

## Determining the Natural Frequency of Behbahan City Soil Using Microtremor Data Analysis

Sasan Motaghed <sup>a\*</sup>, Amin Nakhlian <sup>b</sup>, Lotfolla Emadali <sup>a</sup>, Nasrollah Eftekhari <sup>c</sup>, Heshmatalla Mahmoudian <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Assistant Professor in Civil Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

<sup>b</sup> MSc in Structural Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

<sup>c</sup> Assistant Professor in Civil Engineering, Yasouj University, Choram, Iran

<sup>d</sup> MSc in Geography, Center of monitoring Assessment and Prediction of Natural Disasters (MAP), Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

Received: 11 January 2023

Revised: 15 February 2023

Accepted: 16 March 2023

### Abstract

Soil deformation can have a major impact on the seismic design inputs of structures. In practice, the soil is always bounded by rocks. In this case, the phenomenon of resonance or beating due to the closeness of the frequency of the structure to the natural frequency of the soil can be very destructive. For this reason, the natural frequency of the soil is considered in the construction regulations in presenting the spectral shape. To determine the natural frequency of soil in Behbahan city, the H/V method based on non-destructive measurement of ambient noise, which is an inexpensive and successful method for evaluating soil properties, was used. After recording microtremor data in 69 stations, H/V analysis was done to estimate the resonance frequency at the points. Then, natural frequency maps of the soil were presented. The results showed that the natural frequency range of soil in Behbahan city is between 0.57 and 5.42 Hz. Therefore, this soil is included in soil types 2 and 3 (standard No. 2800). Moreover, based on the construction information, a resonance-prone areas map was provided. In the central areas, the soil type is mainly type 3. Most of the buildings in this area are low codes, so it requires more precision in future developments. In the northwest and southeast of the city, the period of soil resonance is more than one second; therefore, in the construction of tall buildings in these areas, more strict measures should be taken into account to control the structures.

**Keywords:** GIS, Local Site Effects, Soil Type, Resonance, H/V Analysis

\*Corresponding author: Sasan Motaghed Email: motaghed@bkatu.ac.ir Tel:+989166714358

**How to cite this Article:** Motaghed, S., Nakhlian, A., Emadali, L., Eftekhari, N., & Mahmoudian, H. (2024). Determining the natural frequency of Behbahan city soil using microtremor data analysis. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(4),233-251.

DOI:10.22067/geoeh.2023.80563.1326



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

## Geography and Environmental Hazards

Volume 12, Issue 4 - Number 48, Winter 2024

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.80563.1326>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شماره ۴۸ و هفتم، زمستان ۱۴۰۲، صص ۲۵۱-۲۳۳  
مقاله پژوهشی

### تعیین فرکانس طبیعی خاک شهر بهبهان با استفاده از تحلیل داده‌های میکروترمور

ساسان معتقد<sup>۱</sup> - استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

امین نخلیان - کارشناس ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

لطف‌الله عمادعلی - استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

نصراله افتخاری - استادیار، دانشکده صنعت و معدن چرام، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران

حشمت اله محمودیان - کارشناس ارشد جغرافیا، مرکز پایش، ارزیابی و پیش‌بینی بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی، دانشگاه صنعتی

خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵

#### چکیده

تغییر شکل خاک می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر ورودی‌های طراحی لرزه‌ای سازه‌ها داشته باشد. در عمل، خاک اغلب توسط سنگ‌های پیرامونی احاطه شده است. در این حالت، وقوع پدیده تشدید یا تشدید لحظه‌ای به دلیل نزدیک بودن فرکانس سازه به فرکانس طبیعی خاک، می‌تواند اثرات مخربی داشته باشد. از این رو، فرکانس طبیعی خاک در آیین‌نامه‌های ساختمانی در ارائه شکل طیف مورد توجه است. در این مقاله، از روش  $H/V$  بر پایه اندازه‌گیری غیر مخرب نوفه‌های محیطی برای تعیین فرکانس طبیعی خاک شهر بهبهان استفاده شده است. این روش روشی ارزان و موفق برای ارزیابی خصوصیات خاک است. بعد از ثبت داده‌های میکروترمور در ۶۹ ایستگاه، تحلیل  $H/V$  برای برآورد فرکانس تشدید نقاط برداشت شده انجام گردید. سپس نقشه‌های فرکانس طبیعی خاک ارائه گردید. نتایج نشان می‌دهد محدوده فرکانس طبیعی خاک در شهر بهبهان در بازه  $0/57$  تا  $5/42$  هرتز است. این نوع خاک در محدوده خاک نوع ۲ و ۳

Email: motaghed@bkatu.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۶۶۷۱۴۳۵۸

نحوه ارجاع به این مقاله:

معتقد، ساسان؛ نخلیان، امین؛ عمادعلی، لطف‌الله؛ افتخاری، نصرالله؛ محمودیان، حشمت‌الله. (۱۴۰۲). تعیین فرکانس طبیعی خاک

شهر بهبهان با استفاده از تحلیل داده‌های میکروترمور. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲(۴). صص ۲۵۱-۲۳۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.80563.1326>

(استاندارد ۲۸۰۰) قرار می‌گیرد. همچنین بر اساس اطلاعات ساخت‌وساز در پهنه شهر بهبهان، نقشه مناطق مستعد تشدید ارائه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** سیستم اطلاعات جغرافیایی، اثرات محلی ساختگاه، نوع خاک، تشدید، تحلیل H/V.

#### ۱- مقدمه

اثرات محلی پارامترهای زمین‌شناسی بر لرزش زمین، پارامتر مهمی در مهندسی زلزله است (محمدیان، ۱۳۹۹). اولین بار، محققین ژاپنی رابطه‌ای در حوزه فرکانس برای نسبت حرکت سطح به موج فرودی با فرض مانایی امواج برشی عمودی SH ارائه کردند (سزاوا<sup>۱</sup>، ۱۹۳۰؛ کانای<sup>۲</sup>، ۱۹۵۷). آن‌ها با فرض رفتار ویسکو الاستیک، پریودهای طبیعی خاک ( $T_n$ ) را برای یک و دو لایه افقی با سرعت ثابت ارائه کردند:

$$T_n = \frac{4H}{V_s(2n - 1)} \quad (1)$$

در این رابطه،  $n$  نشان دهنده مد ارتعاش،  $H$  عمق خاک و  $V_s$  سرعت موج برشی در خاک است. به این ترتیب، طیف‌های فوریه زلزله، قله‌هایی در فرکانس‌های طبیعی خاک دارند که معمولاً در نتیجه بزرگ‌نمایی امواج برشی هلنا توسط خاک است.

در ۱۹ سپتامبر ۱۹۸۵، زمین‌لرزه‌ای با بزرگای  $M_s = 8.1$  مکزیک را لرزاند. مرکز آن زلزله در اقیانوس آرام در نزدیکی ایالت میچوآکان قرار داشت. این زلزله در ۴۰۰ کیلومتر دورتر از مرکز و در شهر مکزیکوسیتی، باعث بروز خسارات بسیاری گردیده و باعث فرو ریختن ساختمان‌های مرتفع مدرن گردید (روزنبلوت و ملی<sup>۳</sup>، ۱۹۸۶). این در حالی است که در فواصل نزدیک‌تر به مرکز زلزله، حجم خسارات قابل توجه نبود. بررسی اثرات این زلزله نشان داد که در طراحی لرزه‌ای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، تغییر شکل خاک باید در نظر گرفته شود؛ زیرا در مواردی که خاک مستعد تشدید است، این امر به‌طور قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تأثیر می‌گذارد (پاپ و کولار<sup>۴</sup>، ۲۰۱۸). مطالعات عددی نشان می‌دهد که نادیده گرفتن پدیده تشدید، ممکن است به‌طور قابل توجهی پاسخ‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. روش‌های طراحی لرزه‌ای موجود - که اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های حرکت نیرومند زمین را شامل می‌شوند - به‌ندرت می‌توانند تفاوت‌های بین اندازه‌گیری‌های شتاب‌نگاری و پیش‌بینی‌های نظری را که معمولاً ناشی از تأثیر شرایط محلی خاک است، در نظر بگیرند (پاپ و کولار، ۲۰۱۸).

به‌طور کلی، پاسخ ساختگاه را می‌توان از رکوردهای ابزاری با حذف اثرات منبع و مسیر از سری‌های زمانی ثبت شده برآورد نمود، با این فرض که اثرات مسیر برای رکوردهای روی سنگ بستر و روی خاک سطح مجاور یکسان

1 Sezawa

2 Kanai

3 Rosenblueth and Meli

4 Pap and Kollár

است (صفاری و همکاران، ۱۴۰۱). هنگامی که رکورد حرکت زمین در سنگ بستر در دسترس نباشد، می توان از تکنیک های ساده سازی شده که فقط به رکوردهایی در لایه های بالایی نیاز دارد، استفاده کرد. در این زمینه پرکاربردترین روش ها، روش ساختگاه مرجع<sup>۱</sup> (بورچرت<sup>۲</sup>، ۱۹۷۰) و تکنیک تابع گیرنده<sup>۳</sup> لرزه ای (لرمو و چاوز گارسیا<sup>۴</sup>، ۱۹۹۴؛ لانگستن<sup>۵</sup>، ۱۹۷۷). بر اساس مقادیر نسبت طیفی هستند. این روش ها را می توان برای انواع مختلف داده ها از جمله اندازه گیری های میکروترومور<sup>۶</sup>، رکوردهای لرزه ای ضعیف<sup>۷</sup> یا شتاب نگاشت های حرکت نیرومند زمین<sup>۸</sup> استفاده کرد. اخیراً، تحلیل های نوفه<sup>۹</sup> به دلیل ارزان بودن و قابلیت اجرای سریع در مناطق وسیع به روشی بسیار جذاب در مطالعات ریزپهنه بندی تبدیل شده اند. به منظور برآورد پاسخ های ساختگاه، در مطالعات مختلف رکورد نوفه به پنج روش استفاده شده است: (۱) طیف مطلق<sup>۱۰</sup>، (۲) نسبت طیفی مبتنی بر ساختگاه مرجع<sup>۱۱</sup> (لرمو و چاوز گارسیا<sup>۱۲</sup>، ۱۹۹۴)، (۳) نسبت H/V (ناکامورا<sup>۱۳</sup>، ۱۹۸۹ و ۲۰۰۰؛ گاواسه و همکاران<sup>۱۴</sup>، ۲۰۱۹)، (۴) وارونگی ساختار سرعت از طریق رکوردهای آریله و (۵) تحلیل فاز اتوکورلوگرام یک طرفه مؤلفه های افقی<sup>۱۵</sup> تکنیک روش طیفی فاز فوریه (FPSM) (پاپ و کولار<sup>۱۶</sup>، ۲۰۱۸).

در ایران، مسئله تعیین فرکانس طبیعی خاک مورد توجه محققین بسیاری بوده است. در این زمینه، ادیب (۱۳۹۵) طبقه بندی ساختگاه بر مبنای فرکانس طبیعی را با استفاده از داده های لرزه ای برای شهر اردکان انجام داد. البته بیشتر تحقیقات بر استفاده از رکوردهای بالای لایه متمرکز بوده است. به عنوان مثال، فلاحی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از اندازه گیری های میکروترومور، فرکانس غالب و طبقه بندی ساختگاه را در شمال غرب ایران گزارش کردند. کمک پناه و همکاران<sup>۱۷</sup> (۲۰۰۲) اثرات ساختگاهی را در شرق ایران طبقه بندی نمودند. حکیمی و همکاران (۱۳۹۷) اندازه گیری میکروترومور را برای تعیین فرکانس طبیعی خاک شهر زنجان مورد استفاده قرار دادند. لامعی و همکاران (۱۳۹۴) مشخصات خاک را برای کرمانشاه ارائه داده اند.

1 reference site method

2 Borchardt

3 receiver function technique

4 Lermo and Chávez-García

5 Langston

6 microtremor

7 weak seismicity recordings

8 strong motion accelerograms

9 noise

10 absolute spectra

11 spectral ratio with respect to a reference site

12 Lermo, & Chávez-García

13 Nakamura

14 Kawase et al.

15 analysing the phase of the one-sided autocorrelogram of the horizontal component

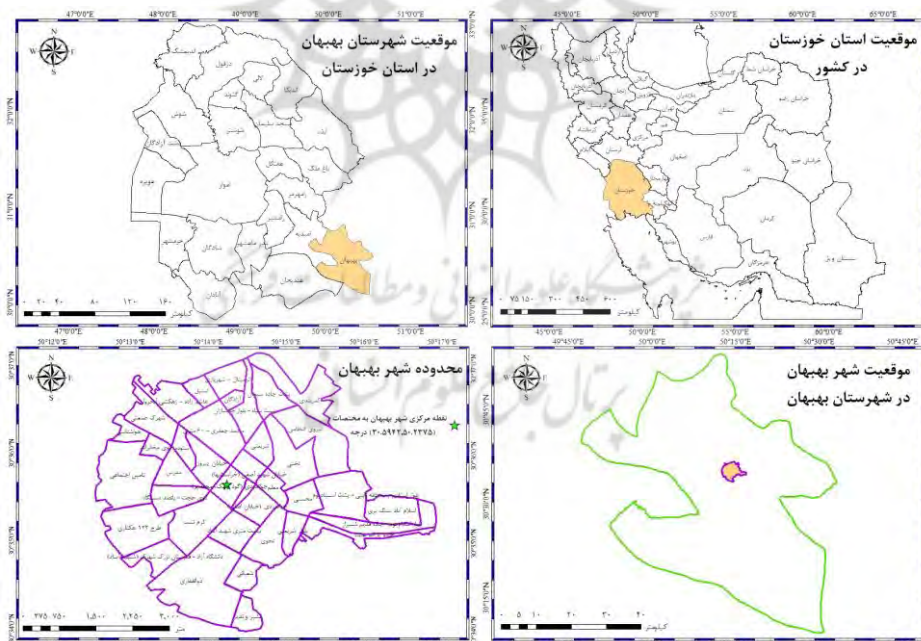
16 Pap and Kollár

17 Komak Panah et al.

توسعه فرآیند تعیین فرکانس طبیعی خاک در کل پهنه سرزمینی می‌تولند به ارائه نقشه جامع فرکانس در آیین‌نامه‌های ساختمانی و لرزه‌ای (هاند استلنارد ۲۸۰۰) کمک کرده و نقش مؤثری را در طراحی بهینه لرزه‌ای سازه‌ها ایفا نماید (محمدیان، ۱۳۹۹). در این تحقیق، بر اساس برداشت جامع میکروترمور منطقه لرزه‌خیز بهبهان، فرکانس طبیعی خاک با استفاده از روش ناکامورا محاسبه شده است. برای این منظور، از داده‌های میکروترمور اندازه‌گیری شده در تعداد ۶۹ ایستگاه در سطح شهر استفاده شده است. علاوه بر این، به منظور صحت سنجی نتایج، اطلاعات یک گمانه ژئوتکنیک در سطح شهر با نتایج به دست آمده از تحلیل مقایسه شده است.

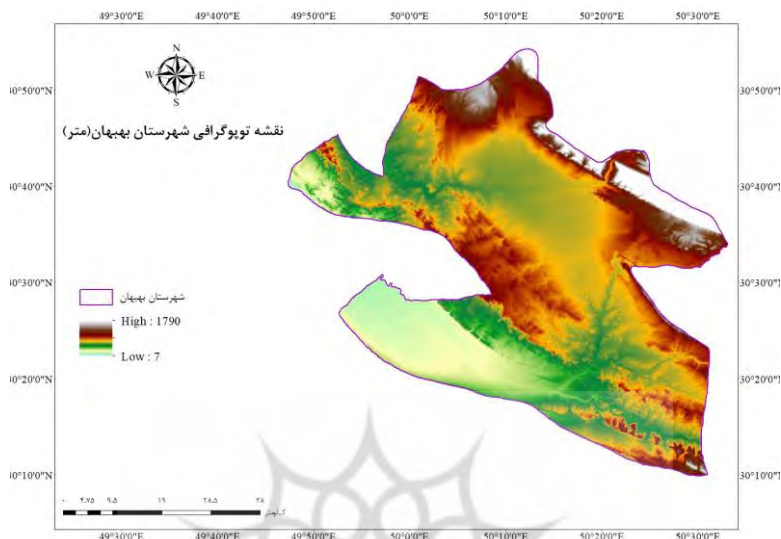
## ۲- منطقه مورد مطالعه

شهرستان بهبهان در جنوب شرقی استان خوزستان و در فاصله ۲۰۰ کیلومتری از مرکز استان در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های زاگرس بین دو منطقه نفتون آججری و گچساران قرار گرفته است. این شهرستان در طول جغرافیایی  $50^{\circ} 16'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $30^{\circ} 35'$  شمالی در ارتفاع متوسط ۳۲۰ متری از سطح مبنای ارتفاعی (MSL) واقع شده است. بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیت شهر بهبهان ۱۲۲۶۰۴ نفر برآورد شده است. وسعت منطقه شهری بهبهان،  $22/3$  کیلومترمربع است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی بهبهان

شکل ۲ نقشه توپوگرافی شهر بهبهان را نشان می‌دهد. نقشه پروفیل شیب زمین منطقه مورد مطالعه، نشان دهنده تغییرات شیب زمین در جهت جنوب غربی به شمال شرقی (جهت حرکت صفحات تکتونیکی در منطقه) است.



شکل ۲- نقشه تغییرات ارتفاعی شهرستان بهبهان

در شمال دشت بهبهان بخشی از رشته کوه زاگرس به نام کوه خاییز قرار دارد. ارتفاع بلندترین نقاط در این قسمت، ۱۶۸۵ متر بر فراز تنگ شیخ و ۲۱۰۰ متر در کوه حاتم است. در جنوب دشت بهبهان، کوه‌های پازنان و دریز کوه با حداکثر ارتفاع ۶۰۰ متر، در غرب کوه ورزرد با ارتفاع ۷۸۵ متر و در شرق کوه رمه چر با حداکثر ارتفاع ۷۰۰ متر واقع شده است. غالب سازندهای تشکیل دهنده قسمت کوهستانی مربوط به دوران سوم زمین‌شناسی و قسمت دشت مربوط به دوران کواترنری یا دوره چهارم زمین‌شناسی است. دو رودخانه پر آب مارون و خیرآباد از نزدیکی این شهر عبور می‌کنند. در این شهر سه سد، دو پالایشگاه گاز، دو نیروگاه برق و یک کارخانه سیمان قرار دارد. اشیاء به دست آمده در کشفیات باستان‌شناسی شهر قدیمی بهبهان (ارجان) قدمتی در حد هزاره دوم پیش از میلاد مسیح دارند.

ارجان شهری بزرگ و پر رونق با باغ و بوستان‌های بسیار بوده است که به تدریج رو به ویرانی می‌رود. عوامل متعددی در ویرانی ارجان و رکود آن مؤثر بوده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها وقوع زلزله‌های پی‌درپی قرن پنجم هجری قمری در سال‌های ۴۴۵ و ۴۷۸ هجری قمری است. این زلزله‌ها موجب شکسته شدن سد ارجان و مختل شدن امور زراعی و کشاورزی و تخریب دیوار دفاعی شهر شد. به دنبال حوادث مذکور، آبادی بهبهان که به فاصله کمی (حدود ۸

کیلومتر) از ارجان قرار داشت به تدریج پذیرای مردم ارجان گردید و سرانجام در قرن هشتم هجری قمری جایگزین ارجان شد.

لرزه‌خیزی ایران به‌طور عمده ناشی از همگرایی صفحات اوراسیا و عربستان است. زعفرانی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) با اصلاح منطقه بندی لرزه‌ای نوروزی<sup>۲</sup> (۱۹۷۶) که در آن ایران را به ۲۳ منطقه تقسیم کرده بود، ایران را به ۱۵ ایالت لرزه‌خیز تقسیم کردند. بر اساس این تقسیم‌بندی، بهبهان در ایالت شماره ۵ (یعنی ایالت زاگرس) قرار دارد. در این ایالت، نرخ لرزه‌خیزی ۶۷۷، مقدار  $b$  برابر با ۰/۸۹ و حداکثر بزرگای زلزله ۷/۳ (بر حسب بزرگای گشتاوری) است. ایالت زاگرس، لرزه‌خیزی بسیار بالایی داشته و زلزله‌خیزترین منطقه ایران است. بیش از ۵۰ درصد کل زلزله‌های ایران در گستره زاگرس روی داده است (میرزایی و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۹۸۸). متوسط ضخامت پوسته در محدوده راندگی زاگرس برابر ۵۰ کیلومتر است. ضخامت به سوی جنوب غرب به تدریج افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در زاگرس مرتفع (حاشیه شمال شرقی زاگرس) این ضخامت برابر ۵۵ کیلومتر یا بیشتر است. از طرف دیگر، در شمال خلیج فارس و در تپه‌ماهورهای زاگرس (مانند شهر بهبهان) مقداران ضخامت به حدود ۳۵ کیلومتر می‌رسد (بربریان<sup>۴</sup>، ۱۹۸۱). بر اساس ویرایش چهارم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران) بهبهان در منطقه خطر نسبی زیاد واقع شده است، بنابراین شتاب پایه  $0.3g$  برای این منطقه توصیه شده است. با این توضیحات و شواهد، مشخص می‌شود که شهر بهبهان در منطقه‌ای با پتانسیل رخداد زلزله‌های خسارت‌بار قرار دارد. به همین جهت، انجام مطالعات شرایط محلی خاک ساختگاه در این منطقه ضروری به نظر می‌رسد.

### ۳- روش شناسی

تکنیک بدون ساختگاه مرجع<sup>۵</sup>، که به نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی و عمودی (H/V) سیگنال ثبت شده در سطح زمین نیاز دارد، به‌طور گسترده‌ای در تعیین پاسخ‌های ساختگاه استفاده شده است (غفران و اتکینسون<sup>۶</sup>؛ نتایج نشان می‌دهد که این تکنیک تخمین قابل‌اعتمادی از فرکانس‌های اصلی تشدید رسوبات نرم ارائه می‌دهد. باین وجود، این روش اطلاعات مربوط به هارمونیک‌های بالاتر را ارائه نمی‌کند و ضرایب بزرگ‌نمایی به‌دست‌آمده عموماً کمتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده با تکنیک‌های دیگر است (بیندی و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۰۰؛ ثابت<sup>۸</sup>، ۲۰۱۹؛ واسلو و همکاران<sup>۹</sup>،

1 Zafarani et al.

2 nowroozi

3 Mirzaei, et al

4. Berberian

5 non-reference site technique

6 Ghofran and Atkinson

7 Bindi et al.

8 Thabet

9 Vassallo et al.

۲۰۲۲). در این روش، طیف مؤلفه‌های شمالی-جنوبی و شرقی-غربی برای به دست آوردن طیف مؤلفه‌های افقی به روش ریشه دوم میانگین مجذور ادغام می‌شوند. سپس نسبت‌های طیفی بین مؤلفه‌های افقی و عمودی (H/V) محاسبه شده و در نهایت، نسبت H/V ساختگاه با محاسبه میانگین حسابی همه نسبت‌های طیفی محاسبه شده، برآورد می‌شود. در این تحقیق از اپلیکیشن MiTA محصول شرکت دانش‌بنیان "آی‌ده تحقیق نوآوری کلور نوفه" برای برداشت داده‌های میکروترمور استفاده شده است. این اپلیکیشن از قابلیت سنسورهای حساس گوشی‌های هوشمند برای نوفه‌های محیطی استفاده می‌کند. برای کاهش اثر نوفه‌های گذرا مانند حرکت وسایل نقلیه، اندازه‌گیری‌ها در شب یا ساعات آرام روز انجام شد. همچنین برای حفاظت لرزه‌نگار از باد و کاهش اثر آن، دستگاه در زیر یک جعبه قرار داده شد. در مراحل برداشت داده‌ها، تمامی نکات ارائه شده در دستورالعمل برداشت نوفه‌های محیطی پروژه سیزمه<sup>۱</sup> (۲۰۰۵) رعایت شد. به‌عنوان نمونه، تلاش گردید که ابزار روی خاک نرم، خاک اشباع از آب و همچنین بستر قلوه‌سنگی قرار نگیرد، ابزار همواره روی سطح هموار و افقی قرار داشته و باری نیز بر آن اعمال نشد. در تمامی برداشت‌ها سعی بر این بود که محل برداشت نوفه در نزدیکی بزرگراه‌ها، خیابان‌ها و ماشین‌آلات ساختمانی، سازه‌های زیرزمینی مانند پارکینگ‌ها و غیره قرار نداشته باشد. برای پردازش داده‌ها از نرم‌افزار ژئوپسی<sup>۲</sup> استفاده شده است (www.Geopsy.org). به این منظور در هر ایستگاه، سری زمانی به پنجره‌هایی با طول معین تقسیم می‌شود. سپس با اعمال فیلتر میان‌گذر، فرکانس‌های نامطلوب حذف می‌شوند (ولا و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۳).

برای حذف نوفه‌های گذرای ناشی از منابعی مانند راه رفتن انسان‌ها، ترافیک در معابر مجاور ایستگاه‌ها، ماشین‌آلات، فعالیت کارخانه‌ها و غیره از الگوریتم Anti-triggering روی نوفه فیلتر شده استفاده شده است. سپس با حذف اثر نشست طیفی، هموارسازی و تعیین روند کلی تغییرات طیفی انجام می‌شود. به‌منظور محاسبه نسبت H/V، سری‌های زمانی با تابع کسینوس ۵ درصد پردازش شده‌اند. FFT برای هر جزء محاسبه شد و طیف‌ها با پنجره هانینگ<sup>۴</sup> با پهنای باند ثابت در مقیاس فرکانس لگاریتمی هموار شده‌اند. تصحیح پاسخ ابزاری نیز انجام شده است. بر اساس این محاسبات، نسبت طیفی ناکامورا محاسبه و میانگین و انحراف معیار داده شده است.

#### ۴- داده‌ها و نتایج

در این تحقیق، در ۷۹ نقطه از شهر بهبهان نوفه‌های محیطی برداشت شد. شکل ۵ موقعیت ایستگاه‌های برداشت در سطح شهر را نشان می‌دهد. ایستگاه‌ها در فواصل تقریباً ۵۰۰ متری نسبت به یکدیگر روی پنج مقطع در امتداد تقریبی شمالی-جنوبی شهر قرار دارند. موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری به‌گونه‌ای انتخاب شده است که کل محدوده

1 SESAME

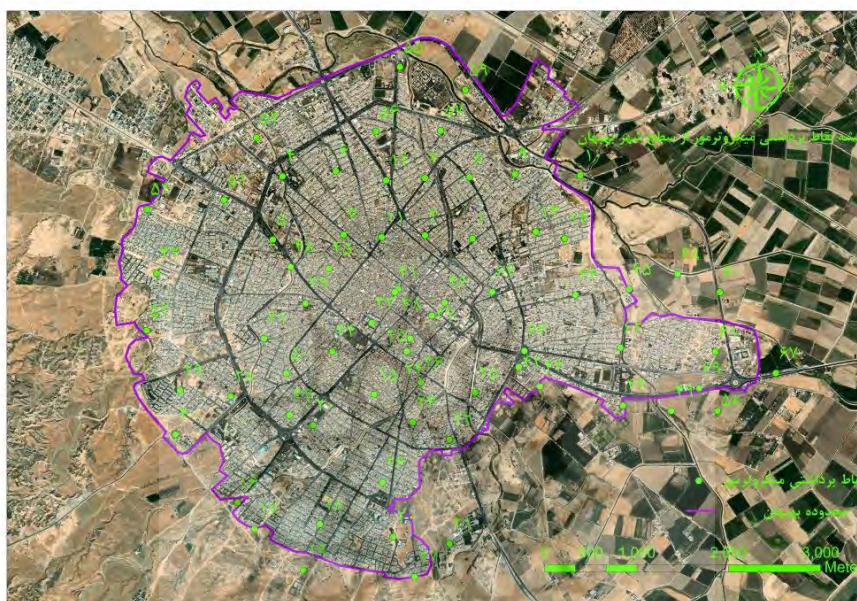
2 geopsy

3 Vella et al

4 Hanning window

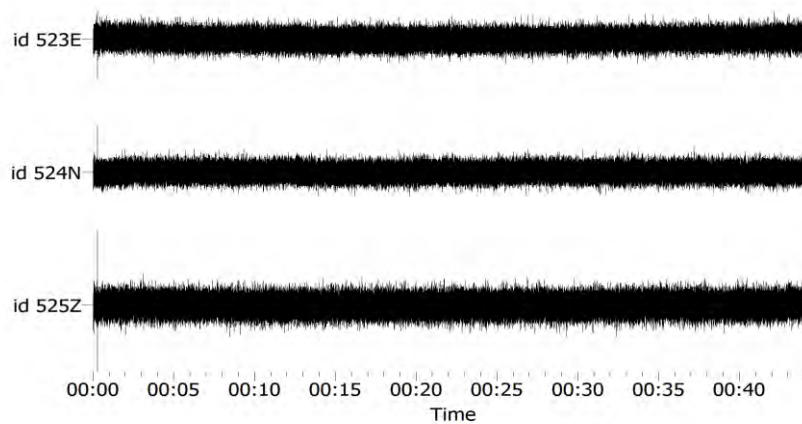


ساخت‌وساز شهر را پوشش دهند. از ۷۹ نقطه برداشت شده، ۵ نقطه به دلیل مناسب نبودن برداشت‌ها و ۵ نقطه دیگر به دلیل اینکه در محدوده‌ی مسکونی شهر بهبهان نبودند، در محاسبات لحاظ نشده و پردازش بر روی ۶۹ نقطه باقیمانده صورت گرفته است. اطلاعات تکمیلی مربوط به داده‌های برداشت شده در **جدول پ ۱** (در پیوست) ارائه شده است.

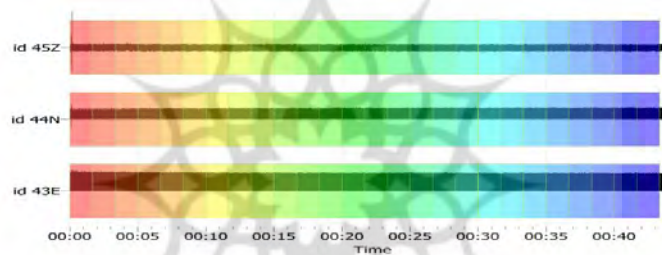


شکل ۳- توزیع نقاط برداشت شده برای محاسبات میکرو اقلیم شهر بهبهان

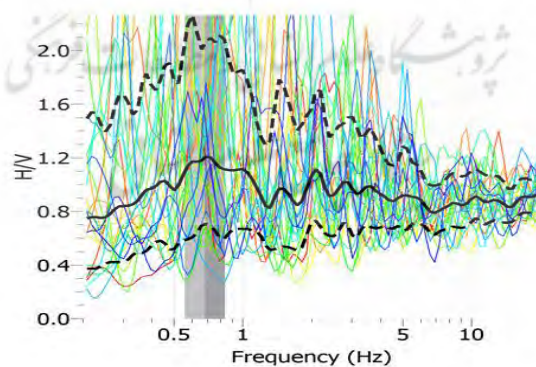
**شکل ۴** نمونه‌ای از میکرو اقلیم‌های سه مؤلفه‌ای ثبت شده (در نقطه ۴۱) را که شامل مؤلفه‌های شرقی-غربی (E)، شمالی-جنوبی (N) و قائم (Z) است، نشان می‌دهد. **شکل ۵** نشان دهنده انتخاب پنجره‌های زمانی مناسب روی لرزه‌نگاشت سه مؤلفه‌ای در نقطه ۴۱ است. برای هر نقطه برداشت شده، سه منحنی H/V مشخص شد. به‌عنوان مثال برای نقطه شماره ۴۱، همان‌گونه که در **شکل ۶** نشان داده شده است، خطوط سیاه‌رنگ منحنی‌های میانگین، ۱۶ درصد و ۸۴ درصد را نشان می‌دهد. بر اساس این اطلاعات، فرکانس طبیعی خاک در این ایستگاه بین ۰/۵ تا ۰/۸ برآورد می‌شود.



شکل ۴- نمونه‌ای از میکروترموهای سه مؤلفه‌ای ثبت شده برای نقطه ۴۱

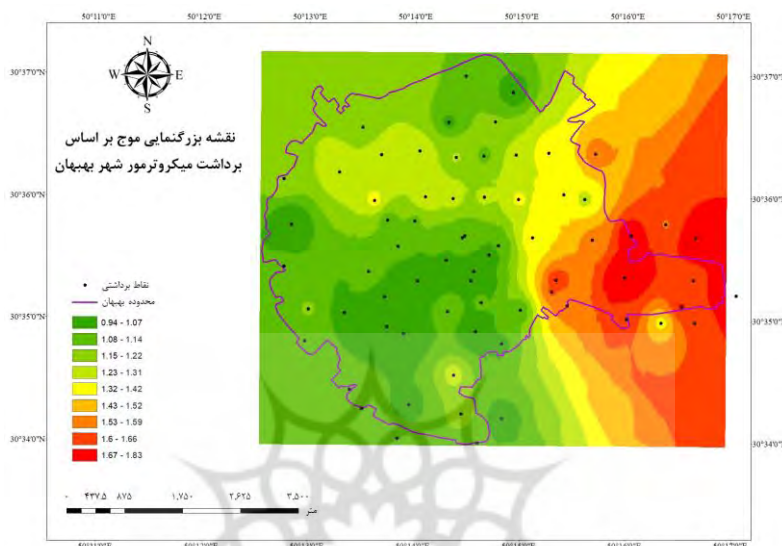


شکل ۵- انتخاب پنجره‌های زمانی مناسب روی لرزه‌نگاشت سه مؤلفه‌ای در نقطه ۴۱



شکل ۶- نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی به قائم (H/V) برای نقطه ۴۱

این عملیات برای تمام ایستگاه‌های اندازه‌گیری تکرار و بر اساس آن نقشه‌های ماکزیمم دامنه H/V (نقشه بزرگنمایی موج)، فرکانس طبیعی خاک، خطوط منحنی میزان پر بود غلب خاک تهیه شده و نوع خاک بر اساس استاندارد ۲۸۰۰، محاسبه شده است. این نتایج به ترتیب در شکل‌های ۹ الی ۱۳ دیده می‌شود.



شکل ۷- نقشه بزرگنمایی موج بر اساس برداشت میکروترمور شهر بهبهان

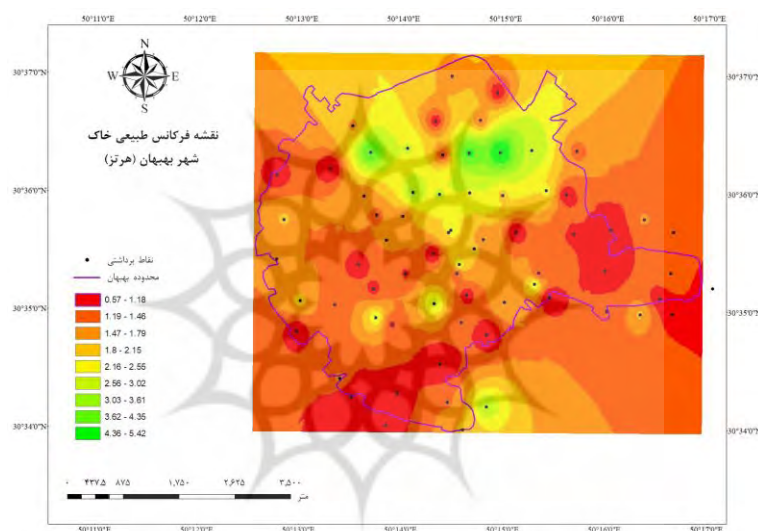
نقشه بزرگنمایی موج نشان می‌دهد که بخش شرقی شهر بزرگنمایی حدود ۲ برابری در امواج را نشان می‌دهد. تقویت حرکات لرزه‌ای عمدتاً در نهشته‌های آبرفتی رخ می‌دهد که ویژگی‌های آن‌ها (هندسه و سرعت موج) فرآیند تقویت را کنترل می‌کند (Semblat, et al., 2003). ممکن است پراکندگی موج قبل از توجیهی نیز در اطراف تغییرات شدید توپوگرافی مانند تاج‌ها یا شیب‌های تند تپه‌ها یافت شود. چنین پدیده‌هایی را اثرات توپوگرافی ساختگاه می‌نامند (Chávez-García, et al., 1996). تقویت امواج لرزه‌ای در حوضه‌های آبرفتی به‌طور کلی بزرگ‌تر از آن چیزی است که در مورد بی‌نظمی‌های توپوگرافی مشاهده و برآورد شده است. این پدیده‌ها می‌توانند حرکت لرزه‌ای حادثه را تقویت کرده و پیامدهای آن را بر سازه‌ها و ساختمان‌ها افزایش دهند.

ایستگاه اندازه‌گیری ۴۱ نقطه‌ای است که اطلاعات گمانه اکتشافی در فاصله کمتر از ۵ متر برای آن در دسترس است. گمانه‌زنی با ماشین حفاری به روش دورانی در خردادماه سال ۱۳۸۹ انجام شده است. بر اساس گزارش ژئوتکنیک، خاک دست‌خورده عمدتاً رسی و به میزان محدودی دانه‌ای است. عمق گمانه ۱۵ متر، عمق آب حدود ۵ متر و عمق خاک دست‌ریز ۴۰ سانتی‌متر گزارش شده است. اعداد SPT در جدول ۱ داده شده است. در جدول مقدار  $\bar{N}_{1(60)} = 46.1$  است.

جدول ۱- اعداد SPT از گمانه اکتشافی (عمق ۱۵ متر)

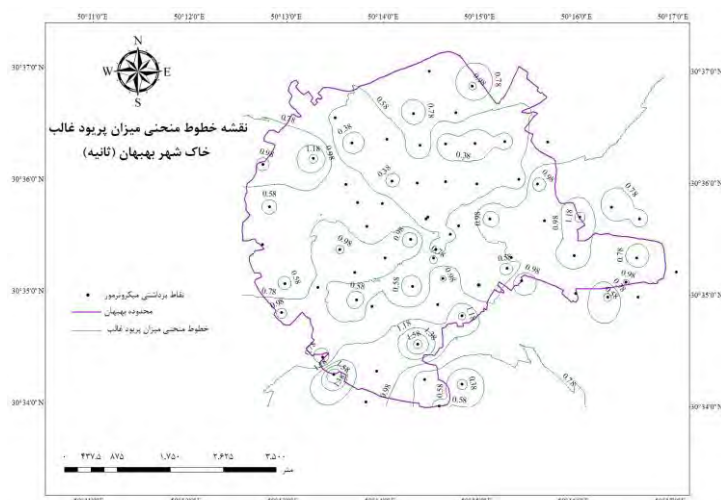
|    |    |    |    |    |    |   |    |                          |
|----|----|----|----|----|----|---|----|--------------------------|
| ۱۴ | ۱۲ | ۱۰ | ۸  | ۶  | ۴  | ۲ | ۰  | عمق (متر)                |
| ۵۰ | ۴۲ | ۵۰ | ۴۳ | ۵۰ | ۴۳ |   | ۴۵ | SPT( $\bar{N}_{1(60)}$ ) |

بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ و مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان، خاک نوع ۲ به صورت «خاک خیلی متراکم یا سنگ سست، شامل - شن و ماسه خیلی متراکم، رس بسیار سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر که مشخصات مکانیکی آن با افزایش عمق به تدریج بهبود یابد یا سنگ‌های آذرین و رسوبی سست، مانند توف و یا سنگ متورق و یا کاملاً هوازده» و با  $\bar{N}_{1(60)} > 50$  توصیف شده است (استاندارد ۲۸۰۰، ۱۳۹۸).



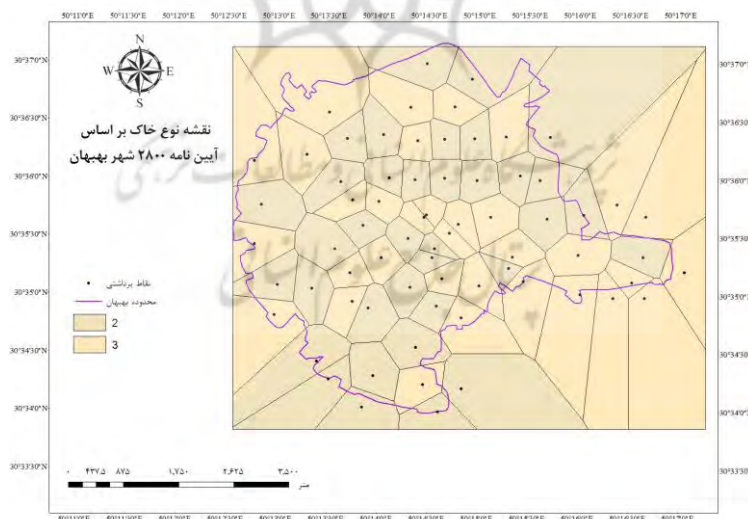
شکل ۸- نقشه فرکانس طبیعی خاک شهر بهبهان (هرتز)

به این ترتیب نقطه مورد نظر خواصی بین خاک ۲ و ۳ و نزدیک به خاک نوع ۲ دارد. بر اساس گزارش گمانه، خاک نوع ۲ است. بر این اساس، نتایج دو روش همخوانی مناسبی دارند. نقشه فرکانس طبیعی خاک نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی خاک در محدوده ۰/۵۷ تا ۵/۴۲ هرتز قرار دارد. هرچه فرکانس تشدید بیشتر باشد، عمق رسوبات بیشتر است. بر اساس نقشه بزرگنمایی موج، ضخامت رسوبات نرم در شرق شهر بهبهان نسبت به جنوب آن کمتر است.



شکل ۹- نقشه خطوط منحنی میزان پرپود غالب خاک شهر بهبهان (ثانیه)

پرپود غالب خاک نیز نشان می‌دهد که پرپود طبیعی خاک بین ۰/۱۸ تا ۱/۷۵ ثانیه قرار دارد. با توجه به انتشار امواج زلزله از محیط خاک، تقویت یا تضعیف آن‌ها عمدتاً به پرپود طبیعی رسوبات بستگی دارد. پرپود اصلی رسوبات به ضخامت، سختی و چگالی آن بستگی دارد. از آنجایی که ویژگی‌های حرکت ورودی تا حد زیادی بر رفتار دینامیکی سازه‌ها تأثیر می‌گذارد، کمی‌سازی آن‌ها مسئله‌ای ضروری در مهندسی زلزله است.

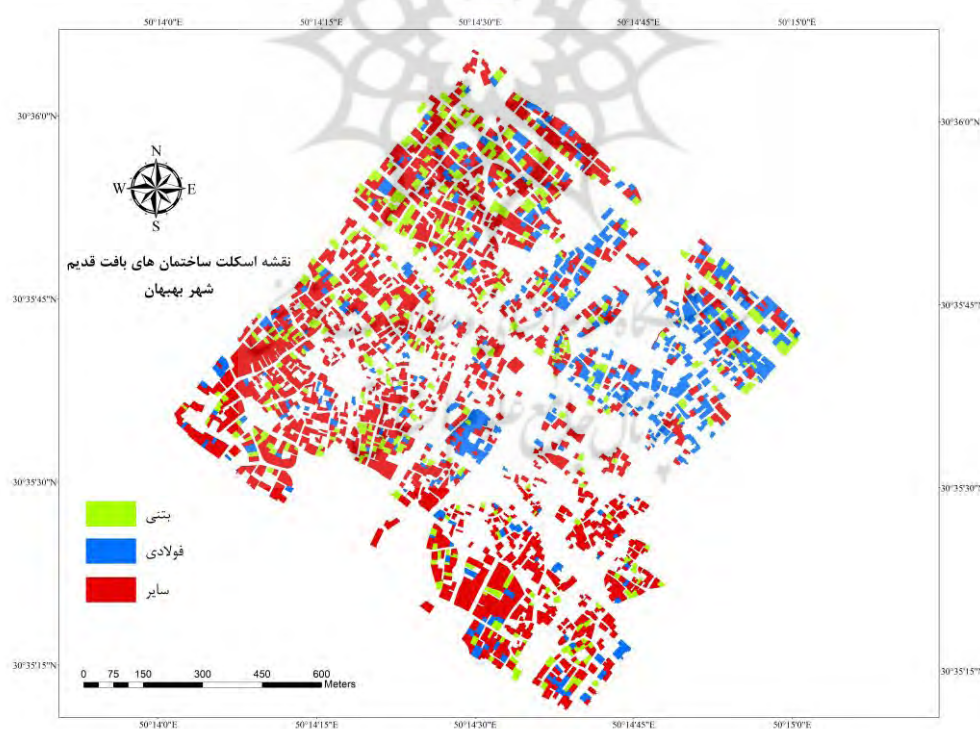


شکل ۱۰- نقشه نوع خاک به روش پلیگون بندی تیسن بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ شهر بهبهان

حال با مشخص شدن وضعیت خاک، بررسی اطلاعات ساختمانی می‌تواند مفید باشد. اطلاعات تهیه شده از سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان خوزستان شامل اطلاعات جمعیت، نوع اسکلت (فلزی، بتنی و سایر) و نوع مصالح (آجر و آهن، آجر و چوب، بلوک سیمانی، تمام آجر یا سنگ و آجر، تمام چوب، خشت و چوب، خشت و گل و سایر) که به صورت بلوکی می‌باشند، در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است. این اطلاعات به صورت خلاصه در **جدول شماره ۲** و **شکل ۱۱** نشان داده شده‌اند. این اطلاعات در محیط GIS فراخوانی شده و پس از تصحیح و یکسان‌سازی سیستم‌های مختصات و سیستم تصویر، لایه‌های مختلف مورد نظر از این اطلاعات تهیه گردید.

جدول ۲- نوع اسکلت و مصالح بکار رفته در ساختمان‌های بافت قدیم شهر بهبهان

| مصالح |          |           |          |                       |             |           | اسکلت     |      |     |       |
|-------|----------|-----------|----------|-----------------------|-------------|-----------|-----------|------|-----|-------|
| سایر  | خشت و گل | خشت و چوب | تمام چوب | تمام آجر یا سنگ و آجر | بلوک سیمانی | آجر و چوب | آجر و آهن | سایر | بتن | فولاد |
| ۵۴    | ۲۹       | ۹         | ۱        | ۴۳۳                   | ۵۰          | ۸۵        | ۱۶۴۶      | ۱۷۸۴ | ۲۱۹ | ۳۰۴   |



شکل ۱۱- نقشه اسکلت ساختمان‌های بافت قدیم شهر بهبهان

اگر فرکانس ارتعاش زمین با فرکانس طبیعی ساختمان به هم نزدیک شوند، به علت بالا رفتن احتمال تشدید، ساختمان بیشترین دامنه نوسان و شدیدترین خسارت را تجربه خواهد کرد. از نقشه فرکانس طبیعی خاک و پریرود غالب خاک شهر بهبهان می‌توان برای مشخص کردن تعداد طبقات مجاز ساختمان‌ها در نقشه‌های توسعه شهری استفاده نمود. نقشه نوع خاک بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰، خاک‌های نوع دو و سه را برای شهر بهبهان نشان داده که قسمت‌های بیشتر شهر دارای خاک نوع دو می‌باشند.

در نهایت لازم به یادآوری است که روش کلاسیک برای ارزیابی خطر لرزه‌ای برای یک سازه سطحی شامل تشخیص مشخصه خطر لرزه‌ای و در مرحله دوم تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری سازه است (یاریان و کرمی، ۱۳۹۸). باین‌حال، در شرایطی که کل منطقه شهری با خطر لرزه‌ای مواجه است، شبکه‌ای از سازه‌های سطحی ممکن است بر حرکت میدان آزاد تأثیر بگذارد. مشاهدات زلزله ۱۹۸۵ مکزیک نشان داد که ساختار شهر می‌تواند بر فرکانس ساختگاه مؤثر باشد. این پدیده که شامل تعامل بین شهر و حوضه رسوبی است، تعامل ساختگاه-شهر (SCD) نامیده می‌شود (خام و همکاران، ۲۰۰۳). در این تحقیق، به‌طور طبیعی این مسئله در اندازه‌گیری‌ها لحاظ شده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

تعیین فرکانس طبیعی خاک با استفاده از میکروترمورها روشی تأیید شده و کم‌هزینه است. نسبت مؤلفه افقی (H) و عمودی (V) میکروترموور اثرات منبع را حذف می‌کند و اثرات ناشی از مسیر موج را افزایش می‌دهد. اساساً نسبت H/V با گذشت زمان در همان محل بدون تغییر باقی می‌ماند و تخمین خوبی از فرکانس اساسی زیر خاک نرم ارائه می‌کند. وجود حداکثر دامنه در فرکانس خاص در منحنی H/V نشان‌دهنده وجود یک لایه سفت است که عمق آن را می‌توان با دانستن  $V_s$  لایه‌های رسوبی فوقانی ارزیابی کرد. تغییرات فضایی فرکانس حداکثر H/V با ناهمگنی‌های جانبی ساختار رسوبی مرتبط است. در این مقاله با استفاده از برداشت میکروترموور وضعیت خاک محلی شهر بهبهان تعیین شده است. فرکانس طبیعی خاک در محدوده ۰/۵۷ تا ۵/۴۲ هرتز و پریرود طبیعی خاک بین ۰/۱۸ تا ۱/۷۵ ثانیه قرار دارد. بر این اساس، خاک مناطق مختلف شهر متشکل از خاک‌های نوع ۲ و نوع ۳ است. در مناطق مرکزی، جنس خاک عمدتاً از نوع ۳ می‌باشد که با توجه ما قبل آیین‌نامه بودن ساخت اغلب ساختمان‌ها در این منطقه، نیاز به توجه دارد. البته با توجه به کوتاه مرتبه بودن اغلب ساختمان‌ها در این منطقه، احتمال تشدید لحظه‌ای متفی است. در شمال غرب و جنوب شرق شهر، پریرود تشدید خاک بالای یک ثانیه است؛ بنابراین در ساخت ساختمان‌های بلند در این مناطق باید تمهیدات لازم را به‌منظور جلوگیری از بروز تشدید در سازه‌های آن‌ها لحاظ کرد. همچنین، بزرگنمایی موج در بخش شرقی شهر حدود ۲ برابر بخش غربی بوده و این مسئله در توسعه ساختار شهری باید موردتوجه قرار گیرد.

## سپاسگزاری

بخشی از این پژوهش با حمایت شرکت پالایش گاز بیدبلند انجام شده است. کلیه پردازش‌ها با استفاده از امکانات مرکز پایش، ارزیابی و پیش‌بینی بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی (MAP Center) دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان صورت گرفته است؛ از این‌رو نهایت سپاس خود را از ایشان اعلام می‌داریم. ضمناً کلیه نقشه‌های تهیه شده در سایت مرکز به آدرس [khrisk.ir](http://khrisk.ir) قابل دسترسی است.

## کتابنامه

- ادیب، احمد؛ ۱۳۹۵. طبقه‌بندی ساختمان‌ها بر مبنای فرکانس طبیعی مبتنی بر داده‌های لرزه‌ای و پیشنهاد استفاده از آن در آئین نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله ایران، مطالعه موردی شهر اردکان. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۲(۱)، ۷۵-۸۱. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2016.54998>
- حکیمی، بهشته؛ معصومی، زهره؛ قدس، عبدالرضا؛ اعتماد سعید، نجمه؛ ۱۳۹۷. مطالعه اثر ساختمان‌ها مبتنی بر HVSAR مایکروترموور در شهر زنجان (ایران). *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۲(۴)، ۱۱۵-۱۳۹. [https://www.ijgeophysics.ir/article\\_82770.html](https://www.ijgeophysics.ir/article_82770.html)
- سفاری، امیر؛ کیانی، سارا؛ عباس زاده، امیرعلی؛ ۱۴۰۱. پتانسیل سنجی مناطق آسیب پذیر در برابر مخاطرات طبیعی (مطالعه موردی: شهر رودهن). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.73710.1249>
- فلاحی، عبدالحسین؛ سمائی، مقداد؛ کارشی، جعفر؛ ۱۳۹۸. تعیین فرکانس غالب و طبقه‌بندی ساختمان‌ها در تعدادی از ایستگاه‌های شتابنگاری شمال غرب ایران، با استفاده از اندازه‌گیری میکروتریمورها. *فصلنامه علمی علوم زمین*، ۲۸(۱۱۲)، ۲۱۷-۲۲۶. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.94986.1218>
- لامعی، مجید؛ عشایری، ایمان؛ بیگلری، مهنوش؛ کدیور، محمدمین؛ ۱۳۹۴. شناسایی سیستم دینامیکی خاک-سازه با استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی (مطالعه موردی: پایه مسیر روزمینی قطار شهری کرمانشاه). *فصلنامه علوم و مهندسی زلزله*، ۲(۳)، ۱-۱۳. [http://www.bese.ir/article\\_240271.html](http://www.bese.ir/article_240271.html)
- محمدیان، میلاد؛ ۱۳۹۹. تحلیل خطر احتمالی ریسک محور زمین لرزه بندر سیراف. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹(۲)، ۶۱-۱۲. <https://doi.org/10.22067/geo.v9i2.85303>
- یاریان، پیمان؛ کرمی، محمدرضا؛ ۱۳۹۸. ارزیابی و عدم قطعیت آسیب‌پذیری شهرها ناشی از زلزله با مدل FAHP (نمونه موردی: شهر سنندج). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۳(۱)، ۱۱۵-۲۰۳. <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.81921>

Berberian, M., 1981. Active faulting and tectonics of Iran: in: Zagros-Hindukush-Himalaya Geodynamic evolution, Gupta, H. K. and Delany, F. M. (eds.), Am. Geophys. Union and Geol. Soc. Am., Geodyn. Ser., 3, 33-69. <https://doi.org/10.1029/GD003p0033>



- Bindi, D., Parolai, S., Spallarossa, D. and Cattaneo, M., 2000. Site effects by H/V ratio: comparison of two different procedures," J. Earthq. Engrg. 4, 97{113.<https://doi.org/10.1080/13632460009350364>
- Borcherdt, R. D., 1970. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. Bulletin of the Seismological Society of America, 60(1), 29-61.<https://doi.org/10.1785/BSSA0600010029>
- Chávez-García, F. J., Sánchez, L. R., & Hatzfeld, D., 1996. Topographic site effects and HVSR. A comparison between observations and theory. Bulletin of the Seismological Society of America, 86(5), 1559-1573.<https://doi.org/10.1785/BSSA0860051559>
- European Commission., (2005), User guideline for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration: Measurement, processing and interpretation, Res. Gen. Dir. Proj. EVG1-CT-2000-00026 SESAME, Rep. D23.12, 62 pp., Brussels. <http://SESAME-fp5.obs.ujf-grenoble.fr>
- Ghofrani, H., & Atkinson, G. M., 2014. Site condition evaluation using horizontal-to-vertical response spectral ratios of earthquakes in the NGA-West 2 and Japanese databases. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 67, 30-43. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.08.015>
- Kanai K. The requisite conditions for the predominant vibration of ground. Bull Earthquake Res Inst 1957;35:457-70. <https://www.semanticscholar.org/paper/4bddbee33f3ab6f9bf8a0b1d7b1971c8b63b6e6d>
- Kawase, H., Nagashima, F., Nakano, K., & Mori, Y., 2019. Direct evaluation of S-wave amplification factors from microtremor H/V ratios: Double empirical corrections to "Nakamura" method. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 126, 105067.<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.049>
- Kham, M., Semblat, J. F., Bard, P. Y., & Gueguen, P., 2003, April. Seismic interaction between a building network and a sedimentary basin. In EGS-AGU-EUG Joint Assembly (p. 3679).<https://www.researchgate.net/publication/235623210>
- Komak Panah, A., Hafezi Moghaddas, N., Ghayamghamian, M., Motosaka, M., Jafari, M., & Uromieh, A., 2002. Site Effect Classification in East-Central of Iran. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 4(1), 37-46.[http://www.jsee.ir/article\\_240468.html](http://www.jsee.ir/article_240468.html)
- Langston, C. A., 1977. The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter. Bulletin of the Seismological Society of America, 67(4), 1029-1050.<https://doi.org/10.1785/BSSA0670041029>
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bulletin of the seismological society of America, 83(5), 1574-1594. Lermo, J., & Chávez-García, F. J., 1994. Are microtremors useful in site response evaluation?. Bulletin of the seismological society of America, 84(5), 1350-1364. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840051350>
- Mirzaei, N., Gao, M., Chen, Y. T., (1998), Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces. J. Earthquake prediction Research, 7, 465-495. Nakamura, Yutaka., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports 30.1. [https://www.researchgate.net/profile/Noorbakhsh-Mirzaei/publication/290796328\\_](https://www.researchgate.net/profile/Noorbakhsh-Mirzaei/publication/290796328_)
- Nakamura, Y., Sato, T., & Nishinaga, M., 2000, November. Local site effect of Kobe based on microtremor measurement. In Proceeding of the Sixth International Conference on Seismic Zonation EERI, Palm Springs California. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4b1a8cc5872deefd1582cab13bd66149352bacff>

- Nowroozi AA., 1976. Seismotectonic provinces of Iran. *Bull Seismol Soc Am* 66:1249–1276
- Pap, Z. B., & Kollár, L. P., 2018. Effect of resonance in soil-structure interaction for finite soil layers. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(3), 676-684. <https://doi.org/10.3311/PPci.11960>
- Rosenblueth, E., & Meli, R., 1986. The 1985 Mexico earthquake. *Concrete international*, 8(5), 23-34. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-1433-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1433-9_5)
- Semblat, J. F., Duval, A. M., & Dangla, P., 2003. Modal superposition method for the analysis of seismic-wave amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3), 1144-1153. <https://doi.org/10.1785/0120000087>
- Sezawa K., 1930. Possibility of the free—oscillations of the surface layer excited by the seismic waves. *Bull Earthquake Res Inst*;13:1–12. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(05\)80005-1](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(05)80005-1)
- Thabet, M., 2019. Site-specific relationships between bedrock depth and HVSR fundamental resonance frequency using KiK-NET data from Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 176(11), 4809-4831. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02256-7>
- Vassallo, M., Cultrera, G., Di Giulio, G., Cara, F., & Milana, G., 2022. Peak frequency changes from HV spectral ratios in Central Italy: Effects of strong motions and seasonality over 12 years of observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, e2021JB023848. <https://doi.org/10.1029/2021JB023848>
- Vella, A., Galea, P., & D'Amico, S., 2013. Site frequency response characterisation of the Maltese islands based on ambient noise H/V ratios. *Engineering geology*, 163, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.006>
- Zafarani, H., Ghafouri, S. M. M., Adlparvar, M. R., Rajaeian, P., & Hasankhani, A., 2015. Application of time-and magnitude-predictable model for long-term earthquake prediction in Iran. *Natural Hazards*, 78(1), 155-178. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90068-X)

پیوست

جدول پ ۱: اطلاعات مربوط به داده‌های برداشت شده در ایستگاه‌ها

| Point | Date & Time | latitude   | longitude  | Frequency (Hz) | Amplitude | Duration (min) | Complete |
|-------|-------------|------------|------------|----------------|-----------|----------------|----------|
| 1     | 2021-02-20  | 30.5997286 | 50.2496739 | 2.08           | 1.32      | 30             | Y        |
| 2     | 2021-02-20  | 30.6000216 | 50.2443011 | 2.53           | 1.23      | 30             | Y        |
| 3     | 2021-02-20  | 30.6000345 | 50.2350836 | 3.06           | 1.31      | 30             | Y        |
| 4     | 2021-02-20  | 30.6056954 | 50.2281031 | 4.25           | 1.26      | 30             | Y        |
| 5     | 2021-02-20  | 30.5995002 | 50.2270648 | 1.6            | 1.34      | 30             | Y        |
| 6     | 2021-02-20  | 30.6062655 | 50.2341461 | 2.57           | 1.27      | 30             | Y        |
| 7     | 2021-02-20  | 30.6056416 | 50.2442474 | 4.55           | 1.12      | 30             | Y        |
| 8     | 2021-02-21  | 30.6057487 | 50.2492787 | 5.43           | 1.25      | 30             | Y        |
| 9     | 2021-02-21  | 30.6060651 | 50.2544468 | 3              | 1.38      | 30             | Y        |
| 10    | 2021-02-21  | 30.6059953 | 50.2618252 | 1.39           | 1.58      | 30             | Y        |
| 11    | 2021-02-21  | 30.5998144 | 50.2393797 | 2.59           | 1.25      | 30             | Y        |
| 12    | 2021-02-21  | 30.6053791 | 50.2398556 | 1.28           | 1.22      | 30             | Y        |
| 13    | 2021-02-21  | 30.6004246 | 50.2568612 | 2.23           | 1.34      | 30             | Y        |
| 14    | 2021-02-21  | 30.5997946 | 50.2601216 | 0.94           | 1.27      | 30             | Y        |
| 15    | 2021-02-23  | 30.5843876 | 50.2386658 | 0.88           | 1.12      | 45             | Y        |
| 16    | 2021-02-24  | 30.5737228 | 50.2232802 | 0.54           | 1.14      | 45             | Y        |
| 17    | 2021-02-25  | 30.5711262 | 50.2252114 | 0.57           | 1.09      | 45             | Y        |
| 18    | 2021-02-26  | 30.5716521 | 50.2326143 | 0.91           | 1.02      | 45             | Y        |
| 19    | 2021-02-26  | 30.5671084 | 50.2308065 | 1              | 1.13      | 45             | Y        |
| 20    | 2021-02-26  | 30.5704558 | 50.2408916 | 0.72           | 1.04      | 45             | Y        |
| 21    | 2021-02-26  | -          | -          | 1.8            | 1.1       | 38             | N        |
| 22    | 2021-02-26  | 30.5698335 | 50.2472913 | 0.49           | 1.25      | 45             | Y        |
| 23    | 2021-02-26  | 30.5800204 | 50.2472109 | 0.25           | 1         | 45             | Y        |
| 24    | 2021-02-26  | 30.5816782 | 50.2430481 | 0.66           | 1         | 45             | Y        |
| 25    | 2021-02-26  | 30.5886338 | 50.2423118 | 0.66           | 1.12      | 46             | Y        |
| 26    | 2021-02-26  | 30.5898945 | 50.2427086 | 0.69           | 1.05      | 45             | Y        |
| 27    | 2021-02-27  | 30.5757666 | 50.2396685 | 0.61           | 1.26      | 45             | Y        |
| 28    | 2021-02-27  | 30.5665451 | 50.2433865 | 0.69           | 1.24      | 45             | Y        |
| 29    | 2021-02-28  | -          | -          | -              | -         | 0              | N        |
| 30    | 2021-02-28  | 30.5841351 | 50.2224112 | 0.52           | 1.03      | 45             | Y        |
| 31    | 2021-02-28  | 30.58465   | 50.2166766 | 1.86           | 1.15      | 45             | Y        |
| 32    | 2021-03-01  | 30.5813509 | 50.2317452 | 0.69           | 0.96      | 45             | Y        |
| 33    | 2021-03-01  | 30.5897999 | 50.2261394 | 0.86           | 1.23      | 45             | Y        |
| 34    | 2021-03-01  | 30.5961245 | 50.2139352 | 0.7            | 0.96      | 45             | Y        |
| 35    | 2021-03-02  | 30.5913985 | 50.2383323 | 0.85           | 1.06      | 45             | Y        |
| 36    | 2021-03-02  | 30.5885875 | 50.2339071 | 0.66           | 0.93      | 45             | Y        |
| 37    | 2021-03-03  | 30.5846447 | 50.2501184 | 0.78           | 1.04      | 45             | Y        |

| Point | Date & Time | latitude   | longitude  | Frequency (Hz) | Amplitude | Duration (min) | Complete |
|-------|-------------|------------|------------|----------------|-----------|----------------|----------|
| 38    | 2021-03-03  | 30.5855977 | 50.2439218 | 0.61           | 1.04      | 45             | Y        |
| 39    | 2021-03-04  | 30.5921549 | 50.2451295 | 0.88           | 1         | 45             | Y        |
| 40    | 2021-03-04  | 30.5947353 | 50.2413067 | 2.38           | 1.09      | 45             | Y        |
| 41    | 2021-03-05  | 30.4942059 | 50.2160382 | 0.54           | 1.14      | 45             | Y        |
| 42    | 2021-03-06  | 30.5932541 | 50.2307908 | 0.58           | 1.05      | 45             | Y        |
| 43    | 2021-03-06  | 30.5803384 | 50.21619   | 0.63           | 1.17      | 45             | Y        |
| 44    | 2021-03-06  | 30.5944449 | 50.2409186 | 0.68           | 1.2       | 45             | Y        |
| 45    | 2021-03-07  | 30.587182  | 50.2550059 | 2.35           | 1.6       | 45             | Y        |
| 46    | 2021-03-07  | 30.5852737 | 50.2574559 | 0.86           | 1.58      | 45             | Y        |
| 47    | 2021-03-07  | 30.5834557 | 50.2668426 | 1.24           | 1.62      | 45             | Y        |
| 48    | 2021-03-07  | 30.5966928 | 50.233413  | 1.54           | 1.13      | 45             | Y        |
| 49    | 2021-03-07  | 30.5934385 | 50.2465885 | 0.67           | 1.16      | 45             | Y        |
| 50    | 2021-03-07  | 30.5823128 | 50.2291108 | 0.62           | 1.07      | 45             | Y        |
| 51    | 2021-03-08  | -          | -          | 1.49           | 1.16      | 16             | N        |
| 52    | 2021-03-08  | -          | -          | 2.88           | 1.15      | 8              | N        |
| 53    | 2021-03-08  | 30.5968305 | 50.2290985 | 1.35           | 1.1       | 45             | Y        |
| 54    | 2021-03-08  | -          | -          | 1.66           | 1.1       | 43             | N        |
| 55    | 2021-03-08  | 30.5829676 | 50.2723063 | 1.82           | 1.39      | 45             | Y        |
| 56    | 2021-03-08  | 30.586389  | 50.2286955 | 0.74           | 1.03      | 45             | Y        |
| 57    | 2021-03-10  | 30.6033311 | 50.2214883 | 0.82           | 1.3       | 45             | Y        |
| 58    | 2021-03-10  | 30.5904881 | 50.2128097 | 0.34           | 1.08      | 45             | Y        |
| 59    | 2021-03-11  | 30.6121801 | 50.2042794 | 0.68           | 1.14      | 45             | Y        |
| 60    | 2021-03-11  | 30.6094498 | 50.2251417 | 0.47           | 1.13      | 45             | Y        |
| 61    | 2021-03-11  | 30.602401  | 50.2127713 | 0.41           | 1.2       | 45             | Y        |
| 62    | 2021-03-12  | 30.6164879 | 50.2413363 | 0.87           | 1.15      | 45             | Y        |
| 63    | 2021-03-12  | 30.6101577 | 50.2386546 | 1.05           | 1.05      | 45             | Y        |
| 64    | 2021-03-13  | 30.610281  | 50.2459826 | 1.53           | 1.14      | 45             | Y        |
| 65    | 2021-03-13  | 30.5829904 | 50.2775472 | 1.05           | 1.6       | 45             | Y        |
| 66    | 2021-03-13  | 30.6142898 | 50.2487617 | 1              | 0.99      | 45             | Y        |
| 67    | 2021-03-13  | 30.5946364 | 50.2777139 | 1.3            | 1.72      | 45             | Y        |
| 68    | 2021-03-14  | 30.5888125 | 50.2773165 | 1.43           | 1.64      | 45             | Y        |
| 69    | 2021-03-14  | 30.5891309 | 50.2665106 | 0.91           | 1.83      | 45             | Y        |
| 70    | 2021-03-15  | 30.5887645 | 50.2556479 | 1.19           | 1.66      | 45             | Y        |
| 71    | 2021-03-15  | 30.5945158 | 50.2519527 | 0.91           | 1.38      | 45             | Y        |
| 72    | 2021-03-15  | 30.5948718 | 50.2674538 | 0.82           | 1.71      | 45             | Y        |
| 73    | 2021-03-15  | 30.5942707 | 50.2613816 | 1.14           | 1.54      | 45             | Y        |
| 74    | 2021-03-15  | 30.5867399 | 50.2841309 | 0.98           | 1.81      | 45             | Y        |
| 75    | 2021-03-15  | 30.5963976 | 50.2729249 | 1.49           | 1.59      | 45             | Y        |
| 76    | 2021-03-17  | 30.5852143 | 50.2754628 | 1.01           | 1.66      | 45             | Y        |
| 77    | 2021-03-21  | 30.6839884 | 50.2829819 | 2.29           | 1.1       | 45             | Y        |
| 78    | 2021-03-22  | 30.668512  | 50.3469568 | 1.44           | 1.05      | 45             | Y        |