

## ارزیابی بسامد طبیعی خاک در محل احداث پل‌های غیرهم‌سطح و مناطق مسکونی در حال توسعه شهر کرمان

فاطمه جهانپور، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد ژئوفیزیک - زلزله شناسی، دانشگاه تحصیلات  
تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

محمدرضا سپهوند\*، استادیار ژئوفیزیک - زلزله شناسی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و  
فناوری پیشرفته، کرمان

افسانه نصرآبادی، استادیار ژئوفیزیک - زلزله شناسی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری  
پیشرفته، کرمان

Email: mrsepahvand@yahoo.com

دریافت: ۹۶/۰۳/۱۴ - پذیرش: ۹۶/۰۷/۱۶

### چکیده

یکی از مسائل مهم در رابطه با تخریب سازه‌ها در هنگام وقوع زمین‌لرزه، رفتار خاک روی سنگ بستر است که به‌عنوان اثر  
ساختگاه شناخته می‌شود. با توجه به موقعیت شهر کرمان و قرارگیری آن در ایالت لرزه زمین‌ساختی ایران مرکزی و شرق ایران  
و مجاورت آن با چندین گسل از جمله گلباف، سیرج، نایبند و کوهبنان و همچنین توسعه روزافزون آن، انجام مطالعات به  
منظور کاهش خسارات زمین‌لرزه ضروری می‌باشد. در این مطالعه، داده‌های میکروترمور در ۵۲ ایستگاه لرزه‌سنجی سه مؤلفه‌ای  
برداشت شده است. جهت در اختیار داشتن داده‌هایی با نوفه محیطی کمینه، تمامی برداشت‌ها در بازه زمانی ۲۴ تا ۵ صبح  
صورت گرفته است. محدوده‌های برداشت، مناطق در حال توسعه شهر کرمان و محل احداث چهار پل مهم در حال ساخت در  
این شهر را پوشش می‌دهد. با توجه به هدف مطالعه که در حقیقت برآورد بسامد طبیعی و شاخص آسیب‌پذیری زمین می‌باشد،  
میکروترمورهای ثبت شده در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری با استفاده از روش نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم (H/V) پردازش شدند.  
مقادیر بسامد در این مناطق بین ۰/۳ تا ۱/۲ هرتز تغییر می‌کند. بر اساس بسامد به‌دست‌آمده و مقایسه با جداول استاندارد برای  
خاک، تمامی ایستگاه‌ها در رده ساختگاهی I از نوع خاک سست قرار گرفته‌اند. در نهایت، نقشه پهنه‌بندی بسامد و شاخص  
آسیب‌پذیری رسم شد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص آسیب‌پذیری در محدوده‌های طرح توسعه شهر کرمان زیاد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لرزه، اثر ساختگاه، میکروترمور، روش H/V

## ۱. مقدمه

وقوع زلزله‌های با قدرت تخریب زیاد، فجایع گسترده و شدیدی را در تاریخ بشر ایجاد کرده است و مدت‌های مدیدی است که حرکت نیرومند زمین و در نتیجه خسارت بیشتر آن بر رسوبات نرم نسبت به سنگ بستر در سراسر جهان شناخته شده است (چن و همکاران، ۲۰۰۹). تفاوت در ضخامت رسوبات و خواص فیزیکی مواد در نقاط مختلف باعث به دام انداختن و تشدید امواج لرزه‌ای در رخداد زمین لرزه می‌شود و در نتیجه فرکانس‌های تشدید مختلفی ایجاد می‌شوند. این امر موجب می‌شود تا در فواصل دور از مرکز زمین لرزه اثرهای تخریبی تشدید قابل ملاحظه باشد و گاه بیش از مناطق در مجاورت گسل مسبب زمین لرزه. از جمله این موارد می‌توان به زلزله‌های میچوکان<sup>۱</sup> مکزیکوسیتی (۱۹۸۵)، لوما پریتا<sup>۲</sup> سانفرانسیسکو (۱۹۸۹) و لس‌آنجلس (۱۹۹۵) اشاره کرد که بیانگر تشدید ناشی از شرایط ساختگاه محلی می‌باشند (طلحه قدری و همکاران، ۲۰۱۵). زلزله‌شناسان و مهندسان زلزله، شناسایی مناطق غیرطبیعی تشدید ناشی از حرکت زمین را به عنوان یکی از اقدامات برای کاهش خطر لرزه‌ای در شهرهای واقع بر رسوبات نرم می‌دانند (چن و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین، تعیین میزان تشدید و بسامد تشدید جهت طراحی ساخت و سازهای یک منطقه بسیار ضروری می‌باشد (تزکان و همکاران، ۲۰۰۲). بر این اساس، اثر ساختگاه برای تعدیل و کنترل اثرهای لرزه‌ای، طراحی و برنامه‌ریزی طی رخداد زمین لرزه برای ساختگاه‌ها و ساختارهای بحرانی و حساس مورد استفاده قرار می‌گیرد و از اهداف اصلی برنامه‌های کاهش خطرات زمین لرزه به‌شمار می‌رود (بارد، ۱۹۹۹).

روش‌های متفاوتی از جمله روش بسامد- عدد موج<sup>۳</sup> (F-K)، روش خودهمبستگی مکانی<sup>۴</sup> (SPAC) و یا روش وابسته به ساختگاه مرجع، یا به عبارتی نسبت طیفی استاندارد (SRR) برای انجام مطالعات اثرهای ساختگاه‌ها، وجود دارد. روش‌های فوق به دلیل وابستگی به نحوه لایه‌بندی در روش F-K و یا نیاز به در اختیار داشتن چندین دستگاه برای تشکیل آرایه برداشت (SPAC) و یا نیاز به در دسترس بودن برون‌زدهای سنگ کف برای ایستگاه مرجع و عدم امکان توصیف محدوده‌های بزرگ به یک مرجع مشخص (SSR) از محدودیت‌های خاصی برخوردارند. بر خلاف روش‌های فوق و محدودیت‌های آنها، روش H/V یا نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم، به دلیل عدم نیاز به تعدد دستگاه و نیز به دلیل جایگزینی ثبت میکروترومورها به‌جای ثبت زمین لرزه که عموماً بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد (روکا و همکاران، ۲۰۰۸) و همچنین عدم وابستگی به مرجعی خاص از مزیت‌های ویژه‌ای در قیاس با دیگر روش‌ها برخوردار است. امروزه کاربرد میکروترومورها با استفاده از روش H/V، به عنوان روشی ساده و مناسب برای تعیین مشخصات ساختگاه از جمله بسامد غالب و ضریب تقویت در برداشت اطلاعات به میزان زیادی رواج یافته و محققین بسیاری روی این مسئله بررسی‌های زیادی به انجام رسانده‌اند (هاشمی و همکاران، ۲۰۰۷).

## ۲. اثر ساختگاه

مک مورد (۱۸۲۴) در بیان اثرهای زمین لرزه ۱۸۱۹ هند اشاره کرده که ساختمان‌های واقع بر سنگ بستر در قیاس با ساختمان‌هایی که پی آنها درون خاک قرار

<sup>3</sup> - Frequency-wave number method

<sup>4</sup> - Spatial autocorrelation method

<sup>1</sup> - Michoacan

<sup>2</sup> - Loma Prieta

مکانیکی ساختار می‌شود (تایلن ویلیج، ۲۰۱۰). این پدیده‌های فیزیکی پیچیده به عنوان اثرهای خاک شناخته می‌شوند. از سوی دیگر، توپوگرافی محلی نیز ویژگی‌های امواج دریافتی را تغییر می‌دهد که به عنوان اثرهای توپوگرافی شناخته می‌شود. اثر خاک و توپوگرافی تحت عنوان اثر ساختگاه محلی در نظر گرفته می‌شود (روکا و همکاران، ۲۰۰۸).

شرایط ساختگاهی بر کلیه خصوصیات مهم امواج لرزه‌ای شامل دامنه، محتوای فرکانسی و مدت زمان حرکت نیرومند زمین اثر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد (تایلن ویلیج، ۲۰۱۰). میزان تأثیر اثرهای ساختگاه به تضاد مقاومت ظاهری، تغییرات سازند زمین‌شناسی، ضخامت و خواص خاک و لایه‌های سنگی، عمق سنگ بستر و سطح آب و توپوگرافی سطحی و زیر سطحی بستگی دارد. اثر عمده حرکت زمین ناشی از زمین‌شناسی محلی، تقویت جنبش زمین به دلیل تضاد مقاومت ظاهری می‌باشد که منجر به محصور شدن انرژی لرزه‌ای بین رسوبات سطحی و سنگ بستر زیرین می‌شود (روکا و همکاران، ۲۰۰۸).

### ۳. میکروترموورها

بی‌شک، شناخت شرایط و ویژگی‌های سطح زمین می‌تواند در کاهش خسارات ناشی از زمین لرزه مؤثر باشد. زیرا شرایط خاک سطحی و توپوگرافی (ناهمواری‌های سطح زمین)، خصوصیات امواج لرزه‌ای را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. از این رو، ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها در طول زمین لرزه تحت آسیب قرار می‌گیرند.

یکی از روش‌های عمومی جهت برآورد شرایط ساختگاه، مطالعه رفتار میکروترموور در سطح زمین می‌باشد. زیرا میکروترموورها حاوی فرکانس‌های طبیعی

داشته، اثر کمتری متحمل شده‌اند. شاید این بیان را بتوان اولین اشاره به اثر ساختگاهی عنوان نمود. در گزارش وود (۱۹۰۸) از توزیع خسارت‌ها و شدت ظاهری تکان‌ها در منطقه خلیج سانفرانسیسکو در زمین لرزه ۱۹۰۶ نیز شواهدی ضمنی از تأثیر قابل توجه شرایط خاک زیر سطحی بر شدت حرکات سطحی زمین ارائه شده است. رید (۱۹۱۰) نیز تحقیقاتی در این زمینه برای زمین لرزه سانفرانسیسکو و وابستگی اثر زمین لرزه با خاک محلی انجام داد. بحث اثر ساختگاهی بعد از زمین لرزه ۱۹۸۵ شهر مکزیکوسیتی، به دلیل فاصله رومرکزی بیش از ۳۰۰ کیلومتر و خسارت بسیار آن، به طور جدی وارد مرحله جدیدی شد (رین، ۱۹۹۴).

با وقوع زمین لرزه، امواج لرزه‌ای در کانون تشکیل می‌یابند. این امواج، با سرعت متناسب با لایه‌بندی‌های زمین انتشار یافته و در یک ساختگاه خاص به سطح می‌رسد. مسیرهای حرکت امواج لرزه‌ای در لایه‌های زمین‌شناسی، به ویژه در لایه‌های نزدیک به سطح، به شدت حرکت زمین لرزه روی سطح زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به طور کلی، لایه‌های ضخیم و نرم رسوبات مستحکم‌نشده تمایل به تقویت انتخابی فرکانس‌های موج به صورت متفاوت دارند (روکا و همکاران، ۲۰۰۸). این رسوبات تحکیم‌نیافته با کاهش سرعت امواج زمین لرزه و به دام انداختن انرژی باعث افزایش دامنه می‌شوند. پدیده اساسی تشدید روی رسوبات نرم، به دام افتادن امواج لرزه‌ای به دلیل تضاد امپدانس (مقاومت ظاهری) بین رسوبات و سنگ بستر زیرین است. هنگامی که ساختار به صورت لایه‌های افقی باشد، امواج حجمی به دام افتاده به سمت بالا و پایین در لایه‌های سطحی حرکت می‌کنند. اما وقتی که ناهمگنی‌های جانبی مانند تغییرات ضخامت وجود داشته باشد، این به دام افتادگی، امواج سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تداخل بین این امواج به دام افتاده منجر به الگوهای تشدید با بسامد مرتبط با ویژگی‌های هندسی و

گذشت زمان کاهش یابد. در آب و هوای بسیار سرد، یا مناطقی که بارش زیاد است، پایداری در فصول مختلف تغییر می کند. درک درستی از پایداری، اساس پیشگیری از فاجعه می باشد. بنابراین، شاخص آسیب پذیری ( $K_g$ ) را می توان به عنوان یک شاخص برای نشان دادن تغییر شکل نقاط اندازه گیری شده در نظر گرفت که برای تشخیص نقاط ضعف زمین مفید می باشد و یک نوع پیش بینی خسارت دیدگی در برابر زلزله های احتمالی است. با مشخص کردن نقاط ضعف می توان با در نظر گرفتن اقدامات جبرانی مناسب، میزان خسارت را کاهش داد. شاخص آسیب پذیری، فاکتور تقویت و بسامد غالب را در ارتباط با خسارات زمین لرزه به هم مرتبط می کند (ناکامورا، ۱۹۹۷).

ایشی هارا (۱۹۷۸) رابطه ای بین کرنش برشی ( $\gamma$ ) با مخاطرات وارد شده از زمین را بیان کرد. او بیان کرد که هنگامی که  $\gamma \cong 100 \times 10^{-6}$  باشد زمین شروع به نشان دادن ویژگی غیرخطی می کند و از  $\gamma > 10,000 \times 10^{-6}$  تغییر شکل های بزرگ و فروپاشی اتفاق می افتد. به طور میانگین، کرنش برشی ( $\gamma$ ) را می توان با فرمول زیر برآورد کرد (ناکامورا، ۱۹۹۷).

$$\gamma = A_g \times d / H \quad (1)$$

که  $A_g$  فاکتور تقویت،  $H$  ضخامت لایه سطحی،  $d$  جابه جایی لرزه ای زمین،  $V_b$  سرعت موج در سنگ بستر و  $V_s$  سرعت موج برشی در لایه سطحی می باشد. بسامد غالب  $F_g$  سطح زمین تقریباً از فرمول (۲) به دست می آید:

$$F_g = V_b / (4A_g \times H) \quad (2)$$

شتاب سنگ کف ( $\alpha_b$ ) به صورت رابطه (۳) بیان می شود:

$$\alpha_b = (2\pi F_g)^2 \times d \quad (3)$$

و با جایگذاری در  $\gamma$  رابطه (۴) را داریم:

خاک به عنوان یکی از شاخص های اثرهای ساختگاهی می باشد (ناکای و ناکاگوا، ۲۰۱۱). لازم به ذکر است که میکروترموورها ابتدا در مطالعه آموری (۱۹۰۸) که قصد حل مسائل ماهیت منبع، سازوکار انتقال روی مسیره های اقیانوسی و همچنین اثر خاک سطحی در زمان وقوع زلزله را داشت، مورد توجه قرار گرفت (میرزا اوغلو و دیکمن، ۲۰۰۳). بعدها، کاربرد مهندسی استفاده از میکروترموورها توسط کانای و تاناکا (۱۹۶۱) پیشنهاد شد (ناکامورا، ۱۹۹۷).

میکروترموورها در واقع ارتعاشات خفیف زمین هستند که این ارتعاشات با دامنه کم همواره در زمین وجود دارند. نابع مولد این ارتعاشات براساس مطالعات گوتنبرگ (۱۹۵۸) و آستن (۱۹۷۸)، اختلالات طبیعی مانند باد، جزر و مد دریا یا نوفه های شهری مانند نوفه صنعتی و ترافیک می باشند که منابع با بسامد پایین با منشأ طبیعی (طوفان اقیانوسی یا آشفستگی هواشناسی) و با بسامد بالا در اثر فعالیت های انسانی هستند. بسیاری از مشاهدات و تجربیات بر ثبت میکروترموورها نشان می دهند که میکروترموور متشکل از امواج حجمی و امواج سطحی است (روکا و همکاران، ۲۰۰۸). از جمله کاربردهای میکروترموورها می توان به ریزپهنه بندی، تعیین سرعت موج برشی، تعیین ضخامت آبرفت ها، اکتشاف ذخایر هیدروکربنی و تعیین بسامد و دوره اساسی زمین و سازه ها اشاره کرد.

### ۳-۱. محاسبه شاخص آسیب پذیری زمین با استفاده از میکروترموورها

برای افزایش پایداری خاک و سازه ها خارج از نیروی لرزه ای، فرض اساسی پیشگیری از فاجعه زمین لرزه است. با این حال، اگرچه در ابتدا پایداری به اندازه کافی وجود داشته باشد، ممکن است تحت نیروی لرزه ای با

۳-۲ روش‌های محاسبه بسامد طبیعی ساختگاه با استفاده از میکروترموورها

بزرگترین چالش در برآورد پاسخ‌های ساختگاه از داده‌های دستگامی، حذف اثر چشمه و مسیر است. به همین منظور دو روش وابسته به ساختگاه مرجع و مستقل از ساختگاه مرجع معرفی شده است که در این روش‌ها با تقسیم در حوزه فرکانس اثر چشمه و مسیر که در هر دو سیگنال مشابه است، حذف می‌شود (ونبو و کوچی، ۲۰۰۰). در تکنیک ساختگاه مرجع یا نسبت طیفی استاندارد (SSR<sup>۱</sup>) که توسط بورچرت<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۰ معرفی شد (ماسا و همکاران، ۲۰۱۱)، نیاز به یک ساختگاه مرجع سنگی است و تابع اثر ساختگاه با استفاده از رابطه (۸) تعریف می‌شود (ناکامورا، ۲۰۰۸):

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $S_{HS}$  طیف دامنه مؤلفه افقی روی ساختگاه مورد نظر و  $S_{HB}$  طیف دامنه مؤلفه افقی روی ساختگاه مرجع می‌باشد (ناکامورا، ۲۰۰۸). مشکل اصلی این روش در ابتدا، دسترس به یک ساختگاه مرجع با کیفیت خوب (برای مثال اجتناب از سنگ‌های شکسته شده و هوازده) و دوم، مشکل مربوط به تعداد سیگنال‌های ثبت شده با کیفیت خوب توسط ایستگاه‌ها و ساختگاه مرجع است که در عمل پیدا کردن یک ساختگاه مرجع آسان نیست. در نتیجه، تکنیک دیگری که در مطالعات اثر ساختگاه به کار برده می‌شود، روش مستقل از ساختگاه مرجع است (ناکامورا، ۲۰۰۸). تکنیک HVSR<sup>۳</sup> یا روش ناکامورا اولین بار با تحقیقات گمانه‌ای همراه با تجزیه و تحلیل نگاشت‌های حرکت قوی زمین، در شرایط زمین‌شناسی و ساختگاه‌های مختلف در ژاپن مشاهده و سپس توسط نوگوشی و ایگاراشی (۱۹۷۱) معرفی و سپس توسط ناکامورا

$$\gamma = (A_g^2 / F_g) \times (\alpha_b / (\pi^2 V_b)) \quad (4)$$

اگر نیروی دینامیک مؤثر  $e\%$  نیروی استاتیک مؤثر باشد، کرنش برشی مؤثر ( $\gamma_e$ ) از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\gamma_e = K_g(e) \times \alpha_b \quad (5)$$

بنابراین، شاخص آسیب‌پذیری طبق فرمول (۶) محاسبه می‌شود:

$$K_g(e) = e \times (A_g^2 / F_g) / (\pi^2 V_b) / 100 \quad (6)$$

مقدار  $V_b$  در یک منطقه گسترده ثابت و  $K_g$  یک مقدار صحیح برای نقطه اندازه‌گیری است. بنابراین  $K_g$  را می‌توان به عنوان یک شاخص برای نشان دادن تغییر شکل نقاط اندازه‌گیری شده در نظر گرفت. اگر  $V_b = 600 \text{ m/s}$  باشد، آنگاه:

$$1 / \pi^2 V_b = 1/69 \times 10^{-6} \text{ (s/cm)}$$

اگر  $e = 60\%$  باشد، می‌توان شاخص آسیب‌پذیری را طبق رابطه (۷) نوشت:

$$K_g(e) \cong A_g^2 / F_g \quad (7)$$

و کرنش برشی مؤثر با ضرب مقدار  $K_g$  در شتاب بیشینه سنگ بستر با واحد گال به دست می‌آید. مقادیر  $K_g$  به دست آمده برای سانفرانسیسکو بعد از زمین‌لرزه لوما پریتا، ۱۹۸۹، نشان‌دهنده این است که  $K_g$  در ساختگاه‌های با تغییر شکل زیاد بیشتر از ۲۰ و در ساختگاه‌های بدون آسیب خیلی کوچک است (ناکامورا، ۱۹۹۷).

<sup>۳</sup>- Horizontal to vertical component spectral ratio

1- Standard Spectral Ratio  
2- Borchardt

عمودی  $V_B$  از میکروترمورها در ساختگاه سنگ بستر برابر با یک می باشد،  $H_B \approx V_B$  (میرزا اوغلو و دیکمن، ۲۰۰۳):

$$\frac{H_B}{V_B} = 1 \quad (11)$$

این فرض که  $H_B/V_B$  برابر با یک است، توسط ناکامورا (۱۹۸۹) از طریق تجربی با استفاده از اندازه گیری های میکروترمور در عمق در یک گمانه تأیید شده است.

در این شرایط، نسبت طیفی بین مؤلفه های افقی و عمودی ثبت شده در سطحی از یک لایه نرم، اثر امواج رایلی  $E_{RW}$  حذف می شود و تنها اثرهای ساختار زمین شناسی ساختگاه طبق رابطه (۱۲) باقی می ماند (میرزا اوغلو و دیکمن، ۲۰۰۳):

$$S_E = \frac{S_R}{E_{RW}} = \frac{H_S}{V_S} \quad (12)$$

بسیاری از مطالعات نظری و تجربی نشان داده اند که نسبت طیفی به دست آمده در این روش قادر به تعیین بسامد غالب ساختگاه می باشد (موسیارلی و گالیولی، ۲۰۰۱).

بنابراین، روش  $H/V$  به عنوان یکی از روش های مستقل از ساختگاه یکی از ساده ترین و متداول ترین روش ها برای برآورد اثر ساختگاه می باشد. این روش برای تخمین بسامد غالب نهشته های رسوبی، مخصوصاً در مناطق شهری و صنعتی که امکان استفاده از روش های ژئوفیزیکی وجود ندارد به کار می رود. نتایج حاصل از این روش مکرراً با روش های استاندارد مقایسه شده و مورد تأیید قرار گرفته است (پیتلاکیس، ۲۰۰۷).

(۱۹۸۹) توسعه یافت (ناکامورا، ۲۰۰۸؛ فلورس و همکاران، ۲۰۱۳). این روش یک رویکرد تک ایستگاه با استفاده از اندازه گیری های لرزش محیطی برای برآورد بسامد اساسی  $F_0$  از یک ساختگاه است و با نسبت طیفی بین مؤلفه افقی و قائم از یک نگاشت میکروترمور محاسبه می شود (ناکامورا، ۲۰۰۸). هدف، برآورد عامل تقویت ناشی از امواج  $S_H$  بازتاب شده است. برای این منظور، موج رایلی موجود توسط میکروترمور، نویز در نظر گرفته می شود و در فرایند  $H/V$  حذف می شود (ناکامورا، ۲۰۰۰).

با توجه به فرضیات ناکامورا، برآورد اثر ساختگاه مهندسی زلزله طبق فرمول (۹) بیان می شود (میرزا اوغلو و دیکمن، ۲۰۰۳):

$$S_R = \frac{H_S}{H_B} \quad (9)$$

که  $H_S$  طیف دامنه مؤلفه افقی از حرکت در لایه سطحی نرم و  $H_B$  طیف دامنه مؤلفه افقی از حرکت در پایه ای از سنگ بستر است.

طبق فرمول (۱۰)، اثر موج رایلی  $E_{RW}$  بر حرکت نوفه شامل طیف عمودی در سطح،  $V_S$  است و روی طیف عمودی در بستر،  $V_B$  اثری ندارد (میرزا اوغلو و دیکمن، ۲۰۰۳):

$$E_{RW} = \frac{V_S}{V_B} \quad (10)$$

مؤلفه قائم میکروترمور به وسیله لایه خاک نرم تقویت نمی شود (میرزا اوغلو و دیکمن، ۲۰۰۳).

اثر امواج رایلی بر میکروترمورها برای مؤلفه های قائم و افقی برابر است. ناکامورا (۱۹۸۹) مشاهده کرد که برای یک محدوده فرکانسی گسترده (۲۰-۰/۲ هرتز) براساس رابطه (۱۱)، نسبت طیفی مؤلفه افقی  $H_B$  و

#### ۴. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

دشت کرمان یک چاله زمین‌ساختی از نوع فروزمین فشاری است و از نظر زمین‌ساختی به ایالت لرزه زمین‌ساخت ایران مرکزی و شرق ایران تعلق دارد (میرزایی و همکاران، ۱۹۹۸). تماس آن با کوه‌های اطراف معمولاً از نوع گسلی است. بسیاری از این گسل‌ها در نزدیکی شهر کرمان فعال بوده و تهدیدی برای ساکنین محسوب می‌گردد. اگرچه بسیاری از کوه‌های اطراف شهر کرمان از جنس سنگ‌های آهک کرتاسه هستند، ولی بر اساس شواهد مربوط به بررسی‌های ژئوفیزیکی و حفاری در محل فعلی شهر کرمان توالی پیوسته‌ای از رسوبات میوسن تا کواترن وجود دارد که ضخامت آن به بیش از ۲۰۰ متر می‌رسد (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰).

رسوبات میوسن از جنس کنگلومرای سرخ و لایه‌های رسی- ماری هستند که توسط لایه‌های رسی، سیلتی و ماری پلیوسن پوشیده شده‌اند. رسوبات کواترن از آبرفت‌های ریز رسی همراه با لایه‌های نازک آبرفت درشت (به‌ویژه به سمت ارتفاعات شرق شهر) و لایه‌های سیلتی- ماسه‌ای تشکیل شده است. بر اساس شواهد موجود، در زیر شهر کرمان رسوبات میوسن به‌طور دگرشیب روی سنگ‌آهک‌های کرتاسه و در برخی نقاط روی شیل‌های ژوراسیک قرار گرفته‌اند. سنگ کف دشت و شهر کرمان را لایه‌های ماری سرخ میوسن در نظر گرفته‌اند که کم‌ویش با گچ و نمک همراه هستند. این سنگ‌ها فرسایش پذیرند. بنابراین به‌ندرت رخنمون‌هایی از آن‌ها در اطراف دشت کرمان به چشم می‌خورد. رسوبات سست، ضخیم و به نسبت جوان که در زیر شهر کرمان قرار دارند می‌توانند اثر تشدیدکننده‌ای بر امواج لرزه‌ای داشته باشند (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰). علاوه بر ویژگی‌های زمین‌شناسی وقوع زمین لرزه‌های بزرگ تاریخی و دستگاهی در نزدیکی

شهر کرمان، از جمله زمین لرزه ۲۹ فروردین ماه ۱۲۹۰ راور با بزرگی (mb) ۶/۷، زمین لرزه ۶ مردادماه ۱۳۶۰ سیرچ-گلباف با بزرگی (Mw) ۷/۳ و بیش از ۱۳۰۰ نفر کشته، رخداد زمین لرزه ۳۱ شهریور ماه ۱۳۰۲ با بزرگی (mb) ۶/۹، زمین لرزه ۵ دی ماه ۱۳۸۲ بم با بزرگی (Ms) ۶/۵ با بیش از ۲۶۰۰۰ نفر کشته و بالغ بر ۳۰۰۰۰ نفر مجروح و نیز وقوع زمین لرزه ۴ اسفندماه ۱۳۸۳ داهوئیه زرنده با بزرگی (Ms) ۶/۴ مؤید لرزه‌خیزی بالای منطقه و احتمال وقوع زمین لرزه‌های بزرگ می‌باشد. تجربه رخداد لرزه‌ای و حضور رسوبات ضخیم تحکیم نیافته در شهر کرمان که افزایش دامنه امواج لرزه‌ای را به همراه دارد، بر ضرورت و اهمیت مطالعات زلزله‌شناسی و زلزله‌شناسی مهندسی در شهر کرمان می‌افزاید.

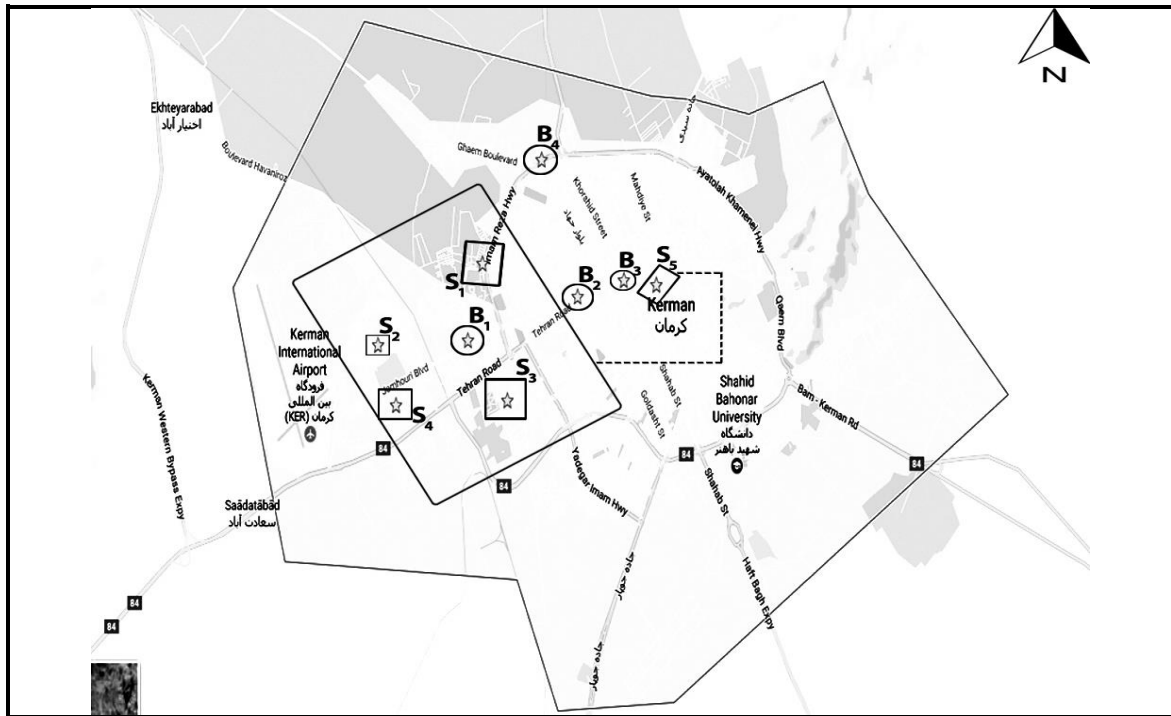
#### ۵. اندازه‌گیری میکروترمورها

در این مطالعه، با توجه به توسعه و گسترش شهر کرمان از لحاظ ایجاد شهرک‌های جدید و احداث پل‌ها و سیستم‌های بزرگراهی در چند سال اخیر، سعی شد علاوه بر برداشت داده در مناطق در حال توسعه، محل احداث چهار پل مهم در شهر کرمان مورد ارزیابی قرار گیرد. برداشت‌ها در محدوده مورد مطالعه در ۵۲ نقطه انجام گرفت و با استفاده از روش ناکامورا آنالیز شدند. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. کادرهای دایره‌ای با حروف B محل احداث پل‌ها و کادرهای مستطیلی با حروف S مناطق توسعه‌یافته شهر کرمان را نشان می‌دهند. در شکل ۲، به‌عنوان نمونه، به محل احداث پل‌های غیر هم‌سطح در میدان آزادی و تقاطع باغ ملی شهر کرمان اشاره شده است. در هر کدام از این مناطق، چندین ایستگاه نصب شده و سعی شده تا توزیع مناسبی از ایستگاه‌ها در تمام محدوده برداشت ایجاد گردد. داده‌های میکروترمو رطی شش روز با

ارزیابی بسامد طبیعی خاک در محل احداث پل های غیرهم سطح و مناطق مسکونی در حال توسعه شهر کرمان

عوامل ترافیکی و نوفه محیطی برداشت شدند. تمامی مراحل بر اساس معیارهای پروژه SESAME صورت گرفته است.

استفاده از لرزه‌نگار LE-3Dlite که دارای فیلتر میان‌گذر ۱ تا ۱۰۰ هرتز و میرایی ۰/۷ می‌باشد، در ساعات آرام شب از ساعات ۱۲ تا ۵ صبح به منظور حداقل تأثیر



شکل ۱. موقعیت شبکه‌های ایستگاهی برداشت شده در سطح شهر کرمان: B محل شبکه ایستگاهی در محل احداث پل‌های شهر کرمان و S شبکه ایستگاهی در مناطق در حال توسعه شهر کرمان



(ب)



(الف)

شکل ۲. محل احداث پل‌های غیر هم سطح در میدان آزادی (الف) و تقاطع باغ ملی (ب) شهر کرمان



## ۶. روند پردازش

در این مطالعه، از نرم‌افزار استاندارد GEOPSY برای پردازش داده‌ها استفاده شد. در مرحله پردازش داده‌ها، پارامترهای زیر برای تعیین پنجره‌های زمانی مناسب در نظر گرفته شد.

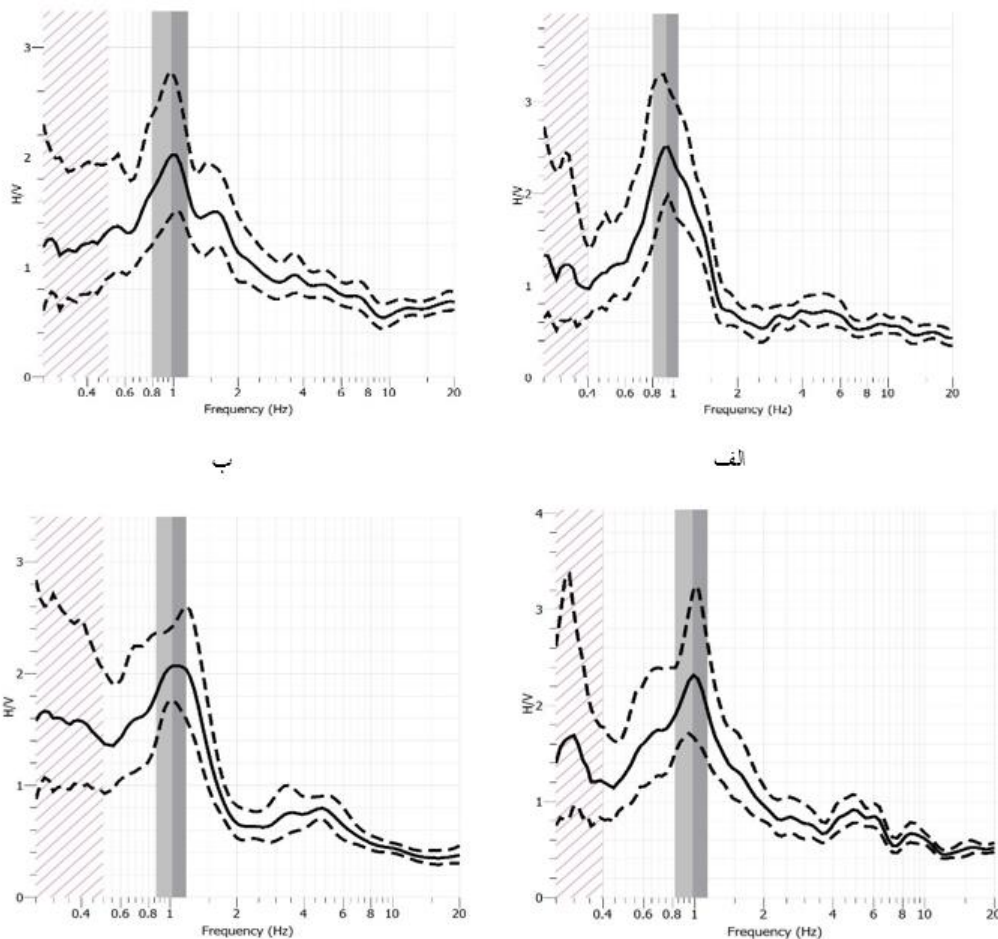
محاسبه  $H/V$  روی پنجره‌های ثابت سیگنال، با استفاده از یک سیستم Anti-Trigger بررسی می‌شود. در پردازش داده‌ها، تعیین طول پنجره مناسب و تعداد نمونه‌های کافی برای تهیه طیف دامنه، مهم می‌باشد. هدف تعیین طول پنجره مناسب، حفظ بخش‌های ایستای نوفه‌های محیطی و جلوگیری از بخش‌های گذرا مربوط به بعضی منابع خاص مانند قدم زدن و ترافیک نزدیک است. با انتخاب پنجره مناسب، قسمت‌های اشباع شده سیگنال به دلیل حضور نوفه زیاد حذف می‌شود. در این مطالعه، طول پنجره‌ها ۱۵ تا ۲۵ ثانیه و برای افزایش تعداد پنجره‌ها و بالا بردن دقت، میزان همپوشانی ۵۰٪ در نظر گرفته شد. برای تشخیص منابع گذرا، از روش STA/LTA استفاده شد. با استفاده از این روش، نوفه‌ها شناسایی شده و از داخل داده‌ها حذف می‌شوند. برای متوسط‌گیری، دامنه STA برابر ۱ ثانیه و برای LTA ۳۰ ثانیه و همچنین کمترین مقدار STA/LTA ۰/۲ و بیشترین مقدار این نسبت ۲/۵ در

نظر گرفته شد. فیلتر باترووٹ باندگذر با حداقل بسامد ۰/۵ هرتز و حداکثر بسامد ۲۰ هرتز برای حذف داده‌های میکروترمور ناخواسته اعمال شد. پس از انتخاب پنجره‌های زمانی و حذف پنجره‌های زمانی با آشفتگی زیاد، نسبت طیفی  $H/V$  با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه شد:

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{(NS^2 + EW^2)}}{V} \quad (13)$$

که در آن  $NS$  و  $EW$  به ترتیب معرف طیف مؤلفه‌های افقی شرقی- غربی و شمالی- جنوبی و  $V$  بیانگر مؤلفه‌ی قائم نگاشت ثبت شده می‌باشد (ناکامورا، ۱۹۸۹). در ادامه، برای نرم کردن نتایج طیفی از نرم‌شدگی کونو و هماچی با یک پهنای باند ۲۰-۴۰ برای هر سه دامنه طیفی استفاده شد. برای Tapering یک تابع کسینوسی با طول ۵٪ روی پنجره سیگنال‌های مؤلفه‌های قائم، شمالی- جنوبی و شرقی- غربی و یک FFT به سیگنال‌های سه مؤلفه برای به‌دست آوردن دامنه‌های طیفی سه مؤلفه اعمال شد. در شکل ۳، چند نمونه از نمودارهای  $H/V$  خروجی از نرم‌افزار GEOPSY آورده شده است. مقادیر بسامد به‌دست آمده از منحنی نسبت طیفی  $H/V$  برای هر ایستگاه در جدول ۱ آمده است.

ارزیابی بسامد طبیعی خاک در محل احداث پل های غیرهم سطح و مناطق مسکونی در حال توسعه شهر کرمان



شکل ۳. نمونه‌های منحنی H/V خروجی از نرم‌افزار GEOPSY در: الف) ایستگاه شماره ۳ شبکه B4، ب) ایستگاه شماره ۳ شبکه B3، ج) ایستگاه شماره ۵ شبکه B2 و د) ایستگاه شماره ۲ شبکه B1

جدول ۱. نتایج به‌دست‌آمده در ایستگاه‌ها از منحنی‌های H/V

ایستگاه	بسامد غالب (هرتز)	فاکتور تقویت $A_0$ (رابطه ۱۳)	شاخص آسیب‌پذیری (رابطه ۷)	ایستگاه	بسامد غالب (هرتز)	فاکتور تقویت $A_0$ (رابطه ۱۳)	شاخص آسیب‌پذیری (رابطه ۷)
	۰/۸۴	۲/۰	۵/۱		۰/۸۲	۳/۱	۱۲
	۰/۸۷	۱/۸	۴/۰		۰/۸۲	۳/۱	۱۲
B1	۰/۶۷	۲/۲	۸/۰	S2	۰/۸۶	۳/۲	۱۲/۸
	۰/۷۸	۱/۸	۴/۶		۰/۸۶	۲/۵	۷/۸
	۰/۸۳	۱/۷	۳/۶		۰/۷۳	۳/۵	۱۷/۵
	۰/۸۶	۲/۰	۵/۰		۰/۷۳	۳/۵	۱۷/۵
B2	۰/۸۹	۲/۲	۶/۰	S3	۰/۵۲	۴/۱	۳۲/۳
	۰/۹۵	۲/۲	۵/۳		۰/۵۲	۴/۰	۳۲

۳۶۰	۱۰/۴	۰/۳۳		۶/۴	۲/۴	۰/۹۵	
۱۶۳	۷/۰	۰/۳۷		۷	۲/۲	۰/۷۰	
۶۷/۵	۴/۵	۰/۳۴		۵/۸	۲/۳	۰/۹۴	
				۹/۶	۲/۲	۰/۵۸	
۱۳/۷	۳/۱	۰/۷۳		۵/۸	۲/۳	۰/۹۸	
۱۰/۴	۲/۷	۰/۷۳					
۹/۶	۲/۶	۰/۷۶		۵/۳	۲/۲	۰/۹۵	
۲۶/۴	۴/۳	۰/۷۰	S4	۴/۵	۲/۰	۰/۹۸	B3
۲۰/۴	۳/۵	۰/۶۲		۴/۰	۱/۸	۰/۸۹	
۸۹/۷	۶/۷	۰/۵۷		۲/۷	۱/۶	۱/۰۸	
۴۴	۵/۱	۰/۵۹		۳/۲	۱/۷	۰/۹۳	
۲۷/۶	۴/۷	۰/۸۶		۴/۰	۲/۱	۱/۱	
۴۳/۵	۵/۹	۰/۸۲		۳/۵	۲/۰	۱/۲	
۴۸/۴	۶/۶	۰/۹۰		۷	۲/۵	۰/۹۳	B4
				۶/۲	۲/۵	۱/۰	
۳۸/۶	۵/۹	۰/۹۰		۱۴/۶	۳/۲	۰/۷۳	
۴۴/۸	۶/۷	۱/۰۲	S5	۴۰/۰	۵/۳	۰/۷۰	
۵۲/۹	۶/۹	۰/۹۳		۲۸	۴/۱	۰/۶۷	S1
۳۷/۲	۶/۱	۱/۰۲		۳۰	۴/۵	۰/۷۳	
				۳۵/۷	۵/۰	۰/۷۳	
				۳۰/۸	۴/۳	۰/۶۲	

## ۷. بحث

طبیعی، طبقه‌بندی‌های مختلفی صورت گرفته است. در ایران می‌توان به آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان‌ها در برابر زمین‌لرزه (استاندارد ۲۸۰۰)، طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲) و طبقه‌بندی خاک بر اساس مطالعات قائم‌مقامیان و نوجوان (۲۰۰۸) اشاره کرد.

در این مطالعه، از جدول طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲) (جدول ۲) که بسامد طبیعی ساختگاه به عنوان پارامتر اصلی و خصوصیات دیگری مانند  $V_{S30}$  جنس مصالح و شرایط زمین‌شناسی به عنوان پارامتر کمکی، برای طبقه‌بندی استفاده شده است. همچنین، از

آیین‌نامه‌های مختلف به منظور کاربردی کردن تحقیقات و سهولت محاسبات با تحلیل پاسخ ساختگاه نسبت به انواع زمین، تمهیداتی برای در نظر گرفتن این تأثیرات ارائه کرده‌اند. در آیین‌نامه‌ها، بر اساس پارامترهای مکانیکی و دینامیک خاک، انواع زمین طبقه‌بندی شده است. سرعت موج برشی، چگالی، فرکانس، دوره تناوب طبیعی و ضخامت لایه‌های خاک، مشخص‌کننده سخت یا سست بودن زمین یک منطقه است. براساس این ویژگی‌ها، به‌ویژه سرعت موج برشی و دوره تناوب

مطالعات گمانه زنی که توسط شرکت ماهان زمین ساخت برای تعیین سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی صورت پذیرفته است برای اعتبار سنجی نتایج به دست آمده در این مطالعه استفاده شد. جدول ۳ اطلاعات سرعت موج برشی را نشان می دهد. با مقایسه بسامد غالب حاصل از منحنی های H/V و جدول ارائه شده توسط کمک پناه و همکاران (۲۰۰۲)، نوع خاک برای هر ساختگاه و حدود سرعت موج برشی برای هر ایستگاه برآورد گردید که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. در نهایت، با توجه به مقادیر بسامد به دست آمده در جدول ۱، نقشه هم بسامد در شکل ۴ و شاخص آسیب پذیری این منطقه در شکل ۵ با استفاده از نرم افزار Surfer رسم شد.

جدول ۲. طبقه بندی براساس کمک پناه و همکاران (۲۰۰۲)

شماره رده	توصیف خاک	فرکانس مینا (هرتز)	$V_{S_{30}}$ (متر بر ثانیه)	شرایط زمین شناسی
I	خاک سست	< ۲/۵	< ۳۵۰	نهشته های رسی سست و ضخیم با تناوب رس و سیلت و ماسه ریزدانه عمدتاً دشت آبرفتی
IIa	خاک نسبتاً سفت	۲/۵-۵	۳۵۰-۵۵۰	تناوب نهشته های ریزدانه و درشت دانه، تراس آبرفتی با سیمان شدگی توسط
IIb	خاک سفت	۵-۷/۵	۵۵۰-۷۵۰	تراس آبرفتی با نهشته های قدیمی خوب سیمانی شده و مقاوم
III	خاک سفت، سنگ سست	> ۷/۵	> ۷۵۰	نهشته های دامنه ای با ضخامت کم و مقاوم، کنگلومرای پلیستوسن

جدول ۳. اطلاعات سرعت موج برشی ارائه شده توسط شرکت ماهان زمین ساخت

عمق (متر)	$V_{S_{30}}$ (متر بر ثانیه)	عمق (متر)	$V_{S_{30}}$ (متر بر ثانیه)
۱	۱۹۵	۱۶	۳۳۰
۲	۲۴۵	۱۷	۳۷۵
۳	۱۹۰	۱۸	۳۷۵
۴	۲۲۰	۱۹	۳۸۰
۵	۲۴۵	۲۰	۳۸۰
۶	۲۲۵	۲۱	۳۹۰
۷	۲۸۵	۲۲	۳۹۰

۳۵۵	۲۳	۲۸۵	۸
۳۵۵	۲۴	۲۵۰	۹
۴۱۰	۲۵	۲۵۰	۱۰
۴۱۰	۲۶	۳۱۵	۱۱
۴۴۰	۲۷	۳۱۵	۱۲
۴۴۰	۲۸	۳۶۰	۱۳
۴۴۰	۲۹	۳۶۰	۱۴
-	-	۳۳۰	۱۵

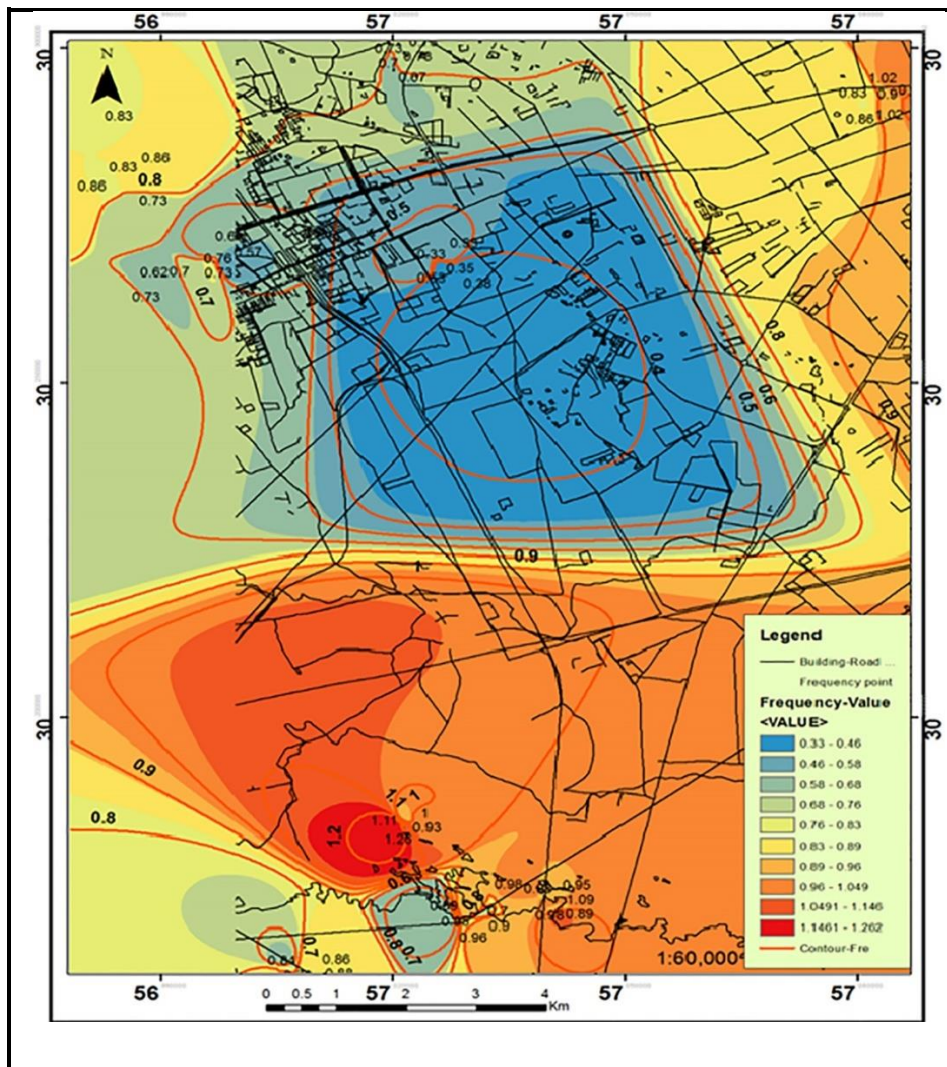
می‌باشند. تغییرات بسامد غالب وابسته به ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی آبرفت می‌باشد. در این مناطق، تغییرات فرکانسی و تنوع خاک زیادی مشاهده نمی‌شود که پایین بودن فرکانس‌ها بیانگر حضور خاک نرم و ضخیم می‌باشند. با انجام تحلیل منحنی‌های H/V در ایستگاه‌های B1 تا B4 مربوط به محل احداث پل‌ها، مقادیر فرکانس بین ۰/۶ تا ۱/۲ متغیر است و در ایستگاه‌های S1 تا S5 مربوط به مناطق در حال توسعه شهر کرمان، فرکانس غالب ساختگاه‌ها بین ۰/۳ تا ۱ برآورد گردید. با توجه به این مقادیر و ارتباط بین بازه فرکانسی و سرعت موج برشی که به نوعی بیانگر شرایط و ضخامت خاک می‌باشد، تغییرات زیادی در این مناطق از حیث نوع خاک و ضخامت مشاهده نمی‌شود که این مسئله، بیانگر یکنواخت بودن تقریبی پوشش خاک در محدوده‌های مورد مطالعه می‌باشد. این نتایج با مطالعات زمین‌شناسی (حسن زاده و همکاران، ۱۳۹۰) همخوانی دارد.

طبق مطالعات گمانه‌زنی انجام شده توسط شرکت ماهان زمین ساخت، سرعت موج برشی در شهر کرمان به طور میانگین  $310 \text{ m/s}$  برآورد شده است. در این مطالعه، با توجه به معیارهای ارائه شده توسط کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲) در رابطه با سرعت موج برشی، برای این نوع خاک، در مناطق برداشت، سرعت کمتر از ۳۵۰ متر بر ثانیه گزارش شده است، که تطابق نتایج را بیان می‌کند.

طبق برآورد صورت گرفته با استفاده از جدول ارائه شده توسط کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲) برای خاک (جدول ۲) که بر اساس بسامد طبیعی و سرعت موج برشی طبقه‌بندی شده است، رده ساختگاهی I و شرایط زمین‌شناسی نهشته‌های رسی سست و ضخیم با تناوب رس و سیلت و ماسه ریزدانه عمدتاً دشت آبرفتی برآورد شد. به بیان آنسال (۲۰۰۴) فرکانس‌های کم مربوط به نهشته‌های ضخیم یا خیلی نرم و فرکانس‌های زیاد مربوط به نهشته‌های خیلی نازک یا سنگ‌هوازده

جدول ۴. رده ساختگاهی و حدود سرعت موج برشی هر ایستگاه در مقایسه با جدول طبقه بندی کمک پناه و همکاران (۲۰۰۲)

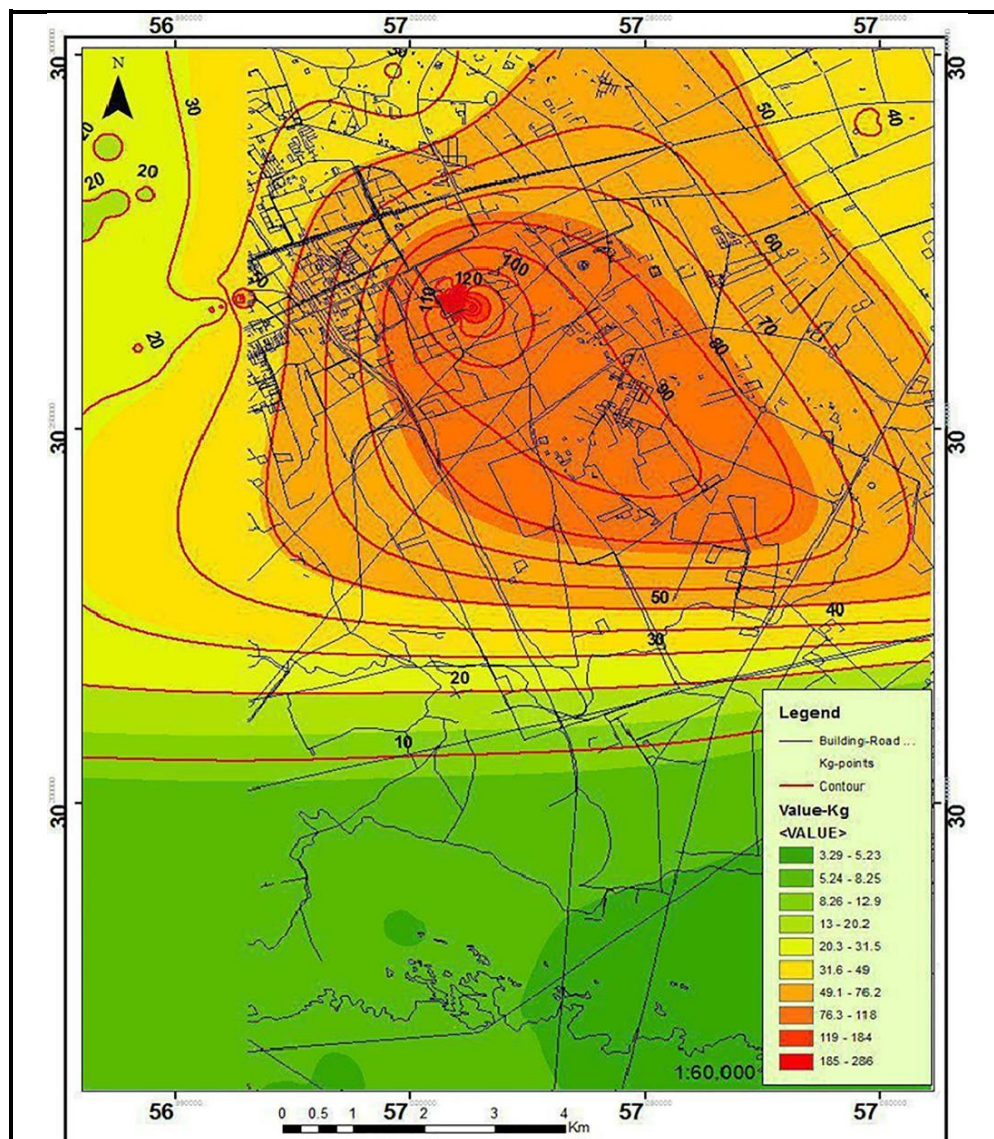
ایستگاه	بسامد غالب (هرتز)	$V_{S_{30}}$ (متر بر ثانیه)	طبقه بندی کمک پناه	ایستگاه	بسامد غالب (هرتز)	$V_{S_{30}}$ (متر بر ثانیه)	طبقه بندی کمک پناه
B1	۰/۸۴	<۳۵۰	I	S1	۰/۷۳	<۳۵۰	I
	۰/۸۷	<۳۵۰	I	S2	۰/۶۲	<۳۵۰	I
	۰/۶۷	<۳۵۰	I		۰/۸۲	<۳۵۰	I
	۰/۷۸	<۳۵۰	I		۰/۸۲	<۳۵۰	I
	۰/۸۳	<۳۵۰	I		۰/۸۶	<۳۵۰	I
	۰/۸۶	<۳۵۰	I		۰/۸۶	<۳۵۰	I
B2	۰/۸۹	<۳۵۰	I	S3	۰/۷۳	<۳۵۰	I
	۰/۹۵	<۳۵۰	I		۰/۵۲	<۳۵۰	I
	۰/۹۵	<۳۵۰	I		۰/۵۲	<۳۵۰	I
	۰/۷۰	<۳۵۰	I		۰/۳۳	<۳۵۰	I
	۰/۹۴	<۳۵۰	I		۰/۳۷	<۳۵۰	I
	۰/۵۸	<۳۵۰	I		۰/۳۴	<۳۵۰	I
B3	۰/۹۸	<۳۵۰	I	S4	۰/۷۳	<۳۵۰	I
	۰/۹۵	<۳۵۰	I		۰/۷۳	<۳۵۰	I
	۰/۹۸	<۳۵۰	I		۰/۷۶	<۳۵۰	I
	۰/۸۹	<۳۵۰	I		۰/۷۰	<۳۵۰	I
	۱/۰۸	<۳۵۰	I		۰/۶۲	<۳۵۰	I
	۰/۹۳	<۳۵۰	I		۰/۵۷	<۳۵۰	I
B4	۱/۱	<۳۵۰	I	S5	۰/۵۹	<۳۵۰	I
	۱/۲	<۳۵۰	I		۰/۸۶	<۳۵۰	I
	۰/۹۳	<۳۵۰	I		۰/۸۲	<۳۵۰	I
	۱/۰	<۳۵۰	I		۰/۹۰	<۳۵۰	I
S1	۰/۷۳	<۳۵۰	I	S1	۰/۹۰	<۳۵۰	I
	۰/۷۰	<۳۵۰	I		۱/۰	<۳۵۰	I
	۰/۶۷	<۳۵۰	I		۰/۹	<۳۵۰	I
	۰/۷۳	<۳۵۰	I		۱/۰	<۳۵۰	I



شکل ۴. نقشه هم‌بسامد شهر کرمان در محدوده شبکه‌های ایستگاهی مورد مطالعه

باعث کاهش دامنه یا فاکتور تقویت می‌شود. به همین دلیل، مقادیر شاخص آسیب‌پذیری در محل احداث پل‌ها کمتر برآورد شده است. با توجه به سست بودن خاک و ضخامت زیاد رسوبات در زیر پل‌های غیرهم‌سطح، بهتر است که ضریب آسیب‌پذیری با دیگر مناطق مجاور (محدوده طرح توسعه شهری) همسان در نظر گرفته شود و نسبت به مطالعات تکمیلی و مقاوم سازی و نیز لحاظ نمودن فرکانس طبیعی در طراحی سازه اقدام گردد.

در برخی از نقاط، از جمله در محل احداث پل‌ها در ایستگاه‌های B1 تا B4، داده‌ها روی آسفالت برداشت شدند. طبق توصیه‌های گروه SESAME، هنگام برداشت در آسفالت، قله ممکن است کمی مسطح شود. اما این شرایط تأثیری بر مقادیر فرکانس نخواهند داشت و از فرکانس ۰/۲ تا ۲۰ هرتز هیچ قله‌ی مصنوعی مشاهده نمی‌شود. از آنجا که مقادیر شاخص آسیب‌پذیری با استفاده از نسبت فاکتور تقویت و فرکانس (رابطه ۷) به‌دست می‌آید، مسطح شدن قله‌ی نمودار روی آسفالت



شکل ۵. نقشه شاخص آسیب پذیری شهر کرمان در محدوده شبکه های ایستگاهی مورد مطالعه

۲۰ می باشند.

### ۸. نتیجه گیری

با توجه به تراکم جمعیتی زیاد مناطق دارای شاخص آسیب پذیری بیشتر از ۲۰ و رشد روز افزون جمعیت در این مناطق در حال توسعه، می بایست مقاوم سازی سازه ها مورد توجه قرار گیرد و در طراحی سازه ها به این ضرورت پرداخته شود.

داده های مناطق در حال توسعه ایستگاه های S1 تا S5 روی خاک برداشت شدند که کاهش دامنه روی خاک اتفاق نمی افتد. به همین دلیل، مقادیر شاخص آسیب پذیری در این ایستگاه ها بیشتر برآورد گردید. بر اساس معیار ناکامورا برای مناطق با شاخص آسیب پذیری بیش از ۲۰، خسارت احتمالی قابل ملاحظه ارزیابی می شود و ضرورت مقاوم سازی از درجه اهمیت بالایی برخوردار خواهد شد. با توجه به جدول ۱، غالب مناطق S1، S3، S4 و S5 دارای شاخص آسیب پذیری بیشتر از



## ۹. مراجع

- حسن‌زاده، ر.، عباس‌نژاد، ا.، علوی، ا. و شریفی، ا. ۱۳۹۰. "تحلیل خطر لرزه‌ای شهر کرمان با تأکید بر کاربرد GIS در ریزپهنه‌بندی مقدماتی درجه ۲". علوم زمین، ۸۱: ۲۳-۳۰.
- Asten, M.W. 1978. "Geological control of the three-component spectra of Rayleigh-wave microseismic". Bull. Seismol. Soc. Am., 68(6): 1623-1636.
- Bard, P.Y. 1999. "Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?" Proceedings of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 3: 1251-1279.
- Borcherdt, R.D. 1970. "Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay". Bull. Seismol. Soc. Am., 60: 29-61.
- Chen, Q.F., Liu, L.B., Wang, W.J. and Rohrbach, E. 2009. "Site effects on earthquake ground motion based on microtremor measurements for metropolitan Beijing". Chinese Sci. Bull., 54(2): 280-287.
- Flores, H., Malischewsky, P. and Jentzsch, G. 2013. "H/V spectral ratio analysis and Rayleigh modelization in Eastern Thuringia, Germany". Geofísica Internacion, 52(4): 355-364.
- Gutenberg, B. 1958. "Microseisms". Adv. Geophy., 5: 53-92.
- Hashemi, H., Eskandarpour, M.R., Adib, D.R. and Fatemi Aghda, D.R. 2007. "A case study of microtremor analysis in Baneh city for the purpose of seismic hazard estimation". EAGE 69<sup>th</sup> Conference and Exhibition.
- Kazemi, A.M. and Adib, A. 2014. "Geotechnical zoning and determining land types by microtremor: A case study of Ardakan, Yazd, Iran". Geodyn. Res. Anal. Int. Quart. Bull., 2(1): 11-18.
- Komak Panah, A., Hafezi Moghaddas, N., Ghayamghamian, M.R., Motosaka, M., Jafari, M.K. and Uromieh, A. 2002. "Site effect classification in east-central of Iran". J. Seismol. Earthq. Eng., 4(1): 37-48.
- Mac Murdo, J. 1824. "Papers relating to the earthquake which occurred in India in 1819". Philos. Mag., 63: 105-177.
- Massa, M., Lovati, S., Marzorati, S. and Augliera, P. 2011. "Seismic ground amplifications estimated by means of spectral ratio techniques: Examples for different geological and morphological settings". Earth Environ. Sci., Doi:10.5772/27766.
- Mirzaei, N., Mengtan, G. and Yuntai, C. 1998. "Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces". J. Earthq. Predic. Res., 7: 465-495.
- Mirzaoglu, M. and Dykmen, U. 2003. "Application of microtremors to seismic microzoning procedure". J. Balkan Geophys. Soc., 6: 143-156.
- Mucciarelli, M. and Gallipoli, M.R. 2001. "A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique". Boll. di Geofisica Teorica Applicata, 42: 255-266.
- Nakai, S.H. and Nakagawa, H. 2011. "Wave propagation analysis of a ground with three-dimensional irregularities based on the finite element method". 4<sup>th</sup> IASPEI/IAEE International Symposium.
- Nakamura, Y. 1989. "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface [Internet]. Q. Rep. Railw. Tech. Research Inst., pp. 25-33.
- Nakamura, Y. 1997. "Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor". World Congress on Railway Research, Florence.
- Nakamura, Y. 2000. "Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications". 12<sup>th</sup> WCEE, [www.sdr.co.jp/papers/n\\_tech\\_and\\_application.pdf](http://www.sdr.co.jp/papers/n_tech_and_application.pdf).
- Nakamura, Y. 2008a. "Characteristics of H/V spectrum". [www.researchgate.net/publication/268381223](http://www.researchgate.net/publication/268381223).

- Nakamura, Y. 2008b. "On the H/V spectrum". The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Nogoshi, Y. and Igarashi, T. 1971. "On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). J. Seis. Soc. Jap. 24: 26-40.
- Omori, F. 1908. "On microtremor". Res. Imp. Earthq. Inv. COMM., 6: 1-6.
- Pitilakis K. 2007. "Earthquake Geotechnical Engineering". 4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering- Invited Lectures, Series: Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, The Netherlands, pp. 93-129.
- Reid, H.F. 1910. "The mechanics of the earthquake". Vol. II of Lawson, A.C., chairman, The California earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington, Publication 87, 192 p.
- Rinne, E.E. 1994. "Development of new site coefficients for building codes". Proceeding of the Fifth US National Conference on Earthquake Engineering, Chicago, 3: 64-78.
- Roca, A., Oliveira, C.S., Ansal, A. and Figueras, S. 2008. "Local site effects and microzonation". In: Oliveira, C.S., Roca, A. and Goula, X. (Eds.), Assessing and Managing Earthquake Risk, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Vol. 2, Springer, Dordrecht.
- Talha Qadri, S.M., Nawaz, B., Sajjad, S.H. and Ahmad Sheikh, R. 2015. "Ambient noise H/V spectral ratio in site effects estimation in Fateh Jang area, Pakistan". Earthq. Sci., 28(1): 87-95.
- Tezcan, S.S., Kaya, E., Bal, I.E. and Ozdemir, Z. 2002. "Seismic amplification at Avcilar, Istanbul". Eng. Struc., 24(5): 661-667.
- Theilen-Willige, B. 2010. "Detection of local site conditions influencing earthquake shaking and secondary effects in Southwest-Haiti using remote sensing and GIS-methods". Nat. Haz. Earth Sys. Sci., 10: 1183-1196.
- Wenbo, Z.H. and Koji, M.A. 2000. "Comparison of site-amplification estimated from different methods using a strong motion observation array in Tangshan". WCEE, China.
- Wood, H.O. 1908. Distribution of apparent intensity in San Francisco, in the California earthquake of April 18, 1906. Report of the State Earthquake Investigation Commission: Carnegie Inst. Washington Pub. 87, Washington, D.C., pp. 220-245.