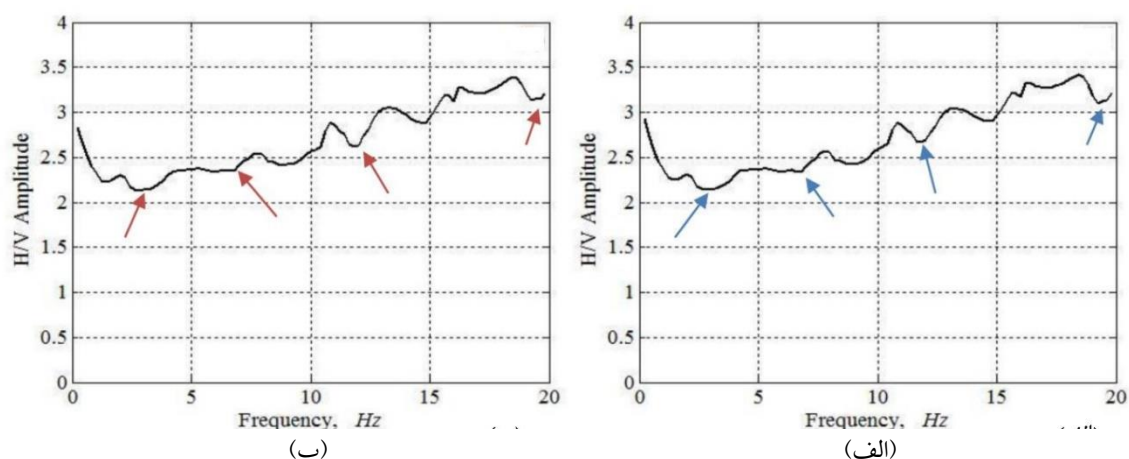
محاسبه نسبت طیفی H/V : با استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT)، نسبت طیفی افقی به عمودی (H/V) محاسبه شد. تخمین فرکانس غالب: فرکانس غالب آبرفت با استفاده از روش‌های H/V و همچنین روش‌های زمان-فرکانس تخمین زده شد.

۳-۱-۳. تحلیل نتایج

نتایج حاصل از تخمین فرکانس غالب و عمق سنگ بستر در جدول ۲ تا ۴ ارائه شده است. نتایج جدول ۲، که برای داده‌های قبل از اعمال فیلتر است، نشان می‌دهد که فرکانس آبرفت منطقه بین تقریباً 6 تا 12 هرتز است. اما پس از اعمال فیلتر (جدول ۳ و ۴)، فرکانس غالب آبرفت منطقه حدوداً بین $1/5$ تا $3/0$ هرتز است و عمق سنگ بستر نیز بین 52 تا 90 متر قرار دارد. این اطلاعات می‌تواند

جدول ۲. فرکانس غالب و عمق سنگ بستر بر اساس داده‌های خردلرزه‌ای در ایستگاه‌های مختلف شهر میبد.

ایستگاه	فرکانس غالب (Hz)	عمق سنگ بستر (متر)	نوع خاک
P32	۶/۵	۹۰	رس و سیلت
P18	۸/۷۴	۷۰	رس و سیلت
P82	۷/۵	۸۰	رس و سیلت
P117	۶/۹۶	۸۲	رس و سیلت
P85	۱۲/۴۴	۵۲	رس و سیلت



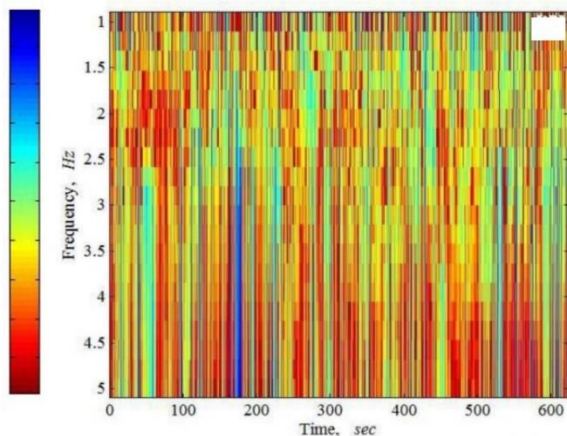
شکل ۴. الف) طیف فرکانسی H/V داده‌های خردلرزه ایستگاه ۱۸ شهر میبد قبل از فیلتر کردن، ب) طیف فرکانسی H/V داده‌های خردلرزه فیلتر شده با فیلتر میان‌گذر.

نوسان‌های اضافی بر روی سیگنال داده‌های جمع‌آوری شده می‌باشد.

در ادامه به جای فیلتر میان‌گذر از روش پیشنهادی ارائه شده در بخش (۱-۲) برای حذف اعوجاج و نوسانات اضافی موجود در سیگنال داده‌ها از تکنیک کاهش فرکانس نمونه‌برداری استفاده می‌شود تا بتوان علاوه بر تضعیف مؤلفه‌های بالای خارج از محدوده حاوی اطلاعات، به گونه‌ای هموارسازی سیگنال را به روشی غیر متعارف انجام داد و از اعوجاج موجود در سیگنال داده‌ها کاست. با توجه فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتزی و حداکثر فرکانسی غالب قابل قبول ۵ هرتز در این منطقه و همچنین برآورده شدن شرط نایکوئیست (فرکانس

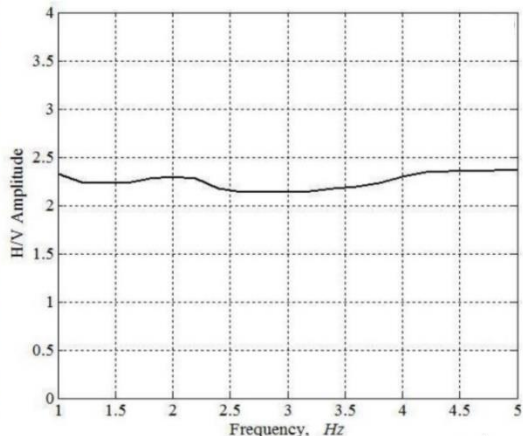
با توجه به شکل ۵-الف که نشان‌دهنده طیف فرکانسی H/V این ایستگاه در محدوده فرکانسی بین ۵-۱ هرتز است، هیچ قله قابل قبولی برای محاسبه فرکانس غالب مطابق راهنمایی‌های ارائه شده در مرجع (هاونیت، ۲۰۰۴) وجود ندارد. همچنین با توجه به شکل ۵-ب که نشان‌دهنده نمودار زمان-فرکانس حاصل از اعمال تبدیل فوریه زمان کوتاه بر روی داده‌های این ایستگاه است، هیچ فرکانس غالبی (فرکانس متناظر با بزرگ‌ترین قله در طیف فرکانسی هر پنجره از داده‌ها) در طیف فرکانسی H/V وجود نداشته که در طی زمان برداشت داده‌ها به طور مداوم حضور داشته است. دلیل این مسئله نیز تأثیر غیر مداوم اختلال‌های گذرای محیطی و ایجاد اعوجاج و

محدوده فرکانسی بین ۵-۱ هرتز دو قله قابل قبول دیده می‌شود. که فرکانس متناظر با قله بزرگ‌تر که همان فرکانس غالب است برابر ۲/۲۱۵ هرتز می‌باشد. این در حالی است که در شکل (۵-الف) در این محدوده فرکانسی قله قابل قبولی دیده نمی‌شود. همچنین در شکل (۶-ب) دیده می‌شود که مؤلفه فرکانسی متناظر با این قله تقریباً در تمام طول محور زمان نمودار زمان-فرکانس حضور دائمی دارد که نشان‌دهنده واقعی بودن این قله و همچنین فرکانس غالب متناظر با آنها دارد. با توجه به جدول ۱ دیده می‌شود فرکانس غالب محاسبه شده برای این ایستگاه با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از گمانه حفر شده در این محل برابر ۲/۲ هرتز است که به مقدار به‌دست آمده از داده‌های خرد لرزه نزدیک است.



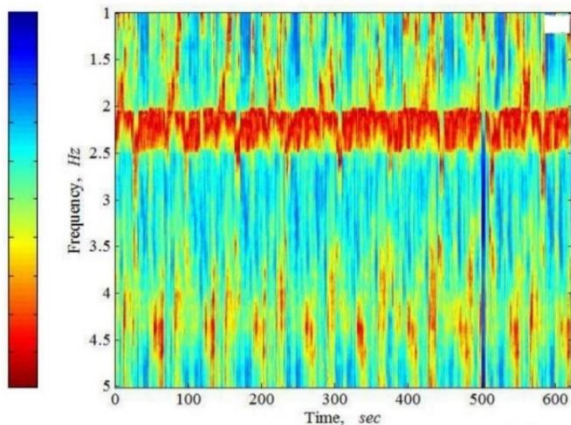
(ب)

نمونه‌برداری باید مساوی یا بیشتر از دو برابر حداکثر فرکانس (f_{max}) سیگنال مورد نمونه‌برداری بیشتر باشد) تصمیم گرفته شد که فرکانس نمونه‌برداری به یک‌دهم فرکانس نمونه‌برداری اولیه داده‌ها تقلیل یابد. قبل از انجام کاهش فرکانس نمونه‌برداری جهت جلوگیری از اثر مخرب aliasing بر روی طیف فرکانسی از فیلتر antialiasing استفاده و حداکثر فرکانس موجود در طیف فرکانسی داده‌های خرد لرزه هر سه مؤلفه را به مقدار ۱۰ Hz محدود می‌کنیم. شکل ۶-الف و ۶-ب به ترتیب نمودار طیف فرکانسی متوسط $H/V_{average}$ به‌دست آمده مطابق با دستورالعمل ارائه شده در روش استاندارد و روش زمان فرکانس توضیح داده شده در بخش (۲-۳) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶-الف) مشخص است که در

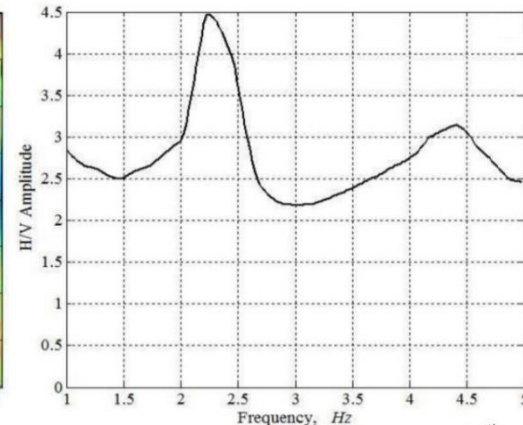


(الف)

شکل ۵. الف) طیف فرکانسی (H/V)، ب) نمودار زمان-فرکانس حاصل از اعمال STFT بر روی داده‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه ۱۸ شهر میبد.



(ب)



(الف)

شکل ۶. الف) طیف فرکانسی H/V داده‌های خرد لرزه‌ای (ب) نمودار زمان-فرکانس حاصل از اعمال STFT ایستگاه ۱۸ شهر میبد پس از اعمال تکنیک کاهش فرکانس نمونه‌برداری.

۳-۳. اعمال روش پیشنهادی مؤلفین "واریانس پیش‌رونده"

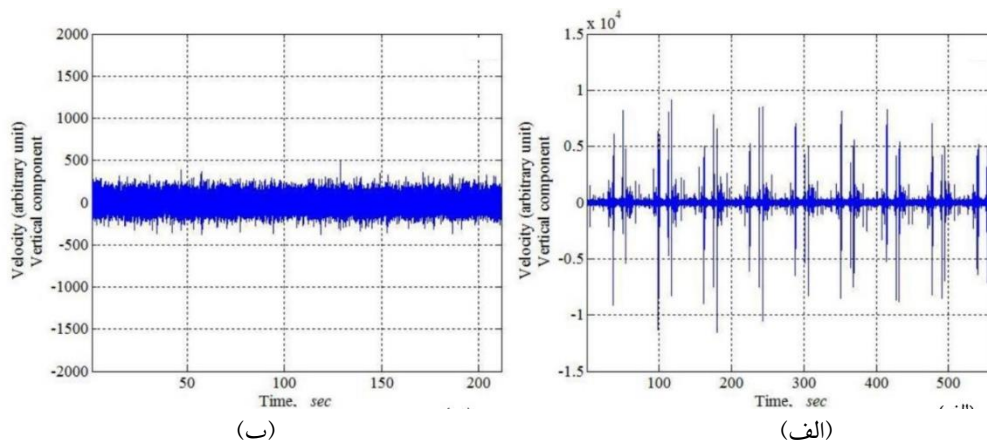
ادامه کار به بررسی تأثیر و توانایی روش پیشنهادی این مقاله (ارائه شده در بخش ۲-۲) در حذف نوسان‌ها و اختلال‌های گذرای محیطی زیاد از داده‌های خردلرزه‌ها اختصاص یافته و همچنین مقایسه آن با روش مرسوم استفاده کننده از نسبت STA/LTA انجام شده است. قابل ذکر است قبل از اعمال هر کدام از روش‌های فوق از تکنیک کاهش فرکانس نمونه‌برداری ذکر شده در بخش ۲-۱ بر روی داده‌های خردلرزه‌ها استفاده شده است. برای این کار داده‌های خردلرزه ایستگاه ۱۱۷ شهر میبد انتخاب و عملیات حذف اثر اغتشاش بر روی داده‌های دو مؤلفه افقی و یک مؤلفه قائم آن بطور جداگانه انجام شد. شکل ۶-الف، دیاگرام زمانی مؤلفه عمودی (V) داده‌های مذکور را نشان می‌دهد. دیاگرام زمانی همین مؤلفه نیز پس از اعمال روش پیشنهادی برای حذف نوسانات گذرای حاصل از اغتشاش در شکل ۶-ب آورده شده است. طیف فرکانسی H/V و همچنین دیاگرام زمان-فرکانس این داده‌ها بعد از اعمال روش پیشنهادی نیز به ترتیب در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب ارائه شده است. پارامترهای تنظیمی مربوط به این روش عبارت‌اند از:

$$RVWDN = 20, \quad ADN = 60, \quad CF_{EW} = 1.1, \\ CF_{NS} = 1.1, \quad CF_V = 1.1 \quad (۶)$$

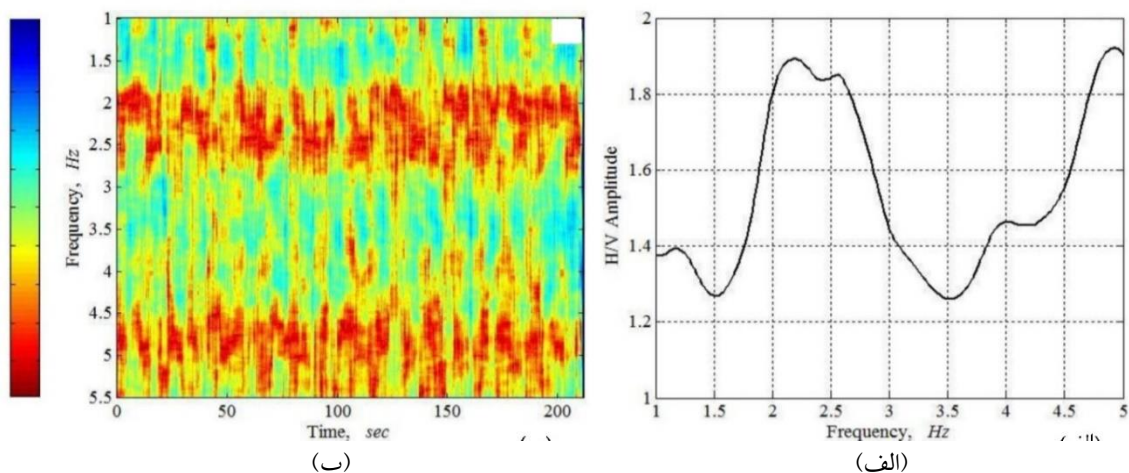
که متغیر RVWDN نشان‌دهنده تعداد داده‌های پنجره

محاسبه واریانس پیش‌رونده در هر گام بوده (Running Variance Window Data Number) و متغیر ADN نشان‌دهنده حداقل تعداد داده‌ها قابل قبول ذخیره‌شده در حافظه موقت قبل از رسیدن به یک محدوده داده‌های غیرقابل قبول می‌باشد. همچنین متغیرهای CF_{NS} و CF_{EW} و CF_V به ترتیب نشان‌دهنده ضریب تصحیح برای سطح آستانه مؤلفه‌های افقی EW و NS و ضریب تصحیح برای سطح آستانه مؤلفه قائم V هستند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که RVWDN حدود ۲۰ گزینه مناسبی برای پنجره واریانس پیش‌رونده می‌باشد. هرچند، تعیین این عدد می‌تواند به عنوان یک پارامتر برای رسیدن به نتیجه بهتر در اختیار کاربر قرار گیرد.

استفاده از روش پیشنهادی برای حذف اغتشاش (شکل ۷)، بخوبی توانسته نوسان‌های اضافی حاصل از اختلال‌های محلی را حذف و سیگنالی هموار بدون تغییرات شدید و ناگهانی ارائه کند. در شکل ۸-الف که نشان‌دهنده طیف فرکانسی $H/V_{average}$ است دو قله تقریباً هم‌دامنه دیده می‌شود که فرکانس‌های متناظر با آنها برابر با ۲/۲۵ و ۴/۹ هرتز می‌باشند، وجود دو قله می‌تواند نشان‌دهنده دو اختلاف امپدانس قابل توجه باشد. این در حالی است که با توجه به جدول ۱ مقدار فرکانس غالب برابر ۱/۸ هرتز محاسبه شده است. نمودار زمان فرکانس داده‌های مذکور در شکل ۸-ب نشان می‌دهد که هر دو فرکانس غالب محاسبه‌شده در طول زمان به طور مداوم حضور داشته و انعکاس‌دهنده دینامیک خاک است.



شکل ۷. دیاگرام زمانی داده‌های مؤلفه عمودی ایستگاه ۱۱۷ شهر میبد (الف) قبل و (ب) پس از اعمال روش پیشنهادی حذف نوسان‌های گذرا.



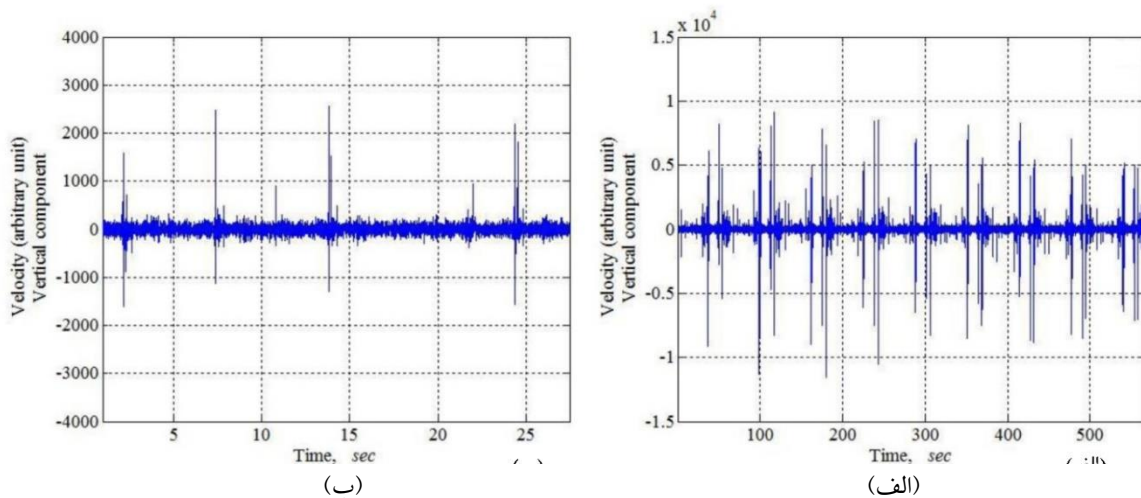
شکل ۸. الف) طیف فرکانسی $H/V_{average}$. ب) نمودار زمان-فرکانس داده‌ها. مؤلفه عمودی ایستگاه ۱۱۷ شهر میبد پس از اعمال روش پیشنهادی حذف نوسان‌های گذرا.

آستانه (Threshold level) برای نسبت STA/LTA دو مؤلفه افقی EW ، NS و مؤلفه قائم V هستند. این مقادیر با الهام از مراجع (ترنکوسزی، ۲۰۱۲؛ هاوئیث، ۲۰۰۴) و همچنین با انجام تعداد زیادی عملیات سعی و خطا به دست آمده است. استفاده از این روش برای حذف اغتشاش به‌خوبی روش پیشنهادی (روش RVM) نتوانسته نوسان‌های اضافی حاصل از اختلال‌های محلی را حذف کند و سیگنال باقی‌مانده از آرامش خوبی برخوردار نبوده و در دامنه آن تلاطم و تغییرهای زیاد و ناگهانی دیده می‌شود.

شکل ۹، دیاگرام زمانی داده‌های مؤلفه قائم ایستگاه مذکور پس از اعمال روش STA/LTA برای حذف نوسان‌های گذرای حاصل از اغتشاش را نشان می‌دهد. پارامترهای تنظیمی این روش عبارت‌اند از:

$$STA_{WL} = 2\text{sec}, LTA_{WL} = 20\text{sec}, r_{iEW} = 0.15, r_{iNS} = 0.2, r_{iV} = 0.18 \quad (V)$$

که در آن STA_{WL} نشان‌دهنده طول پنجره در متوسط‌گیری کوتاه‌مدت بوده و LTA_{WL} نشان‌دهنده طول پنجره در متوسط‌گیری طولانی‌مدت است و همچنین متغیرهای r_{iEW} ، r_{iNS} و r_{iV} به ترتیب مقدار سطح



شکل ۹. دیاگرام زمانی داده‌های مؤلفه عمودی ایستگاه ۱۱۷ شهر میبد الف) قبل و ب) پس از اعمال روش مرسوم STA/LTA .

از ایستگاه ۱۸، به دست آمده است. f_1 فرکانس اساسی با احتمال رخداد بالاتر از f_2 می باشد. جهت تخمین فرکانس اساسی خاک از روش زمان-فرکانس استفاده شده است.

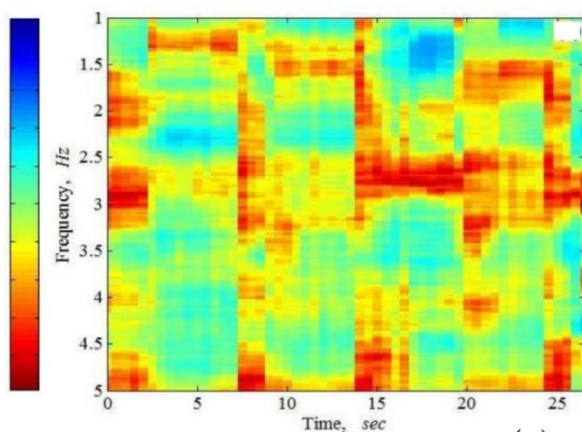
محدودیت های روش های موجود: روش STA/LTA به دلیل نیاز به تنظیم پارامترها و انتخاب آستانه برای تشخیص داده های خراب از داده های سالم، ممکن است در برخی شرایط کارایی کمتری داشته باشد. در مقاله به این نکته اشاره شده که بسیاری از روش های دیگر نیز در عمل خطای زیادی نشان داده اند و به همین دلیل، نویسندگان تصمیم به استفاده از روش های جدیدتر و کارآمدتر گرفته اند.

کارایی و سادگی: روش های پیشنهادی در مقاله به گونه ای طراحی شده اند که تنظیم پارامترها در آنها ساده تر و سریع تر است. این ویژگی می تواند در شرایط عملی و در زمان های محدود، مزیت قابل توجهی باشد.

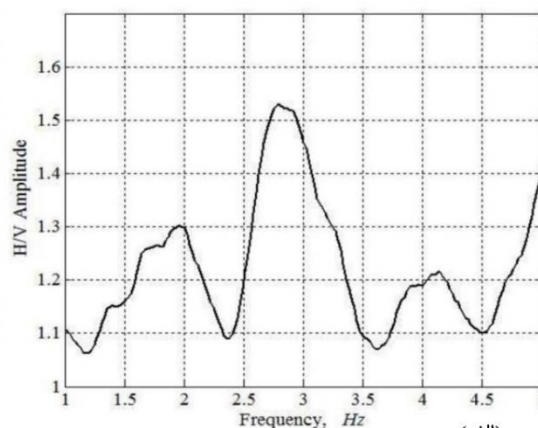
نتایج تجربی: نتایج حاصل از اعمال روش های جدید بر روی داده های واقعی نشان دهنده عملکرد مؤثر این تکنیک ها در حذف اثر اختلالات محلی و بهبود دقت تخمین فرکانس غالب است. این نتایج می تواند دلیلی برای عدم استفاده از روش های دیگر باشد، زیرا نویسندگان به دنبال ارائه راهکارهایی هستند که به طور خاص در شرایط خاصی که با آن مواجه هستند، کارایی بهتری داشته باشند.

در شکل ۱۰-الف طیف فرکانسی H/V داده های پالایش شده به روش نسبت STA/LTA با تعداد زیادی قله مشاهده می شود. نمودار زمان فرکانس داده های مذکور در شکل ۱۰-ب، نشان می دهد که این قله ها به جز قله متناظر با فرکانس حوالی ۵ هرتز در طول زمان به طور مداوم حضور نداشته و نمی توان اطمینان داشت که آنها انعکاس دهنده دینامیک خاک بوده و به واسطه نوسان های حاصل از اختلال های محلی ایجاد نشده اند.

روش استفاده از نسبت STA/LTA و روش پیشنهادی در این مقاله (RVM) همواره تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند و غالباً نتایج تقریباً مشابهی دارند. این بدین دلیل است که هر دو روش ماهیت مشابهی داشته و به منظور تشخیص اثر اختلال ها و نوسان ها هر دو براساس تحلیل انرژی سیگنال در طول زمان عمل می کنند. به هر حال روش پیشنهادی مؤلفین ساده تر بوده و تنظیم پارامترها زمان کمتری می گیرد. از شکل های ۶-ب و ۸-ب مشخص است که در روش پیشنهادی در مقایسه با روش معمول استفاده از نسبت STA/LTA حجم بیشتری از داده باقی مانده است (یا داده کمتری حذف شده است). جدول ۳ مقادیر فرکانس اساسی هر ۵ ایستگاه را با استفاده از اطلاعات پروفیل خاک و همچنین با استفاده از داده های خردلرزه فیلترشده با روش های پیشنهادی را نشان می دهد. بر طبق این جدول دو فرکانس غالب برای همه ایستگاه ها، به غیر



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. (الف) طیف فرکانسی H/Vaverage (ب) نمودار زمان فرکانس داده ها. مربوط به مؤلفه قائم ایستگاه ۱۱۷ شهر میند پس از اعمال روش مرسوم STA/LTA.

جدول ۳. فرکانس‌های اساسی محاسبه شده بر اساس پروفیل‌های خاک و داده‌های خردلرزه در شهر میبد (فیلترشده با روش‌های پیشنهادی و تخمین‌زده‌شده به روش زمان-فرکانس)

فرکانس اساسی حاصل از تحلیل خردلرزه‌ها فیلتر شده با روش‌های پیشنهادی		فرکانس اساسی بر اساس $(f = \frac{\sqrt{s}}{4h})$ برای پروفیل خاک	نام ایستگاه
f_2 (Hz)	f_1 (Hz)	f (Hz)	
۴/۴	۱/۴	۱/۶	P32
—	۲/۲	۲/۲	P18
۴/۳	۲/۲	۱/۹	P82
۴/۷	۲/۱	۱/۸	P117
۴/۴	۲/۸	۳/۱	P85

برای تجزیه سیگنال.

تجزیه سیگنال: استفاده از تبدیل موجک برای تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های فرکانسی مختلف.
حذف نوفه: شناسایی و حذف مؤلفه‌های فرکانسی که به نوفه‌های گذرا مربوط می‌شوند.
بازسازی سیگنال: بازسازی سیگنال از مؤلفه‌های باقی‌مانده که شامل اطلاعات اصلی سیگنال هستند.

۳-۴-۱. نتایج

در ادامه نتایج حاصل از اعمال روش تبدیل موجک بر روی داده‌های خردلرزه‌ای در جدول ۴ ارائه شده است. داده‌های آزمایشی از ایستگاه‌های مختلف جمع‌آوری شده و فرکانس غالب آنها با استفاده از روش‌های مختلف (تبدیل موجک و روش STA/LTA) محاسبه شده است.

۳-۴. روش تبدیل موجک و اجرای آن

برای بررسی یک روش دیگر در حذف نوفه‌های گذرا در داده‌های خردلرزه‌ای، می‌توان به روش تبدیل موجک (Wavelet Transform) اشاره کرد. این روش به دلیل قابلیت‌های خاص خود در تحلیل سیگنال‌های غیرایستا و حذف نوفه‌های گذرا، به‌طور گسترده‌ای در پردازش داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. تبدیل موجک یک تکنیک ریاضی است که به تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها در دامنه زمان و فرکانس کمک می‌کند. این روش به‌ویژه برای شناسایی و حذف نوفه‌های گذرا مؤثر است، زیرا می‌تواند تغییرات ناگهانی در سیگنال را شناسایی کند و به‌طور مؤثری نوفه‌ها را از سیگنال اصلی جدا کند. مراحل اجرای آن شامل موارد زیر است: انتخاب تابع موجک: انتخاب تابع موجک مناسب مانند موجک هار (Haar) یا موجک داویش (Daubechies)

جدول ۴. نتایج حاصل از اعمال روش تبدیل موجک بر روی داده‌های خردلرزه‌ای در شهر میبد.

ایستگاه	فرکانس غالب - (Hz) تبدیل موجک	فرکانس غالب STA/LTA - (Hz)	درصد بهبود دقت (%)
P32	۲/۵	۲/۰	۲۵
P18	۳/۱	۲/۸	۱۰/۷
P82	۱/۸	۱/۵	۲۰
P117	۴/۰	۳/۵	۱۴/۳
P85	۲/۲	۱/۹	۱۵/۸

نکات قابل توجه پژوهش حاضر به شرح زیر است: بهبود دقت: نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش تبدیل موجک در مقایسه با روش STA/LTA منجر به بهبود دقت تخمین فرکانس غالب در تمامی ایستگاه‌ها شده است.

کارایی در شرایط مختلف: روش تبدیل موجک به‌ویژه در ایستگاه‌هایی که نوفه‌های گذرا بیشتری دارند، عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

قابلیت شناسایی نوفه‌ها: این روش به‌دلیل توانایی در شناسایی و حذف نوفه‌های گذرا، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در پردازش داده‌های لرزه‌ای در مناطق شهری و پرنوفه مورد استفاده قرار گیرد.

۴. نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق ارائه روشی برای کاهش و یا حذف اثر اختلال‌های گذرای موجود در داده‌های خردلرزه‌ای مستخرج در مناطق شهری و بالا بردن دقت تخمین فرکانس غالب خاک می‌باشد. داده‌های خردلرزه‌ای در شهر میبد، طی دو مرحله به‌منظور حذف نوسان‌های فرکانس بالا و همچنین حذف نوسان‌های حاصل از اختلال‌های محیطی، مورد پردازش قرار گرفتند. بر این اساس فرکانس نمونه‌برداری داده ایستگاه (نقطه ۱۸) به‌صورت مصنوعی کاهش یافت، نتیجه حاصله قبل و بعد از اعمال این روش قابل ملاحظه بود به‌طوری که قبل از اعمال آن به خاطر اثر اغتشاش‌های گذرای محیطی هیچ پیک قابل ملاحظه‌ای در طیف به‌دست‌آمده دیده نشد اما پس از اعمال آن، طیف حاصله پیک واضحی را نشان داد. در واقع با این روش بدون حذف هیچ بخشی از داده، پاسخ فرکانسی آنها هموارتر و در نتیجه تعیین فرکانس غالب با دقت بیشتری انجام شد.

برای حذف اغتشاش‌های حاصل از اختلال‌های محیطی روشی بنام "واریانس پیش‌رونده" پیشنهاد شد. این روش بر روی داده‌های یکی از نقاط دیگر (نقطه ۱۱۷) اعمال شد. در واقع در این روش به کمک پنجره لغزان، محاسبه واریانس پیش‌رونده انجام و از سیگنال واریانس حاصل

برای حذف محدوده داده‌هایی که تحت تأثیر اختلال‌های گذرا قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود. در این روش با حرکت در طول سیگنال حاصل از داده‌ها، آن قسمت از داده‌ها که در سیگنال واریانس (انرژی) متناظر با آن تغییرات شدید و غیرقابل قبولی رخ داده را داده‌های آلوده فرض کرده و آنها را حذف می‌کنند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از استفاده از این روش می‌توان گفت که این روش در جهت حذف اثر اختلال‌های گذرای محلی بر روی داده‌ها به‌خوبی عمل کرده و توانسته نوسان‌های اضافی حاصل از آنها را حذف کند. به‌طوری که سیگنال باقی مانده از آرامش خوبی برخوردار بوده و در دامنه آن تغییرات شدید و ناگهانی دیده نمی‌شود. تنظیم پارامترهای این روش ساده بوده و تقریباً به مقدار نامی و پیشنهادی در این تحقیق نزدیک است. نتایج بررسی‌های انجام شده این ادعا را تأیید کرده و از لحاظ راحتی تنظیم، حکایت از برتری این روش نسبت به روش استفاده کننده از نسبت STA/LTA دارد. این روش، برای مناطقی که حاوی داده‌های با آلودگی زیاد هستند، روشی کارآمد می‌باشد. با در نظر گرفتن اقتصادی بودن این روش، تحلیل خردلرزه‌ها می‌تواند به‌عنوان یک روش پایه‌ای در مطالعه‌های اولیه ژئوتکنیکی در منطقه‌های مختلف استفاده شود. همچنین، روش تبدیل موجک به‌عنوان یک تکنیک مؤثر در حذف نوفه‌های گذرا و بهبود دقت تخمین فرکانس غالب در داده‌های خردلرزه‌ای شناخته می‌شود. این روش می‌تواند به‌ویژه در شرایطی که داده‌ها تحت تأثیر نویزهای محیطی قرار دارند، کاربردی باشد.

با مقایسه نتایج حاصله از اعمال دو روش پیشنهادی این مقاله با نتایج حاصله از روش‌های متداول بر روی داده‌های خردلرزه‌ای مستخرج از یک مناطق شهری نشان داده شد، که می‌توان با تغییراتی در پردازش داده تا حدود زیادی از اثر مخرب اختلال‌های گذرای محلی بر روی داده‌های خردلرزه مستخرج از مناطق شهری کاست و در نتیجه موجب افزایش دقت و درجه اطمینان در تخمین فرکانس غالب از روی نسبت طیفی بر اساس داده‌های خردلرزه‌ای شد.

تخمین فرکانس غالب و عمق سنگ بستر پردازد و همچنین روش‌های جدیدی برای بهبود دقت تخمین‌ها ارائه دهد.

مراجع

ادیب، ا. (۱۳۹۵). طبقه‌بندی ساختگاه بر مبنای فرکانس طبیعی مبتنی بر داده‌های خرد لرزه‌ای برای طراحی ساختمان‌ها، مطالعه موردی شهر اردکان، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۱)، ۷۵-۸۸.

Abbas, A., Aimar, M., Cox, B. R., & Foti, S. (2025). A frequency-domain beamforming procedure for extracting Rayleigh wave attenuation coefficients and small-strain damping ratio from 2D ambient noise array measurements. *Earthquake Spectra*, 87552930241304914.

Adib, A., Afzal, P., & Heydarzadeh, K. (2015). Site effect classification based on microtremor data analysis using a concentration-area fractal model, *Nonlin Processes Geophys*, 22, 53-63.

Adib, A., & Kianoush, P. (2025). Geotechnical and geological characterization of the Meskani Mine Complex, Yazd Block, Central Iran: A Multidisciplinary study. *Results in Earth Sciences*, 3, 100072.

Bagheri, M., & Riahi, M. A. (2018). Using a novel method for random noise reduction of seismic records. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 7(3), 65-72.

Bagheri, M., & Riahi, M. A. (2016). Seismic data random noise attenuation using DBM filtering. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 57, 1-11.

Bagheri, M., Riahi, M.A. & Hashemi, H. (2017). Denoising and improving the quality of seismic data using combination of DBM filter and FX deconvolution. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 440.

Mousavi Anzehaee, M., Heydarzadeh, K., & Adib, A. (2018). Employing the Bayesian data fusion to estimate the fundamental frequency of site by means of microtremors data, *Acta Geod Geophys*, 53, 523-541.

Ait Laasri, E. H., Akhouayri, E. S., Agliz, D., & Atmani, A. (2014). Automatic detection and picking of P-wave arrival in locally stationary noise using cross-correlation, *Digital Signal Processing*, 26, 87-100.

Akazawa, T. (2004). A technique for automatic detection of onset time of P and S-phases in strong motion records, *Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering*,

این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از تکنیک‌های نوین پردازش داده‌ها، می‌توان به‌طور قابل‌توجهی از اثرات مخرب اختلالات محلی بر روی داده‌های خرد لرزه‌ای کاست و در نتیجه دقت و اعتماد به تخمین فرکانس غالب آبرفت را افزایش داد. این نتایج می‌تواند به بهبود روش‌های موجود در ارزیابی خطر زلزله و طراحی سازه‌ها کمک کنند و به‌ویژه در مناطق شهری که تحت تأثیر نویزهای محیطی قرار دارند، کاربردی باشند. تحقیقات آینده می‌تواند به بررسی تأثیرات دیگر عوامل محیطی بر

Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 786.

Apostolidis, P. I., Raptakis D. G., Pandi, K. K., Manakou, M.V., & Pitilakis, K.D. (2006). Definition of subsoil structure and preliminary ground response in Aigion city (Greece) using microtremor and earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26 (10), 922-940.

Bommer, J. J., van Elk, J., & Zoback, M. D. (2024). Estimating the Maximum Magnitude of Induced Earthquakes in the Groningen Gas Field, the Netherlands. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114(6), 2804-2822.

Boore, D. M. (2003). Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method. In: *Seismic Ground Motion*, pp. 1-20.

Chatelain, J., Guillier, B., Cara, F., Duval, A., Atakan, K., Bard, P., & the WP02 SESAME team. (2008). Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings, *Springer, Bull. Earthq. Eng*, 6 (1), 33-74.

Delgado, J., Galiana-Merino, J. J., García-Tortosa, F. J., Garrido, J., Lenti, L., Martino, S. & Soler-Llorens, J. L. (2021). Ambient noise measurements to constrain the geological structure of the Güevéjar landslide (S Spain). *Applied Sciences*, 11(4), 1454.

Eftekhari, S. H., Memariani, M., Maleki, Z., Aleali, M., & Kianoush, P. (2024). Electrical facies of the Asmari Formation in the Mansouri oilfield, an application of multi-resolution graph-based and artificial neural network clustering methods. *Scientific Reports*, 14(1), 5198.

EL Hilali, M., Bounab, A., Timoulali, Y., El Messari, J. E. S., & Ahniche, M. (2023). Seismic site-effects assessment in a fluvial sedimentary environment: case of Oued Martil floodplain, Northern Morocco. *Natural Hazards*, 118(2), 1235-1257.

Gentili, S., & Michelin, A. (2006). Automatic picking of P and S phases using a neural tree",

- J. Seismol.* 10 (1), 39–63.
- Gosar, A. (2007). Microtremor HVSr study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw 5.6 and 2004 Mw 5.2 earthquakes, *Engineering Geology*, 91 (2-4), 178–193.
- Havenith, H. B. (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. *European Commission, ORBi, the institutional repository of the University of Liège*, 1-62.
- Hloupis G., Vallianatos F., & Stonham, J. (2004). *A wavelet representation of HVSr technique*, *Bull. Geol. Soc. Greece, Proceedings of the 10th International Congress*, Thessaloniki XXXVI, pp. 1269-1278.
- Hosseini, S. A., Khah, N. K. F., Kianoush, P., Arjmand, Y., Ebrahimabadi, A., & Jamshidi, E. (2023a). Tilt angle filter effect on noise cancelation and structural edges detection in hydrocarbon sources in a gravitational potential field. *Results in Geophysical Sciences*, 14, 100061.
- Hosseini, S. A., Khah, N. K. F., Kianoush, P., Afzal, P., Shakiba, S., & Jamshidi, E. (2023b). Boundaries determination in potential field anomaly utilizing analytical signal filtering and its vertical derivative in Qeshm Island SE Iran. *Results in Geophysical Sciences*, 14, 100053.
- Jamshidi, E., Kianoush, P., Hosseini, N., & Adib, A. (2024). Scaling-up dynamic elastic logs to pseudo-static elastic moduli of rocks using a wellbore stability analysis approach in the Marun oilfield, SW Iran. *Scientific Reports*, 14(1):19094.
- Kanlı, A. I., Tildy, P., Prónay, Z., Pınar, A., & Hermann, L. (2006). V_s^{30} mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey, *Geophys. J. Int.*, 165 (1), 223–235.
- Kassaras, I., Kalantoni, D., Benetatos, C., Kaviris, G., Michalaki, K., Sakellariou, N., & Makropoulos, K. (2015). Seismic damage scenarios in Lefkas old town (W. Greece). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 3669–3711.
- Kerh, T., & Chu, D. (2002). Neural networks approach and microtremor measurements in estimating peak ground acceleration due to strong motion, *Advances in Engineering Software*, 33 (11-12), 733-742.
- Keshavarz Faraj Khah, N., Salehi, B., Kianoush, P., & Varkouhi, S. (2024). Estimating elastic properties of sediments by pseudo-wells generation utilizing simulated annealing optimization method. *Results in Earth Sciences*, 2, 100024.
- KhodAgholi, M. A., & BAGheri, M. (2020). Seismic data random noise attenuation using LLSP smoothing. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 61(2).
- Khoshmagham, A., Hosseini, N., Shirinabadi, R., Bangian Tabrizi, A.H., Gholinejad, M., & Kianoush, P. (2024). Investigating the Time-Dependent Behavior of Intact Rocks and Fractured Rocks Using Unconfined Relaxation Testing in Underground Coal Mines. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42, 6889-6922.
- Kianoush, P., Mohammadi, G., Hosseini, S.A., Keshavarz Faraj Khah, N., & Afzal, P. (2023a). Inversion of seismic data to modeling the Interval Velocity in an Oilfield of SW Iran. *Results in Geophysical Sciences*, 13:100051.
- Kianoush, P., Mohammadi, G., Hosseini, S. A., Keshavarz Faraj Khah, N., & Afzal, P. (2023b). ANN-based estimation of pore pressure of hydrocarbon reservoirs—a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(5), 302.
- Kianoush, P., Khah, N. K. F., Hosseini, S. A., Jamshidi, E., Afzal, P., & Ebrahimabadi, A. (2023c). Geobody estimation by Bhattacharyya method utilizing nonlinear inverse modeling of magnetic data in Baba-Ali iron deposit, NW Iran. *Heliyon*, 9(11).
- Kianoush, P., Afzal, P., Mohammadi, G., Keshavarz Faraj Khah, N., & Hosseini, S. A. (2023d). Application of Geostatistical and Velocity-Volume Fractal Models to Determine Interval Velocity and Formation Pressures in an Oilfield of SW Iran. *Journal of Petroleum Research*, 33(1402-1), 146-170.
- Kianoush, P., Mahvi, M.R., Keshavarz Faraj Khah, N., Kadkhodaie, A., Jodeiri Shokri, B., & Varkouhi, S. (2024a). Hydrogeological studies of the Sepidan basin to supply required water from exploiting water wells of the Chadormalu mine utilizing reverse osmosis (RO) method. *Results in Earth Sciences* 2, 100012.
- Kianoush, P., Keshavarz Faraj Khah, N., Afzal, P., Jamshidi, E., Bangian Tabrizi, A. H. & Kadkhodaie, A. (2024b). Formation Pressures Determination Utilizing the Integration of Fractal and Geostatistical Modelling in a Hydrocarbon Formation of SW Iran. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 14(40), 11-34.
- Kvasnička, P., Matešić, L., & Ivandić, K. (2011). Geotechnical site classification and Croatian National Annex for Eurocode 8, *GEOFIZIKA*, 28 (1), 83–97.
- Labuta, M., Oprsal, I., Landa, D. A., & Burjánek, J. (2025). Ambient vibrations of a deep maar resonator. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 188, 109072.

- Lombardo, G., Langer, H., Gresta, S., Rigano, R., Monaco, C., & De Guidi, G. (2006). On the importance of geolithological features for the estimate of the site response: the case of Catania metropolitan area (Italy), *Natural Hazards*, 38 (3), 339-354.
- Mukhopadhyay, M., & Bormann, P. (2004). Low cost seismic microzonation using microtremor data: an example from Delhi, India, *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 (3), 271-280.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface, *Quarterly Report of RTRI*, 30 (1), 25-33.
- Okada, H. (2003). The microseismic survey method, *Society of Exploration Geophysicists of Japan, Translated by Koya Suto as Geophysical Monograph Series Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Geophysical Monograph Series*, No. 12.
- Parolai, S., & Galiana-Merino, J. J. (2006). Effect of transient seismic noise on estimates of H/V spectral ratios, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96 (1), 228-236.
- Parolai, S., Richwalski, S. M., Milkereit, C., & Bormann, P. (2004). Assessment of the stability of H/V spectral ratios from ambient noise and comparison with earthquake data in the Cologne area (Germany), *Tectonophysics*, 390 (1-4), 57- 73.
- Rajput, A., Ajay Pratap Singh, A.P., Kumar Pal, S., & Singh, P. (2025). Determining shallow S-Wave velocity structure and site response parameters in Gwalior basin, Central India, through microtremor measurements. *Near Surface Geophysics*, 23(1), 49 – 68.
- Riepl, J., Bard, P. Y., Hatzfeld, D., & Papaioannou, C. (1998). Nechtschein S. Detailed evolution of site response estimation methods across and along the sedimentary valley of Volvi (EURO-SEISTEST), *Bull Seismol Soc Am*, 88 (2), 488–502.
- Saragiotis, C. D., Hadjileontiadis, L. J., & Panas, S. M. (2002). PAI-S/K: a robust automatic seismic P phase arrival identification scheme, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 40 (6), 1395-1404.
- Tezcan, S. S., Kaya, I.E., BAL, E., & Ozdemir, Z. (2002). Seismic amplification at Avcilar, Istanbul, *Eng. Struct.* 24 (5), 661-667.
- Song, C., Yu, C., Li, Z., Pazzi, V., Del Soldato, M., Cruz, A., & Utili, S. (2021). Landslide geometry and activity in Villa de la Independencia (Bolivia) revealed by InSAR and seismic noise measurements. *Landslides*, 18(8), 2721-2737.
- Trnkoczy, A. (2012). Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm”, In: *Bormann, P. (Ed.) New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), p. 1-20.
- Tuladhar, R. (2002). Seismic Microzonation of the Greater Bangkok with Microtremor Observations, Thesis for degree of Master of Engineering, *Asian Institute of Technology, School of Civil Engineering*.
- Vera Rodriguez, I. (2011). Automatic Time-picking of Microseismic Data Combining STA/LTA and the Stationary Discrete Wavelet Transform, *Recovery 2011, CSPG CSEG CWLS Joint Annual Convention, Verarodr, Canada*.
- Varkouhi, S., Tosca, N.J., Cartwright, J.A., Guo, Z., Kianoush, P., & Behl, R.J. (2024). Pervasive accumulations of chert in the equatorial Pacific during the early eocene climatic optimum. *Marine and Petroleum Geology*, 167, 106940.
- Vera Rodriguez, I., Bonar, D., & Sacchi, M. (2011). Improvements in microseismic data processing using sparsity and non-linear inversion constraints, *Recorder, Official Publication of the Canadian Society of Exploration Geophysicists*, 36 (9), 24-28.
- Wahba, D., Omran, A. A., Adly, A., Gad, A., Arman, H., & El-Bagoury, H. (2024). Optimizing Site Selection for Construction: Integrating GIS Modeling, Geophysical, Geotechnical, and Geomorphological Data Using the Analytic Hierarchy Process. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(1), 3.
- Wong, J., Han, L., Bancroft, J. C., & Stewart, R. R. (2009). Automatic time-picking of first arrivals on noisy microseismic data, CSPG CSEG CWLS Convention”, *Calgary, Canada*.
- Xiantai, G., Zhimin, L., Na, Q., & Weidong, J. (2011). Adaptive picking of microseismic event arrival using a power spectrum envelope. *Computers & geosciences*, 37(2), 158-164.
- Xu, W., Wu, J., & Gao, M. (2023). Seismic Hazard Analysis of China's Mainland Based on a New Seismicity Model. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(2), 280-297.
- Zaharia, B., Radulian, M., Popa, M., Grecu, B., & Tataru, D. (2008). Estimation of the Local Response Using the Nakamura Method for Bucharest area, *Romanian Reports in Physics*, 60 (1), 131-144.
- Zhang, H. J., Thurber, C., & Rowe, C. (2003). Automatic P-wave arrival detection and picking with multi scale wavelet analysis for single-component recordings, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 93 (5), 1904-1912.