

## مطالعه اثر ساختگاه مبتنی بر HVSR مایکروترمور در شهر زنجان (ایران)

بهشته سادات حکیمی<sup>۱</sup>، زهره معصومی<sup>۲\*</sup>، عبدالرضا قدس<sup>۳</sup>، و نجمه اعتماد سعید<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۷)

### چکیده

با بررسی زلزله‌های پیشین رخ داده در جهان و ایران، مشخص شد یکی از عوامل مهم در برآورد آسیب مناطق در برابر زلزله، ویژگی‌های خاک سطحی حین زمین‌لرزه است. این موضوع به اثر ساختگاه معروف است. شهر زنجان در شمال‌غرب کشور در منطقه‌ای با خطر زلزله‌خیزی زیاد و اثر ساختگاه متنوع قرار دارد؛ از این‌رو، در مطالعات مربوط به پهنه‌بندی خطر زلزله، بررسی اثر ساختگاه در این منطقه اهمیت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق، از روش ناکامورا برای بررسی رفتار خاک استفاده شده است. داده‌ها در چهل و یک نقطه از شهر و روی مقاطع از پیش طراحی شده برداشت شدند. نتایج نشان‌دهنده آن است که بیشترین فرکانس مشاهده‌شده مربوط به مناطق شمالی شهر است که روی رسوبات کم‌ضخامت واقع است. در بخش جنوبی، در نزدیکی رودخانه زنجان رود، فرکانس تشدید به کمترین مقدار خود یعنی کمتر از یک هرتز می‌رسد. در شمال‌غرب و نیمه جنوبی شهر، در بعضی از مناطق دو بیشینه فرکانس مشاهده می‌شود که بیانگر وجود لایه کم‌سرعت زیرسطحی است. با استفاده از درون‌یابی فرکانس‌های به‌دست‌آمده با روش کریجینگ، نقشه‌های پهنه‌بندی اثر ساختگاه، ترسیم و با نقشه‌های به‌دست‌آمده از اطلاعات گمانه‌های ژئوتکنیکی برای سرعت موج برشی در شهر مقایسه شد. نتایج مقایسه، نشان‌دهنده تطبیق قابل‌قبول روش ناکامورا با اطلاعات گمانه‌هاست. در شمال شهر، فرکانس تشدید در محدوده چهار هرتز است؛ بنابراین باید از ساخت ساختمان‌های یک تا سه طبقه جلوگیری کرد یا تمهیدات لازم را در سازه‌های آنها لحاظ کرد تا تشدید صورت نگیرد. به‌طور مشابه، باید در محدوده گسترده‌ای از مرکز و غرب شهر که فرکانس طبیعی کمتر از یک هرتز است، از ساخت ساختمان‌های ده تا دوازده طبقه و در شمال‌شرق شهر که فرکانس تشدید خاک بین ۰/۷ تا ۱/۵ هرتز است، از ساخت ساختمان‌های شش تا پانزده طبقه اجتناب شود.

**واژه‌های کلیدی:** اثر ساختگاه، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زلزله، مایکروترمور، نسبت طیفی H/V، خطر زلزله

## ۱ مقدمه

ارتعاشات سطح زمین وابسته به تابع چشمه، اثر مسیر و اثر ساختگاه است. در مطالعات خطرپذیری در مقیاس کوچک، مناطق مختلف یک شهر از لحاظ پارامترهای چشمه (بزرگای زلزله و فاصله از گسل مسبب) و اثر مسیر در شرایط یکسانی قرار دارند و تفاوت رفتار زلزله در مناطق مختلف نشان‌دهنده اهمیت رفتار انواع خاک در برابر امواج زلزله است (آرنولد، ۲۰۰۷). رفتار لایه‌های سطحی خاک را در برابر امواج لرزه‌ای، اثر ساختگاه می‌نامند. اهمیت اثر ساختگاه بعد از زلزله‌هایی مانند کانتو (۱۹۲۳) در ژاپن (آتاکان و همکاران، ۲۰۰۴) و مارکا و همکاران، (۲۰۱۲)، میشواکان (۱۹۸۵) در مکزیکوسیتی (بک و هال، ۱۹۸۶)، لوما پریتا (۱۹۸۹) در سانفرانسیسکو (بناماساو و ایدال، ۱۹۹۱)، کوبه (۱۹۹۵) در ژاپن (آلدومن و همکاران، ۱۹۹۵)، کاراکاس (۱۹۶۷) در ونزوئلا (دوال و همکاران، ۲۰۰۲) و رودبار-منجیل (۱۹۹۰) در ایران (مولوی و عشقی، ۱۹۹۲) مورد توجه قرار گرفت. در همه این زلزله‌ها، علی‌رغم مشخصات یکسان چشمه و اثر مسیر زلزله، الگوی خرابی آنها در مناطق مختلف متفاوت بود. در بررسی اثر ساختگاه، عوامل مختلفی مانند تفاوت امپدانس لرزه‌ای لایه‌های خاک، تشدید، روانگرایی، توپوگرافی و حوضه رسوبی دخیل هستند (آرنولد، ۲۰۰۷). تفاوت امپدانس لرزه‌ای موجب تقویت دامنه تمامی فرکانس‌ها می‌شود. زمانی که امواج زلزله از لایه‌ای سخت با سرعت زیاد وارد لایه‌ای از خاک نرم با سرعت کمتر می‌شوند، به دلیل پایداری انرژی، دامنه آنها بزرگ‌تر خواهد شد. یک لایه خاک نرم با ضخامت چند متر تا چند صد متر می‌تواند باعث تقویت دامنه امواج لرزه‌ای از ۱/۵ تا ۶ برابر نسبت به دامنه امواج در سنگ بستر شود (آرنولد، ۲۰۰۷). در بسیاری از منابع (مانند سهت و ولنبرگ، ۱۹۹۹؛ ناکامورا، ۲۰۰۰ و کارنیل و همکاران، ۲۰۰۶) از قانون یک‌چهارم طول موج برای بیان فرکانس

تشدید در لایه خاک استفاده شده است. در این قانون، ستون خاک مانند یک لوله سر بسته در نظر گرفته می‌شود. در هنگام وقوع تشدید، یک گره در مرز دو لایه و یک شکم در سطح لایه خاک ایجاد می‌شود. در محل ایجاد شکم، لایه خاک با بیشترین دامنه نوسان می‌کند (سهت و ولنبرگ، ۱۹۹۹).

هر ساختمان، فرکانس تشدید ویژه خود را دارد. اگر فرکانس سازه و خاک مشابه باشد، با تشدید لایه خاک، سازه نیز دچار تشدید می‌شود و در نتیجه با دامنه زیادی نوسان می‌کند که موجب تخریب آن می‌شود. به این ترتیب، ضرورت تعیین فرکانس طبیعی ساختگاه و استفاده از آن در طراحی سازه به خوبی مشخص می‌شود. به دلیل اهمیت این موضوع، در بسیاری از مناطق جهان فرکانس طبیعی خاک بررسی شده است (سهت و ولنبرگ، ۱۹۹۹؛ سوریا و همکاران، ۲۰۰۷؛ ترابر و همکاران، ۲۰۱۱؛ کیسل و همکاران، ۲۰۱۰ و بونیا و همکاران، ۱۹۹۷).

روش‌های تعیین اثر ساختگاه به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند (هراک، ۲۰۰۷). روش اول براساس شبیه‌سازی عددی و ادغام آن با روش‌های ژئوتکنیکی (گمانه‌ها) و ژئوفیزیکی مانند روش‌های لرزه‌ای بازتابی و انعکاسی است، اما بسیاری از این روش‌ها در مناطق شهری با محدودیت‌هایی از قبیل هزینه گزاف، آسیب‌رسانی به محیط و حجم زیاد ابزار و نیروی انسانی مورد نیاز روبه‌رو هستند. روش دوم شامل اندازه‌گیری مستقیم پاسخ ساختگاه با استفاده از نگاشت‌های زلزله است. این روش در مناطقی که لرزه‌خیزی متوسط یا کم دارند، نیازمند صرف زمان زیاد جهت جمع‌آوری داده است (حق‌شناس و همکاران، ۲۰۰۸). روش سوم بررسی اثر ساختگاه با استفاده از ثبت مایکروترمور و بررسی نسبت طیفی افقی به عمودی (Horizontal to Vertical Spectral HVS Ratio) است. این روش در دهه‌های اخیر به دلیل سادگی،

به شدت تقویت شده بود. این منطقه در امتداد رودخانه واقع و با کوه‌هایی احاطه شده بود. به این منظور، ایستگاه-های برداشت در سه منطقه با مقاطع یازده تایی طراحی شد که بیشتر مقاطع در مناطق با ویرانی زیاد زده شده بودند. همچنین نتایج با نگاشت‌های ثبت شده از زلزله و پس‌لرزه-های آن مقایسه شد. بررسی نتایج به خوبی نشان می‌دهد در مناطقی که عمق رسوبات بیشتر است، دامنه امواج تقویت شده است. افسیس و همکاران (۲۰۱۰) از روش ناکامورا (Yanbu) برای بررسی فرکانس تشدید خاک در شهر ینبع (Yanbu) در ساحل شرقی دریای سرخ در عربستان استفاده کردند. فرکانس تشدید به دست آمده با استفاده از این روش در محدوده ۰/۲۵ تا ۷/۹ هرترز ثبت شد. در این تحقیق نشان داده شد که مقادیر فرکانس تشدید با کاهش عمق سنگ بستر افزایش پیدا کرده است. کیسلس و همکاران (۲۰۱۰) در بخشی از مطالعه خطرپذیری شهر والنسیا در برابر زلزله، از روش ناکامورا برای بررسی خطرپذیری ساختمان‌های بنا شده در شهر از دیدگاه خصوصیات خاک استفاده کردند. در این مطالعه، آزمایش‌های مختلفی روی شرایط برداشت داده انجام شد تا بهترین حالت پیشنهاد شود. محققان در ادامه، نقشه فرکانس خاک و عمق رسوبات در شهر را ارائه دادند. از آنجایی که در برخی از نقاط شهر، دو فرکانس بیشینه مشاهده شده بود، نتایج با تفاسیر زمین‌شناسی توضیح داده شدند. همچنین با توجه به نتایج، ساختمان‌های در معرض خطر بیشتر، مشخص شدند. ترابر و همکاران (۲۰۱۱) به منظور بررسی خطرپذیری زلزله از دیدگاه اثر ساختگاه در محدوده مترو شهر ونکوور کانادا از روش ناکامورا استفاده کردند. در این مطالعه از ۲۱۲ ایستگاه اندازه‌گیری نوفه استفاده شده است. همچنین مشاهدات در دو بازه زمانی در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ انجام شد و نقشه فرکانس خاک و نیز ضخامت تقریبی رسوبات در منطقه تهیه شد. بورانتا و همکاران (۲۰۱۳)، در صد ایستگاه در سطح شهر میتیلن (Mytilene) یونان، به

هزینه کم و قابلیت اجرایی در مناطق شهری بسیار مورد توجه قرار گرفته و استفاده شده است (به طور مثال، اماچی و همکاران، ۱۹۹۱؛ فیلد و جاکوب، ۱۹۹۵؛ پانو و همکاران، ۲۰۰۵؛ دوال و همکاران، ۱۹۹۶؛ لاجت و همکاران، ۱۹۹۶ و حق شناس و همکاران، ۲۰۰۸). مایکروترمور به ارتعاشات زمین ناشی از باد، امواج دریا، ترافیک، ماشین‌آلات صنعتی و غیره اطلاق می‌شود که زلزله‌نگارهای بسیار حساس می‌توانند آنها را ثبت کنند (بورانتا، ۲۰۱۳).

استفاده از مایکروترمورها برای تعیین اثر ساختگاه ابتدا در ژاپن مطرح شد (کانایی و همکاران، ۱۹۵۴ و سئو و همکاران، ۲۰۰۰). بعد از وقوع زلزله ۱۹۸۵ در مکزیکو نیز به روشنی ثابت شد که اطلاعات به دست آمده از امواج زلزله، با اطلاعات حاصل از مایکروترمورها همخوانی دارد. در دهه نود میلادی، اهمیت مایکروترمورها با انتشار مقالات متعددی مبنی بر توانایی نسبت طیفی H/V در تخمین اثر ساختگاه تأیید شد. از جمله این مقالات می‌توان به کوبایاشی و همکاران (۱۹۸۶)، لرمو و همکاران (۱۹۹۴) و بارد (۱۹۹۹) اشاره کرد. این روش به علت هزینه کم، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرد و مطالعات متعددی در این زمینه انجام شد که در ادامه به برخی از آنها پرداخته می‌شود. سوریانو و همکاران (۲۰۰۷)، اثر ساختگاه را با استفاده از ۱۸۰ ایستگاه در سطح شهر لوردس فرانسه بررسی کردند. زلزله در این شهر، بارها خرابی‌های زیادی برجای گذاشته است. در آن پژوهش، با توجه به کاتالوگ زلزله‌های گذشته، راستای گسل و اثر ساختگاه در فواصل مختلف از آن نیز بررسی و نتایج روش ناکامورا با داده‌های به دست آمده از زلزله‌های رخ داده مقایسه شده است. یاماناکا و همکاران (۲۰۰۸) در بررسی تفاوت خرابی‌های زلزله نوتو هاتو در ژاپن با بزرگای ۶/۹، از روش ناکامورا استفاده کردند. مطالعات در منطقه‌ای شهری انجام شد که دامنه زلزله در آن

دست داشتن سرعت موج برشی و فرکانس طبیعی خاک و با توجه به قانون یک‌چهارم طول موج ( $f = \frac{1}{4} \frac{V_s}{H}$ ) (سهت و ولنبرگ، ۱۹۹۹) که فرکانس طبیعی ( $f$ ) را به سرعت موج برشی ( $V_s$ ) و ضخامت خاک ( $H$ ) مربوط می‌سازد، می‌توان تخمینی از ضخامت خاک به دست آورد. با دانستن ضخامت خاک و فرکانس طبیعی خاک، می‌توان اثر ساختگاه را بررسی کرد.

## ۲ استفاده از مایکروترمور در تعیین اثر ساختگاه

### در شهر زنجان

اولین بار کانایی و همکاران (۱۹۵۴) متوجه رابطه‌ای میان طیف مایکروترمورها و شرایط زمین‌شناسی منطقه شدند. پس از آن، نخستین بار نوگوشی و ایگراشی (۱۹۷۱)، روش  $H/V$  را معرفی کردند و ناکامورا (۱۹۸۹) برای تعیین اثر ساختگاه از این روش استفاده کرد. روش ناکامورا بر پایه این فرض است که لایه سطحی، مؤلفه عمودی موج را تقویت نمی‌کند. از روش ناکامورا می‌توان برای به دست آوردن فرکانس طبیعی ساختگاه و ضخامت لایه آبرفت بهره برد. در این روش، ابتدا برای تمامی مؤلفه‌ها تبدیل فوریه محاسبه و سپس نسبت طیف مؤلفه افقی به مؤلفه قائم نوفه سنجیده می‌شود. این نسبت با رابطه (۱) بیان می‌شود (ناکامورا، ۱۹۸۹):

$$S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}}, \quad (1)$$

که  $S_{HS}$  تبدیل فوریه مؤلفه افقی و  $S_{VS}$  تبدیل فوریه مؤلفه عمودی در سطح است. ناکامورا دامنه بیشینه به دست آمده از مایکروترمورها ( $A_0$ ) را به عنوان ضریب تقویت ساختگاه معرفی کرد. استفاده از دامنه بیشینه نمودار  $H/V$  به عنوان ضریب تقویت ساختگاه را برخی از پژوهشگران تایید کرده‌اند (به طور مثال، کونو و اماچی (۱۹۹۸)) و در برخی مقالات نیز از آن استفاده شده است (حسین و

اندازه‌گیری مایکروترمور پرداختند و اثر ساختگاه را با مطالعه نوفه بررسی و داده‌های مایکروترمور را با استفاده از روش ناکامورا تحلیل و پردازش کردند. در نهایت، فرکانس طبیعی خاک و فاکتور تشدید در هر نقطه اندازه‌گیری و نقشه فرکانس و گسترش مکانی آن در شهر ترسیم شد. المدنی و همکاران (۲۰۱۵) با مطالعه نوفه، اثر ساختگاه را با استفاده از ۳۳ ایستگاه اندازه‌گیری نوفه در شهر احد رفیده (Ahad Rufeidah) عربستان بررسی کردند. در بیشتر ایستگاه‌ها تنها یک بیشینه فرکانسی وجود داشت، ولی در برخی ایستگاه‌های شمالی و شرقی شهر، دو بیشینه موجود بود. پژوهشگران این مسئله را به دلیل وجود دو لایه متفاوت و وجود یک منطقه گذار در این ناحیه دانسته‌اند. بازه تغییرات فرکانس تشدید در شهر از ۰/۸۶ تا ۳/۱۳ هرتز به دست آمد و نشان داده شد که ضخامت رسوبات رابطه عکس با فرکانس دارد.

در نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران (کمیته بازرنگری دائمی آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۹۳)، برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، شهر زنجان در پهنه با خطر نسبی «زیاد» ارزیابی شده است. این شهر، تنوع زیادی در نوع بافت ساخت‌وساز و شهرسازی دارد به طوری که در نقاط مختلف شهر، هم‌زمان، ساختمان‌هایی با بافت قدیمی و ساختمان‌هایی با تراکم زیاد وجود دارند (ضرغامی و همکاران، ۱۳۹۵). هدف این مطالعه، به دست آوردن توزیع فرکانس طبیعی خاک و بررسی خطرپذیری زلزله از منظر اثر ساختگاه در شهر زنجان با استفاده از روش ناکامورا براساس ثبت نوفه است. همچنین ارزیابی خطر زلزله در مناطق مختلف شهر با توجه به وضعیت کنونی از منظر نوع ساختگاه نیز از دیگر اهداف این تحقیق است. به این منظور از ۴۱ ایستگاه اندازه‌گیری نوفه در سطح شهر استفاده شده است. برای بررسی سرعت موج برشی در سطح شهر زنجان، اطلاعات گمانه‌های ژئوتکنیک در سطح شهر جمع‌آوری شد. با در

در مطالعه‌ای که شرکت دریاخاک پی (دریاخاک پی)، در سال ۲۰۰۹ برای بررسی اثر ساختگاه در سطح شهر انجام داد، روش انجام کار براساس تعیین سرعت موج برشی در سی متر ابتدایی خاک بود که به این منظور، گمانه‌هایی در شهر ایجاد شد. در این تحقیق، گزارشی درباره پهنه‌های فرکانس تشدید خاک وجود ندارد و متأسفانه جزئیات دقیقی از روش انجام کار و خروجی‌ها ارائه نشده است. همچنین بیشتر ساخت‌وسازهای شهری پرتراکم، بعد از آن تاریخ انجام شده‌اند که در محدوده مطالعاتی تحقیق ذکر شده قرار ندارند.

محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر و برخی خصوصیات آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. به منظور درک بهتر موقعیت ارتفاعی شهر، در شکل ۱-ب مدل رقمی ارتفاعی اطراف شهر زنجان نشان داده شده است. مطابق شکل، ارتفاع از شمال به جنوب در حال کاهش است. در شکل ۱-ج، نقشه زمین‌شناسی محدوده اطراف شهر نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، قسمت‌های شمالی شهر در پایین دست کوه‌های آتشفشانی طارم قرار دارند. این نواحی پوشیده از سنگ‌های گرانیت و دیوریت است که با لایه‌ای از رسوبات پوشیده شده‌اند. در جنوب شهر، رودخانه زنجان رود قرار دارد که از شمال‌غربی به جنوب‌شرقی امتداد یافته است. این منطقه پوشیده از نهشته‌های آبرفتی جوان (شن، سیلت، ماسه) است. قسمت میانی شهر از مخروط‌افکنه آبرفتی قدیمی کواترنری و رسوبات آواری عهد حاضر سخت‌نشده با دانه‌بندی متفاوت تشکیل شده است.

شهر زنجان از منظر ساخت‌وسازها بافت متنوعی دارد. بافت شهر در مرکز و جنوب، بافتی فرسوده با تراکم کم است. این در حالیست که ساخت‌وسازهایی با تراکم زیاد در مناطق شمالی انجام شده است. همچنین ساختمان‌هایی با تراکم بسیار زیاد که شامل برج‌های مسکونی است، در قسمت‌های منتهی‌الیه شرقی و غربی شهر ملاحظه می‌شود (کاظمی و کلانتری، ۱۳۹۰).

همکاران، ۲۰۱۶ و کمال و میدوری‌کاوا، ۲۰۰۶)، اما بسیاری از تحقیقات صورت گرفته روی صحت دامنه به‌دست‌آمده در روش ناکامورا نشان داده است که این دامنه نمی‌تواند به‌درستی میزان تقویت خاک را نشان دهد. در مقایسه با روش‌هایی مانند SSR، این روش معمولاً دامنه تقویت را کمتر تخمین می‌زند، ولی در مقدار فرکانس طبیعی به‌دست‌آمده توافق وجود دارد (حق‌شناس و همکاران، ۲۰۰۸؛ بونفوی-کلادت و همکاران، ۲۰۰۶ و دیاگورتاس و همکاران، ۲۰۰۲). این تفاوت دامنه به ترکیب میدان موج، نسبت امواج حجمی به امواج سطحی در نگاشت زلزله یا نوفه و نوع ایستگاه مرجع انتخابی (خاک سخت یا سنگ) در روش SSR بستگی دارد (حق‌شناس و همکاران، ۲۰۰۸)؛ از این رو، استفاده از دامنه پیشینه به‌عنوان فاکتور تقویت توصیه نمی‌شود.

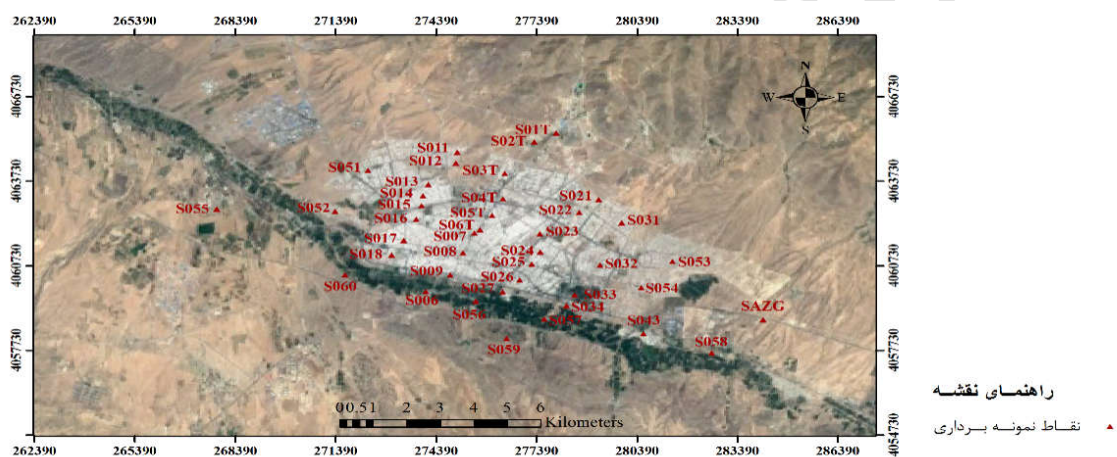
## ۱-۲ منطقه مطالعاتی

شهر زنجان که در شمال‌غرب کشور بین دو کمر بند کوه‌زایی البرز و زاگرس واقع شده، مرکز استان زنجان است و بزرگ‌ترین شهر این استان به‌شمار می‌رود. طبق سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران، جمعیت شهر زنجان ۵۲۱،۳۰۲ نفر است (<http://www.amar.org.ir>). راستای عمده‌ترین گسل‌های فعال این منطقه، شمال‌غرب - جنوب‌شرق است. گسل‌های فعالی چون منجیل و آب‌بر در شمال‌شرق، کناوند، مشمپا و ماه‌نشان در غرب و سلطانیه در جنوب زنجان قرار دارند. گسل شمال زنجان در شمال‌غرب شهر زنجان واقع است و روندی تقریباً شمالی-جنوبی دارد (ثبوتی و همکاران، ۱۳۸۷ و سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱). همان‌طور که گفته شد، در نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران، شهر زنجان در پهنه با خطر نسبی زیاد ارزیابی شده است. در پهنه‌بندی لرزه‌ای استان زنجان و مناطق مجاور، پیشینه شتاب زمین برای شهر زنجان در دوره بازگشت پنجاه سال،  $g/164$  به‌دست‌آمده است (کلانتری، ۱۳۹۵).

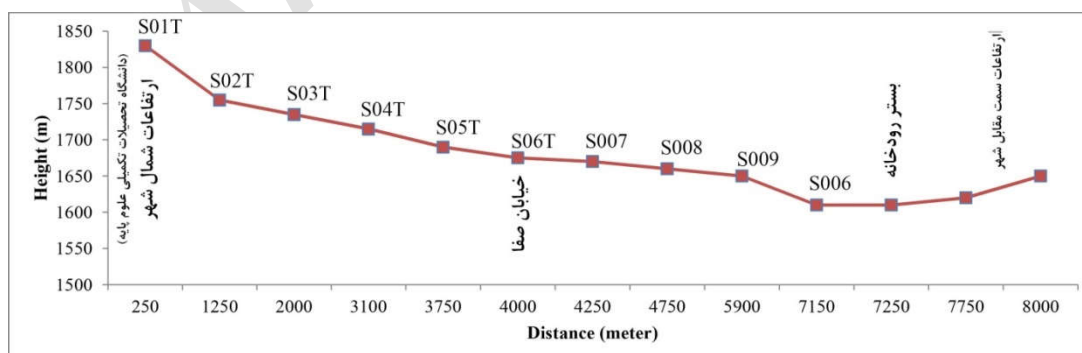


نسبت به یکدیگر روی پنج مقطع در امتداد تقریبی شمالی-جنوبی شهر قرار دارند. نقاط به گونه‌ای انتخاب شدند که کل شهر پوشش داده شود. برای افزایش دقت میان‌یابی و همچنین در نظر گرفتن گسترش آبی شهر، داده‌های برخی از نقاط واقع در خارج از شهر نیز برداشت شد. برداشت داده به مدت ده روز در تیرماه ۱۳۹۵ صورت گرفت. شکل ۳ تغییرات ارتفاع در امتداد یک مقطع نقاط برداشت شده در شهر را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، از شمال به جنوب شهر، به تدریج ارتفاع کاهش می‌یابد.

محیطی پروژه SESAME (بارد، ۲۰۰۵)، رعایت شد. برای مثال، تلاش شد که زلزله‌نگار روی خاک نرم، خاک اشباع از آب و همچنین بستر قلوه‌سنگی قرار نگیرد. زلزله‌نگار همواره روی سطح هموار افقی قرار داشت و باری نیز بر آن اعمال نشد. در تمامی برداشتها سعی بر این بود که محل برداشت نوفه در نزدیکی بزرگراه‌ها، خیابان‌ها، ماشین‌آلات ساختمانی، ساختارهای زیرزمینی مانند پارکینگ‌ها و غیره قرار نداشته باشد. موقعیت ایستگاه‌های برداشت نوفه در شکل ۲ نشان داده شده است. ایستگاه‌ها تقریباً در فواصل ۵۰۰ متری



شکل ۲. نقشه نقاط نمونه‌برداری شده (مثلث‌های قرمز) روی تصویر ماهواره‌ای منطقه شهر زنجان. این نقاط در راستای مقاطع تقریباً شمالی-جنوبی انتخاب شده‌اند.



شکل ۳. تغییرات ارتفاع در امتداد یکی از مقاطع شمالی-جنوبی نقاط برداشت شده. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۲ مشخص شده است. محور افقی، فاصله نقاط از شمال مقطع و محور عمودی، ارتفاع نقاط برداشت را از سطح آب‌های آزاد نشان می‌دهد. ارتفاع نقاط با استفاده از GPS دستی برداشت و با استفاده از تقریب جدایی ژئوئید در شهر زنجان، به ارتفاع از سطح دریا تبدیل شد.

## ۳-۲ پردازش داده‌ها

برای پردازش داده‌ها از نرم‌افزار Geopsy (www.Geopsy.org) استفاده شد. مراحل پردازش داده‌ها در این تحقیق عبارت‌اند از:

الف. تقسیم‌بندی سری زمانی: در هر ایستگاه، سری زمانی به پنجره‌هایی با طول معین تقسیم شد. کم بودن طول پنجره سبب می‌شود طول موج‌های بزرگ در محاسبات وارد نشوند. از طرفی، طول زیاد پنجره موجب کم شدن تعداد پنجره‌ها و کاهش دقت ارزیابی خطای نمودار H/V می‌شود. طول پنجره‌ها با توجه به مدت زمان زیاد نمونه‌برداری در این تحقیق (یک ساعت یا بیشتر) و کیفیت سیگنال، بین ۵۰ تا ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. براساس معیارهای ارائه‌شده در پروژه SESAME، طول پنجره باید به گونه‌ای تعیین شود که فرکانس مورد نظر حداقل ده بار تکرار شود. اگر کمترین فرکانس ۰/۱ هرتز فرض شود، لازم است طول پنجره ۱۰۰ ثانیه باشد؛ بنابراین برای پوشش دادن تمامی فرکانس‌های موجود، زمان پنجره ۱۰۰ ثانیه تعیین شده است. با توجه به طولانی بودن زمان اندازه‌گیری (حداقل یک ساعت) طول زیاد پنجره موجب کاهش تعداد پنجره‌ها نشده است و می‌توان با انحراف معیار مناسب، بیشینه را تعیین کرد. در برخی از نقاط، تعداد پنجره‌ها با طول ۱۰۰ ثانیه کافی نیست و سبب ایجاد انحراف معیار زیاد در نتیجه می‌شود؛ بنابراین طول پنجره کاهش یافت و ۵۰ ثانیه در نظر گرفته شد که با توجه به کمترین فرکانس در شهر زنجان یعنی حدود ۰/۴ هرتز مناسب است.

ب. فیلتر کردن سیگنال: در این مرحله به منظور حذف فرکانس‌های نامطلوب، فیلتر میان‌گذر ۰/۱ تا ۱۵ هرتز بر سیگنال اعمال شده است. در بررسی فرکانس طبیعی خاک، فرکانس‌های خیلی زیاد (برای مثال، بیش از ۱۵ هرتز) حذف می‌شوند؛ زیرا خاک‌هایی که فرکانس طبیعی بیش از ۱۰ هرتز دارند، همگی در گروه ساختگاه سنگی

قرار می‌گیرند (ژائو و همکاران، ۲۰۰۶ و شیخی و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین فرکانس‌های زیر ۰/۱ هرتز نیز به دلیل نبود ساختمان‌های بسیار مرتفع در شهر زنجان حذف شده‌اند.

ج. حذف نوفه‌های گذرا: به منظور حذف نوفه‌های گذرا ناشی از منابعی مانند راه رفتن انسان‌ها، ترافیک نزدیک، ماشین‌آلات، کارخانجات و غیره از الگوریتم Anti-triggering روی نوفه فیلتر شده استفاده شده است. در این پژوهش، STA برابر با ۱ ثانیه و LTA برابر با ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده است؛ بنابراین پارامتر STA/LTA مقداری برابر ۳ دارد.

د. حذف اثر نشت طیفی: پنجره‌بندی سیگنال موجب می‌شود تبدیل فوریه فرکانس‌هایی که باید صفر باشند، مقادیر غیرصفر داشته باشد. به این اثر، نشت طیفی گفته می‌شود؛ بنابراین قبل از انجام تبدیل فوریه لازم است هر پنجره در یک تیپر (Taper) ضرب شود. تیپر باعث می‌شود سیگنال در ابتدا و انتهای هر پنجره به آرامی کاهش یابد و صفر شود. به این ترتیب، اثر ناپیوستگی ابتدا و انتهای سری زمانی کاهش می‌یابد. در این تحقیق از تیپر کسینوسی با پهنای پنج درصد استفاده شده است.

ه. هموارسازی و تعیین روند کلی تغییرات طیفی: جهت مشخص کردن روند کلی تغییرات طیفی، طیف فوریه محاسبه شده برای هر کدام از مؤلفه‌ها با استفاده از تابع کونو-اوماچی هموار شد. تابع هموارسازی کونو-اوماچی  $W_B$  به صورت زیر است (کونو و اماچی، ۱۹۹۸):

$$W_B(f, f_c) = [\sin(\log(f/f_c)^b) / (\log(f/f_c)^b)]^4, \quad (2)$$

که در آن،  $b$  ضریب پهنای باند،  $f$  فرکانس مورد نظر و  $f_c$  فرکانس مرکزی است. این تابع، لگاریتمی است و با افزایش فرکانس، شکل آن ثابت می‌ماند. در این پژوهش برای  $b$  عدد ۴۰ فرض شده است.



در معیار اول،  $f_0$  به عنوان فرکانس بیشینه نمودار ارزیابی می‌شود. طبق پروژه SESAME، باید رابطه (۳) بین فرکانس بیشینه و طول پنجره  $l_w$  برقرار باشد:

$$f_0 > 10 / l_w, \quad (3)$$

بر اساس این رابطه، فرکانس بیشینه به دست آمده باید حداقل ده مرتبه در پنجره تعیین شده تکرار شود؛ بنابراین در انتخاب طول پنجره باید دقت کرد. در مورد داده‌های برداشت شده در ایستگاه S01T، این رابطه به صورت زیر است:

$$4.48 \text{ Hz} > \frac{10}{100} = 0.1 \text{ Hz},$$

معیار دوم، معیار  $n_c(f_0)$  است که تعداد چرخه معنی دار را طبق رابطه (۴) مشخص می‌کند:

$$n_c = n_w \cdot l_w \cdot f_0, \quad (4)$$

$n_w$  تعداد پنجره‌های تعیین شده است. مقدار معیار  $n_c(f_0)$  برای فرکانس بیشینه، باید بیش از ۲۰۰ باشد:

$$n_c(f_0) > 200. \quad (5)$$

در مورد داده‌های برداشت شده در ایستگاه S01T، طبق رابطه (۶)، معیار دوم برقرار است:

$$n_c = 17 \cdot 100 \cdot 4.48 = 7616 > 200. \quad (6)$$

در معیار سوم، انحراف معیار دامنه یا  $\sigma_A(f)$  مطابق روابط (۷) و (۸) بررسی می‌شود:

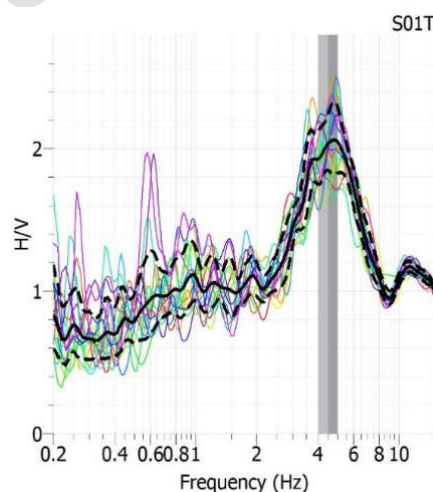
$$\sigma_A(f) < 2 \quad \text{for} \quad 0.5f_0 < f < 2f_0 \quad (7) \\ \text{if } f_0 > 0.5 \text{ Hz}$$

$$\sigma_A(f) < 3 \quad \text{for} \quad 0.5f_0 < f < 2f_0 \quad (8) \\ \text{if } f_0 < 0.5 \text{ Hz}$$

و. محاسبه نسبت طیفی ناکامورا: با استفاده از میانگین هندسی، دو مؤلفه افقی، ادغام و نسبت طیفی ناکامورا برای هر پنجره به صورت جداگانه محاسبه شد. به عنوان نمونه، نسبت طیفی مربوط به ایستگاه S01T در شکل ۴ نشان داده شده است.

ز. میانگین‌گیری از نمودارها: با میانگین‌گیری از نمودارهای محاسبه شده برای پنجره‌های مختلف (نمودارها با رنگ‌های مختلف در شکل ۴) نمودار نهایی (منحنی سیاه در شکل ۴) به دست می‌آید.

ح. اعتبارسنجی داده‌ها: قبل از استخراج فرکانس طبیعی از نمودار H/V، اعتبار نمودار با استفاده از روابط بارد (۲۰۰۵) بررسی شد. بر اساس مطالعات موجود در این پروژه، سه معیار برای پذیرش نمودار H/V معرفی شده است. به منظور روشن‌تر شدن مطلب، این معیارها به همراه یک مثال در شکل ۴، توضیح داده شده‌اند.



$$f_0 = 4.48 \pm 0.050 \text{ Hz}$$

$$A_0 = 2.03886 [1.8485, 2.24883]$$

$$\sigma_A = 1.102, \quad l_w = 100 \text{ s}, \quad n_w = 17$$

شکل ۴. نمودار نسبت طیفی در ایستگاه S01T. نمودارهای رنگی نسبت طیفی محاسبه شده در هر پنجره به طور مجزا؛ نمودار مشکی، میانگین نسبت‌های طیفی در پنجره‌ها و نمودار خط چین، انحراف معیار مربوط به آن را نشان می‌دهد. ستون خاکستری رنگ، محل بیشینه نمودار و پهنای آن، انحراف معیار مربوط به آن را نشان می‌دهد. در این ایستگاه، بیشینه نمودار در فرکانس ۴/۴۸ هرتز به دست آمده است.  $f_0$  فرکانس بیشینه،  $A_0$  دامنه بیشینه،  $l_w$  طول پنجره انتخابی و  $n_w$  تعداد پنجره‌ها است.

نقاط معلوم حول نقطه مجهول نیز در محاسبات وارد می-شود (حسینی پاک، ۱۳۹۲).

برای انجام درون‌یابی و انتخاب روش مناسب، ابتدا چهار نقطه به‌عنوان نقاط کنترلی از مجموعه نقاط نمونه‌برداری انتخاب شدند. پراکنش این نقاط طوری در نظر گرفته شد که تمامی محدوده را پوشش دهند. در ادامه، درون‌یابی با استفاده از دو روش وزن‌دهی معکوس فاصله و کریجینگ انجام شد. از آنجا که روش کریجینگ، RMSE کمتری در نقاط کنترل دارد، ارزیابی دقت درون‌یابی برای نقاط کنترلی، نشان‌دهنده عملکرد بهتر روش کریجینگ است؛ بنابراین تمام نقشه‌های این مقاله با استفاده از روش کریجینگ تولید شدند. جدول ۱ مقادیر به‌دست‌آمده از هر دو روش را در نقاط کنترل نشان می‌دهد.

#### ۲-۵ تخمین سرعت موج برشی

در این مطالعه علاوه بر تعیین فرکانس طبیعی خاک، تلاش شده است تا تخمینی از سرعت موج برشی با استفاده از گمانه‌های دردسترس در سطح شهر ارائه شود. با در دست بودن سرعت موج برشی و فرکانس طبیعی خاک، می‌توان تخمینی از ضخامت لایه خاک به‌دست آورد. به‌منظور تخمین سرعت موج برشی برای نقاط گمانه ارائه‌شده در این تحقیق، آزمون استاندارد SPT (Standard Penetration Test) (ای. اس. تی. ام، ۲۰۰۸) در

فرکانس بیشینه در این مثال بیش از ۰/۵ هرتز است؛ بنابراین باید از رابطه (۷) استفاده شود. طبق رابطه (۹)، شرط انحراف معیار دامنه نیز برقرار است:

$$\sigma_A(f) < 2 \quad \text{for} \quad (9)$$

$$0.5 \quad 4.48 = 2.24 < f < 2 \quad 4.48 = 8.96$$

این روابط برای تمامی نمودارهای دیگر نیز بررسی و داده‌ها اعتبارسنجی شده‌اند.

#### ۲-۴ درون‌یابی داده‌های شبکه

به‌منظور پهنه‌بندی فرکانس طبیعی خاک و بررسی اثر ساختگاه با استفاده از آن، پس از یافتن فرکانس طبیعی در نقاط برداشت‌شده در سطح شهر، از الگوریتم‌های درون‌یابی استفاده شد. روش وزن‌دهی معکوس فاصله (Inverse Distance Weighted) IDW هنگامی استفاده می‌شود که نقاط نمونه‌گیری، اثری محلی و وابسته به فاصله بر مکان‌های اطراف داشته باشند. در این روش، نقاط برحسب دوری و نزدیکی از نقاط واقع در همسایگی‌شان در شعاع تأثیر، وزن‌دهی می‌شوند. سپس با توجه به وزن نسبت داده شده، مقادیر در نقاط مجهول محاسبه می‌شوند. روش کریجینگ روش زمین-آماري است که در آن از ارتباط مکانی نقاط معلوم و نحوه پراکندگی آنها حول نقطه تخمین استفاده می‌شود. در حقیقت در کریجینگ، علاوه بر فاصله، ساختار فضایی

جدول ۱. مقایسه دقت دو روش کریجینگ و IDW در نقاط کنترل

شماره ایستگاه	مقدار واقعی	تفاوت مقدار واقعی و محاسبه‌شده		مقدار محاسبه‌شده با IDW	
		مقدار محاسبه‌شده با کریجینگ	تفاوت شده با کریجینگ	مقدار محاسبه‌شده با IDW	تفاوت با IDW
S03T	۱/۴	۱/۳۹	۰/۰۰۴۸۷۳	۰/۷۵	۰/۳۴۶۳۹-
S017	۰/۴	۰/۴۵	۰/۰۵۳۵۸۹-	۰/۳۹	۰/۰۰۵۵۰۲
S057	۰/۴۶	۰/۵۴	۰/۰۸۲۱۶۹-	۰/۵۲	۰/۰۶۰۳۶-
S054	۰/۵	۰/۸۶	۰/۳۵۹۴۹۸-	۰/۷۴	۰/۲۳۵۰۶-
		۰/۱۸RMSE:			۰/۲۱RMSE:

است. نقشه سرعت موج برشی با استفاده از این اطلاعات تولید شد که در بخش نتایج و شکل ۶ ارائه شده است.

### ۳ نتایج و بحث

در این بخش به نتایج پردازش داده‌های برداشت‌شده در سطح شهر پرداخته خواهد شد. در نتایج ایستگاه‌های مختلف، بیشینه‌های متفاوتی در نمودارهای H/V مشاهده شده است. در اینجا سعی بر آن است ابتدا نتایج ایستگاه‌هایی با یک بیشینه فرکانسی و در ادامه نتایج ایستگاه‌هایی با دو بیشینه آورده شود. سپس نتایج با استفاده از داده‌های گمانه‌های ژئوتکنیک در دسترس، ارزیابی می‌شود و درباره آن بحث خواهد شد.

#### ۳-۱ ایستگاه‌های با یک بیشینه

اطلاعات مربوط به فرکانس بیشینه اول در ایستگاه‌های با دو بیشینه و فرکانس بیشینه در سایر ایستگاه‌های تک بیشینه در جدول ۲ ارائه شده است.

نتایج در بیشتر ایستگاه‌ها، نشان‌دهنده وجود تنها یک بیشینه روی نمودار H/V است. شکل ۵ نقشه توزیع فرکانسی برای بیشینه اول را در شهر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، فرکانس طبیعی در شمال شهر زنجان، در ایستگاه‌های S01T، S02T و S021، بیش از ۴ هرتز است (نمودار فرکانس مربوط به ایستگاه S01T در شکل ۴ نشان داده شده است). همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، فرکانس بیشینه نمودار H/V با عمق مرز بین دو لایه در ارتباط است. هرچه فرکانس تشدید بیشتر باشد، این مرز در عمق کمتری قرار دارد؛ بنابراین با توجه به نتایج، ضخامت رسوبات نرم در شمال شهر زنجان نسبت به جنوب آن کمتر است. همچنین با توجه به نقشه سرعت موج برشی (شکل ۶) و اطلاعات گمانه‌ها و قانون یک چهارم طول موج (سخت و ولنبرگ، ۱۹۹۹)، سرعت بالای موج برشی برای شمال شهر زنجان تصدیق می‌شود.

آزمایشگاه‌های ژئوتکنیک انجام شد و در اختیار نویسندگان مقاله حاضر قرار گرفت. روش انجام آزمایش بدین صورت است که یک چکش با وزن مشخص به دفعات از ارتفاع معین روی نمونه‌گیر SPT واقع در درون گمانه رها می‌شود. این عمل تا زمانی تکرار می‌شود که نمونه‌گیر به اندازه ۴۵ سانتی‌متر در کف گمانه نفوذ کند. تعداد ضربات لازم برای نفوذ ۳۰ سانتی‌متر آخر از کل ۴۵ سانتی‌متر نفوذ در کف گمانه به‌عنوان عدد نفوذ استاندارد ( $N$ ) تعیین می‌شود. روابط تجربی بسیاری وجود دارند که بین  $N$  و  $V_s$  ارتباط برقرار می‌کنند. این روابط به شرایط زمین‌شناسی منطقه و نوع خاک وابسته است و در مکان‌های مختلف، متفاوت است. متأسفانه تاکنون رابطه تجربی منحصر به شهر زنجان ارائه نشده است؛ بنابراین برای محاسبه  $V_s$  با استفاده از  $N$  از میانگین مقادیر روابط مختلف ارائه‌شده در چترجی و چدهاری (۲۰۱۳) و دراسرای و همکاران (۱۳۹۰) استفاده شد. در مطالعه دراسرای و همکاران (۱۳۹۰)، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از مطالعات ژئوتکنیک در نقاط مختلف کشور و برنامه‌نویسی ژنتیک برای خاک‌های ایران، مناسب‌ترین رابطه ارائه شده است. روابط به‌کاررفته از مطالعه چترجی و چدهاری (۲۰۱۳) نیز روابطی بودند که آزمایشگاه مکانیک خاک زنجان و آزمایشگاه‌های ژئوتکنیک شهر به کار می‌بردند. شایان ذکر است که در این مقاله، از داده‌های همین آزمایشگاه‌ها استفاده شده است. در این تحقیق، تصحیح روی  $N$  انجام نشد.

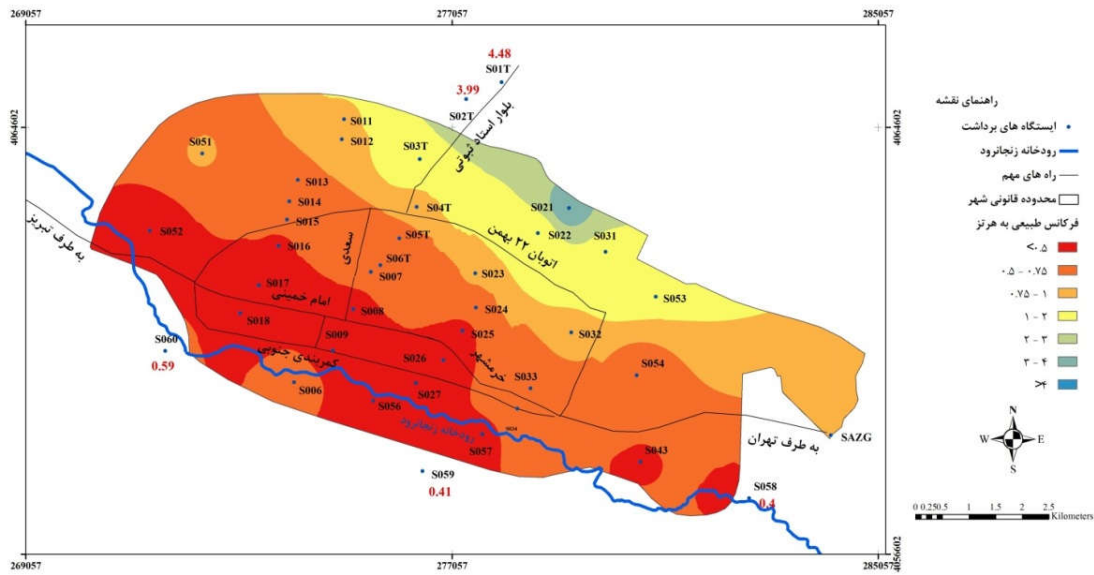
به‌منظور بررسی  $V_s$  در کل محدوده شهر، اطلاعات گمانه‌ها در سطح شهر جمع‌آوری شد، اما به‌علت قدیمی بودن بافت جنوب شهر و بالا بودن سطح ایستایی در این ناحیه، گمانه‌ای با عمق مناسب (بیشتر از ۱۵ متر) موجود نیست. در سایر نقاط شهر، اطلاعات گمانه‌ها با توزیع و عمق به‌نسبت خوب در دسترس است و اطلاعات ۲۷ گمانه با عمق بیش از ۲۰ متر در اختیار پژوهشگران قرار گرفته

جدول ۲. اطلاعات مربوط به فرکانس بیشینه اول در ایستگاه‌های با دو بیشینه و فرکانس بیشینه در سایر ایستگاه‌های تک بیشینه.  $f_0$  فرکانس بیشینه،  $A_0$  دامنه بیشینه،  $d_{11}$  طول پنجره انتخابی و  $n_{11}$  تعداد پنجره‌ها را نشان می‌دهد.

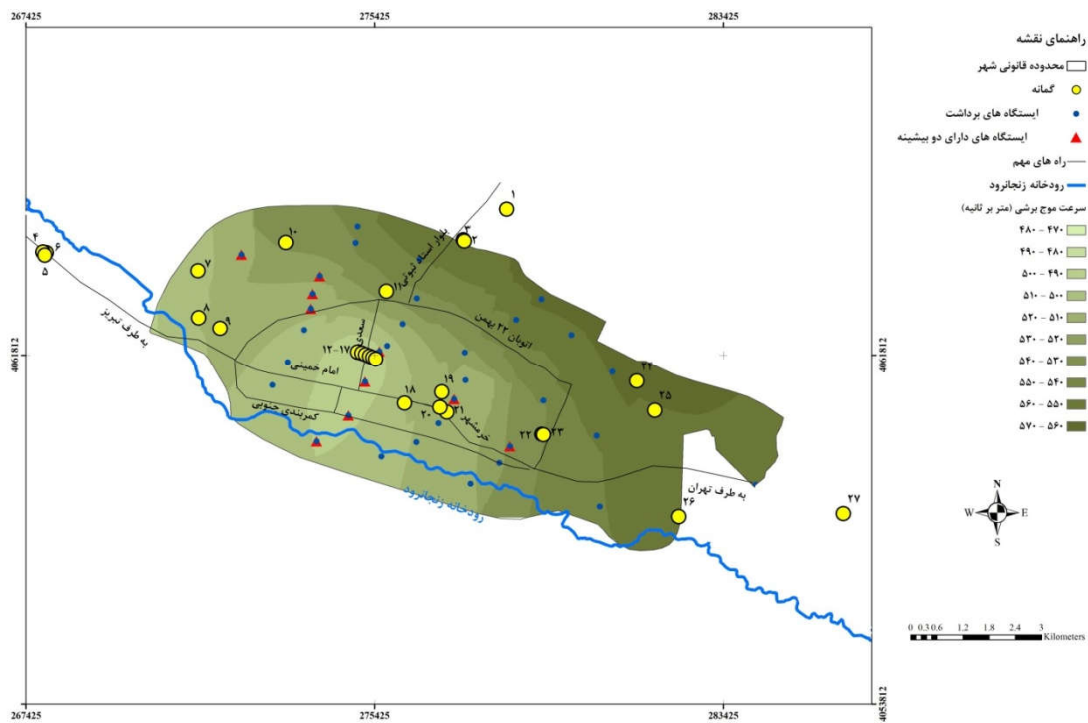
$X$	$Y$	Name					
277990	4065456	S01T	4.48	2.03	1.102	100	17
277325	4065140	S02T	3.99	2.47	1.108	100	25
276452	4064011	S03T	1.12	2.02	1.092	100	11
276394	4063113	S04T	0.88	2.41	1.298	100	30
276068	4062526	S05T	0.66	2.18	1.270	100	30
275713	4062023	S06T	0.54	2.58	1.174	100	10
274093	4059825	S006	0.65	1.55	1.531	80	7
275537	4061897	S007	0.55	2.39	1.224	100	35
275206	4061197	S008	0.43	2.69	1.412	40	24
274822	4060419	S009	0.38	2.45	1.537	50	20
275034	4064763	S011	0.92	2.4	0.991	80	5
274988	4064384	S012	0.94	2.03	1.223	100	31
274166	4063622	S013	0.7	2.86	1.583	50	14
274002	4063219	S014	0.58	3.13	1.507	50	10
273961	4062877	S015	0.58	2.65	1.468	50	18
273802	4062389	S016	0.48	2.36	1.196	100	19
273431	4061648	S017	0.4	3.13	1.431	50	13
273080	4061121	S018	0.36	2.47	1.398	50	26
279254	4063095	S021	4.01	1.72	1.192	80	16
278672	4062625	S022	1.23	1.55	1.234	50	19
277497	4061872	S023	0.79	2.43	1.241	100	18
277508	4061229	S024	0.7	2.22	1.219	70	43
277252	4060793	S025	0.42	4.09	1.814	80	7
276893	4060241	S026	0.43	2.52	1.177	70	5
276383	4059812	S027	0.42	2.34	1.359	60	18
279941	4062274	S031	1.74	1.87	1.161	100	17
279296	4060764	S032	0.88	1.85	1.378	40	48
278531	4059712	S033	0.51	1.85	1.346	80	18
278288	4059330	S034	0.64	2.61	1.419	70	41
280592	4058333	S043	0.48	1.98	1.339	40	14
272369	4064118	S051	0.78	2.65	1.431	40	12
271385	4062669	S052	0.3	2.43	1.604	70	22
281455	4060889	S053	1.17	1.89	1.145	100	13
280523	4059959	S054	0.5	4.11	1.655	30	15
267851	4062751	S055	0.78	2.35	1.295	100	18
275579	4059482	S056	0.39	30.39	2.368	100	38
277625	4058854	S057	0.46	3.24	2.020	80	5
282636	4057650	S058	0.4	2.74	1.535	50	30
276505	4058159	S059	0.41	1.84	1.515	50	28
271675	4060414	S060	0.59	2.1	1.423	70	24
284168	4058831	SAZG	0.77	2.14	1.384	70	10

گرانیت و دیوریت است و با لایه‌ای نازک از رسوبات پوشیده شده‌اند. در جنوب شهر، رودخانه زنجان‌رود قرار دارد که از شمال‌غرب به جنوب‌شرق امتداد یافته است. این منطقه پوشیده از نهشته‌های آبرفتی جوان (شن، سیلت، ماسه) است. قسمت میانی شهر نیز از مخروط‌افکنه آبرفتی قدیمی کواترنری و رسوبات آواری عهد حاضر سخت‌نشده با دانه‌بندی متفاوت، تشکیل شده است.

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، فرکانس طبیعی از شمال شهر به سمت جنوب شهر روند کاهشی دارد که حاکی از افزایش ضخامت لایه رسوبات است. مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد تغییرات فرکانس طبیعی خاک، همبستگی خوبی با تغییرات سرعت خاک در ۳۰ متر بالایی دارد. قسمت شمالی شهر در پایین‌دست کوه‌های آتشفشانی طارم قرار دارد. این نواحی پوشیده از سنگ‌های



**شکل ۵.** نقشه فرکانس طبیعی برای بیشینه اول. فرکانس طبیعی خاک در شمال شهر بیشترین مقدار را دارد و با حرکت به سمت جنوب شهر، از مقدار آن کاسته می‌شود. مقدار فرکانس در نقاط خارج از محدوده قانونی شهر، با رنگ قرمز در محل این ایستگاه‌ها نشان داده شده است. محل ایستگاه‌های برداشت با دایره‌های توپر آبی نشان داده شده است. در کنار هر دایره توپر نام ایستگاه برداشت نوشته شده است. اعداد قرمز رنگ، مقدار فرکانس طبیعی خاک در ایستگاه‌های واقع در خارج از منطقه قانونی شهر را نشان می‌دهند. مسیر رودخانه زنجان رود نیز در شکل مشخص شده است.



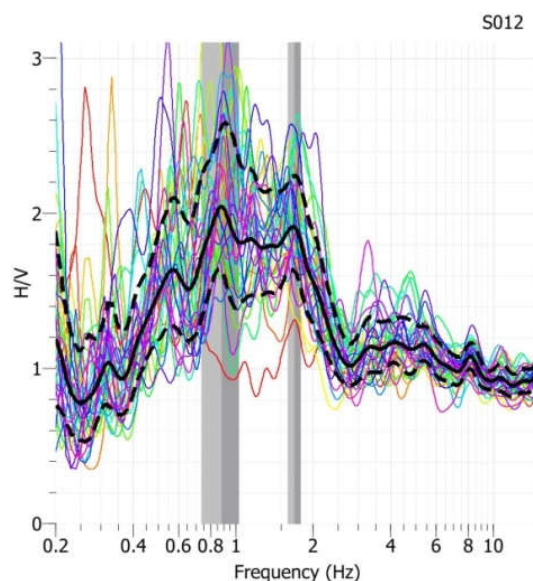
**شکل ۶.** نقشه سرعت موج برشی برای ۳۰ متر بالایی خاک در سطح شهر زنجان با استفاده از اطلاعات گمانه‌های ژئوتکنیک. سرعت از شمال به جنوب شهر کاهش یافته است و در مرکز شهر کمترین مقدار را دارد. نقاط زرد رنگ، موقعیت گمانه‌ها و نقاط قرمز رنگ، ایستگاه‌ها با دو بیشینه در اثر ساختگاه را نشان می‌دهند. اعداد درج شده روی نقشه، شماره گمانه‌ها را نشان می‌دهند. مقادیر سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی خاک برای هر گمانه در جدول پ آمده است. مشخصات نگاره حفاری گمانه‌ها در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

در قسمت‌های شمالی اتوبان ۲۲ بهمن، در یک راستای تقریباً شرقی-غربی، در ایستگاه‌های S011، S012، S013، S022، S031، S053، بیشینه ظاهر شده روی نمودار پهنای بیشتری دارد و به صورت چند بیشینه نزدیک به یکدیگر است. نمودار ایستگاه S012 به‌عنوان نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است. گویلیر و همکاران (۲۰۰۶) این موضوع را به میدان موج پیچیده ناشی از پاشش امواج حجمی و امواج سطحی نسبت داده‌اند. طبق تحقیقات گویلیر و همکاران (۲۰۰۶)، این اتفاق معمولاً در مکان‌هایی که شیب سنگ بستر به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند، مانند لبه حوضه رسوبی، رخ می‌دهد؛ بنابراین می‌توان استنباط کرد که این ایستگاه‌ها در نزدیکی لبه یک حوضه رسوبی قرار گرفته‌اند. در این منطقه شیب سنگ بستر تغییر کرده و از ساختگاه تقریباً سنگی در شمال منطقه وارد حوضه رسوبی عمیق‌تر جنوبی شده است. در واقع، این منطقه یک منطقه گذار بین دو ساختار مختلف است. با ورود به حوضه رسوبی، مقدار فرکانس طبیعی به کمتر از ۱ هرتز می‌رسد. با توجه به کم بودن سرعت موج برشی در جنوب منطقه گذار (شکل ۶) می‌توان گفت ضخامت رسوب در این قسمت زیاد است. در ایستگاه‌های S017، S023، S06T، S05T، S04T، S018، S024، S032، S027، S034، S043، S056، S057، بیشینه کمتر از ۱ هرتز مشاهده شده است که نمونه آن در شکل ۸ دیده می‌شود.

### ۲-۳ ایستگاه‌های با دو بیشینه

اطلاعات مربوط به فرکانس بیشینه دوم در ایستگاه‌های با دو بیشینه در جدول ۳ آمده است. این ایستگاه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.

طبق مطالعات انجام شده توسط گویلیر و همکاران (۲۰۰۶)، بیشینه دوم ممکن است در ارتباط با نوفه صنعتی باشد و یا تحت اثر ساختگاه ایجاد شده باشد. در هنگام



$$f_0 = 0.94 \pm 0.17 \text{ Hz}$$

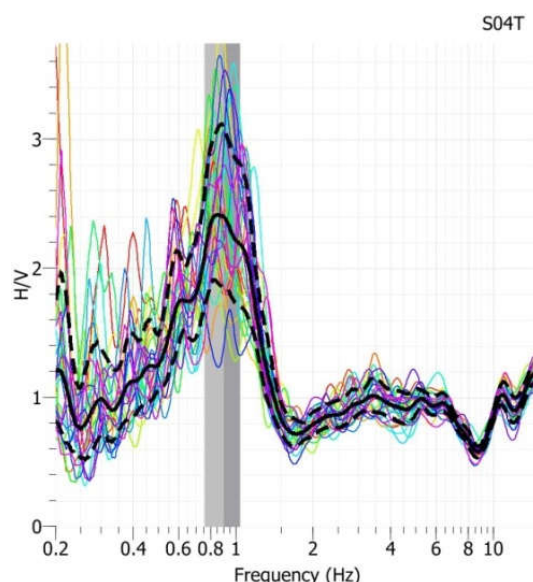
$$A_0 = 2.03919 [1.66614, 2.49576]$$

$$f_1 = 1.69 \pm 0.09 \text{ Hz}$$

$$A_1 = 1.95876 [1.69547, 2.26273]$$

$$\sigma_A = 1.155, \quad I_w = 100 \text{ s}, \quad n_w = 31$$

شکل ۷. نمودار نسبت طیفی در ایستگاه S012. در این نمودار دو بیشینه نزدیک به هم وجود دارد. اولین بیشینه در فرکانس ۰/۹۴ هرتز و بیشینه دوم در فرکانس ۱/۶۹ هرتز قرار دارد. موقعیت ایستگاه S012 در شکل ۵ نشان داده شده است.



$$f_0 = 0.885349 \pm 0.129848 \text{ Hz}$$

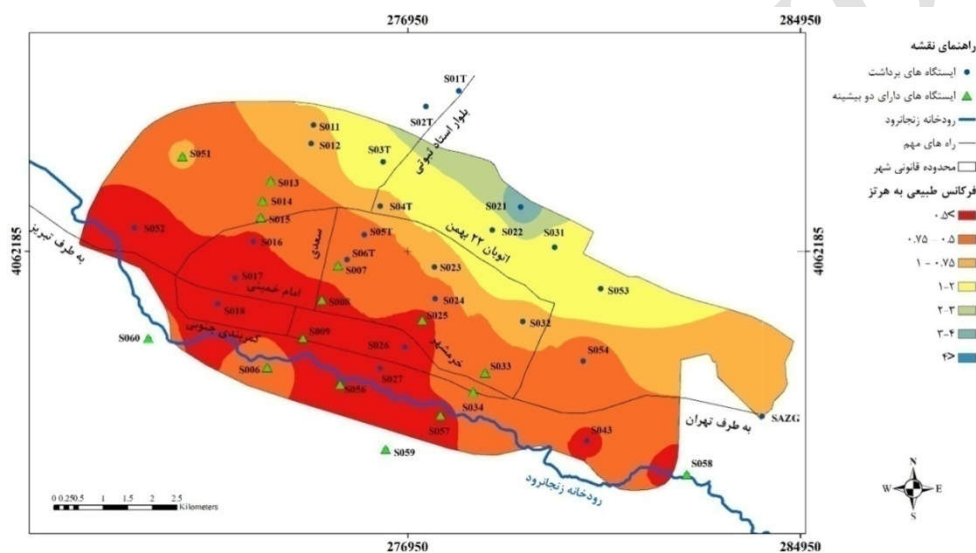
$$A_0 = 2.41986 [1.86398, 3.14153]$$

$$\sigma_A = 1.298, \quad I_w = 100 \text{ s}, \quad n_w = 30$$

شکل ۸. نمودار نسبت طیفی در ایستگاه S04T. در این ایستگاه، بیشینه نمودار در فرکانس ۰/۸۸ هرتز به‌دست آمده است.

**جدول ۳.** اطلاعات مربوط به فرکانس بیشینه دوم در ایستگاه‌های با دو بیشینه در محدوده شهری.  $f_0$  فرکانس بیشینه دوم،  $A_0$  دامنه بیشینه دوم،  $l_w$  طول پنجره انتخابی و  $n_w$  تعداد پنجره‌ها را نشان می‌دهد.

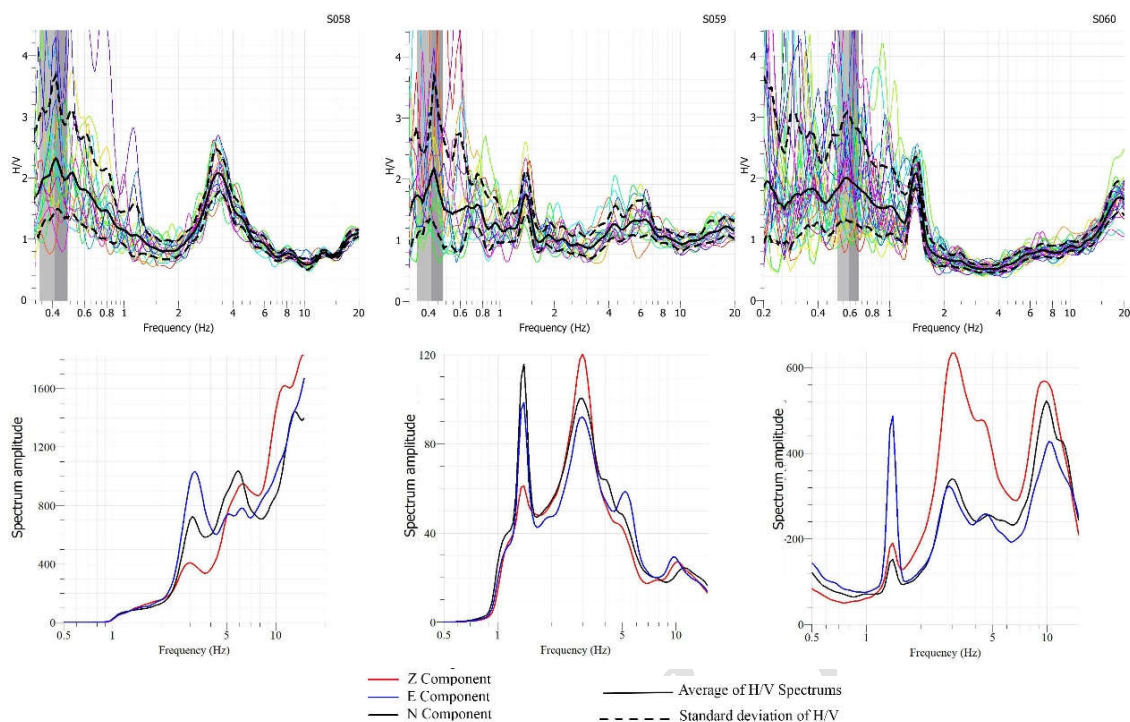
$X$	$Y$	Name	$f_0$ (HZ)	$A_0$	$\sigma_A$	$l_w$ (s)	$n_w$
274093	4059825	S006	7.04	4.80	1.095	80	7
275537	4061897	S007	3.38	1.88	1.124	100	35
275206	4061197	S008	3.40	1.82	1.320	40	24
274822	4060419	S009	6.36	2.00	1.202	50	20
274002	4063219	S014	3.88	2.15	1.205	50	10
273961	4062877	S015	3.08	2.00	1.180	50	18
273802	4062389	S016	4.06	2.44	1.089	100	19
277252	4060793	S025	4.34	2.15	1.195	80	7
278531	4059712	S033	7.27	1.86	1.088	80	18
272369	4064118	S051	3.52	2.32	1.168	40	12
282636	4057650	S058	3.41	2.41	0.92	50	30
276505	4058159	S059	1.37	1.86	0.57	50	28
271675	4060414	S060	1.3	1.82	0.49	70	24



**شکل ۹.** نقشه فرکانس طبیعی برای بیشینه اول. نقاط مشکی نقاط برداشت و مثلث‌های سبز، محل ایستگاه‌های با دو بیشینه طبیعی خاک را نشان می‌دهند.

است. در شکل ۱۰ نمودار نسبت طیفی و دامنه سه ایستگاه S58، S59 و S60 نمایش داده شده است که این ایستگاه‌ها در مجاورت یکدیگر و در امتداد رودخانه زنجان رود هستند. متأسفانه هیچ گمانه ژئوتکنیکی در جنوب شهر در اختیار نویسندگان قرار نگرفت تا بتوان وجود لایه دوم کم‌سرعت را بررسی کرد. در مناطق مرکزی و شمالی، گمانه‌هایی در دسترس نویسندگان این مقاله قرار گرفت که به تفسیر نتایج نمودارهای دو بیشینه در آن مناطق، کمک شایانی کرد. در ادامه به بررسی این نتایج پرداخته خواهد شد.

وجود نوفه صنعتی قوی در فاصله نزدیک مؤلفه افقی و مؤلفه عمودی، هر دو مؤلفه به‌طور تقریباً یکسانی تقویت می‌شوند و ممکن است بیشینه‌ای روی نمودار H/V ایجاد شود. با استفاده از نمودارهای طیف دامنه مؤلفه‌ها و شکل بیضی‌وار امواج ریلی می‌توان نوع بیشینه را تا حد زیادی تشخیص داد. با بررسی نمودارهای طیف دامنه در ایستگاه‌های شکل ۹ مشخص شد که تقریباً در تمامی آنها شکل بیضی‌وار امواج ریلی وجود دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بیشینه دوم مربوط به نوفه صنعتی نیست و احتمالاً مربوط به یک لایه کم‌سرعت زیرسطحی



شکل ۱۰. نمودار نسبت طیفی (ردیف اول) و نمودار ترکیبی دامنه کل نگاشت (ردیف دوم) در سه ایستگاه S058، S059 و S060. این ایستگاه‌ها در جنوب شهر و در حاشیه رودخانه زنجان رود قرار دارند. نام ایستگاه‌ها در بالای نمودار نسبت طیفی نوشته شده است. در این نمودارها بیشینه رخ داده در اثر ساختگاه در فرکانس حدود  $0.4$  هرتز قرار دارد. در نمودار طیف دامنه در سه مؤلفه، با توجه به بیضوی وار بودن شکل مؤلفه افقی به عمودی، بیشینه رخ داده در فرکانس حدود  $1/5$  و  $3$  هرتز، نیاز به بررسی بیشتر و دسترسی به اطلاعات گمانه‌ها دارد.

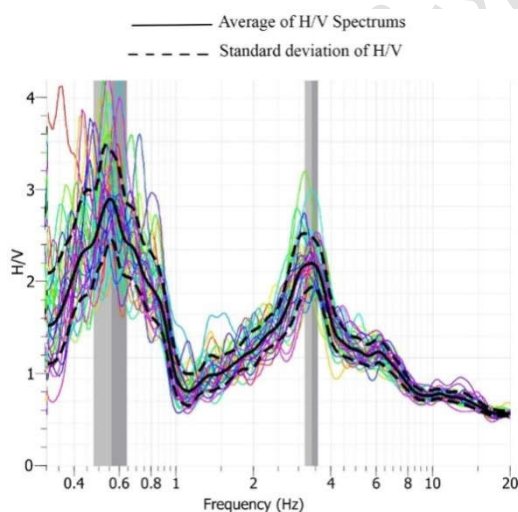
ماسه و شن است. لایه‌های خاک در یک مقطع افقی در محدوده ایستگاه‌هایی که دو بیشینه دارند (شکل ۱۲) و یک مقطع عمودی، عمود بر راستای ایستگاه‌های ذکر شده (شکل ۱۳)، بررسی شده‌اند. اندازه و بافت دانه‌های خاک مورد مطالعه در این شکل‌ها در جدول ۴ آمده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، لایه رسی در ایستگاه‌های با دو بیشینه فرکانسی دیده می‌شود. البته این مشاهده به معنی تعمیم کلی این مسئله نیست و تحقیق دقیق‌تر نیازمند گمانه‌های بیشتر است. به عبارتی، در قسمت میانی شهر با توجه به این اطلاعات، سه لایه روی یکدیگر قرار دارند که با حرکت به عمق، سرعت موج برشی در این لایه‌ها افزایش می‌یابد. در قسمت پایانی بخش نتایج و بحث، به دانه‌بندی لایه‌ها نیز بررسی می‌شود.

در ایستگاه‌های S006، S007، S008، S009، S014، S015، S016، S025، S033 و S051، بیشینه دوم به احتمال زیاد با اثر ساختگاه مرتبط است. نمونه‌ای از نمودار H/V مربوط به این ایستگاه‌ها در شکل ۱۱ نمایش داده شد. حضور دو بیشینه طبیعی در نمودار H/V نشان‌دهنده وجود دو مرز با تباین امپدانس سرعتی زیاد است. بیشینه دوم (بیشینه با فرکانس بیشتر) می‌تواند مربوط به مرز دو لایه در عمق کمتر باشد (گویگون و همکاران، ۱۹۹۸ و ماکائو و همکاران، ۲۰۱۵). همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده شد، سرعت موج برشی نیز در محل این ایستگاه‌ها کمترین مقدار را دارد. براساس اطلاعات به‌دست‌آمده از گمانه‌های موجود که موقعیت آنها در شکل ۶ و مشخصات آنها در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است، این قسمت حداقل تا عمق ۳۰ متر، پوشیده از رس،



جدول ۴. اندازه و بافت دانه‌های خاک در ضخامت ۲۰ متر برای گمانه‌های ۶، ۷، ۱۹ و ۲۲ و ضخامت ۳۰ متر برای گمانه‌های ۱، ۲، ۱۱ و ۱۴. محل گمانه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

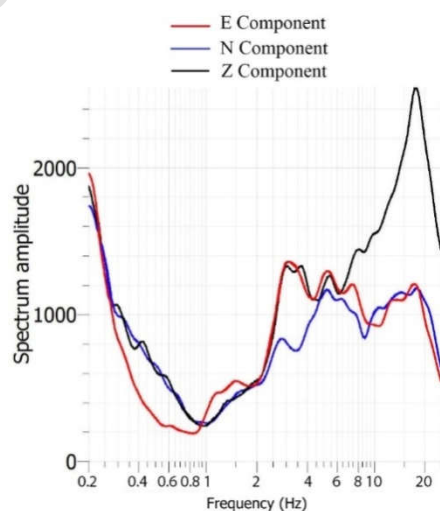
گمانه	گمانه	گمانه	گمانه	گمانه	گمانه	گمانه	گمانه	گمانه	علائم و توصیف
جای ریزدانه	رس غیر آلی با خاصیت خمیری زیاد (CH)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	رس غیر آلی با خاصیت خمیری کم تا متوسط (CL)	۰	۰	۱۱	۳	۰	۱۸	۱۶	۳
	ماسه رس دار، مخلوط ماسه-سیلت؛ با خاصیت خمیری کم یا زیاد (SC)	۶	۹	۹	۱۳	۱۸	۴	۲	۱۵
	ماسه سیلت دار، مخلوط ماسه-سیلت؛ با خاصیت خمیری کم یا بدون خاصیت خمیری (SM)	۰	۱۳	۰	۴	۸	۰	۰	۲
	ماسه یا ماسه گراول دار با دانه بندی ضعیف (SP)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ماسه سیلت دار با دانه بندی ضعیف (SP-SM)	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ماسه یا ماسه گراول دار با دانه بندی خوب (SW)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ماسه سیلت دار با دانه بندی خوب (SW-SM)	۰	۲	۰	۰	۲	۰	۰	۰
	گراول رس دار، مخلوط گراول-ماسه-رس؛ با خاصیت خمیری کم یا زیاد (GC)	۱۷	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۰
	گراول سیلت دار، مخلوط گراول-ماسه-سیلت؛ با خاصیت خمیری کم یا بدون خاصیت خمیری (GM)	۰	۲	۰	۰	۲	۰	۰	۰
جای درشت دانه	گراول یا مخلوط گراول-ماسه با دانه بندی ضعیف (GP)	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	گراول یا مخلوط گراول-ماسه با دانه بندی خوب (GW)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	گراول رس دار با دانه بندی ضعیف (GP-GC)	۵	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ضخامت کل (m)	۳۰	۳۰	۲۰	۲۰	۳۰	۳۰	۲۰	۲۰



$$f_0 = 0.55 \pm 0.087 \text{ HZ}$$

$$f_1 = 3.38 \pm 0.18 \text{ HZ}$$

$$l_w = 100 \text{ s}$$



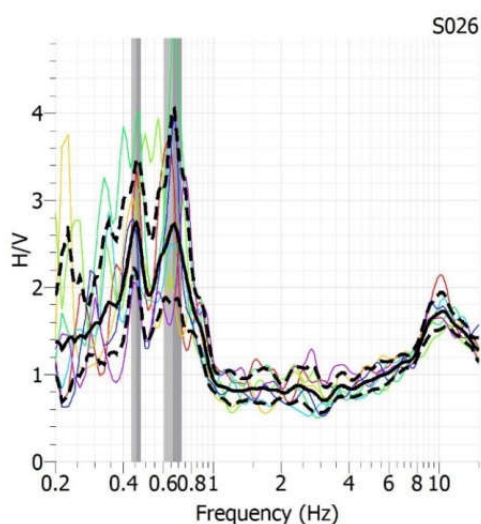
$$A_0 = 2.39706 [1.95694, 2.93617]$$

$$A_1 = 1.88478 [1.67674, 2.11863]$$

$$n_w = 35$$

شکل ۱۱. نمودار ترکیبی دامنه (سمت راست) و نمودار نسبت طیفی (سمت چپ) به دست آمده در ایستگاه S007. در این نمودار، دو بیشینه دیده می شود که هر دو مربوط به اثر ساختگاه هستند. بیشینه اول در فرکانس ۰/۵۵ هرتز و بیشینه دوم در فرکانس ۳/۳۸ هرتز قرار دارد. در فرکانس حدود ۱۵ هرتز نوفه صنعتی دیده می شود.  $f_0$  فرکانس اولین بیشینه،  $A_0$  دامنه اولین بیشینه،  $f_1$  فرکانس دومین بیشینه،  $A_1$  دامنه دومین بیشینه،  $l_w$  طول پنجره انتخابی و  $n_w$  تعداد پنجره ها است. تقویت مؤلفه های افقی و تقویت نشدن مؤلفه عمودی در فرکانس های حدود ۰/۵ و ۳/۵ هرتز مشهود است.

در ایستگاه‌های S025 (بیشینه اول)، S026، S033 (بیشینه اول)، S052، S054، S055 و SAZG مشابه با ایستگاه‌هایی همچون S022 و S013، بیشینه پهن و یا چند بیشینه در مجاورت هم روی نمودار H/V دیده می‌شود که می‌تواند بیانگر وجود یک منطقه گذار بین دو منطقه رسوب سفت‌تر و نرم‌تر باشد. مثالی از نمودارهای این ایستگاه‌ها در شکل ۱۴ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، این ایستگاه‌ها در یک راستای غربی-شرقی و در مجاورت ایستگاه‌هایی قرار دارند که دو بیشینه دارد. بنابراین احتمالاً این منطقه گذار، در ارتباط با دو لایه رسوب مشاهده‌شده در این ایستگاه‌هاست.



$$f_0 = 0.45 \pm 0.02 \text{ Hz}$$

$$A_0 = 2.74556 [2.17048, 3.47302]$$

$$f_1 = 0.66 \pm 0.06 \text{ Hz}$$

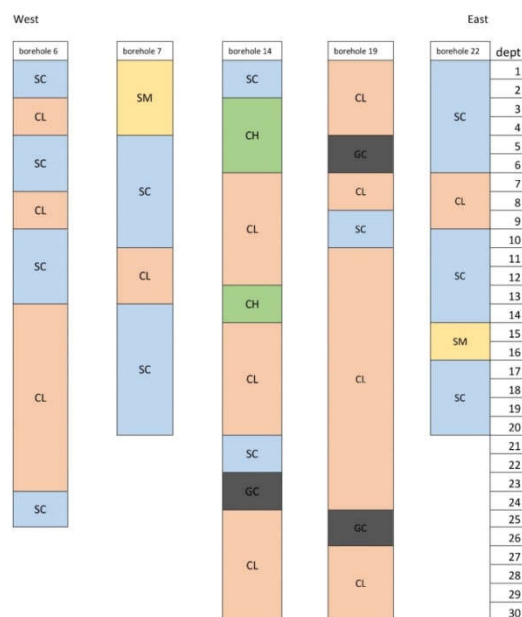
$$A_1 = 2.71797 [1.8293, 4.03837]$$

$$\sigma_{A0} = 1.264, \sigma_{A1} = 1.485$$

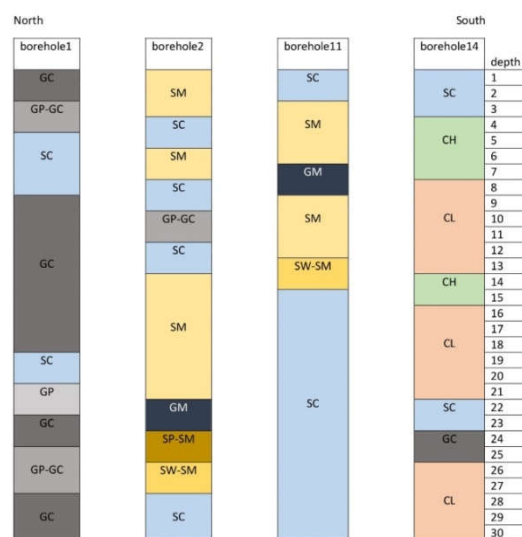
$$l_w = 100 \text{ s}, n_w = 5$$

شکل ۱۴. نمودار نسبت طیفی در ایستگاه S026. در این نمودار دو بیشینه مشاهده می‌شود که نزدیک به هم واقع شده‌اند. بیشینه اول در فرکانس ۰/۴۵ هرتز و بیشینه دوم در فرکانس ۰/۶۶ هرتز قرار دارد.

۳-۳ بررسی رابطه عمق رسوبات و فرکانس خاک  
طبق نتایج نتایج نمودارهای H/V و قانون یک‌چهارم طول موج، یک مقطع عرضی شمالی-جنوبی در منطقه مطالعاتی رسم



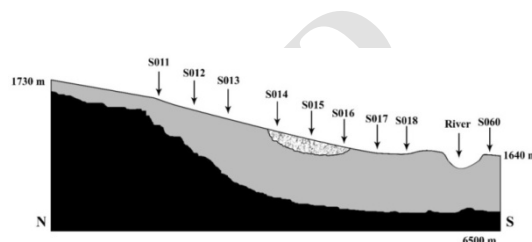
شکل ۱۲. لایه‌های خاک روی مقطع افقی در محل ایستگاه‌هایی که دو بیشینه فرکانسی دارند. علائم به اختصار نوع خاک را نشان می‌دهند. CL رس، CH رس با پلاستیسیته زیاد، SC ماسه همراه با رس، SM ماسه همراه با سیلت و GC قلوه‌سنگ همراه با رس را نشان می‌دهد. در تمامی این گمانه‌ها، لایه‌ای از رس وجود دارد. ستون سمت راست عمق لایه‌های خاک را برحسب متر نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. لایه‌های خاک روی مقطع عمودی. این مقطع عمود بر مقطع شکل ۱۰ است. GM قلوه‌سنگ همراه با سیلت، GP قلوه‌سنگ با دانه‌بندی بد، SW ماسه با دانه‌بندی خوب و SP ماسه با دانه‌بندی بد است. تنها در گمانه ۱۴ که در نزدیکی ایستگاه برداشت نوفه با دو بیشینه قرار گرفته است، لایه‌های رس وجود دارد. ستون سمت راست عمق لایه‌های خاک را برحسب متر نشان می‌دهد.

برای بیشینه اول (شکل ۵)، نشان‌دهنده نتایج قابل توجهی است. در روند غربی-شرقی (A)، به‌طور مشخص از گمانه ۱۴ به سمت گمانه ۲۲، ذرات رسی خاک از ۰٪ تا ۹۰٪ به ۱۵٪ کاهش و ذرات ماسه‌ای و گراولی از ۱۰٪ به ۸۵٪ افزایش می‌یابد و بافت خاک از ریزدانه به درشت‌دانه تغییر می‌کند. همراه با این تغییر، فرکانس طبیعی نیز افزایش می‌یابد. در امتداد شمال به جنوب (B)، از گمانه ۱ به سمت گمانه ۱۴، با کاهش اندازه ذرات گراولی و ماسه‌ای از ۱۰۰٪ به ۲۳٪ و افزایش ذرات رسی از ۰٪ به ۷۷٪ و تغییر بافت خاک از درشت‌دانه به ریزدانه، فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد. به این ترتیب، در شمال شهر زنجان بافت درشت‌تر خاک، فرکانس طبیعی بزرگ‌تری به دست آمده است و با حرکت به سمت مرکز و جنوب شهر، با تغییر بافت خاک به ریزدانه، فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ایستگاه‌های با دو بیشینه نیز در مناطقی که خاک ریزدانه ضخامت زیادی دارد، یعنی مناطق مرکزی و جنوبی شهر متمرکز هستند. به‌طور خاص، گمانه‌های شماره ۷، ۱۴ و ۱۹ که حاوی تناوب لایه‌های خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه هستند، در نزدیکی ایستگاه‌هایی قرار دارند که دو بیشینه دارند و احتمالاً تغییر در مرز لایه‌ها، سبب ایجاد دو بیشینه در فرکانس طبیعی شده است. نکته جالب توجه درباره گمانه ۱۴ که تقریباً در مرکز شهر واقع شده است، افزایش فرکانس طبیعی و سرعت موج برشی از این نقطه در جهات مختلف شرق، غرب و شمال است. همان‌طور که در شکل ۱۳ و جدول ۴ مشخص است، در این منطقه، خاک در عمق برابر با سایر گمانه‌ها بسیار ریزدانه است. علاوه بر این، ضخامت قابل توجهی از خاک CH، تنها در این گمانه مشاهده می‌شود که معرف خاک‌های ریزدانه رسی غیر ارگانیک با پلاستیسیته و چسبندگی زیاد است.

شده است. نتایج عددی این نمودار، کاملاً تقریبی هستند و فقط برای درک بیشتر ارائه شده‌اند. طول این مقطع ۶۵۰۰ متر است (شکل ۱۵). همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با کاهش ارتفاع از شمال به جنوب شهر، شیب لایه زیرین (سنگ بستر) در محل ایستگاه‌های S011، S012 و S013 تغییر کرده و منطقه وارد حوضه رسوبی شده است. همچنین در محل ایستگاه‌های S014، S015 و S016، یک لایه کم‌ضخامت و کم‌سرعت وجود دارد.



شکل ۱۵. مقطع خاک از شمال شهر به سمت جنوب شهر. طول مقطع ۶۵۰۰ متر است. این شکل با توجه به تخمین‌های زده شده برای ضخامت خاک به صورت کاملاً تقریبی رسم شده است تا بتوان نسبت به آنچه بیان شد، دید بهتری ارائه داد. رنگ مشکی، سنگ بستر و رنگ خاکستری، رسوبات آبرفتی عهد حاضر را نشان می‌دهد. در محل ایستگاه‌های S014، S015، S016 لایه‌ای نرم و کم‌ضخامت واقع شده است. در نزدیکی رودخانه، به داشتن اطلاعات گمانه برای بررسی وجود لایه‌های کم‌سرعت زیرسطحی نیاز است.

علاوه بر ارتباط بین فرکانس طبیعی خاک و ضخامت رسوبات در سطح شهر زنجان، به نظر می‌رسد توزیع اندازه دانه و بافت خاک نیز بر این فرکانس اثرگذار است. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نمونه‌هایی از گمانه‌های حفر شده در خاک با عمق‌های مختلف مشاهده شد که نام‌گذاری انواع خاک در آنها براساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (USCS) (Unifies Soil Classification System) بود. بررسی انواع خاک در این گمانه‌ها در ضخامت ۲۰ متر با روند غربی-شرقی و ۳۰ متر با روند شمالی-جنوبی و مقایسه آن با نقشه به‌دست آمده از توزیع فرکانس طبیعی

و در هر منطقه از شهر، با توجه به فرکانس طبیعی خاک، تعداد طبقات ساختمان باید به گونه‌ای باشد که فرکانس تشدید سازه و فرکانس طبیعی ساختمانگاه مشابه نباشند.

تنها اطلاعات موجود از تعداد طبقات در شهر زنجان (شکل ۱۶) مربوط به سال ۱۳۸۸ است. با توجه به اینکه از سال ۱۳۸۸ به بعد، تغییرات چشمگیری در تعداد طبقات مناطق موجود در شکل ۱۶ رخ نداده است، در این قسمت، درباره وضعیت شهر از منظر تعداد طبقات و فرکانس طبیعی خاک بحث می‌شود. گفتنی است بخش بزرگی از ساخت‌وسازهای شهر زنجان پس از سال ۱۳۸۸ در سمت شرقی و شمال‌غربی شهر صورت گرفته است که در شکل ۱۶ اطلاعاتی از این بخش‌ها ارائه نشده است.

فرکانس طبیعی در شمال شهر در محدوده ۴ هرتز است که معادل فرکانس تشدید ساختمان‌های دو تا چهار طبقه است. همان‌طور که در شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود و با توجه به بازدیدهای محلی و اطلاعات موجود در سازمان نظام مهندسی ساختمان استان زنجان، با اینکه بیشتر ساختمان‌های قدیمی در شمال شهر یک طبقه هستند، ولی به دلیل بالا بودن قیمت زمین در این مناطق، بیشتر ساخت‌وسازهای آغاز شده در محدوده سه تا پنج طبقه قرار دارند که برای گسترش‌دهندگان شهری، جای تأمل دارد. در محدوده گسترده‌ای از شهر، فرکانس طبیعی کمتر از یک هرتز است که برابر با فرکانس طبیعی ساختمان‌های ده تا بیست طبقه است. با توجه به قدیمی بودن بافت جنوب شهر، انتظار ساخت بناهای جدید در این مناطق می‌رود؛ از این جهت لازم است هنگام ساخت، ارتفاع ساختمان‌ها مورد توجه قرار گیرد و اجازه ساخت ساختمان‌هایی با این تعداد طبقات داده نشود یا تدابیر خاص و ویژه‌ای برای تاب‌آوری آنها انجام گیرد.

بنا به طرح تفصیلی شهر زنجان که در سال ۸۸ به سفارش مدیریت شهرسازی و معماری وزارت مسکن و شهرسازی وقت تهیه شد، پیشرفت آینده شهر به سمت

### ۴-۳ بررسی رابطه فرکانس طبیعی خاک و

#### ساخت‌وسازهای انجام‌شده در شهر زنجان

در شرایط یکسان کیفیت طراحی ساختمان، پاسخ هر ساختمان در برابر زلزله به ارتفاع ساختمان وابسته است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، زمانی که دوره‌تناوب طبیعی ساختمانگاه و دوره‌تناوب تشدید سازه مشابه باشد، سازه دچار تشدید می‌شود و با بیشترین دامنه شروع به نوسان می‌کند. روابط مختلفی برای تخمین فرکانس طبیعی ساختمان‌ها وجود دارد که فرکانس طبیعی را براساس پارامترهای مختلف تعیین می‌کنند. رابطه (۱۰) یکی از ساده‌ترین روابط ارائه‌شده برای تخمین فرکانس طبیعی ساختمان است و به‌طور تقریبی، ارتباط بین تعداد طبقات ساختمان ( $n$ ) و دوره‌تناوب تشدید ساختمان ( $T$ ) را بیان می‌کند (هوسنر، ۱۹۶۱):

$$T = n/10 \quad (10)$$

نوسان ساختمان‌های بلند و کوتاه بسیار متفاوت از یکدیگر است. در جدول ۵ مثال‌هایی از فرکانس طبیعی ساختمان‌های مختلف ارائه شده است (آرنولد، ۲۰۰۷).

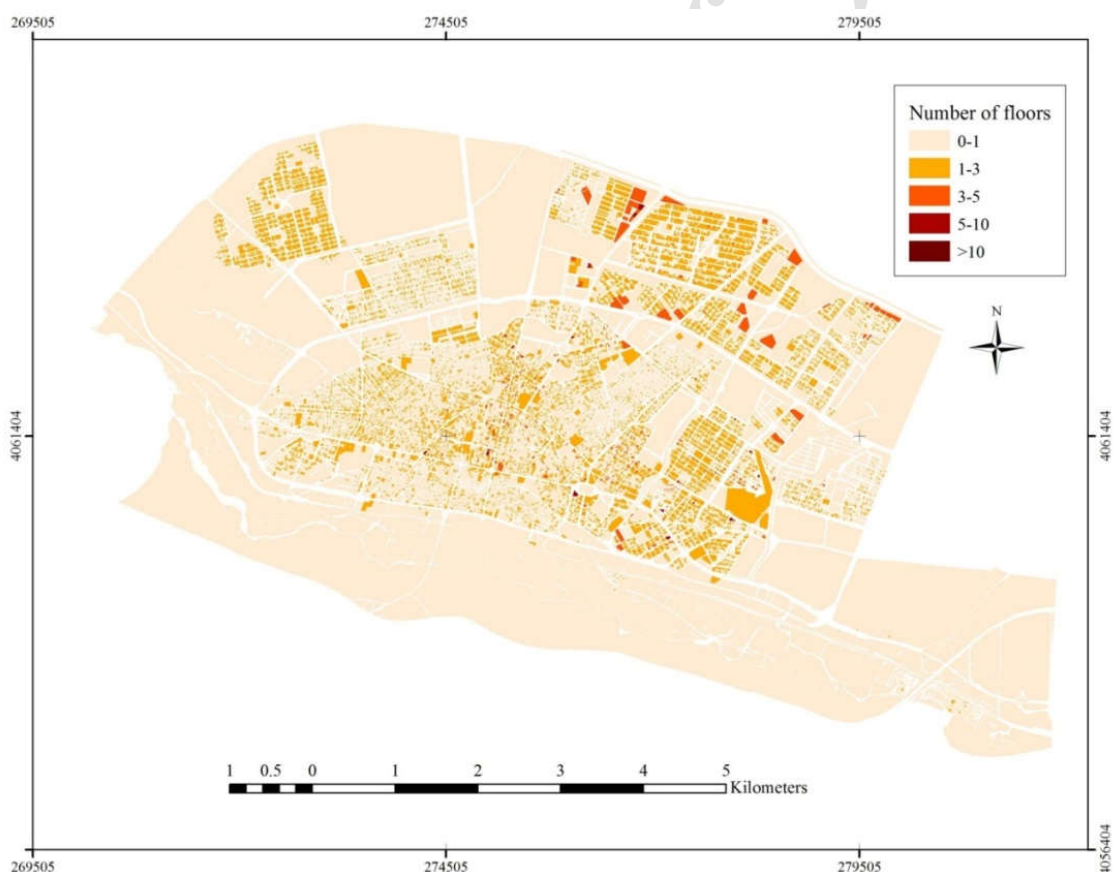
جدول ۵. دوره‌تناوب طبیعی ساختمان‌های مختلف براساس تعداد طبقات. دوره‌تناوب، تنها براساس ارتفاع ساختمان تعیین شده است و با توجه به نوع مصالح به‌کاررفته در ساختمان و هندسه آن می‌تواند تغییر کند (آرنولد، ۲۰۰۷).

تعداد طبقات ساختمان	دوره‌تناوب طبیعی ساختمان (ثانیه)
۱	۰/۱
۴	۰/۵
۱۰-۲۰	۱-۲
۶۰	۷

همان‌طور که گفته شد، با وقوع پدیده تشدید، مدت زمان نوسان، افزایش و در نتیجه احتمال خرابی ساختمان و شدت آن افزایش می‌یابد؛ از این رو، ضروری است طراحی ساختمان‌ها با توجه به فرکانس طبیعی خاک صورت گیرد

زیادی دارند. در مرکز و غرب شهر نیز ساختمان‌ها باید به گونه‌ای ساخته شوند که فرکانس تشدید آنها، مشابه دو فرکانس طبیعی به دست آمده در این ناحیه نباشند. به این منظور، باید از ساخت ساختمان‌های کوتاه یک تا سه طبقه و ساختمان‌های بلند بیست طبقه ممانعت شود. شایان ذکر است تعداد طبقات یادشده تقریبی است. لازم است فرکانس طبیعی ساختمان‌ها با توجه به مصالح به کاررفته در ساختمان، با استفاده از روابط دقیق‌تر، محاسبه و استفاده شود.

شمال شرق شهر است. در این مناطق اغلب ساختمان‌های بلندی ساخته می‌شوند که فرکانس کمی دارند. از آنجا که فرکانس تشدید خاک در این مناطق بین  $0.7$  تا  $1.5$  هرترتز است؛ بنابراین باید از ساخت ساختمان‌های شش تا پانزده طبقه در این منطقه اجتناب شود. با توجه به ساخت‌وسازهای اخیر انجام شده در مناطق شرق و شمال شرق زنجان که متأسفانه به دلیل جدید بودن آنها داده‌هایشان در شکل ۱۶ موجود نیست، اغلب ساختمان‌های ساخته شده در این قسمت از شهر، که بیشتر از نوع طرح مسکن مهر هستند، بالای شش طبقه هستند و تراکم



شکل ۱۶. نقشه تعداد طبقات ساختمان‌ها در شهر زنجان مربوط به سال ۱۳۸۸ که از شهرداری زنجان گرفته شده است.

#### ۴ نتیجه‌گیری

به منظور بررسی اثر ساختگاه در سطح شهر زنجان، در ۴۱ نقطه از شهر، برداشت نوفه انجام شد و با استفاده از روش ناکامورا، فرکانس طبیعی در این نقاط به دست آمد. روش ناکامورا تخمین قابل قبولی از اندازه فرکانس طبیعی ارائه می‌دهد، اما همواره تقویت دامنه را کمتر نشان می‌دهد. نتایج حاکی است که در گستره شهر، فرکانس طبیعی از ۰/۳ تا ۱۰/۰ هرتز متغیر است. در شمال شهر، فرکانس به دست آمده بیش از ۴ هرتز است و سرعت موج برشی در مقایسه با دیگر نقاط شهر بیشتر است؛ بنابراین ضخامت لایه رسوب در این منطقه کم است. در قسمت میانی شهر، به علت ورود به حوضه رسوبی دشت زنجان، ضخامت رسوبات بیشتر می‌شود. درون حوضه رسوبی دشت زنجان، فرکانس طبیعی کمتر از ۱ هرتز و سرعت موج برشی کمتر از مقدار آن در شمال شهر است؛ بنابراین انتظار می‌رود پوشش رسوبی ضخامت چند صد متر داشته باشد. در نیمه جنوبی شهر، در بعضی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری اثر ساختگاه، دو پیشینه در نمودار H/V وجود دارد که می‌تواند نشان‌دهنده یک لایه سطحی و یک لایه زیرسطحی کم‌سرعت باشد که اطلاعات گمانه‌ها مؤید این نظر است. در نهایت، با توجه به عمق رسوبات به دست آمده از فرکانس طبیعی خاک، تعداد طبقات ساختمان‌ها باید به گونه‌ای باشد که فرکانس تشدید سازه و فرکانس طبیعی ساختگاه مشابه نباشند؛ بنابراین در شمال شهر که فرکانس تشدید در محدوده ۴ هرتز است، ساخت‌وسازهای کم‌تراکم و در محدوده یک تا سه طبقه مناسب نیست. همچنین در محدوده مرکز و غرب شهر نیز که فرکانس طبیعی در حدود ۱ هرتز است، از ساخت‌وسازهای تراکم زیاد مانند ساختمان‌های ده تا دوازده طبقه باید اجتناب شود. در شمال شرق شهر که فرکانس تشدید خاک بین ۰/۷ تا ۱/۵ هرتز است، توصیه می‌شود ساخت‌وسازها در محدوده تراکم کم و متوسط باشند.

#### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از کارکنان آزمایشگاه‌های مکانیک خاک در شهر زنجان و مدیر کل مدیریت بحران که در جمع‌آوری و برداشت داده کمال همکاری را کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

#### منابع

- ثبوتی، ف.، حسامی، خ.، قدس، ع.، طبسی، ه. و عسگری، ر.، ۱۳۸۷، لرزه‌خیزی و گسلش فعال در زنجان و مناطق مجاور: سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، انجمن ژئوپلتیک ایران.
- حسینی پاک، ع. ا.، ۱۳۹۲، زمین‌آمار (ژئواستاتستیک)، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- دراسرای، ع.، بیک لریان، م.، قمی، ج. و خانلو، م.، ۱۳۹۰، بررسی ژئوتکنیکی ارتباط سرعت موج برشی خاک با عدد آزمایش نفوذ استاندارد برای فلات ایران: ششمین گنکره ملی مهندسی عمران، سمنان.
- شیخی، ر.، سپهوند، م. ر.، غلامی، و. و زارع، م. ع.، ۱۳۹۴، تحلیل مایکروترموورها در تعیین مشخصات ساختمانی با استفاده از روش نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی به عمودی: دومین همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، شیراز.
- ضرغامی، س.، تیموری، ا.، محمدیان، ح. و شماعتی، ع.، ۱۳۹۵، سنجش و ارزیابی میزان تاب‌آوری محله‌های شهری در برابر زلزله مورد پژوهی: (بخش مرکزی شهر زنجان): مجله پژوهش و برنامه‌ریزی شهری، ۷(۲۷)، ۷۷-۹۲.
- کازمی، ل. و کلانتری، م.، ۱۳۹۰، تحلیل عوامل مؤثر بر بیمه نمودن مسکن شهر زنجان در برابر زلزله: فصلنامه جغرافیایی چشم انداز زاگرس، ۳(۷)، ۹۹-۱۱۷.

- 1985: Geophysical Research Letters, **13**(6), 593-596.
- Bonamassa, O., and Vidale, J. E., 1991, Directional site resonances observed from aftershocks of the 18 October 1989 Loma Prieta earthquake: Bulletin of the Seismological Society of America, **81**(5), 1945-1957.
- Bonilla, L. F., Steidl, J. H., Lindley, G. T., Tumarkin, A. G., and Archuleta, R. J., 1997, Site amplification in the San Fernando Valley, California: Variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods: Bulletin of the Seismological Society of America, **87**(3), 710-730.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cécile, C., Bard, P.Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J., and Donat, F., 2006, H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations: Geophysical Journal International, **167**(2), 827-837.
- Bouranta, E., Vallianatos, F., Hatzopoulos, J. N., Papadopoulos, I., and Gaganis, P., 2013, Microtremor HVSR study of site effects in the urban area of the town of Mytilene, Lesvos (Greece), Preliminary results: Bulletin of the Geological Society of Greece, Proceedings of the 13th International Congress, Chania, September, 2013.
- Carniel, R., Barazza, F., and Pascolo, P., 2006, Improvement of Nakamura technique by singular spectrum analysis: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **26**(1), 55-63.
- Caselles, J., Pérez-Gracia, V., Franklin, R., Pujades, L. G., Navarro, M., Clapes, J., Canas, J., and García, F., 2010, Applying the H/V method to dense cities. A case study of Valencia city: Journal of Earthquake Engineering, **14**(2), 192-210.
- Chatterjee, K., Choudhury, D., 2013, Variations in shear wave velocity and soil site class in Kolkata city using regression and sensitivity analysis: Natural Hazard, **69**(3), 2057-2082.
- Darya Khak Pey, Earthquake Emergency Reconstruction Project, Risk Assessment at Provincial Level (for Kermanshah, Qazvin, Zanjan and Hamadan Provinces), TASK E: General Training, Zanjan, 2009.
- Diagourtas, D., Tzanis, A., and Makropoulos, K., 2002, Comparative study of microtremor analysis methods: Earthquake Microzoning, 2463-2479.
- Duval, A. M., Bard, P. Y., Méneroud, J. P., and Vidal, S., 1996, Mapping site effect with کلانتری، ع.، ۱۳۹۵، تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی در منطقه زنجان: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- کمیته بازننگری دائمی آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۹۳، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم.
- وبگاه داده‌های مرکز آمار ایران <http://www.amar.org.ir> (Alderman, J., Beardall, J., Campbell, K., Campbell, R., Chang, S., Cole, C., David, K., Goltz, J., Gordon, B., and Lee, M., 1995, The January 17, 1995 Kobe earthquake. An EQE summary report: EQE International.
- Almadani, S., Abdelrahman, K., Ibrahim, E., Al-Bassam, A., Al-Shmrani, A., 2015, Site response assessment of an urban extension site using microtremor measurements, Ahud Rufeidah, Abha District, Southwest Saudi Arabia: Arabian Journal of Geoscience, **8**(4), 2347-2357.
- Arnold, C., 2007, Designing for Earthquakes: A Manual for Architects: Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, Available as a book or online from <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do>.
- ASTM D1586, 2008, Standard test method for standard penetration test (SPT) and split barrel sampling of soils: Annual book of ASTM standards.
- Atakan, K., Duval, A., Theodulidis, N., Bard, P., and Team, S., 2004, The H/V spectral ratio technique: experimental conditions, data processing and empirical reliability assessment: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- Bard, P. Y., 1999, Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? In: Irikura, K., Kudo, K., Okada, H., and Sasatani, T., (eds), The effects of surface geology on seismic motion, Balkema, Rotterdam, 1251-1279.
- Bard, P. Y., 2005, SESAME-Team. 2005. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations-measurements, processing and interpretations: SESAME European research project.
- Beck, J. L., and Hall, J. F., 1986, Factors contributing to the catastrophe in Mexico City during the earthquake of September 19,

- Housner, G., 1961, Vibration of structures induced by seismic waves: Shock and vibration handbook, **3**(50).
- Kamal, A., and Midorikawa, S., 2006, Geomorphological approach for seismic microzoning within Dhaka city area, Bangladesh: International Association for Engineering Geology and the Environment, **457**, 1-2.
- Kanai, K., Tanaka, T., and Osada, K., 1954, Measurement of the microtremor: Bulletin of the Earthquake Research Institute of Tokyo, **32**, 199-209.
- Kobayashi, H., Seo, K., Midorikawa, S., and Kataoka, S., 1986, Measurements of microtremors in and around Mexico D. F., Part I: Technical Report, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan.
- Konno, K., and Ohmachi, T., 1998, Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor: Bulletin of the Seismological Society of America, **88**(1), 228-241.
- Lachet, C., Hatzfeld, D., Bard, P. Y., Theodulidis, N., Papaioannou, C., and Savvaidis, A., 1996, Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches: Bulletin of the Seismological Society of America, **86**(6), 1692-1703.
- Lermo, J., and Chávez-García, F. J., 1994, Are microtremors useful in site response evaluation?: Bulletin of the Seismological Society of America, **84**(5), 1350-1364.
- Macau, A., Benjumea, B., Gaba's, A., Figueras, S., Vila, M., 2015, The Effect of shallow Quaternary deposits on the shape of the H/V Spectral Ratio: Surveys in Geophysics, **36**(1), 185-208.
- Makra, K., Raptakis, F. J., Chavez-Garcia, K., Ptilakis, K., 2012, Site Effects and Design Provisions: The Case of Euroseistest, In R. Antoni, Carlos, O. (Ed.), Earthquake Microzoning (Vol. Pure and applied geophysics, 2349-2367), Berlin: Birkhauser.
- Molavi, M., and Eshghi, S., 1992, Structural damage from Manjil-Iran earthquake of June 1990, Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface: Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, **30**(1).
- Nakamura, Y., 2000, Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique microtremors: International conference on seismic zonation.
- Duval, A. M., Vidal, S., Méneroud, J. P., Singer, A., De Santis, F., Ramos, C., Romero, G., Rodriguez, R., Pernia, A., and Reyes, N., 2002, Caracas, Venezuela, site effect determination with microtremors: Earthquake Microzoning, 2513-2523, Springer.
- Field, E. H., and Jacob, K. H., 1995, A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent: Bulletin of the Seismological Society of America, **85**(4), 1127-1143.
- Fnais, M. S., Abdelrahman, K., Al-Amiri, A. M., 2010, Microtremor measurements in Yanbu city of Western Saudi Arabia: A tool for seismic microzonation: Journal of King Saud University-Science, **22**(2), 97-110.
- Guéguen, P., Chatelain, J. L., Guillier, B., Yepes, H., and Egred, J., 1998, Site effect and damage distribution in Pujili (Ecuador) after the 28 March 1996 earthquake: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **17**(5), 329-334.
- Guillier, B., Cornou, C., Kristek, J., Moczo, P., Bonnefoy-Claudet, S., Bard, P., and Donat, F., 2006, Simulation of seismic ambient vibrations: does the H/V provide quantitative information in 2D-3D structures: Third international symposium on the effects of surface geology on seismic motion Grenoble, France.
- Haghshenas, E., Bard, P. Y., Theodulidis, N., and Team, S. W., 2008, Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio: Bulletin of Earthquake Engineering, **6**(1), 75-108.
- Herak, M., 2007, The use of ambient noise for building and soil characterization, In: Mucciarelli, M., Hreak, M., and Cassidy, J., (Ed.), Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data (Vol. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, pp. 3-15): Springer.
- Hossain, M. S., Kamal, A. M., Rahman, M. Z., Rahman, M. M., Nahar, K., and Woobaidullah, A., 2016, Predominant period and amplification factor estimation with respect to geomorphology-a case study of Sylhet city corporation area, Bangladesh. Bangladesh: Journal of Scientific Research, **27**(1), 1-10.



- Microtremor Testing Modal Analysis Topics, **3**, 451-459, Springer.
- Yamanaka, H., Motoki, K., Yamada, N., Sugawara, T., Mabuchi, Y., and Seo, K., 2008, Observation of ground motions of aftershocks of the 2007 Noto Hanto earthquake in Monzenmachi, the Wajima city, for estimation of site amplification: Earth, planets and space, **60**(10), 1063-1067.
- Zhao, J. X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., and Ogawa, H., 2006, An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio: Bulletin of the Seismological Society of America, **96**(3), 914-925.
- and its applications: Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering.
- Nogoshi, M., and Igarashi, T., 1971, On the amplitude characteristics of microtremor (part 2): Journal of the Seismological Society of Japan, **24**, 26-40.
- Ohmachi, T., Nakamura, Y., and Toshinawa, T., 1991, Ground motion characteristics of the San Francisco bay area detected by microtremor measurements.
- Panou, A., Theodulidis, N., Hatzidimitriou, P., Stylianidis, K., and Papazachos, C., 2005, Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment: the case of the city of Thessaloniki (Northern Greece): Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **25**(4), 261-274.
- Seo, K., Yamanaka, H., Kurita, K., Motoki, K., Eto, K., Terasaka, M., et al., 2000, A joint research on microtremors in Fukui basin, Japan- for site effects evaluation during the 1948 Fukui (Japan) earthquake: 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- Seht, M., and Wohlenberg, J., 1999, Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments: Bulletin of the Seismological Society of America, **89**(1), 250-259.
- Soleymani Azad, S., Dominguez, S., Philip, H., Hessami, K., Forutan, M. R., Zadeh, M. S., and Ritz, J. F., 2011, The Zandjan fault system: Morphological and tectonic evidences of a new active fault network in the NW of Iran: Tectonophysics, **506**(1-4), 73-85.
- Souriau, A., Roullé, A., and Ponsolles, C., 2007, Site effects in the city of Lourdes, France, from H/V measurements: implications for seismic-risk evaluation: Bulletin of the Seismological Society of America, **97**(6), 2118-2136.
- Traber, J., Kutyn, K., Ventura, C. E., and Finn, W. L., 2011, Evaluation of Site Periods in the Metro Vancouver Region Using

### پیوست پ

جدول پ. شماره نقاط گمانه‌های ژئوتکنیک به همراه مقادیر Vs30 در آنها (موقعیت نقاط در شکل ۸ نمایش داده شده است).

Vs30	شماره نقاط
430.674600	1
518.925300	2
493.902700	3
436.592500	4
490.391600	5
451.514300	6
500.125000	7
503.010000	8
463.071600	9
568.319600	10
574.977700	11
550.649900	12
526.044800	13
512.839100	14
558.136000	15
543.900300	16
535.464100	17
577.538000	18
549.688300	19
516.625500	20
547.500300	21
492.630800	22
585.685200	23
580.000000	24
574.977700	25
534.812100	26

## Microtremor HVSR Study of Site Effects in Zanjan City (Iran)

Beheshteh Hakimi<sup>1</sup>, Zohreh Masoumi<sup>2\*</sup>, Abdoreza Ghods<sup>3</sup>, and Najmeh Etemad-Saeed<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M. Sc. Student, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Earth science faculty, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, Earth science faculty, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

(Received: 04 February 2018, Accepted: 16 February 2019)

### Summary

Natural frequency of soils is one of the important factors in the study of vulnerability to earthquakes. In areas characterized by soft sediments, the maximum amplitude of ground motion is common that leads to enhanced seismic hazard and risk. Zanjan city is located in northwest of Iran with high risk of earthquake hazard according to Building and Housing Research Center (BHRC). So, investigation of site effect, beside other parameters, in earthquake vulnerability is considerable.

To map natural frequency of soil in Zanjan, microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSR) method has been conducted. Specially, we used Nakamura's method on ambient noise records. We employed 3-component medium band Guralp seismometer. Ambient noise was recorded in 41 sites in a pre-designed profile. At each site, noise was recorded for at least one hour long. Geopsy software was used for data processing. Evaluation of the gathered data was examined following the recommended guidelines of SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations) project.

The results of this study represent that there is one amplification peak in most stations. Considering the first peaks, the natural frequency of soil decreases from north to south in the city. The decrease of natural frequency represents an increase in the thickness of soil layer. In some sites, in west and center of the city, parallel to the Zanjanrud river, there are two peaks in spectral ratio. The second peak was always more than 3 Hz. The second peak is related to a shallow thin and low velocity sedimentary layer.

To evaluation of results, the data for standard penetration test of boreholes was collected and shear wave velocity was estimated. Using the shear wave velocity obtained from the boreholes, we estimated the thickness of soil from the measured natural frequency of soils employing quarter wavelength law. The estimated thickness of soil shows the presence of a thin sedimentary layer with high velocity in the north of Zanjan. The bedrock slope becomes steeper by moving towards south and flattens within the basin. Inside the basin, the natural frequency is less than 1 Hz and the thickness of the sediments increases to about hundreds of meters.

In general, the results of this study investigate one step for seismic hazard assessment and risk qualification of this urban area where great damages can be attained in case of strong earthquakes. Hence, these results should be taken into consideration before establishing the new urban constructions in the area of study.

**Keywords:** site effect, earthquake vulnerability zoning maps, microtremor

\*Corresponding author:

z.masoumi@iasbs.ac.ir