

چکیده

شناخت و درک واقع‌بینانه از تفرق امواج لرزه‌ای ناشی از سازه‌های زیرزمینی که تحت عنوان پدیده بزرگ‌نمایی در سطح زمین شناخته می‌شود، می‌تواند منجر به طراحی ایمن و مقاوم سازه‌های ساخته شده در سطح زمین شود. در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC مدل‌های مختلفی از ایستگاه مترو دایکای که تحت زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ به شدت آسیب دید، مورد بررسی قرار گرفت. برای مطالعه پدیده بزرگ‌نمایی، پاسخ‌های سطح زمین در دو حالت بدون سازه و با وجود سازه بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار بزرگ‌نمایی به مقدار ۲/۲ در نقطه میانی سازه و بیشترین پیک شتاب در نقطه مجاور لبه سازه ثبت شد. در بین نقاط مختلف روی لایه‌های خاک، نقاطی که در تماس با سازه قرار داشتند بیشترین مقدار افزایش نسبت به حالت بدون سازه را تجربه کرده‌اند. در ادامه مدل‌های مختلفی از سازه در ضخامت‌های ۱۰ تا ۷۰ سانتی‌متری ستون مرکزی تهیه و تغییر مکان‌های جانبی سازه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر تغییر مکان جانبی سازه بین کمترین و بیشترین ضخامت کمتر از ۱۰ میلی‌متر می‌باشد.

واژگان کلیدی: بزرگ‌نمایی، تفاضل محدود، سازه زیرزمینی، تفرق امواج.

بررسی اثرات سازه زیرزمینی بر روی تفرق امواج لرزه‌ای رسیده به سطح زمین

محسن ایثاری

دانش‌آموخته دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

رضا تارینژاد (نویسنده مسئول)

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
r_tarinejad@tabrizu.ac.ir

سید کاظم رضوی

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۱- مقدمه

زیرزمینی، تأیراتی را نیز بر روی سازه‌های سطحی می‌گذارند. یکی از دلایل تخریب این سازه‌ها می‌تواند به دلیل در نظر نگرفتن عوامل مختلف تأثیرگذار در ایجاد نیروهای اضافی در سازه به هنگام وقوع پدیده زلزله در هنگام طراحی این سازه‌ها باشد [۴-۶]. یکی از مواردی که در این سازه‌ها باید مورد توجه قرار گیرد، این است که در صورت تخریب و آسیب در اثر زلزله، کار بازسازی و تعمیر آنها بسیار سخت و پرهزینه خواهد بود. علاوه بر این، آسیب این سازه‌ها می‌تواند روی پایداری و امنیت ساختمان‌ها و سایر سازه‌هایی که روی سطح زمین در مجاورت این سازه‌ها، ساخته شده‌اند تأثیر مستقیم داشته باشد؛ بنابراین بررسی رفتار لرزه‌ای^۱ این سازه‌ها برای درک صحیح عملکرد و رفتارشان در هنگام وقوع زلزله بسیار مهم می‌باشد. محققین مختلفی تاکنون به بررسی عملکرد و پاسخ لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی همانند مترو پرداخته‌اند. یکی از ساختگاه‌های

امروزه برای مهندسین، اهمیت سازه‌های زیرزمینی^۱ همانند مترو به دلیل مزیت‌های فراوان آن برای حل مسئله ترافیک در مقایسه با سایر روش‌های روزمینی بیش‌ازپیش نمایان شده است. به دلیل اینکه متروها غالباً در شهرهای پرجمعیت ساخته می‌شوند و از زیر مراکز عمده تجاری و اقتصادی عبور می‌کنند، در صورت آسیب دیدن و تخریب شدن می‌توانند خطرات جانی و اقتصادی فراوانی ایجاد کنند [۱]. در طی سالیان متمادی در گذشته این گونه تصور می‌شد که عملکرد سازه‌های زیرزمینی در هنگام وقوع زمین‌لرزه نسبت به سازه‌های روی سطح زمین بهتر و مناسب‌تر می‌باشد. این در حالی است که تجربه بعضی از زلزله‌های مخرب نشان داده که این سازه‌ها نیز ممکن است در هنگام وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ، دچار تغییر شکل‌های بزرگ یا حتی تخریب کلی شوند [۲-۳]. این سازه‌ها به دلیل اینکه در اعماق زیاد ساخته نمی‌شوند علاوه بر تأثیرگذاری بر سازه‌های

لرزه‌ای، ۲- سختی نسبی سازه- خاک، ۳- ویژگی‌های وجه مشترک خاک- سازه و ۴- نیروهای داخلی سازه و خاک اشاره کرد. مطالعات ایشان نشان داد که پاسخ‌های لرزه‌ای سازه شامل لنگر خمشی، نیروی داخلی اعضا، نیروی برشی و تغییر مکان مشاهده شده به شدت متأثر از اثرات خاک و نسبت سختی بین خاک- سازه می‌باشد که باید در طراحی این سازه‌ها در نظر گرفته شود. در سال ۲۰۱۹ محققین مختلفی از جمله سان و همکاران [۱۸] و ما و همکاران [۱۹] از طریق مدل‌سازی سه بعدی سازه زیرزمینی دایکای به بررسی پارامترهای مختلف مؤثر روی رفتار لرزه‌ای خطی و غیرخطی سازه مترو پرداختند. ایشان در مطالعه خود از رکوردهای مربوط به زلزله‌های کوبه، چی چی و همچنین یک تحریک مصنوعی به عنوان شتاب ورودی به مدل استفاده کردند. پارامترهای مختلفی روی سازه از جمله تغییر مکان، نیروی محوری، نیروی برشی، لنگر خمشی و مکانیسم شکست سازه مترو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که رفتار لرزه‌ای ستون‌ها بیشتر تابعی از بارهای قائم وارده می‌باشد. رفتار لرزه‌ای دال‌ها تابعی از نیروهای قائم و نیروهای ثقلی همانند وزن خاک روی سازه می‌باشد. لو و هوانگ [۲۰] در سال ۲۰۱۹ به شبیه‌سازی غیرخطی تخریب ایستگاه مترو دایکای تحت زلزله ۱۹۹۵ کوبه با استفاده از توسعه یک روش ساده برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه و وارد کردن و ترکیب آن با نرم‌افزار FLAC پرداختند. با استفاده از روش توسعه داده شده ایشان می‌توان مکانیسم تخریب سازه را دقت نسبتاً مناسبی شبیه‌ساز نمود. با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه مشخص شد که در عمده تحقیقات صورت گرفته اشاره چندانی به ارتباط بین شتاب‌های رسیده به سطح زمین، بزرگ‌نمایی بین لایه‌ها و عوامل مؤثر روی تغییر مکان‌های نسبی سازه نشده است. در این مطالعه یک سازه زیرزمینی واقعی که در اثر زلزله آسیب‌های جدی به آن وارد شده، با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC مدل‌سازی می‌شود. بررسی اثرات سازه بر تفرق امواج لرزه‌ای رسیده به سطح زمین، بررسی میزان الگوی تغییر مکان‌های نسبی سازه در ابعاد مختلف ستون مرکزی

شناخته شده در این زمینه ایستگاه مترو دایکای^۳ در کشور زلزله خیز ژاپن می‌باشد [۷]. این ایستگاه زیرزمینی متأسفانه در طی زلزله مخرب سال ۱۹۹۵ کوبه به شدت آسیب دید و بعضی از قسمت‌های آن به طور کلی ویران شد. این ایستگاه در سال ۱۹۶۲ ساخته شده و در طرح آن اثرات لرزه‌ای خاص در نظر گرفته نشده بود. این سازه و رفتار لرزه‌ای آن، نحوه تخریب و علت آسیب آن مبنای مطالعات بسیاری در این زمینه شده است. در ادامه به مواردی از مطالعات در این زمینه اشاره می‌شود. علی‌الهی و همکاران [۸-۹]، علی‌الهی و رمضانی [۱۰] و علی‌الهی و آدم‌پیرا [۱۱] با استفاده از روش عددی المان مرزی^۴ در حوزه زمان^۵ به مطالعه پارامتری اثرات حفرة‌های زیرزمینی روی تغییر مکان‌های ایجاد شده در سطح زمین پرداختند. ایشان در مطالعه خود نشان دادند که حضور این سازه‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای در حدود ۲ برابر، بر بزرگ‌نمایی ایجاد شده در سطح زمین نسبت به حالت میدان آزاد دارند. پنجی و همکاران [۱۲-۱۳] نیز با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان که از روش‌های قدرتمند در بررسی مسائل انتشار امواج می‌باشد، به بررسی اثرات سازه‌های زیرزمینی بر سطح زمین در حالت دره‌ای شکل پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان‌دهنده‌ی اثرات متقابل این سازه‌ها بر یکدیگر نسبت به حالت منفرد هر کدام از این سازه‌ها می‌باشد. یکی دیگر از محققین ایرانی که در این زمینه به مطالعه پرداخته‌اند، بازیار و همکاران [۱۴-۱۵] می‌باشد. ایشان در پژوهش خود با استفاده از ساخت نمونه آزمایشگاهی در دستگاه سانتریفیوژ با اندازه‌گیری شتاب روی نمونه با تونل و مدل بدون تونل بزرگ‌نمایی ناشی از سازه در پیوندهای مختلف شتاب ورودی را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۹ ژو و همکاران [۱۶-۱۷] از طریق تهیه مدل‌های مختلف دو بعدی سازه-خاک ایستگاه دایکای در ژاپن به مطالعه عددی پارامتری روی این سازه پرداختند. برای رفتار خاک از یک مدل خطی توسعه داده شده و برای سازه از مدل الاستیک استفاده کردند. ایشان در مطالعه خود انواع مختلفی از پارامترهای تأثیرگذار روی رفتار لرزه‌ای سازه را مورد بررسی قرار دادند. از جمله این پارامترها می‌توان به ۱- شرایط بارگذاری

از ناحیه مورد توجه دور قرار داده شده است تا تاریخچه زمانی شتاب دریافتی در سطح زمین برابر تاریخچه شتاب حرکت میدان آزاد باشد. فرکانس موج ورودی و مشخصات سرعت برشی مصالح، دقت عددی انتقال موج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای نمایش درست انتقال موج از میان یک مدل، اندازه المان باید کوچک‌تر از یک‌دهم تا یک‌هشتم طول موج بیشترین فرکانس موج ورودی λ_s باشد.

$$\lambda_s = \frac{V_s}{f_{\max}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V_s سرعت موج برشی و f_{\max} متناظر با ماکزیمم فرکانس موج ورودی قابل تأثیر در تحلیل لرزه‌ای می‌باشد. حداقل سرعت موج برشی در این ساختگاه برابر ۱۴۰ متر بر ثانیه و f_{\max} نیز ۲۵ هرتز در نظر گرفته شده که اندازه مش‌ها را بین ۰/۵۶ تا ۰/۷ متر تعیین می‌نماید که در اینجا ۰/۶ متری انتخاب شده است. مشخصات لایه‌های خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات لایه‌های خاک در ایستگاه دایکای [۱۶-۱۷].

| لایه | خاک | ضخامت (متر) | چگالی (تن بر مترمکعب) | سرعت موج برشی (متر بر ثانیه) | نسبت پواسون |
|------|-----|-------------|-----------------------|------------------------------|-------------|
| ۱ | رس | ۱ | ۱/۹ | ۱۴۰ | ۰/۳۳۳ |
| ۲ | شن | ۴/۱ | ۱/۹ | ۱۴۰ | ۰/۴۸۸ |
| ۳ | شن | ۳/۲ | ۱/۹ | ۱۷۰ | ۰/۴۹۳ |
| ۴ | رس | ۳/۱ | ۱/۹ | ۱۹۰ | ۰/۴۹۴ |
| ۵ | رس | ۵/۵ | ۱/۹ | ۲۴۰ | ۰/۴۹۰ |
| ۶ | شن | ۲۲ | ۲ | ۳۳۰ | ۰/۴۸۷ |

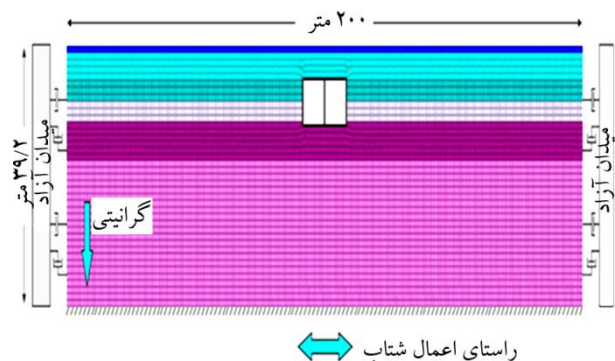
ابعاد مدل چنان که در شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد، برابر ۲۰۰ متر طول و ۳۹/۲ متر عرض می‌باشد. به دلیل اینکه از اثرات مرزهای انتهایی بر پاسخ‌های حاصل شده جلوگیری شود این ابعاد انتخاب شده است.

جهت شبیه‌سازی سازه ایستگاه از المان‌های سازه‌ای لاینر استفاده شده است. این نوع المان سازه‌ای قادر به شبیه‌سازی رفتار سیستم‌هایی که دارای ضخامت قابل توجهی بوده و نمی‌توان از جدایش بین سازه و خاک صرف‌نظر نمود استفاده می‌شود. فصل

(تخریب شده در اثر زلزله)، ارتباط شتاب‌های ثبت شده در سطح زمین، اثرات وجود و عدم سازه بر شتاب‌های ایجاد شده در لایه‌های زمین اطراف سازه از جمله اهداف پژوهش انجام شده می‌باشد.

۲- مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود سه‌بعدی توسط نرم‌افزار FLAC 3D صورت گرفته است. در شکل (۱) لایه‌های خاک به همراه مش‌بندی صورت گرفته در آن نشان داده شده است. جهت تعریف تنش‌های ناشی از وزن خاک به مدل از روش Gravity Loading در حالت استاتیکی استفاده شده است. در این تحلیل از تکیه‌گاه‌های غلتکی برای مرزهای قائم و مفصلی برای کف مدل استفاده شده است. در حالت دینامیکی دیگر نمی‌توان از این مرزها که باعث انعکاس موج‌ها به داخل مدل‌سازی می‌شوند، استفاده نمود و معمولاً از مرز ویسکوز استفاده می‌شود [۲۱]. در این روش میراگرها به‌طور مستقل به مرز در جهات عمودی و برشی متصل می‌شوند. جهت حذف موج‌های ناشی از حرکت میدان آزاد در پاسخ سازه، میراگرهای ذکر شده در FLAC به ستون‌های مجازی که قابلیت شبیه‌سازی حرکت میدان آزاد را دارند متصل می‌شوند. این کار باعث می‌شود که میراگرها موج برگشتی ناشی از سازه را به‌خوبی جذب نمایند. برای افزایش میزان دقت نتایج تحلیل عددی در مدل‌های ساخته شده، فاصله میان مرزهای آزاد به اندازه کافی



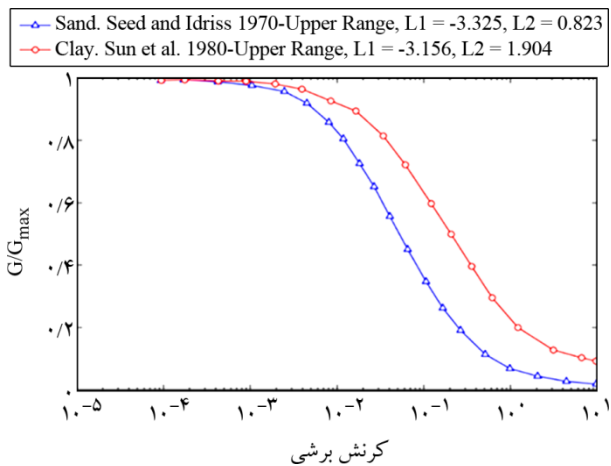
شکل (۱): هندسه، لایه‌بندی، مش‌بندی و شرایط مرزی مدل عددی در حالت دینامیکی.

$$s = \frac{L_2 - L}{L_2 - L_1} \quad (3)$$

در این رابطه L_1 و L_2 پارامترهای متناسب با نوع منحنی مورد استفاده بوده و برای رس و ماسه متفاوت می‌باشد و L برابر لگاریتم کرنش برشی تولید شده در خاک می‌باشد. با داشتن $M_s(\gamma)$ و γ رابطه تنش و کرنش به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\bar{\tau} = M_s \gamma \quad (4)$$

منحنی‌های مدول برشی نرمالایز شده به کرنش برشی برای خاک رس و ماسه بر اساس مطالعات آزمایشگاهی قابل توجه انجام شده در ادبیات فنی در شکل (۳) نشان داده شده و پارامترهای مدول معرفی شده نیز در این شکل آورده شده است.

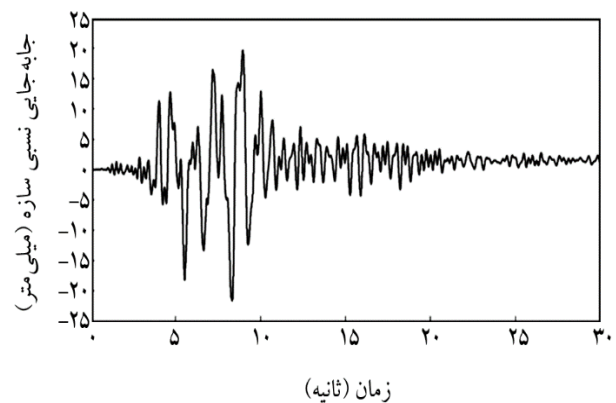


شکل (۳): منحنی‌های مدول برشی نرمالایز شده به کرنش برشی برای خاک رس و ماسه.

۳- تابع بزرگ‌نمایی

مطالعات محققین نشان داده که سازه‌های زیرزمینی، به خصوص سازه‌هایی که در اعماق کم نسبت به سطح زمین، ساخته می‌شوند بر روی شتاب‌های رسیده به سطح زمین و در نتیجه بر روی سازه‌های ساخته شده در آن منطقه نیز تأثیرگذار خواهند بود. این پدیده تحت عنوان بزرگ‌نمایی^۶ یا کوچک‌نمایی ناشی از اثرات سازه بر روی محیط اطراف تعریف می‌شود. در نقاطی از محیط سازه اثر مانع شوندگی و اثر کاهشی روی امواج داشته که می‌تواند منجر به کوچک‌نمایی روی لایه‌های خاک اطراف شود. در بعضی نقاط هم به دلیل پدیده

مشترک بین خاک و سیستم لاینر هم در راستای برشی و هم در راستای عمودی توسط فنرهایی که دارای سختی مشخصی هستند مدل‌سازی می‌شود. در اینجا فرض شده است که در راستای عمودی به طور کامل امکان جدایش وجود داشته و در راستای برشی ماهیت انتقال نیرو به صورت اصطکاکی بوده و ضریب اصطکاک $0/4$ برای آن در نظر گرفته شده است. جهت صحت‌سنجی مدل تهیه شده از نتایج ارائه شده توسط ژو و همکاران [۱۶-۱۷] استفاده شد. جابه‌جایی نسبی بین بالا و پایین ستون وسط، به دست آمده در مطالعه ایشان 20 میلی‌متر و در مطالعه حاضر برابر 21 میلی‌متر می‌باشد. نمودار تغییر مکان نسبی سازه تحت زلزله کوبه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): تغییر مکان نسبی سازه در بالا و پایین ستون وسط.

رفتار خاک در حالت استاتیکی به صورت الاستیک مدل شده و در حالت دینامیکی جهت شبیه‌سازی رفتاری سیکلیک خاک از مدل Hysteretic Damping استفاده شده است. در این مدل منحنی G/G_{max} در برابر کرنش برشی می‌تواند توسط تابع زیر تعریف شود:

$$M_s(\gamma) = \frac{G_t}{G_{max}} = s^2(3 - 2s) \quad (2)$$

این تابع شیب منحنی تنش برشی - کرنش برشی به متناظر با کرنش برشی تولید شده در مدل می‌باشد. در این رابطه G_t مدول برشی متناظر با کرنش برشی تولید شده در خاک، G_{max} مدول برشی خاک در کرنش‌های کوچک و s برابر رابطه (۳) است:

استفاده از میرایی منجر به هموار شدن نمودار می‌شود. استفاده از تغییر مکان‌های طیفی برای محاسبه بزرگ‌نمایی منجر به نتایج هموارتری می‌گردد بنابراین در این مطالعه از این روش استفاده شد [۲۱-۲۲].

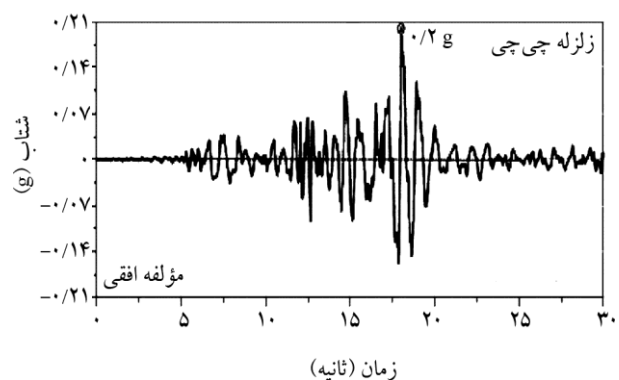
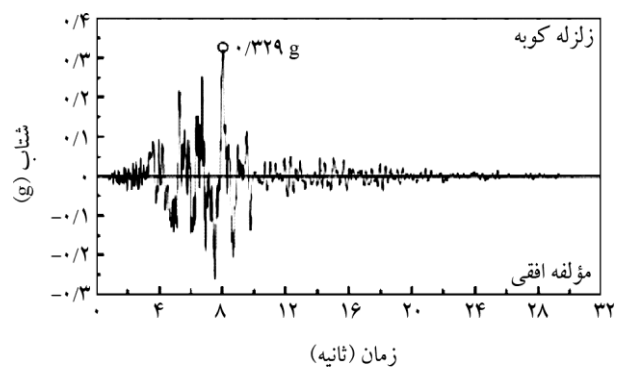
$$\text{Amp}_{S,F}(\omega) = \frac{SD_{\text{subway}}(\omega)}{SD_{\text{Free field}}(\omega)} \quad (5)$$

در این رابطه Amp نشان‌دهنده‌ی بزرگ‌نمایی، SD طیف پاسخ جابه‌جایی نقاط مختلف روی سطح زمین می‌باشد.

برای بررسی اثرات سازه روی محیط پیرامون و سطح زمین، مدل‌های مختلفی بدون وجود سازه و همچنین با حضور سازه تهیه شد. در شکل (۵) مکان قرارگیری نقاط مورد مطالعه روی سطح زمین و بر روی لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی خاک اطراف سازه ارائه شده است. روی سطح زمین ۹ نقطه در فواصل بی‌بعد ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ در این رابطه X فاصله روی محور افقی و B نصف بعد عرض سازه می‌باشد. علاوه بر این روی لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی زمین نیز در دو حالت بدون سازه و با وجود سازه ۶ نقطه مطابق شکل (۵) برای بررسی این پدیده، تعریف شده است. در شکل (۶) بزرگ‌نمایی ایجاد شده (چنان‌که در قسمت قبل اشاره شد، نسبت طیف جابه‌جایی در حالتی که سازه وجود دارد نسبت به حالتی که سازه وجود ندارد) در اثر دو زلزله کوبه و چی چی در ایستگاه دایکای روی نقاط مختلف سطح زمین ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده در این قسمت با کمیت‌های مختلفی از جمله محل قرارگیری نقاط، محدوده فرکانسی مؤثر و خصوصیات موج ورودی قابل تفسیر می‌باشد. چنان‌که در شکل (۲) قابل مشاهده است، در نقاط قرار گرفته روی مرکز، وسط و لبه سازه بیشترین بزرگ‌نمایی تجربه شده است. در بین این سه نقطه تحت زلزله کوبه که دارای پیک شتاب و پرپود غالب بیشتری نسبت به زلزله چی چی می‌باشد، نقطه $X/B = 0/5$ بیشترین بزرگ‌نمایی را نشان می‌دهد.

از مقایسه بین این سه نقطه می‌توان مشاهده کرد که در محدوده فرکانسی بیشتر از ۲۰ هرتز، تحت زلزله کوبه نسبت به

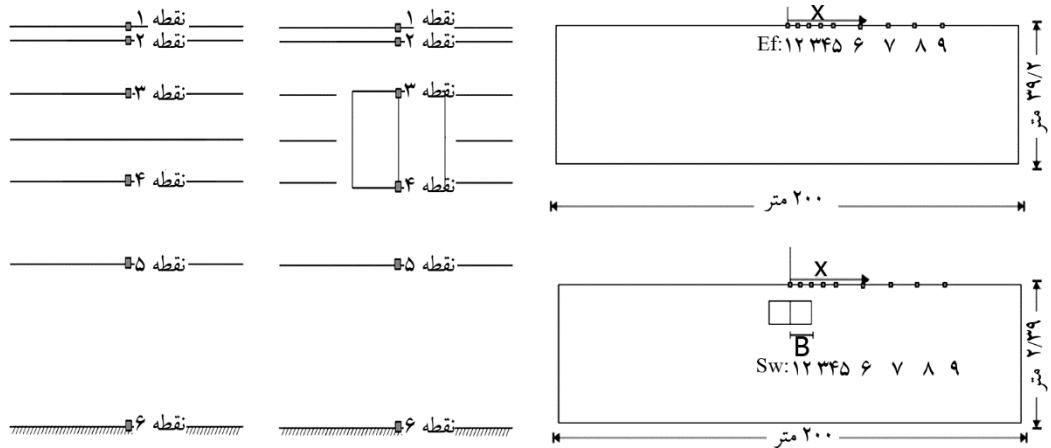
تفرق امواج لرزه‌ای از نقاطی مانند گوشه و لبه‌های سازه و یا جذب و سپس انعکاس امواج، منجر به بزرگ‌نمایی و افزایش اثرات امواج رسیده به سطح زمین می‌شود. در این تحقیق ایستگاه دایکای که تحت زلزله ۱۹۹۵ کوبه به شدت آسیب دید در نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC مدل شده است. برای بررسی اثرات این سازه روی پاسخ‌های نقاط سطح زمین و همچنین لایه‌های خاک از رکوردهای دو زلزله ایستگاه دانشگاه کوبه که یکی از نزدیک‌ترین رکوردها به این سازه می‌باشد و همچنین رکورد زلزله چی چی که در تایوان رخ داده استفاده شده است. رکورد ثبت شده در ایستگاه دانشگاه کوبه دارای پیک شتاب $0/329 \text{ g}$ ، پرپود غالب $1/28$ (ثانیه) و رکورد چی چی دارای پیک $0/2 \text{ g}$ ، پرپود غالب $0/84$ (ثانیه) می‌باشد. در شکل (۴) رکوردهای این زلزله ارائه شده است. برای محاسبه تابع بزرگ‌نمایی می‌توان از نسبت طیف پاسخ تغییر مکان مؤلفه‌های مربوط به حرکات سطح زمین با وجود سازه مترو و بدون آن با مقادیر میرایی مناسب (به‌عنوان مثال ۵ درصد)، استفاده نمود.



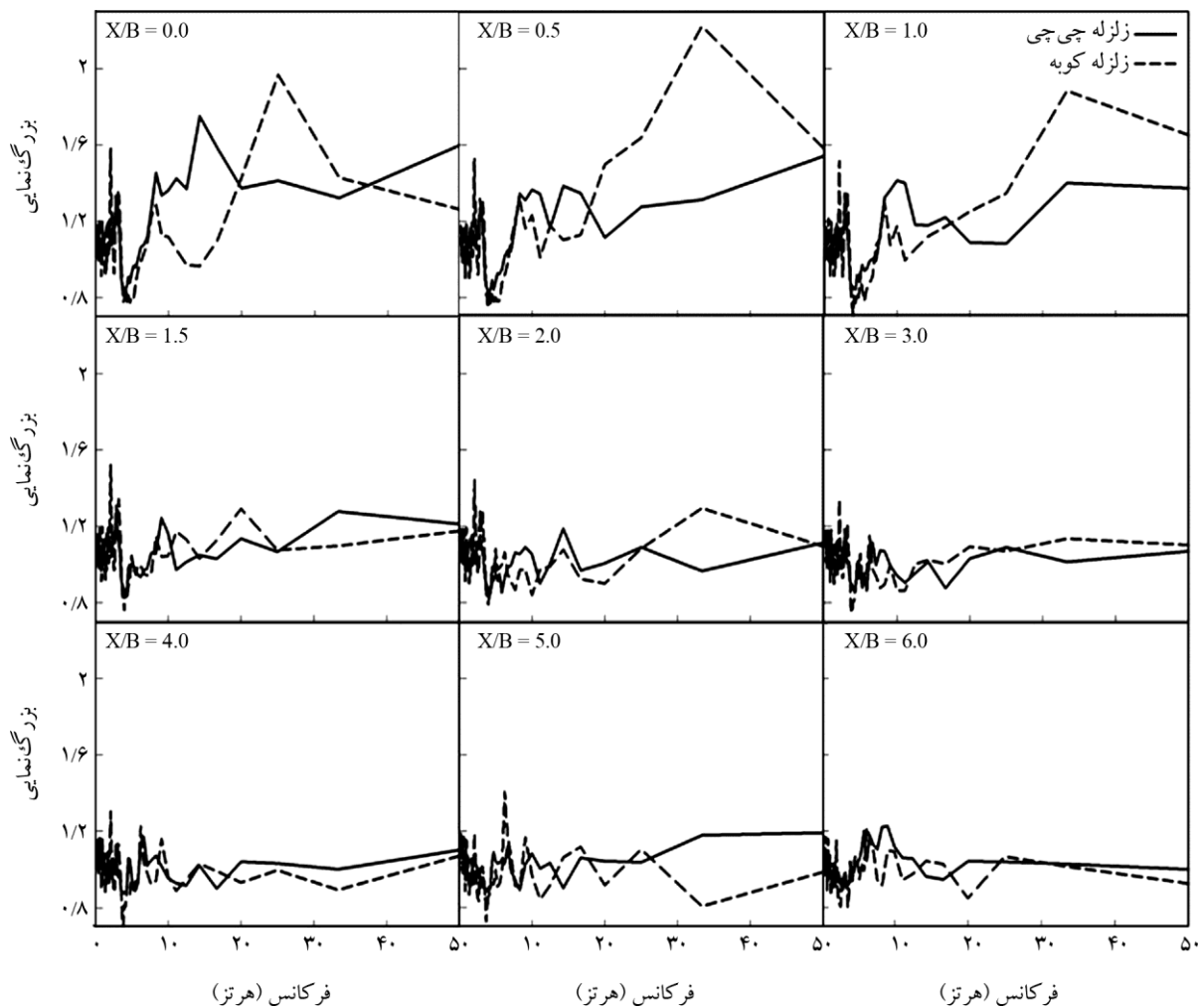
شکل (۴): مؤلفه‌های افقی شتاب‌های مورد استفاده در تحلیل لرزه‌ای ایستگاه دایکای.

زلزله چی چی بزرگ نمایی بیشتر تجربه شده است. نکته جالب توجه در این شکل که در اکثر نقاط نیز دیده می شود، این است که در محدوده فرکانسی کمتر از ۱۰ هرتز برای هر دو

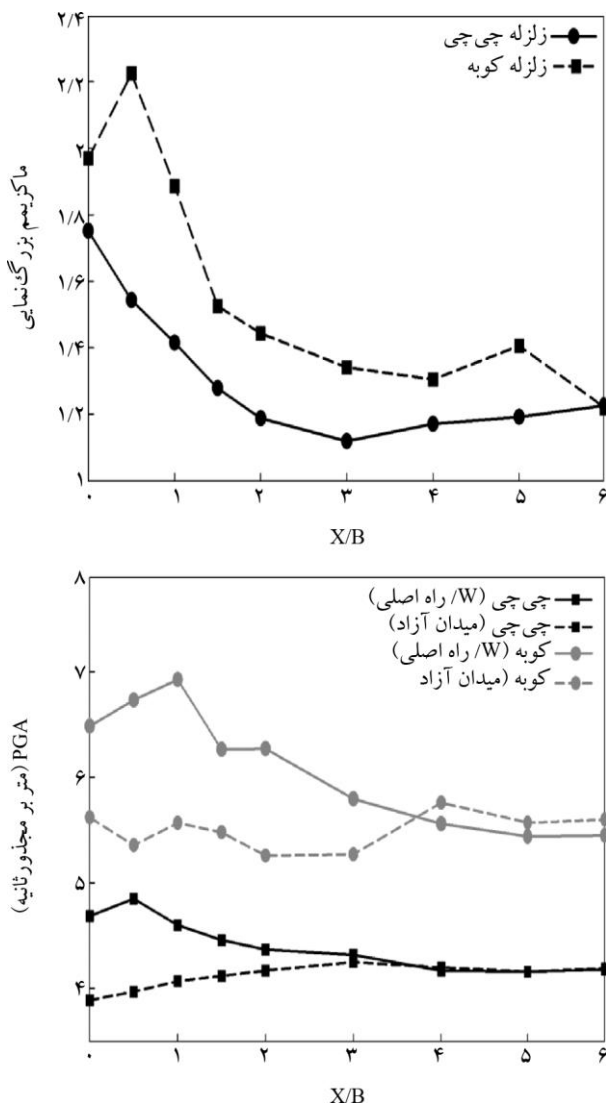
زلزله کوچک نمایی تجربه شده است. علت مشاهده الگوی رفتاری که غالباً به صورت بزرگ نمایی می باشد در این سه نقطه، چنان که در مطالعه سایر محققین نیز به آن اشاره شده است،



شکل (۵): شکل شماتیک از مقطع عرضی ایستگاه دایکای به همراه نقاط مشخص شده در فواصل و عمق های مختلف برای بررسی اثرات سازه.



شکل (۶): نسبت های طیف جابه جایی در نقاط مختلف روی سطح زمین.



شکل (۲): ماکزیمم شتاب و بزرگ‌نمایی در نقاط مختلف روی سطح زمین تحت دو زلزله کوبه و چی چی.

قابل مشاهده است، کم‌رنگ شدن اثرات بزرگ‌نمایی با افزایش فاصله از سازه می‌باشد. در ادامه تحلیل‌های انجام شده، شتاب‌های ماکزیمم تجربه شده بین لایه‌ها، در شکل (۸) ارائه شده است. مقایسه بین شتاب‌های ماکزیمم در دو حالت سطح آزاد و وضعیتی که سازه وجود دارد، نشان‌دهنده این است که در نقاط ۵ و ۶ که نقاط روی لایه انتهایی و مرز پایینی قرار گرفته‌اند، با سخت‌تر شدن خاک و افزایش سرعت موج برشی و افزایش ابعاد طول موج ورودی و همچنین افزایش فاصله نقاط از سازه، میزان اثرات سازه کاهش یافته است. شتاب ماکزیمم از پایین‌ترین در کف تا سطح زمین به تقریبی در هر دو تحلیل افزایش را نشان می‌دهد.

می‌تواند ناشی از اثر پدیده تفرق توسط سازه روی امواج لرزه‌ای انتشار یافته در محیط باشد. در صورتی که طول موج برخوردی به سازه در مقایسه با ابعاد سازه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ باشد، اثرات بزرگ‌نمایی و تفرق امواج منتشر شده نیز کاهش می‌یابد، اما اگر طول موج و ابعاد سازه به هم نزدیک باشند (به‌خصوص در خاک‌های نرم که سرعت موج برشی کمتر است)، این اثرات نیز ملموس‌تر خواهد بود. در محدوده‌های فرکانسی کمتر از ۱۰ هرتز الگوی نمودارهای ارائه شده از پیچیدگی بیشتری برخوردار هستند. با افزایش فاصله نقاط از سازه، الگوی مشاهده شده نقاط مختلف برای هر دو زلزله به پاسخ‌های زمین بدون سازه نزدیک و انطباق بیشتری مشاهده می‌شود. در شکل (۷) مقادیر ماکزیمم بزرگ‌نمایی و شتاب ثبت شده روی نقاط مختلف در سطح زمین تحت دو زلزله و در دو حالت بدون سازه و با سازه مترو ارائه شده است. از مقایسه مقادیر شتاب ماکزیمم برای هر دو زلزله کوبه و چی چی می‌توان مشاهده نمود که برای فاصله‌های بیشتر از ۲ برابر بعد دهانه سازه، این مقادیر برای زمین بدون سازه و زمین با سازه به یکدیگر نزدیک شده به گونه‌ای که در مقادیر بزرگ‌تر از ۳ این دو نمودار برای هر دو زلزله تقریباً بر هم منطبق می‌شوند. مقادیر شتاب‌های ماکزیمم ثبت شده تحت زلزله کوبه نسبت به زلزله چی چی به دلیل خصوصیات موج ورودی که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، بیشتر می‌باشد. در محدوده فاصله بین ۰ تا ۲ ($X/B = 0-2$) که اثرات سازه به‌صورت ملموسی قابل مشاهده است، تحت زلزله کوبه در نقاط $X/B = 0/5$ و $X/B = 1$ افزایش ۲۵ درصدی و در نقاط $X/B = 0$ و $X/B = 1/5$ افزایش ۱۵ درصدی را نشان می‌دهد. این افزایش شتاب ماکزیمم تحت زلزله چی چی در نقطه $X/B = 0/5$ برابر ۲۲ درصد، در نقطه $X/B = 0$ برابر ۲۰ درصد و در نقطه $X/B = 1$ برابر ۱۴ درصد می‌باشد. در ادامه شکل (۷) مقایسه‌ای بین بزرگ‌نمایی‌های ماکزیمم در نقاط مختلف روی سطح زمین برای دو زلزله ورودی ارائه شده است. چنان‌که در شکل قابل مشاهده می‌باشد، بیشترین مقدار بزرگ‌نمایی برای زلزله کوبه در نقطه $0/5$ و به مقدار $2/2$ ثبت شده است. در هر دو نمودار رفتار غالبی که

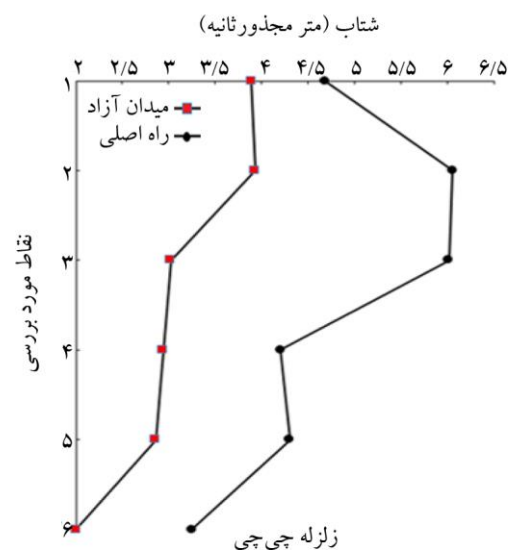
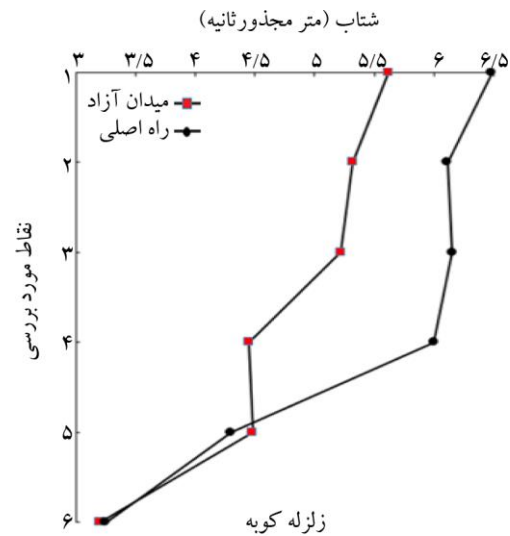
۹۹ درصدی را تجربه کرده است. وجه مشترک این پاسخ‌ها نسبت به زلزله کوبه این است که نقاطی که بیشترین افزایش را تجربه کرده‌اند در تماس با سازه، یکی در پایین و دیگری در بالای آن می‌باشد که می‌تواند به دلیل اثرات جذب و انعکاس امواج لرزه‌ای توسط سازه باشد. تقریباً در اکثر حالت‌ها سطح زمین بیشترین میزان شتاب را تجربه کرده است.

یکی از پارامترهای مورد توجه توسط اکثر محققین روی شتاب‌های ثبت شده در سطح زمین در طی یک زمین‌لرزه، طیف ارتباط ۷ بین شتاب‌نگاشت‌ها می‌باشد. این طیف کاربردهای متنوعی دارد. جهت تعیین میزان اطمینان به صحت نتایج حاصل از طیف توان متقاطع، از این طیف استفاده می‌شود. آنچه در حین یک آزمایش ارتعاش محیطی رخ می‌دهد تحریک سازه با فواصل متفاوت می‌باشد که باعث می‌شود مقادیر طیف ارتباط از مقدار واحد که نشان‌دهنده دو نگاشت کاملاً وابسته است، کاهش یابد. این طیف همواره مقداری بین صفر و یک را دارد. آنچه در مورد این طیف مورد توجه قرار می‌گیرد این است که در فرکانس‌های غالب سازه دچار تشدید می‌گردد و در منحنی تغییرات دامنه طیف در مقابل فرکانس مقداری به شکل پیک ظاهر می‌شود. مقدار طیف ارتباط بیشتر معرف کیفیت داده می‌باشد و می‌توان ادعا نمود پیک‌هایی از طیف ارتباط که بر پیک‌های تابع چگالی طیف توان منطبق گردد، اطمینان بیشتری به فرکانس تشدید بودن پیک‌ها ایجاد می‌کنند. مقدار این طیف از رابطه (۶) حاصل می‌شود [۲۱]:

$$\gamma_{jk}(\omega) = \frac{S_{jk}(\omega)}{\sqrt{S_{jj}(\omega)S_{kk}(\omega)}} \quad (6)$$

در این رابطه S چگالی طیف توان و γ طیف ارتباط بین زوج نقاط می‌باشد.

شکل (۹) طیف ارتباط بین نقطه $(X/B=0)$ به‌عنوان شروع و نقاط $۲ (X/B=0/5)$ ، $۴ (X/B=1/5)$ ، $۶ (X/B=3/5)$ و $۸ (X/B=5/5)$ در فواصل مختلف روی سطح زمین را نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل قابل مشاهده می‌باشد، از دیدگاه‌های فاصله نقاط از سازه، محدوده فرکانسی مؤثر و اثرات وجود سازه قابل بحث



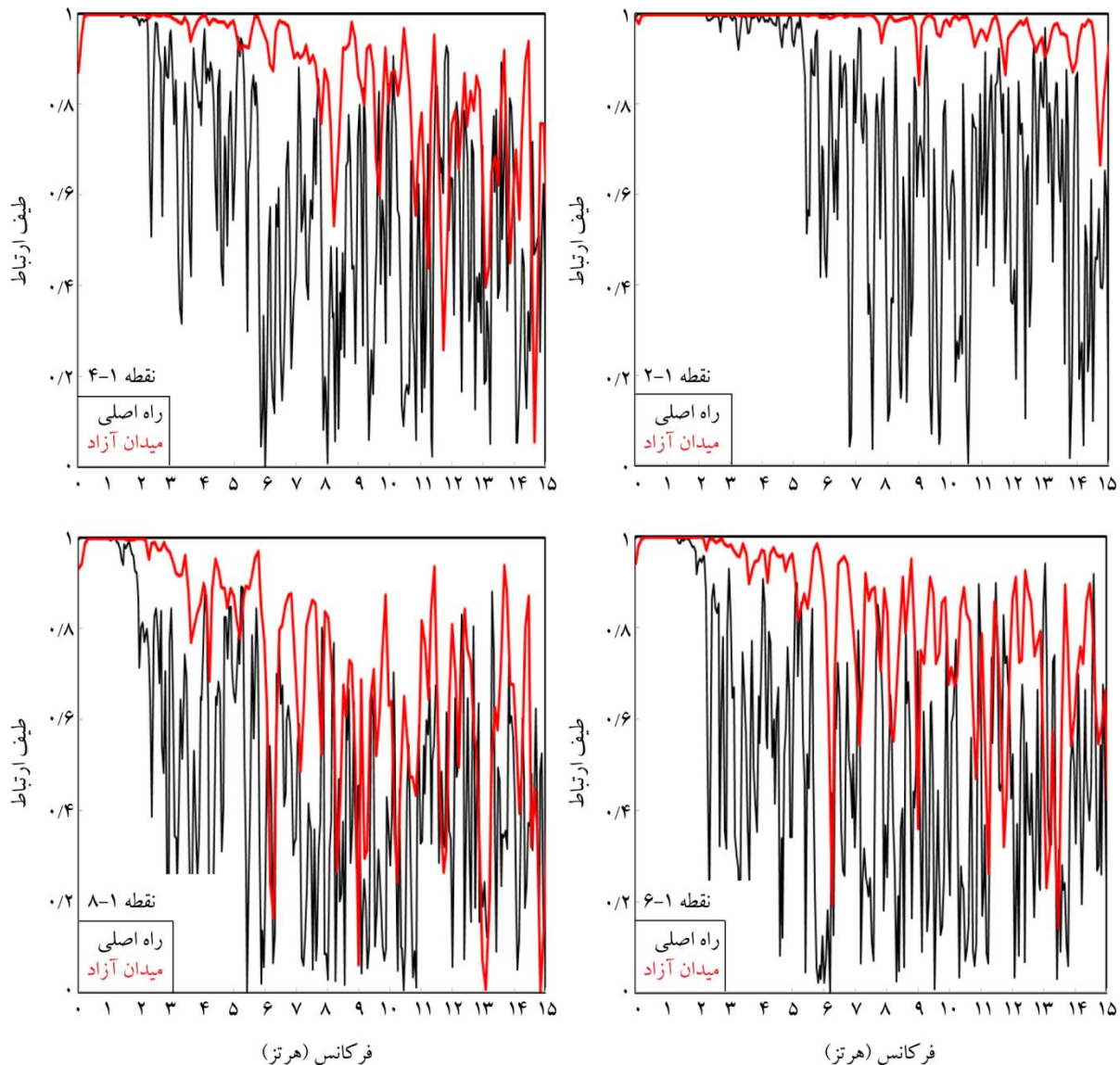
شکل (۸): مقایسه ماکزیمم شتاب در نقاط مختلف روی لایه‌های خاک اطراف سازه.

نقطه ۴ تحت زلزله کوبه بیشترین مقدار افزایش (۳۴/۸ درصد) تجربه کرده که می‌تواند به دلیل انعکاس و تداخل امواج در آن نقطه باشد. از نقطه ۴ تا نقطه ۱ با شیب نسبتاً ملایمی شتاب افزایش پیدا کرده، به طوری که در سطح زمین بیشترین شتاب ثبت شده است. تحت زلزله چی‌چی رفتارها کمی پیچیده‌تر شده است. قابل مشاهده است که خصوصیات موج ورودی در کنار سایر پارامترها از جمله خصوصیات هندسی و جنس مصالح خاک از عوامل مهم و تأثیرگذار در پاسخ‌های مشاهده شده از میزان اثرگذاری وجود و عدم وجود سازه می‌باشد. بیشترین میزان افزایش شتاب در این حالت در نقطه ۳ مشاهده شده که افزایش

نقاط نزدیک به سازه منجر به کاهش طیف ارتباط بین شتاب‌نگاشت‌ها شده است. علاوه بر این قابل مشاهده است که با افزایش فاصله نقاط از یکدیگر از میزان طیف ارتباط در هر دو حالت با سازه و بدون سازه کاسته شده و این نمودارها با هم انطباق بیشتری پیدا کرده‌اند. در واقع می‌توان دید که با افزایش فاصله اثرات سازه روی این طیف کمتر شده است.

همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد اکثر مطالعات محققین در این زمینه متمرکز بر چگونگی و میزان اثرگذاری سازه بر خاک پیرامونی می‌باشد. در ادامه تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش، سعی شده است پاسخ‌های سازه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

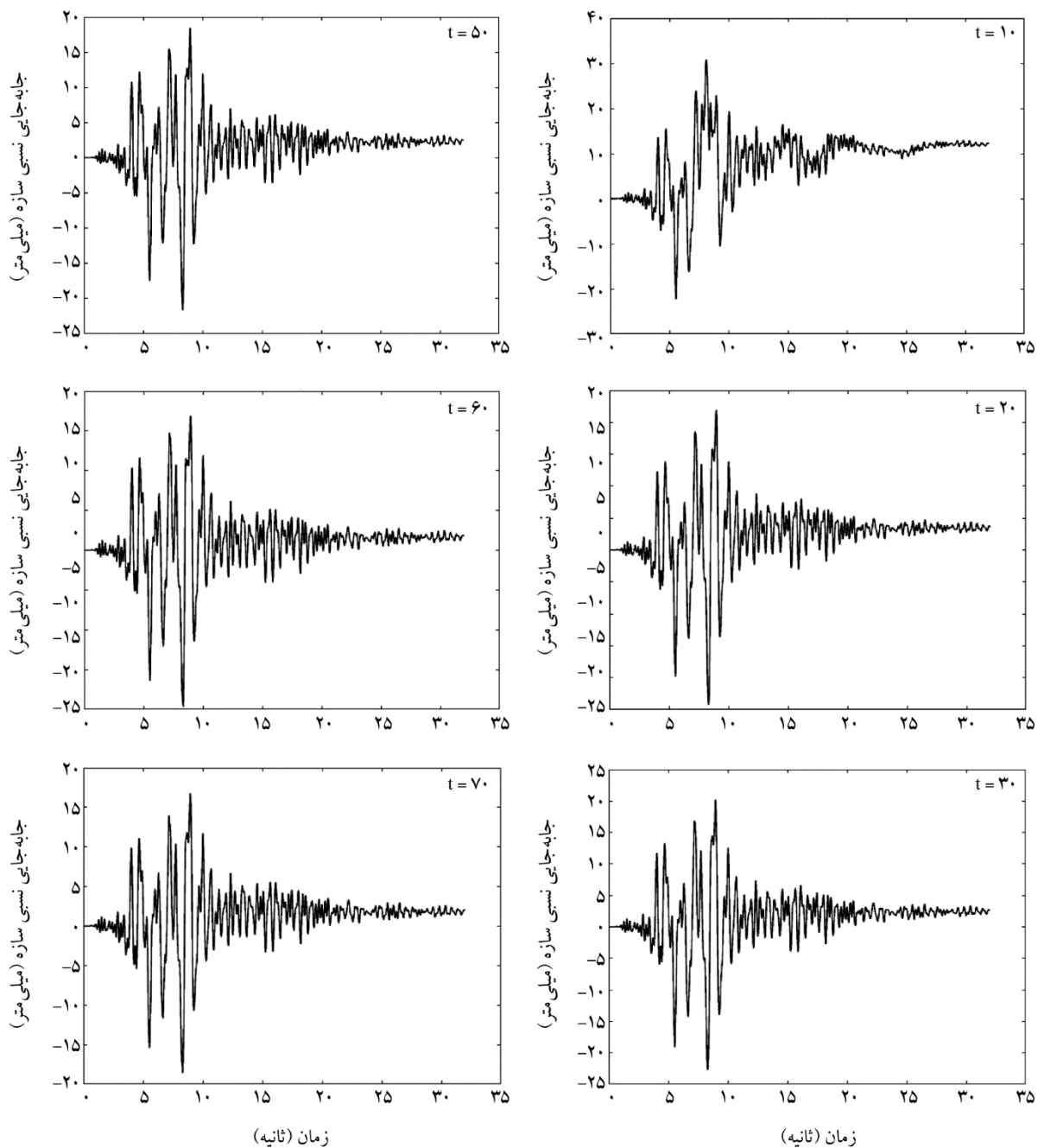
می‌باشد. در هر نمودار ارائه شده بین دو نقطه، طیف ارتباط با وجود سازه دارای الگوی پیچیده‌تر و طیف ارتباط با نوسانات و پیک‌های بیشتری می‌باشد. در تمام نمودارهای ارائه شده این طیف در دو حالت بدون سازه و با سازه در محدوده فرکانسی کمتر از ۲ هرتز بر یکدیگر انطباق و مقدار یک را دارند، که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی این باشد که در این محدوده اثرات اغتشاشات خارجی ناشی از سازه و عوامل دیگر دیده نشده است. افزایش فرکانس موجب افزایش نوسانات در طیف ارتباط بین زوج نقاط در هر دو حالت شده، ولی چنان‌که اشاره شد این نوسانات با حضور سازه افزایش پیدا کرده است. وجود سازه در



شکل (۹): طیف ارتباط بین نقاط مختلف تحت زلزله کوبه در دو حالت بدون سازه و با وجود سازه مترو.

زلزله کوبه مورد بررسی قرار گرفتند. چنان که قابل مشاهده است، در اکثر ضخامت‌ها الگوهای جابه‌جایی مشابه مشاهده شده، ولی مقادیر حداکثر جابه‌جایی تغییر کرده است. لازم به ذکر است این نمودارها، مربوط به تغییر مکان نسبی بین بالا و پایین ستون مرکزی می‌باشد. چنان که مورد انتظار هم بود، افزایش ضخامت ستون موجب کاهش جابه‌جایی نسبی شده است. شکل (۱۱) پیک جابه‌جایی‌های نسبی بین بالا و پایین ستون را نشان می‌دهد.

یکی پارامترهای مهم در بررسی رفتار سازه، مشاهده تغییر مکان‌های افقی نسبی سازه می‌باشد. در این تحلیل تغییر مکان‌های نسبی ۸ ستون مرکزی سازه در ضخامت‌های مختلف بررسی می‌شود تا اثرات افزایش و کاهش سختی سازه نسبت به حالت واقعی در راستای افقی مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور هفت مدل از سازه با عرض‌های مختلف برای ستون مرکزی با مقادیری که در شکل (۱۰) مورد اشاره قرار گرفته، تهیه و تحت



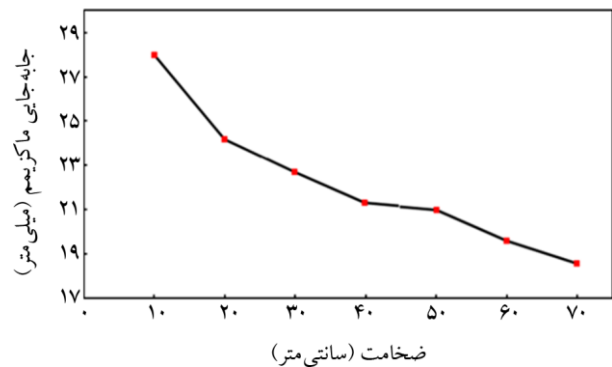
شکل (۱۰): جابه‌جایی نسبی در ضخامت‌های مختلف بین بالا و پایین ستون مرکزی.

زمین، نقاط که در تماس با سازه می‌باشند، بیشترین افزایش را در پیک شتاب تجربه کرده‌اند به گونه‌ای که تحت شتاب چی چی افزایش ۹۹ درصدی شتاب را در نقطه بالای سازه شاهد بودیم.

۴. مقایسه بین ماکزیمم تغییر مکان‌های نسبی سازه در ضخامت‌های مختلف ستون وسط ایستگاه نشان داد که تفاوت جابه‌جایی نسبی در بالا و پایین سازه کمتر از ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. این موضوع لزوم بررسی سایر عوامل از جمله مصالح خاک اطراف سازه و سختی نسبی بین سازه- خاک را نمایان می‌سازد.

مراجع

- Dowding C.H. and Rozan A. (1978) Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *ASCE J. Geotech. Eng. Div.*, **104**, 175-191.
- Jing-Ming, W. and Litehiser, J.J. (1985) The distribution of earthquake damage to underground facilities during the 1976 Tang-Shan earthquake. *Earthquake Spectra*, **1**, 741-757.
- Sharma, S. and Judd, W.R. (1991) Underground opening damage from earthquakes. *Eng. Geol.*, **30**, 263-276.
- Iida, H., Hiroto, T., Yoshida, N., and Iwafuji, M. (1996) Damage to Daikai subway station. *Soils Found.*, **36**, 283-300.
- Power, M., Rosidi, D., Kaneshiro, J., Gilstrap, S., and Chiou, S. (1998) Summary and evaluation of procedures for the seismic design of tunnels. *Final Report Task*.
- Chen, G., Wang, Z., Zuo, X., Du, X., and Gao, H. (2013) Shaking table test on the seismic failure characteristics of a subway station structure on liquefiable ground. *Earthq Eng. Struct. Dyn.*, **42**, 1489-1507.
- Jiang, L., Chen, J., and Li, J. (2010) Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis. *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, **9**, 555-567.
- Alielahi, H., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M.K., and Panji, M. (2013) Applying a time-domain boundary element method for study of



شکل (۱۱): مقایسه ماکزیمم تغییر مکان‌های نسبی بین بالا و پایین ستون.

نکته قابل توجه این است که با اینکه ضخامت ستون مرکزی به طور قابل توجهی تغییر کرده ولی حداکثر جابه‌جایی بین کمترین و بیشترین ضخامت کمتر از ۹ میلی‌متر تغییر داشته که عدد چندان قابل توجهی نیست. بدین معنی که در تغییر مکان نسبی سازه علاوه بر خصوصیات خود سازه، عوامل دیگری از جمله مسئله اندرکنش بین لایه‌های خاک - سازه، سختی نسبی بین خاک - سازه و جنس مصالح خاک نیز اثرگذار می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

به دلیل سختی زیاد بازسازی و هزینه‌های فراوان ناشی از آسیب و تخریب سازه‌هایی همانند مترو و همچنین اثرات مستقیم آنها، روی سازه‌های ساخته شده روی سطح زمین در مجاورت این سازه‌ها، بررسی رفتار لرزه‌ای این قبیل سازه‌ها را از اهمیت زیادی برخوردار کرده است. در این مقاله روش تفاضل محدود برای حل پاسخ لرزه‌ای یک ایستگاه واقعی مترو به کار گرفته شد. در ادامه به طور خلاصه به اهم نتایج حاصل شده در این مطالعه اشاره می‌شود.

- مقایسه نمودارهای بزرگ‌نمایی ناشی از اثرات وجود سازه روی تفرق امواج لرزه‌ای نشان می‌دهد که هر چه به سمت انتهایی سازه نزدیک می‌شویم اثرات تفرق افزایش می‌یابد که منجر به افزایش بزرگ‌نمایی در این نقاط شده است.
- بیشترین بزرگ‌نمایی به مقدار ۲/۲ و همچنین افزایش ۲۵ درصدی پیک شتاب تحت زلزله کوبه روی این ایستگاه مشاهده شد.
- نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در بین لایه‌های داخلی

- (2019) Simplified equivalent static methods for seismic analysis of shallow buried rectangular underground structures. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **121**, 1-11.
18. Sun, Q., Dias, D., Guo, X., and Li, P. (2019) Numerical study on the effect of a subway station on the surface ground motion. *Computers and Geotechnics*, **111**, 243-254.
19. Ma, C., Lu, D., Du, X., Qi, C., and Zhang, X. (2019) Structural components functionalities and failure mechanism of rectangular underground structures during earthquakes. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **119**, 265-280.
20. Lu, C. and Hwang, J. (2019) Nonlinear collapse simulation of Daikai Subway in the 1995 Kobe earthquake: Necessity of dynamic analysis for a shallow tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **87**, 78-90.
21. Tarinejad, R. and Damadipour, M. (2014) Modal identification of structures by a novel approach based on FDD-wavelet method. *J. Sound Vibr.*, **333**, 1024-1045.
22. Isari, M., Tarinejad, R., and Razavi, S. (2019) The effects of underground structure on the free field displacement under uniform and non-uniform excitation. *Civil and Environmental Researches*, **5**(1), 61-75, doi: 10.22091/ceer.2019.4760.1167.
- seismic ground response in the vicinity of embedded cylindrical cavity. *Int. J. Civil Eng.*, **11**, 45-54.
9. Alielahi, H., Kamalian, M., and Adampira, M. (2015) Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **71**, 63-79.
10. Alielahi, H. and Ramezani, M.S. (2016) Seismic Site amplification pattern caused by underground box-shaped structures. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **3**, 55-71 (in Persian).
11. Alielahi, H. and Adampira, M. (2016) Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: amplification patterns and engineering applications. *International Journal of Civil Engineering*, **14**, 233-251.
12. Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J.A., and Jafari, M.K. (2013) Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophysical Journal International*, **194**, 1849-1865.
13. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2014) Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded truncated circular cavity: a time-domain half-plane BEM. *International Journal of Civil Engineering, Transaction B: Geotechnical Engineering*, **12**, 193-206.
14. Baziar, M.H., Moghadam, M.R., Kim, D.S., and Choo, Y.W. (2014) Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **44**, 10-22.
15. Baziar, M.H., Ghalandarzadeh, A., and Moghadam, M.R. (1394) Tehran subway tunnel effect on the seismic response of the ground surface with linear soil behavior: an experimental and numerical study. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **3**, 15-36.
16. Xu, Z., Du, X., Xu, C., Hao, H., and Bi, K. (2019) Numerical research on seismic response characteristics of shallow buried rectangular underground structure. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **116**, 242-252.
17. Xu, Z., Du, X., Xu, C., Jiang, J., and Han, R.

واژه‌نامه

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Underground Structure | ۱- سازه زیرزمینی |
| Seismic Response | ۲- رفتار لرزه‌ای |
| Daikai Subway Station | ۳- ایستگاه مترو دایکای |
| Boundary Element | ۴- المان مرزی |
| Time Domain | ۵- حوزه زمان |
| Amplification | ۶- بزرگ‌نمایی |
| Coherence | ۷- طیف ارتباط |
| Deformations of the Structure | ۸- جابه‌جایی سازه |

Investigating the Effects of Underground Structures on the Scattering of Seismic Waves Reaching the Ground Surface

Mohsen Isari¹, Reza Tarinejad^{2*}, and Seyyed Kazem Razavi³

1. Ph.D., Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran,
*Corresponding Author, email: r_tarinejad@tabrizu.ac.ir
3. Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

In the present study, the FLAC Software is applied to investigate the different models of Daikai Subway Station, which was heavily damaged in the 1995 Kobe earthquake. The responses of the ground surface were analyzed with and without the presence of the structure to examine the phenomenon of amplification. The maximum amplification of 2.2 was obtained in the middle point of the structure, while the maximum acceleration was obtained in the point adjacent to the edge of the structure. The points located on the contact surface of the structure were experienced the highest amplification in comparison with the case of without structure. In the next step, different models of the structure with the central column thicknesses of 10-70 cm were developed to investigate the lateral displacements of the structure. The results indicated that the maximum lateral displacement of the structure between the maximum and minimum thicknesses was smaller than 10 mm.

1. Introduction

Today, the importance of underground structures such as subways is more than ever because of their no doubt critical roles in solving traffic problems in metropolises. Since subways are typically constructed in populated cities and pass beneath major commercial and economic centers, they can impose considerable casualties and economic losses if damaged or destroyed [1]. For many years, the performance of underground structures was believed to be better than that of ground structures when subjected to the earthquakes. However, the experience of some earthquakes demonstrated that underground structures might undergo large deformations or even major failures [2-3]. The present study models a real underground structure, which experienced serious damages during the earthquakes, by the finite difference method (FDM) using the FLAC Software. The present study aims to investigate the effects of the structure on the scattering of the seismic waves reaching the ground surface. The quantity and pattern of relative displacements for different sizes of the central column (destroyed by the earthquake), the relationship between the recorded accelerations on the ground surface and the effects of the presence of the structure on the acceleration response are investigated.

2. Numerical Modeling

The numerical modeling was performed by the Finite Difference Method using FLAC 3D software. The static mode of the gravity loading was employed to define stresses induced by the soil weight. Roller supports were used for vertical boundaries, while pinned supports were applied to the bottom of the model. These boundaries reflect waves into the model and thus they cannot be applied to the dynamic mode.

Conclusion

The present study employed the FDM to investigate the seismic responses of a real subway station. The obtained results are as follows:

1. Comparison of the amplification induced by the effects of the structure on the scattering of seismic waves indicated that the scattering effects increased near the edges of the structure, leading to the large amplification factors at the end area.
2. The maximum amplification of 2.2, and a 25 percent increase was obtained in the maximum acceleration of Daikai under the 1995 Kobe earthquake.

References

1. Dowding, C.H. and Rozan, A. (1978) Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *ASCE J. Geotech. Eng. Div.*, **104**, 175-91.
2. Jing-Ming, W. and Litehiser, J.J. (1985) The distribution of earthquake damage to underground facilities during the 1976 Tang-Shan earthquake. *Earthquake Spectra*, **1**, 741-57.
3. Sharma, S., and Judd, W.R. (1991) Underground opening damage from earthquakes. *Eng. Geol.*, **30**, 263-76.

Keywords: Amplification; Finite Difference Method; Underground Structures; Seismic Wave Scattering.