

**M. Isari**

PhD, Faculty of Civil  
Engineering, University of  
Tabriz, 29 Bahman Blvd.  
5166616471, Tabriz, Iran.

**e-mail:** isari.mohsen@tabrizu.ac.ir

**R. Tarinejad\***

Associate Professor, Faculty of  
Civil Engineering, University of  
Tabriz, 29 Bahman Blvd.  
5166616471, Tabriz, Iran.

**e-mail:** [r\\_tarinejad@tabrizu.ac.ir](mailto:r_tarinejad@tabrizu.ac.ir)

**S. K. Razavi**

PhD Candidate, Faculty of Civil  
Engineering, University of  
Tabriz, 29 Bahman Blvd.  
5166616471, Tabriz, Iran.

**e-mail:** skrazavi2010@gmail.com

## The Effects of Underground Structure on the Free Field Displacement Under Uniform and Non-Uniform Excitation

*In this study, the effects of a subway station on the surface ground motion subjected to uniform and the non-uniform propagating seismic wave is investigated. Numerical analysis is carried out by finite difference method using FLAC software. Seismic wave scattering considering and ignoring the effects of the underground station in the case of uniform and non-uniform excitation is performed, and corresponding amplification factors on the free field displacement are discussed. The major results of this study indicated that the possible large amplification factor on seismic waves considering the underground station is obtained. Therefore, it should be paid more attention to seismic design for surface structures.*

**Keywords:** Uniform Excitation, Amplification, Underground Structure, Finite difference, Non-Uniform Excitation.

---

\* Corresponding author

Received 26 August 2019, Revised 06 October 2019, Accepted 20 October 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4760.1167

## بررسی اثرات سازه زیرزمینی بر جابه‌جایی‌های سطح زمین تحت بارگذاری لرزه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت

مطالعات محققین اثبات می‌کند که رکوردهای مربوط به یک زلزله که در نقاط مختلف زمین ثبت می‌شوند، به دلیل عواملی چون محدود بودن سرعت انتشار امواج زلزله، تفرق امواج از نظر دامنه و فاز، تفاوت‌هایی دارند. این امر، لزوم کاربرد مفهوم تغییرات مکانی حرکت زمین در زمان زلزله را برای به‌کارگیری در آنالیزهای دینامیکی سازه‌ها نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC مدل ایستگاه مترو دایکای تهیه و در دو وضعیت بارگذاری لرزه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. پدیده بزرگنمایی ناشی از تفرق امواج لرزه‌ای با حضور سازه مترو و بدون آن، شتاب‌های حداکثر روی سطح زمین و بین لایه‌های تشکیل دهنده اطراف ایستگاه، تغییرمکان نسبی سازه و همچنین طیف ارتباط بین زوج نقاط در دو وضعیت بارگذاری ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین مقدار بزرگنمایی به مقدار ۱/۷۵ در نقطه نزدیک سازه و در وضعیت بارگذاری غیریکنواخت اتفاق افتاده است. همچنین برای افزایش دقت در تخمین شتاب‌های سطح زمین، علاوه بر وجود سازه، وضعیت بارگذاری غیریکنواخت نیز باید در نظر گرفته شود.

**واژگان کلیدی:** بارگذاری یکنواخت، بزرگنمایی، سازه زیرزمینی، تفاضل محدود، بارگذاری غیریکنواخت.

محسن ایناری

دکتری مهندسی عمران، دانشگاه  
تبریز، ایران.  
پست الکترونیک:  
isari.mohsen@tabrizu.ac.ir

رضا تارینژاد\*

دانشیار، دانشکده مهندسی  
عمران، دانشگاه تبریز، ایران.  
پست الکترونیک:  
r\_tarinejad@tabrizu.ac.ir

سید کاظم رضوی

دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه  
تبریز، ایران.  
پست الکترونیک:  
skrazavi2010@gmail.com

### ۱- مقدمه

شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در فواصل نزدیک به هم نیز مشاهده شده است که این امر لزوم به‌کارگیری مفهوم تغییرات مکانی حرکت زمین در زمان زلزله را برای کاربرد آنالیزهای دینامیکی سازه‌ها ایجاب می‌کند [۱]. عوارض توپوگرافی همچون دره‌ها و همچنین سازه‌هایی همانند تونل‌ها و متروها که در زیر زمین ساخته می‌شوند نیز موجب پدیدار شدن اختلالاتی در انتشار امواج و همچنین انکسار و تفرق امواجی که از یک منبع زلزله می‌آیند، می‌گردد. عمده تحقیقات انجام شده روی این پدیده را می‌توان بعد از نصب اولین آرایه شتاب‌سنج‌های SMART-1 در اوایل دهه ۸۰ دانست، زمانی که دسترسی به داده‌های حاصل از این شتاب‌سنج‌ها میسر شد. بنابراین اطلاعات زیادی از این داده‌ها در مورد تغییرات مکانی زمین‌لرزه و عوامل مؤثر روی آن حاصل

مطالعات بسیاری در گذشته تاکنون نشان داده‌اند که رکوردهای مربوط به یک زلزله که در نقاط مختلف زمین ثبت می‌شوند به دلیل عواملی چون محدود بودن سرعت انتشار امواج زلزله، انعکاس و تفرق امواج، فاصله گرفتن از مرکز انتشار و همچنین تفاوت در نوع خاک در آن محل، با هم متفاوت بوده و ممکن است شتاب‌های مربوط به یک زلزله که در دو محل مختلف ثبت شده‌اند، با یکدیگر تفاوت‌هایی را داشته باشند. این تفاوت حتی در

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۰۶/۰۴، بازنگری ۱۳۹۸/۰۷/۱۴، پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۲۸.  
(DOI): 10.22091/cer.2019.4760.1167 شناسه دیجیتال

شد [۲]. سازه‌های بزرگ و طویل مانند پل‌ها، سدها و تونل‌ها که دارای گستردگی تماسی زیادی با سطح زمین هستند ممکن است تغییرات عمده در دامنه و فاز تحریک در تکیه‌گاه‌های مختلف تجربه کنند. تفرق امواج لرزه‌ای و تشدید آنها توسط نامنظمی‌های موجود در ساختگاه نقش مهمی در تشدید جابه‌جایی‌ها دارد [۳-۵]. استفاده از تحریک یکنواخت برای چنین سازه‌هایی همانند سدها، پل‌ها و تونل‌ها چندان منطقی نیست. یکی از سازه‌های حساس زیرزمینی، مترو می‌باشد. این سازه‌ها به دلیل اینکه معمولاً در شهرهای پرجمعیت و در زیر مراکز تجاری و اقتصادی ساخته می‌شود، از اهمیت و حساسیت فراوانی برخوردار می‌باشند [۶ و ۷]. یکی از نکاتی که در این قبیل سازه‌ها باید در نظر گرفته شود این است که به دلیل اینکه در اعماق زیاد ساخته نمی‌شوند، بر روی سازه‌های روزمینی تأثیرگذار خواهند بود [۸]. این پدیده تحت عنوان بزرگنمایی<sup>۱</sup> ناشی از تفرق امواج لرزه‌ای در اثر برخورد با این سازه‌ها شناخته می‌شود. این پدیده تاکنون توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله آنها می‌توان به تحقیقات بازاریار<sup>۲</sup> و همکاران اشاره کرد. ایشان در مطالعات خود با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ و آزمایش روی نمونه‌های ساخته شده با وجود تونل و بدون تونل، بزرگنمایی ناشی از اثرات وجود سازه روی سطح زمین تحت شتاب‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که وجود سازه زیرزمینی موجب تقویت تحریک ورودی با پریودهای بلند و تضعیف تحریک ورودی با پریود کوتاه می‌شوند [۹ و ۱۰].

علی‌الهی<sup>۳</sup> و همکاران نیز با استفاده از روش عددی المان مرزی توسعه داده شده در حوزه زمان به مطالعه پارامتری اثرات حفره‌های زیرزمینی روی بزرگنمایی ایجاد شده در سطح زمین پرداختند. ایشان در مطالعه خود

نشان دادند که حضور این سازه‌ها تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر بزرگنمایی ایجاد شده ناشی از حفره‌ها در سطح زمین دارند [۱۱-۱۴]. پنجی و همکاران نیز با استفاده از روش المان مرزی، به بررسی اثرات سازه‌های زیرزمینی بر سطح زمین با وجود عارضه توپوگرافی به شکل دره پرداختند. نتایج مطالعه ایشان نشان‌دهنده اثرات متقابل این عوارض بر یکدیگر نسبت به حالت منفرد هرکدام از این سازه‌ها می‌باشد [۱۵ و ۱۶]. یکی از متروهای شناخته شده که توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته، ایستگاه مترو دایکای در ژاپن می‌باشد که در سال ۱۹۶۲ با استفاده از روش کند و پوش ساخته شده بود. این سازه در طی زلزله ویرانگر ۱۹۹۵ کوبه آسیب جدی دید. همین مسأله موجب شد تا رفتار لرزه‌ای آن مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد [۱۷]. در سال ۲۰۱۹ ژو<sup>۴</sup> و همکاران با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، به مطالعه پارامتری رفتار لرزه‌ای این سازه پرداختند. ایشان پارامترهای مختلفی از جمله، جنس مصالح خاک اطراف سازه، چگالی بتن سازه، اعمال همزمان مؤلفه‌های افقی و قائم رکوردهای زلزله را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که تغییر چگالی سازه تأثیر چندانی در تغییر مکان جانبی سازه ندارد و این رفتار متأثر از جنس مصالح خاک اطراف سازه نیز می‌باشد [۱۸ و ۱۹]. با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه، مشخص شد که اثرات تغییرات مکانی زمین‌لرزه روی ساختگاه با وجود سازه زیرزمینی مترو چندان مورد توجه محققین قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر، این پدیده با اعمال تحریک‌های یکنواخت و غیریکنواخت به‌عنوان ورودی روی ساختگاه خاک لایه‌بندی شده با وجود سازه مترو و بدون آن بررسی شد. برای این منظور، ساختگاه شناخته شده دایکای در کشور ژاپن در نظر گرفته شده است. برای تولید شتاب‌های غیریکنواخت تکیه‌گاهی از روش شناخته شده ارتعاش تصادفی برمبنای چگالی طیف توان و طیف

<sup>1</sup>- amplification

<sup>2</sup>- Baziar

<sup>3</sup>- Alielahi

<sup>4</sup>- Xu

انتقال روی یک سطح از رابطه (۴) که براساس تئوری انتشار امواج برشی نوشته شده، استفاده می‌شود:

$$H_i(i\omega) = \frac{(1+r_i - i\xi_i) \exp(-i\omega\tau_i(1-2i\xi_i))}{1+(r_i - i\xi_i) \exp(-2i\omega\tau_i(1-2i\xi_i))} \quad (4)$$

در این رابطه  $\xi_i$  نسبت میرایی،  $\tau$  زمان عبور موج و  $r$  ضریب انعکاس موج می‌باشد. اختلاف فاز بین تحریک دو نقطه  $i$  و  $j$  با توجه به عبور موج در ساختگاه از رابطه (۵) تعیین می‌شود:

$$\theta_i(\omega) - \theta_j(\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(H_i(i\omega)H_j^*(i\omega))}{\text{Re}(H_i(i\omega)H_j^*(i\omega))} \quad (5)$$

ماتریس چگالی طیف توان  $S(i\omega)$  یک ماتریس هرمیتی می‌باشد، که براساس رابطه (۶)، به صورت حاصل ضرب دو ماتریس پایین‌مثلثی در ماتریس هرمیتی آن نوشته می‌شود:

$$S(i\omega) = L(i\omega)L^H(i\omega) \quad (6)$$

تجزیه این ماتریس با استفاده از روش چولسکی انجام و سپس درایه‌های ماتریس پایین‌مثلثی به صورت معادله (۷) نوشته می‌شود:

$$L(i\omega) = \begin{bmatrix} L_{11}(\omega) & 0 & \dots & 0 \\ L_{21}(i\omega) & L_{22}(\omega) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1}(i\omega) & L_{n2}(i\omega) & \dots & L_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L_{ii}(\omega) = \left[ S_{ii}(\omega) - \sum_{k=1}^{i-1} S_{ik}(i\omega)S_{ik}^*(i\omega) \right]^{1/2} \quad (8)$$

$i=1,2,\dots,n$

ارتباطی استفاده گردید [۲۰]. در این مطالعه، مواردی شامل مقایسه بزرگنمایی ایجاد شده ناشی از حضور سازه در سطح زمین، پیک شتاب‌های ایجاد شده در روی سطح و روی لایه‌های زمین تشکیل‌دهنده اطراف سازه تحت دو بارگذاری یکنواخت<sup>۵</sup> و غیریکنواخت<sup>۶</sup> بررسی شد.

## ۲- روش ارتعاش تصادفی

تحریک متفاوت زمین‌لرزه بر روی یک بستر سنگی به صورت یک فرایند مانا با میانگین صفر که دارای تابع چگالی طیف توان مشابه می‌باشد، فرض می‌شود. این فرض با توجه به فاصله زیاد منبع تا ساختگاه که معمولاً از ابعاد سازه بزرگتر است، منطقی به نظر می‌رسد. تابع چگالی طیف توان متقاطع برای تحریک زمین‌لرزه برای یک ساختگاه در  $n$  تکیه‌گاه به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود [۲۰]:

$$S(i\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(i\omega) & \dots & S_{1n}(i\omega) \\ S_{21}(i\omega) & S_{22}(\omega) & \dots & S_{2n}(i\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1}(i\omega) & S_{n2}(i\omega) & \dots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه  $S_{ij}(i\omega)$  و  $S_{ii}(\omega)$ ، به ترتیب تابع چگالی طیف توان متقاطع و تابع چگالی طیف توان خود ارتباطی می‌باشند، که از روابط (۲) و (۳) تعیین می‌شوند:

$$S_{ii}(\omega) = |H_i(i\omega)|^2 S_g(\omega) \quad (2)$$

$$S_{ij}(i\omega) = H_i(i\omega)H_j^*(i\omega)S_g(\omega)\gamma_{ij}(d_{ij},i\omega) \quad (3)$$

در این روابط  $H_j(i\omega)$  و  $H_i(i\omega)$  عبارتند از: تابع انتقال بین دو تکیه‌گاه،  $S_g(\omega)$  تابع چگالی طیف توان تحریک زمین و  $\gamma_{ij}$  تابع طیف ارتباطی بر روی بستر سنگی در تحریک متفاوت تکیه‌گاهی. برای تعیین تابع

<sup>5</sup>- Uniform Excitation

<sup>6</sup>- Non-Uniform Excitation

محاسبه تابع چگالی طیفی توان متقاطع بین نقاط تکیه‌گاهی نیاز داریم.

$$f_i(t) = \zeta(t)u_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\zeta(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 1 & t_0 < t \leq t_n \\ \exp[-0.155(t-t_n)], & t_n < t \leq T \end{cases} \quad (13)$$

ارتباط بین توابع چگالی طیف توان متقاطع و خود ارتباطی ما بین دو تکیه‌گاه  $n$  و  $m$  به صورت رابطه (۱۴) توسط تابع ارتباطی بیان می‌شود:

$$S_{mn}(d, \omega) = S_g(\omega)\gamma_{mn}(\omega) \quad (14)$$

برای تعریف  $S(\omega)$  از طیف اصلاح شده کانای-تاجیمی استفاده می‌شود. کانای و تاجیمی رابطه‌ای به شکل معادله (۱۵) را برای محاسبه چگالی طیف توان ارائه کرده‌اند [۲۰].

$$S_g(\omega) = \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_f \omega \xi_f)^2} \times \frac{1 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \Gamma \quad (15)$$

در رابطه بالا  $\Gamma$  بزرگی تحریک سنگ بستر،  $\omega_g$  فرکانس مرکزی،  $\omega_f$  فرکانس مربوط به فیلتر بالاگذر،  $\xi_g$  نسبت میرایی و  $\xi_f$  پارامترهای مربوط به خاک محیط می‌باشند، که برای بیان شرایط محیطی در انتشار امواج به کار می‌رود. در پژوهش حاضر،  $\omega_g = 10\pi$  (rad/s)،  $\xi_g = \xi_f = 0.6$  و همچنین مقدار  $\omega_g = 0.5\pi$  (rad/s) و همچنین مقدار  $\Gamma = 0.022$  (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>) در نظر گرفته شده است [۲۰].

تابع طیف ارتباطی بین دو ایستگاه با فرض سرعت انتشار موج C از رابطه (۱۶) تعیین می‌شود.

$$\gamma_{mn}(d, \omega) = |\chi(d, \omega)| e^{-i\omega d/c} \quad (16)$$

$$L_{ij}(i\omega) = \frac{S_{ij}(i\omega) - \sum_{k=1}^{i-1} S_{ik}(i\omega)S_{jk}^*(i\omega)}{S_{ij}(\omega)} \quad (9)$$

$$j = 1, 2, \dots, i$$

در روابط (۸) و (۹) علامت \* نشان دهنده تابع مزدوج مختلط و  $S_{ij}(i\omega)$  تابع چگالی طیف توان متقاطع می‌باشد. بعد از تعیین درایه‌های ماتریس مثلثی، سری‌های زمانی برای تکیه‌گاه‌های مختلف با استفاده از رابطه (۱۰) تعیین می‌شود:

$$u_i(t) = \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^N A_{im}(\omega_n) \cos \left[ \omega_n t + \beta_{im}(\omega_n) + \varphi_{mn}(\omega_n) \right] \quad (10)$$

در این رابطه  $A_{im}(\omega)$  برابر دامنه و  $\beta_{im}(\omega)$  فاز سری زمانی تولید شده می‌باشند که براساس معادلات (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌گردند.  $\varphi_{mn}(\omega_n)$  فاز تصادفی و  $n$  تعداد فرکانس‌های گسسته شده می‌باشد [۲۰].

$$A_{im}(\omega) = \sqrt{4\Delta\omega} |L_{im}(i\omega)| \quad (11)$$

$$0 \leq \omega \leq \omega_N$$

$$\beta_{im}(\omega) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}[L_{im}(i\omega)]}{\text{Re}[L_{im}(i\omega)]} \right) \quad (12)$$

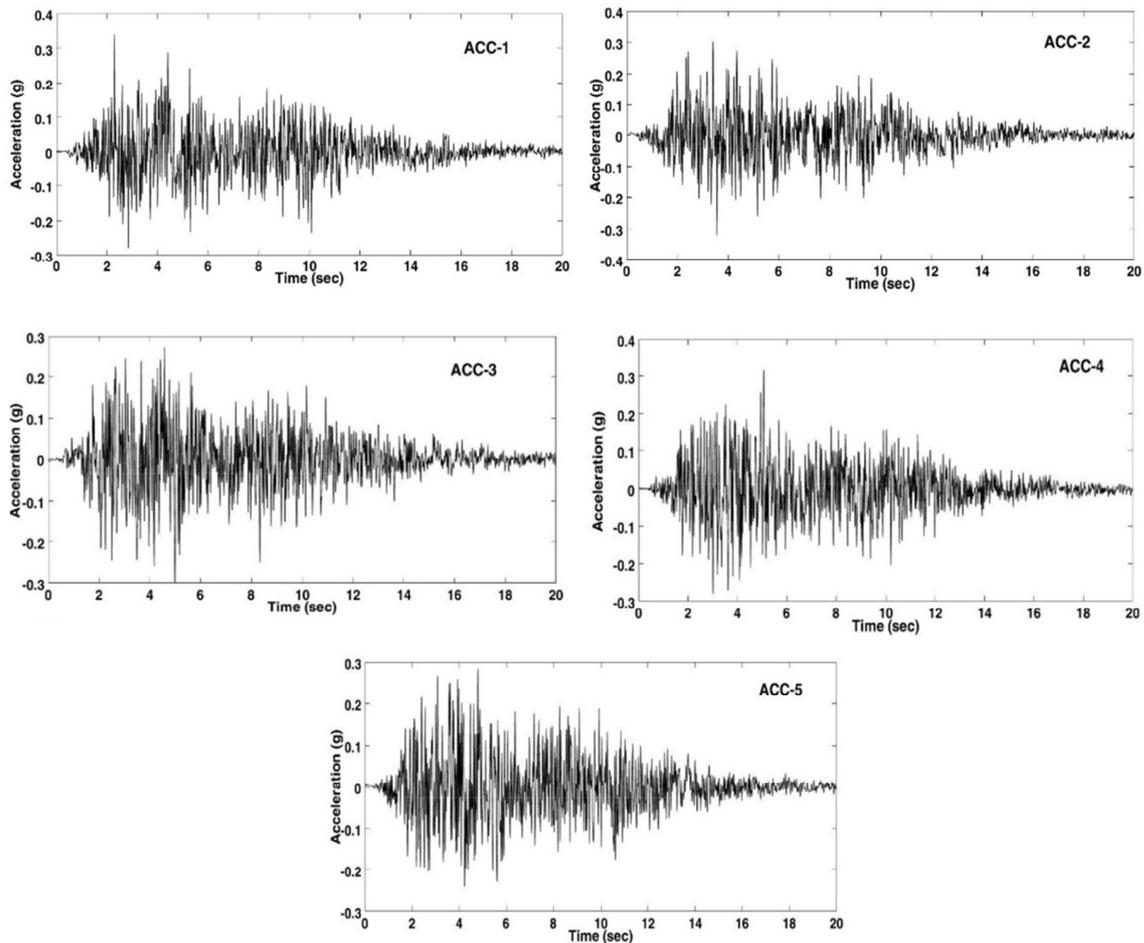
$$0 \leq \omega \leq \omega_N$$

سری زمانی تولید شده با استفاده از این روش یک فرایند مانا می‌باشد. به منظور دست‌یابی به سری‌های زمانی غیرمانا در نقاط مختلف ساختگاه از تابع پوش جنینگ<sup>۷</sup> با فرض  $t_0=2s$  و  $t_n=10s$  به صورت معادله (۱۳) استفاده می‌شود. در این رابطه،  $\zeta(t)$  تابع پوش جنینگ و  $u_i(t)$  تابع سری زمانی تولید شده می‌باشد. همانگونه که در بخش‌های قبلی اشاره شد، در روش‌های ارتعاش تصادفی برای محاسبه تحریک متفاوت تکیه‌گاهی به

<sup>7</sup>- Jennings envelope function

در شکل ۱ شتاب‌های تولید شده براساس روش ارتعاش تصادفی ارائه شده است.

بخش نمایی رابطه (۱۶) نشان‌دهنده اثرات عبور موج یا تأخیر زمانی و  $|\gamma(d, \omega)|$  تابع کاهش ارتباطی می‌باشد.



شکل ۱- شتاب‌نگاشت‌های تولید شده با روش ارتعاش تصادفی

استفاده نمود و معمولاً از مرز ویسکوز که توسط کوهلمیر و لایسمر<sup>۸</sup> در سال ۱۹۶۹ معرفی شده استفاده می‌شود. در این روش، میراگرها به‌طور مستقل به مرز در جهات عمودی و برشی متصل می‌شوند [۱۸]. جهت حذف موج‌های ناشی از حرکت میدان آزاد در پاسخ سازه، میراگرهای ذکر شده در FLAC به ستون‌های مجازی که قابلیت شبیه سازه 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

### ۳- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

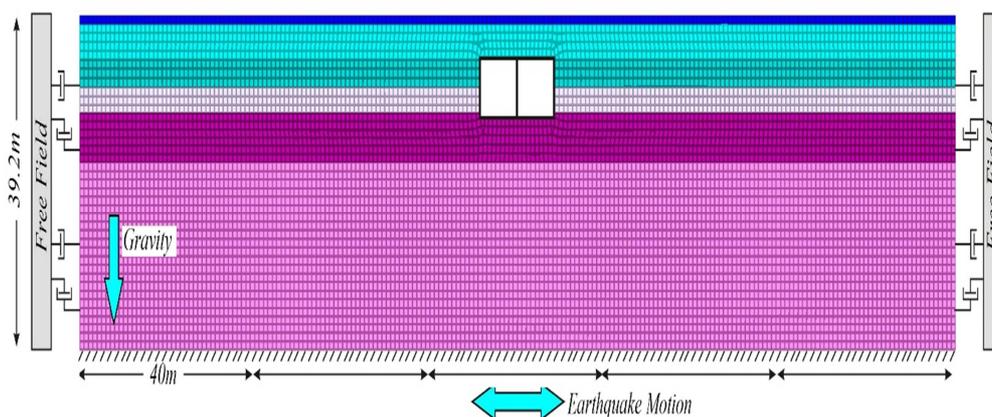
مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود سه بعدی توسط نرم افزار FLAC 3D صورت گرفته است. در شکل ۲ لایه‌های خاک به‌همراه مش‌بندی صورت گرفته در آن نشان داده شده است. جهت تعریف تنش‌های ناشی از وزن خاک به مدل از روش Gravity Loading در حالت استاتیکی استفاده شده است. در این تحلیل از تکیه‌گاههای غلطکی برای مرزهای قائم و مفصلی برای کف مدل استفاده گردیده است.

در حالت دینامیکی دیگر نمی‌توان از این مرزها که باعث انعکاس موج‌ها به داخل مدل‌سازی می‌شوند،

<sup>8</sup>- Kuhlemeyer and Lysmer

نمایش درست انتقال موج از میان یک مدل، اندازه المان باید کوچکتر از یک دهم تا یک هشتم طول موج بیشترین فرکانس موج ورودی  $\lambda_s$  که در رابطه (۱۷) نشان داده شده است، باشد.

میان مرزهای آزاد به اندازه کافی 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



شکل ۲- هندسه، لایه‌بندی، مش‌بندی و شرایط مرزی مدل

فنرهایی که دارای سختی مشخصی هستند مدل‌سازی می‌شود.

در اینجا فرض شده است که در راستای عمودی به‌طور کامل امکان جدایش وجود داشته و در راستای برشی، ماهیت انتقال نیرو به‌صورت اصطکاکی بوده و ضریب اصطکاک ۰/۴ برای آن در نظر گرفته شده است. رفتار خاک در حالت الاستیک به‌صورت الاستیک مدل شده و در حالت دینامیکی جهت شبیه‌سازی رفتاری دوره‌ای خاک از مدل Hysteretic Damping استفاده شده است. در این مدل، منحنی  $G/G_{max}$  در برابر کرنش برشی می‌تواند توسط تابع (۱۸) تعریف شود:

$$M_S(\gamma) = \frac{G_r}{G_{max}} = s^2(3-2s) \quad (18)$$

این تابع، شیب منحنی تنش برشی- کرنش برشی به متناظر با کرنش برشی تولید شده در مدل می‌باشد. در این رابطه،  $G_r$  مدول برشی متناظر با کرنش برشی تولید شده در خاک،  $G_{max}$  مدول برشی خاک در کرنش‌های کوچک و  $s$  برابر رابطه (۱۹) است:

$$\lambda_s = \frac{V_s}{f_{max}} \quad (17)$$

در این رابطه،  $V_s$  سرعت موج برشی و  $f_{max}$  متناظر با حداکثر 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 اندازه‌مش‌ها 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. ابعاد مدل چنانکه در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد، برابر ۲۰۰ متر طول و ۳۹/۲ متر عرض می‌باشد. به‌دلیل اینکه از اثرات مرزهای انتهایی بر پاسخ‌های حاصل شده جلوگیری شود این ابعاد انتخاب شده است [۱۸].

جهت شبیه‌سازی سازه ایستگاه از المان‌های سازه‌ای خطی استفاده شده است. این نوع المان سازه‌ای قادر به شبیه‌سازی رفتار سیستم‌هایی است که دارای ضخامت قابل توجهی بوده و نمی‌توان از جدایش بین سازه و خاک صرف‌نظر نمود. فصل مشترک بین خاک و سیستم خطی هم در راستای برشی و هم در راستای عمودی توسط

رابطه (۲۰) قابل تعریف است:

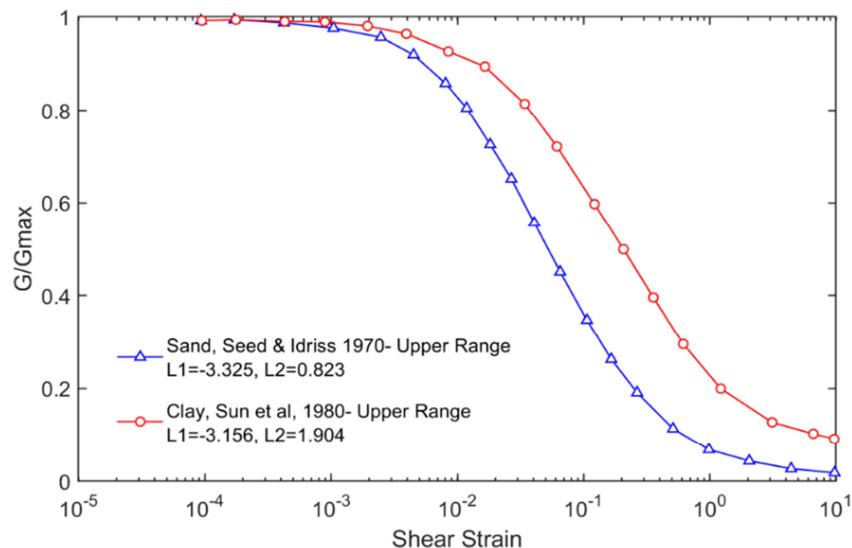
$$\bar{\tau} = M_s \gamma \quad (20)$$

$$s = \frac{L_2 - L}{L_2 - L_1} \quad (19)$$

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

جدول ۱- مشخصات لایه‌های خاک در ایستگاه دایکای [۱۸]

نسبت پواسون	سرعت موج برشی (m/s)	چگالی ( $t/m^3$ )	ضخامت (m)	خاک	لایه
۰/۳۳۳	۱۴۰	۱/۹	۱	رس	۱
۰/۴۸۸	۱۴۰	۱/۹	۴/۱	شن	۲
۰/۴۹۳	۱۷۰	۱/۹	۳/۲	شن	۳
۰/۴۹۴	۱۹۰	۱/۹	۳/۱	رس	۴
۰/۴۹۰	۲۴۰	۱/۹	۵/۸	رس	۵
۰/۴۸۷	۳۳۰	۲	۲۲	شن	۶



شکل ۳- منحنی‌های مدول برشی نرمال شده با مدول برشی حداکثر به کرنش برشی برای خاک رس و ماسه

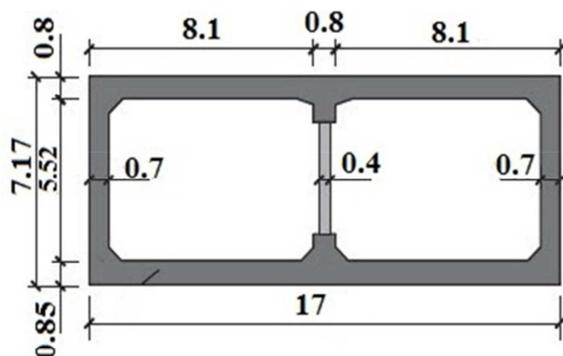
کوبه و در مطالعه حاضر برابر ۲۱ میلی‌متر می‌باشد. هندسه سازه ایستگاه و نمودار تغییرمکان نسبی سازه تحت زلزله کوبه در شکل ۴ نشان داده شده است.

#### ۴- نتایج تحلیل عددی

در این بخش به مقایسه اثرات حضور سازه روی تفرق امواج لرزه‌ای رسیده به سطح زمین در دو حالت بارگذاری لرزه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت پرداخته

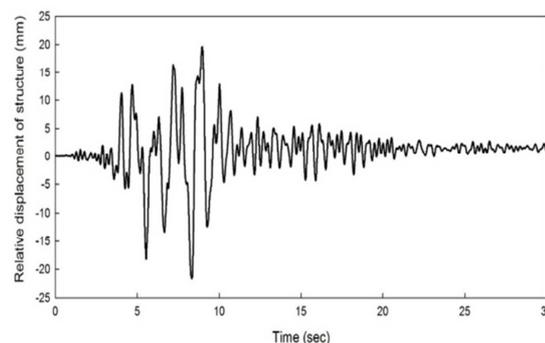
منحنی‌های مدول برشی نرمال شده با مدول برشی حداکثر به کرنش برشی برای خاک رس و ماسه براساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در ادبیات فنی در شکل ۳ نشان داده شده و پارامترهای مدل معرفی شده نیز در این شکل آورده شده است. جهت صحت‌سنجی مدل تهیه شده از نتایج ارائه شده توسط محققان در سال ۲۰۱۹ استفاده شد [۱۸]. جابه‌جایی نسبی بین بالا و پایین ستون وسط، در مطالعه ایشان ۲۰ میلی‌متر تحت زلزله

سطح زمین می‌باشد. این اثرات، به‌خصوص برای سازه‌ای مانند مترو که در عمق کم نسبت به سطح زمین ساخته می‌شود، بیشتر نمایان می‌گردد.



(الف)

می‌شود. چنانکه اشاره شد، یکی از اثرات پدیده تفرق امواج لرزه‌ای ناشی از سازه زیرزمینی، ایجاد بزرگنمایی و در بعضی نقاط کوچکنمایی در قسمت‌های مختلف در



(ب)

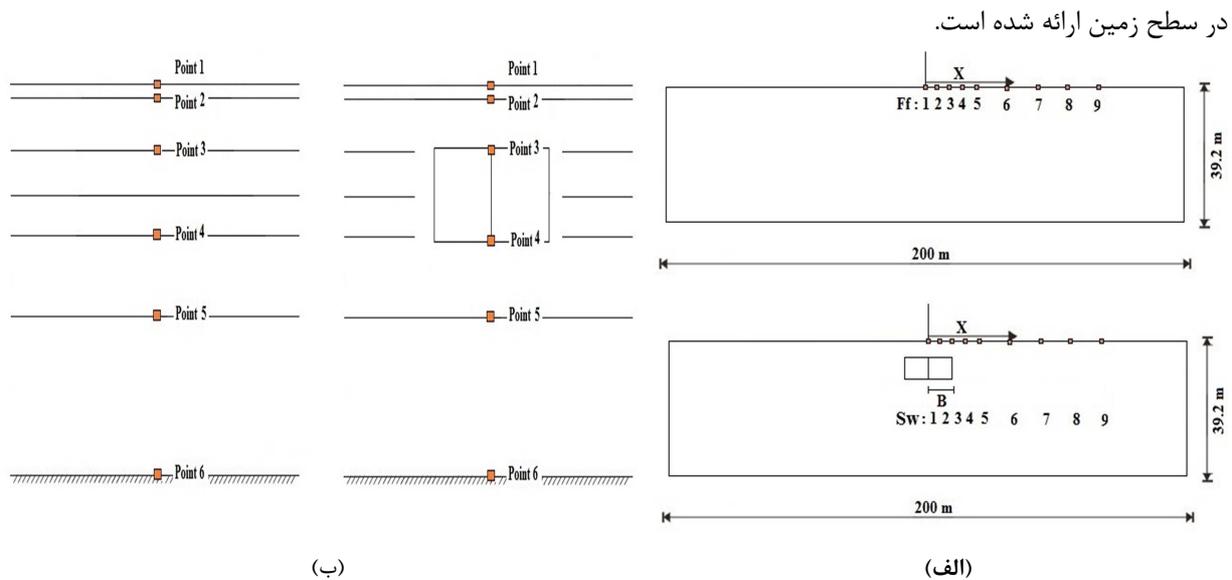
شکل ۴- هندسه سازه ایستگاه و تغییرمکان نسبی سازه در بالا و پایین ستون وسط

(۲۱) استفاده گردید. استفاده از میرایی و طیف تغییرمکان برای محاسبه بزرگنمایی منجر به هموارتر شدن نتایج می‌شود [۲۱].

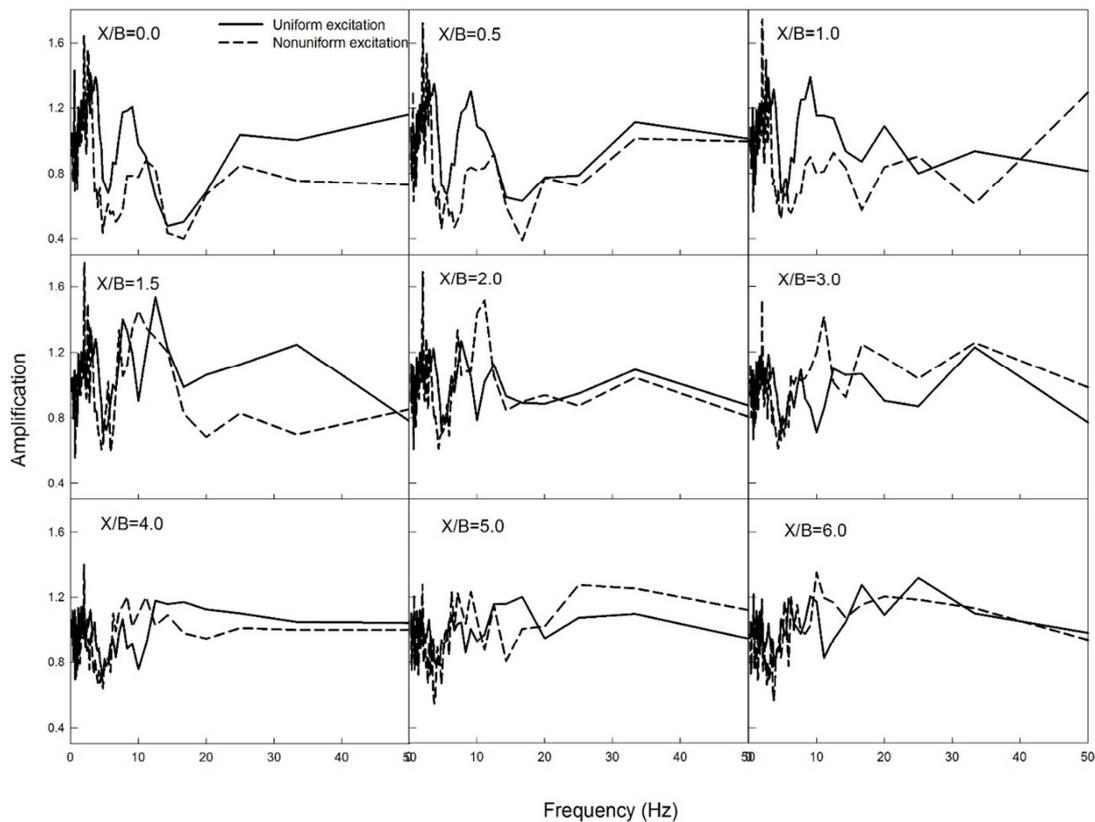
$$Amp_{S,F}(\omega) = \frac{SD_{subway}(\omega)}{SD_{Free\ field}(\omega)} \quad (21)$$

در این رابطه  $Amp$  نشان‌دهنده بزرگنمایی و  $SD$  طیف پاسخ جابه‌جایی نقاط مختلف روی سطح زمین می‌باشد. برای بررسی اثرات سازه روی تفرق امواج لرزه‌ای رسیده به سطح زمین در دو حالت تحلیل‌های غیریکنواخت و یکنواخت، مدل‌های مختلفی بدون وجود سازه و همچنین با حضور سازه تهیه شد. در شکل ۵ مکان قرارگیری نقاط مختلف مورد مطالعه روی سطح زمین و بر روی لایه‌های تشکیل‌دهنده خاک اطراف سازه ارائه شده است. روی سطح زمین ۹ نقطه در فواصل بی‌بعد  $X/B$  برابر صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ در نظر گرفته شده است. در این رابطه  $X$  فاصله روی محور افقی و  $B$  نصف بعد عرض سازه می‌باشد. علاوه بر این، روی لایه‌های تشکیل‌دهنده زمین نیز در دو حالت بدون سازه و با وجود آن، ۶ نقطه مطابق شکل ۵ برای بررسی این پدیده، تعریف شده است. در شکل ۶ بزرگنمایی (نسبت طیف جابه‌جایی) در دو حالت ورودی یکنواخت و غیریکنواخت، روی نقاط مختلف

سازه زیرزمینی که در مسیر امواج قرار می‌گیرد، به‌عنوان مانع در مقابل آنها عمل کرده، امواج را جذب و سپس منعکس می‌کند، که می‌تواند در بعضی نقاط اثرات کاهش و در بعضی نقاط نیز اثرات افزایشی (تشدید) داشته باشد. یکی از اهداف پژوهش انجام شده بررسی اثرات وجود سازه بر تفرق امواج لرزه‌ای تولید شده با استفاده از روش ارتعاش تصادفی می‌باشد. این امواج در دو حالت به محیط برخورد داده می‌شود. ابتدا تمام نقاط در کف مدل تحت شتاب  $ACC1$  که دارای پیک شتاب  $0.34g$  می‌باشد قرار داده می‌شود. سپس کف مدل به فواصل ۴۰ متری تقسیم و تحت شتاب‌های اشاره شده در شکل ۱، به ترتیب  $ACC1$  تا  $ACC5$ ، قرار داده می‌شود. بدین ترتیب اثرات تحلیل‌های یکنواخت و غیریکنواخت لرزه‌ای روی مدل بررسی می‌گردد. برای اینکه بتوانیم بزرگنمایی را در هرکدام از حالت‌ها جداگانه داشته باشیم، تحلیل‌های یکنواخت روی مدل ساخته شده بدون وجود سازه و با وجود سازه با یکدیگر و همچنین برای تحلیل غیریکنواخت نیز مشابه حالت یکنواخت بررسی شد. برای محاسبه تابع بزرگنمایی از نسبت طیف پاسخ تغییرمکان در مدل با وجود سازه به مدل بدون حضور سازه با مقادیر میرایی مناسب (به عنوان مثال ۵ درصد)، براساس رابطه



شکل ۵- نمایش شماتیک از مقطع عرضی ایستگاه دایکای، (الف) نقاط روی سطح زمین و (ب) نقاط روی لایه‌های داخلی

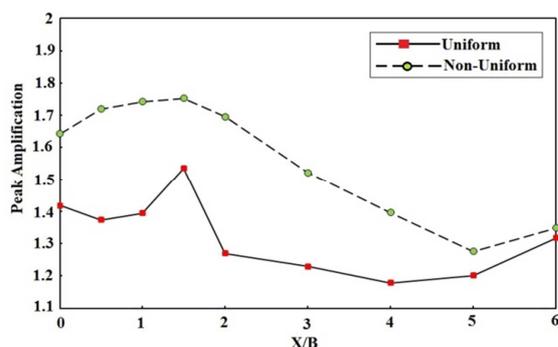


شکل ۶- نسبت طیف جابه‌جایی در نقاط مختلف روی سطح زمین تحت دو ورودی یکنواخت و غیریکنواخت

هرچند در این فاصله نیز به‌خصوص در فرکانس‌های کمتر از ۵ هرتز، تحریک غیریکنواخت، بزرگنمایی بیشتری را موجب شده است. تا محدوده فرکانس ۲۰ هرتز در هر دو ورودی، نمودارها نوسانات بیشتری را نشان می‌دهند. چنانکه قابل مشاهده است، در محدوده فرکانسی کمتر از

چنانکه در شکل ۶ قابل مشاهده است، الگوی بزرگنمایی‌های به‌دست آمده در حالت ورودی یکنواخت و غیریکنواخت تفاوت زیادی به‌خصوص با افزایش فاصله از سازه، نشان نمی‌دهد. نقاط تا فاصله  $X/B$  برابر  $1/5$  نشان‌دهنده تأثیر بیشتر تحریک یکنواخت می‌باشد.

است. قابل مشاهده است که، پاسخ حداکثر در نزدیکی نقاط لبه سازه اتفاق افتاده، که نشان‌دهنده اثرات لبه بر امواج رسیده به متروی دایکای می‌باشد. در مراجع مختلف نیز به این نکته اشاره شده که در نزدیکی لبه سازه اثرات تفرق امواج لرزه‌ای، تشدید می‌شود [۲۲].



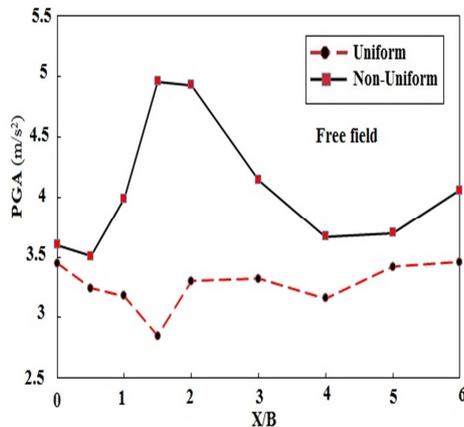
شکل ۷- حداکثر بزرگنمایی در نقاط مختلف روی سطح زمین تحت ورودی‌های یکنواخت و غیریکنواخت

در تحقیق انجام شده توسط سان<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ روی ساختگاه متروی دایکای، حداکثر بزرگنمایی در نزدیکی لبه سازه به مقدار ۱/۴ تحت شتاب واقعی کوبه و به شکل ورودی یکنواخت محاسبه شد [۲۲]. نتایج حاصل شده در پژوهش حاضر، تحت تحریک غیریکنواخت در مقایسه با نتایج سان و همکاران که از شتاب واقعی به صورت یکنواخت روی مدل دوبعدی برای انجام تحقیق خود استفاده کردند، افزایش ۲۵ درصد را نشان می‌دهد. مقایسه حداکثر بزرگنمایی در دو حالت ورودی یکنواخت و غیریکنواخت، نشان‌دهنده اثرات تحریک غیریکنواخت روی تفرق امواج لرزه‌ای رسیده به سطح زمین ناشی از وجود سازه و در نتیجه افزایش حداکثر بزرگنمایی نسبت به حالت یکنواخت شده است. با افزایش فاصله از سازه، بزرگنمایی در هر دو ورودی یکنواخت و غیریکنواخت به هم نزدیک شده‌اند. در شکل ۸ مقادیر شتاب‌های حداکثر در دو حالت یکنواخت و غیریکنواخت، روی مدل با سازه و مدل بدون سازه ارائه شده است. در حالت بدون سازه، در محدوده فاصله بین ۱

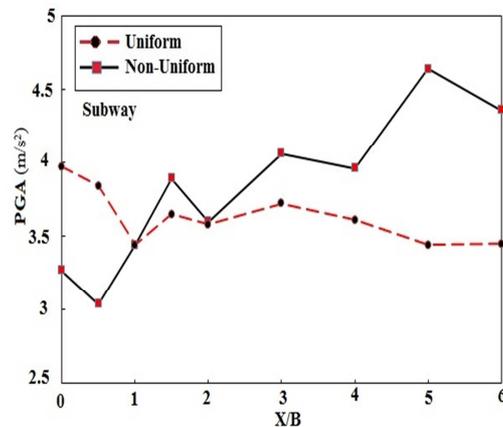
۲۰ هرتز برای هر دو ورودی، کوچکنمایی و بزرگنمایی در سطح زمین، تجربه شده است. مشاهده پدیده بزرگنمایی یا کوچکنمایی در سطح زمین در هر دو ورودی، نشان‌دهنده اثرات کاهندگی و افزایشی سازه بر انتشار امواج می‌باشد. هرچه به نقاط مجاور سازه نزدیک می‌شویم، نوسانات نمودارها بیشتر شده و الگوهای ارائه شده از پیچیدگی بیشتری برخوردار می‌شوند که می‌تواند نشان‌دهنده اثرات لبه بر تفرق امواج باشد. هرچه به انتهای مدل نزدیک می‌شویم و با افزایش فرکانس، الگوی نمودارها هموارتر شده و تحلیل‌های یکنواخت و غیریکنواخت به یکدیگر و همچنین به حالت بدون سازه انطباق بیشتری را نشان می‌دهند. چنانکه در مراجع مختلف توسط محققین مورد اشاره قرار گرفته در صورتی که طول موج ورودی بیشتر از ۶ برابر ابعاد سازه باشد، اثرات بزرگنمایی و تفرق امواج ناشی از سازه زیرزمینی چندان قابل توجه نیست، اما در صورتی که طول موج ورودی و ابعاد سازه به هم نزدیک باشند (به خصوص در خاک‌های نرم که سرعت موج برشی کمتر است)، اثرات تفرق امواج از سازه زیرزمینی قابل توجه خواهد بود [۲۲]. علت شباهت زیاد بین الگوهای بزرگنمایی ارائه شده، در شکل ۶ تحت دو ورودی مختلف، این است که برای ورودی یکنواخت و غیریکنواخت از نسبت طیف تغییرمکان در سطح زمین با وجود سازه، به ترتیب از نسبت ورودی یکنواخت و غیریکنواخت مدل بدون سازه استفاده شد. تفاوت عمده بین پاسخ‌های سطح زمین در این دو نوع تحلیل در نمودارهای حداکثر بزرگنمایی و شتاب‌های ثبت شده روی نقاط مختلف در سطح زمین تحت دو ورودی یکنواخت و غیریکنواخت که در شکل‌های ۷ و ۸ در ادامه ارائه می‌شود، نمایان است. چنانکه در شکل ۷ قابل مشاهده است، بیشترین مقدار بزرگنمایی تحت ورودی غیریکنواخت در نقطه ۱/۵، نزدیک‌ترین نقطه مجاور لبه سازه و به مقدار ۱/۷۵ تجربه شده است. بیشترین درصد افزایش بزرگنمایی نسبت به حالت یکنواخت در نقطه ۲ به میزان ۳۳ درصد مشاهده شده

<sup>۹</sup>- Sun

که تغییرات حداکثر شتابها در حالت بدون سازه در مقایسه با وجود سازه در خاک در ورودی غیریکنواخت بیشتر می‌باشد.



(ب)



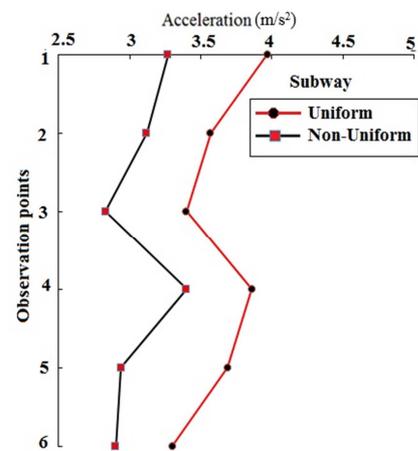
(الف)

شکل ۸- حداکثر شتاب در نقاط مختلف روی سطح زمین تحت ورودی‌های یکنواخت و غیریکنواخت، (الف) مدل با مترو، (ب) مدل بدون مترو

به گونه‌ای که شیب افزایش در تحلیل یکنواخت بیشتر است. در بین نقاط ۲ تا ۶ که زیرزمین می‌باشند، نقطه ۴ در هر دو تحلیل بیشترین شتاب را تجربه کرده است. این رفتار را می‌توان اینگونه توجیه کرد که این نقطه که در تماس با مترو و در زیر آن قرار دارد، به دلیل گیر کردن امواج در زیر سازه، کاهش سرعت امواج در لایه ۵ که موجب کاهش طول موج برخوردی نسبت به ابعاد مترو و همچنین تفرق امواج در آن نقطه موجب بروز این رفتار شده است. همچنین جذب امواج توسط سازه و انعکاس آن به سمت لایه‌های بالا موجب افزایش تدریجی شتاب تا سطح زمین شده است. البته در هر دو حالت در نقطه ۳ کاهش شتاب مشاهده شده است، که می‌تواند به دلیل اثر مانع‌شوندگی سازه در رسیدن امواج به آن نقطه باشد. قابل مشاهده است که نحوه اعمال بار 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. یکی از پارامترهای مورد توجه توسط اکثر محققین

تا ۲ ( $X/B=1-2$ ) که اثرات تغییر مکانی زمین‌لرزه قابل مشاهده است، تحت ورودی غیریکنواخت، نقاط  $X/B$  برابر  $1/5$  و  $2$ ، افزایش ۷۵ درصد و ۴۹ درصد را نشان می‌دهد. مقایسه بین نمودارهای ارائه شده نشان می‌دهد

در ادامه تحلیل‌های انجام شده، شتاب‌های حداکثر ایجاد شده بین لایه‌ها، در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹- مقایسه حداکثر شتاب در نقاط مختلف روی لایه‌های خاک اطراف سازه

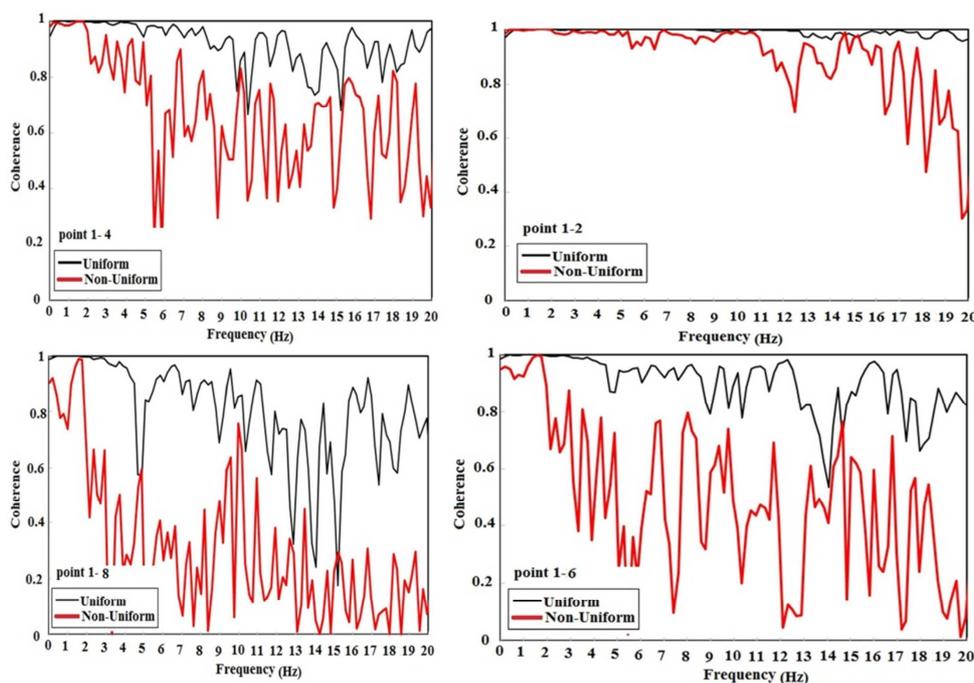
مقایسه بین شتاب‌های حداکثر تحت دو حالت یکنواخت و غیریکنواخت، نشان‌دهنده این است که در ورودی یکنواخت بین لایه‌های زمین شتاب‌های بزرگتری ایجاد شده است. شتاب حداکثر از پایین‌ترین نقطه در کف تا سطح زمین به غیر از نقطه ۳ که در بالا و در تماس با سازه می‌باشد، در هر دو تحلیل افزایش را نشان می‌دهد؛

در این رابطه،  $S_k$  چگالی طیف توان و  $\gamma$  طیف ارتباط بین زوج نقاط می‌باشد.

شکل ۱۰، طیف ارتباط بین نقطه  $(X/B=0)$  به‌عنوان شروع و نقاط ۲  $(X/B=0.5)$ ، ۴  $(X/B=1.5)$ ، ۶  $(X/B=3)$  و ۸  $(X/B=5)$  در فواصل مختلف روی سطح زمین بدون وجود سازه را نشان می‌دهد. چنانکه در این شکل مشاهده می‌شود، از منظر فاصله نقاط از سازه، محدوده فرکانسی مؤثر و اثرات نحوه بارگذاری قابل بحث می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در هر نمودار ارائه شده بین دو نقطه، طیف ارتباط در بارگذاری غیریکنواخت دارای الگوی پیچیده‌تر و همچنین نوسانات و پیک‌های بیشتری می‌باشد. افزایش فرکانس، موجب افزایش نوسانات در طیف ارتباط بین زوج نقاط در هر دو حالت شده، ولی چنانکه اشاره شد این نوسانات در بارگذاری غیریکنواخت افزایش پیدا کرده است. علاوه بر این قابل مشاهده است که با افزایش فاصله نقاط از یکدیگر از میزان طیف ارتباط در هر دو وضعیت کاسته شده و تأثیر افزایش فاصله روی بارگذاری غیریکنواخت بیشتر نمایان می‌باشد.

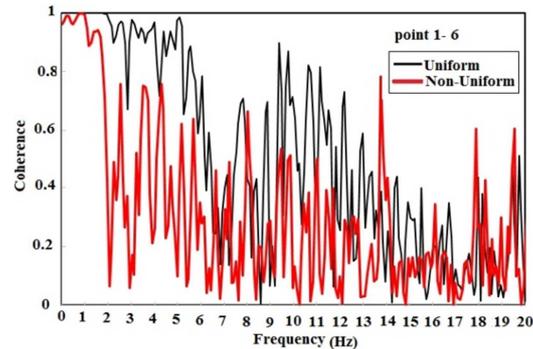
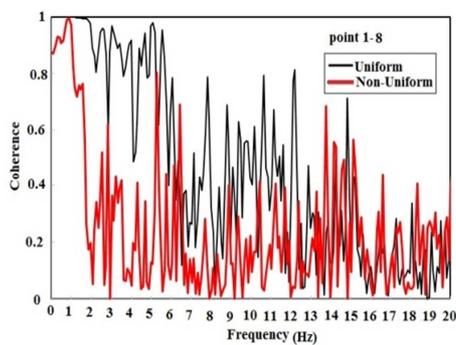
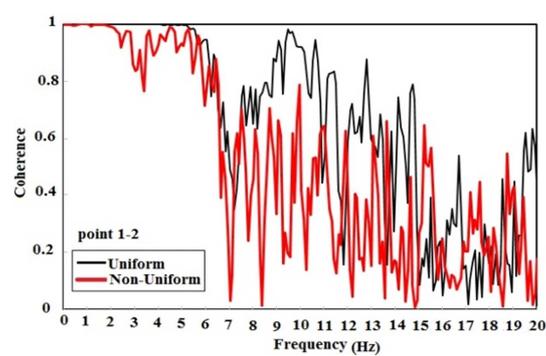
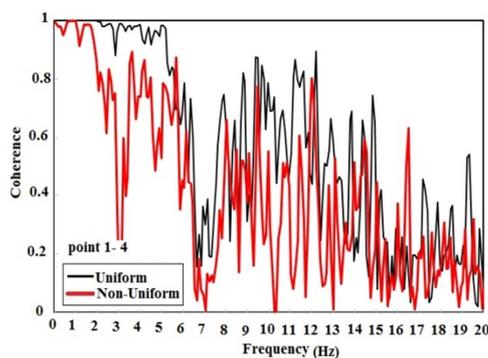
روی شتاب‌های ثبت شده در سطح زمین در طی یک زمین‌لرزه، طیف ارتباط بین شتاب‌نگاشت‌ها می‌باشد. این طیف، کاربردهای متنوعی دارد. جهت تعیین میزان اطمینان به صحت نتایج حاصل از طیف توان مقاطع، از این طیف استفاده می‌شود. آنچه که در حین یک آزمایش ارتعاش محیطی رخ می‌دهد تحریک سازه با فواصل متفاوت می‌باشد که باعث 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 که 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 (۲۲) حاصل می‌شود [۲۱]:

$$\gamma_{jk}(\omega) = \frac{S_{jk}(\omega)}{\sqrt{S_{jj}(\omega)S_{kk}(\omega)}} \quad (22)$$



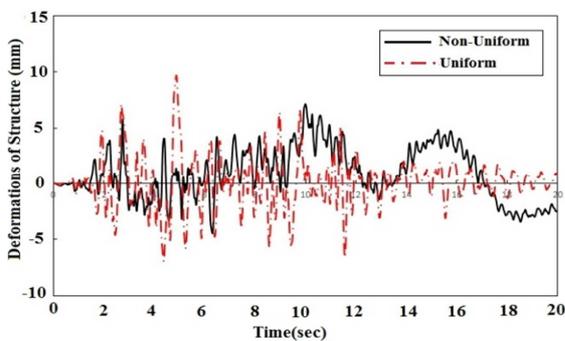
شکل ۱۰- طیف ارتباط بین زوج نقاط مختلف روی سطح زمین بدون وجود مترو دایکای

می‌باشد. 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 نقاط نزدیک به هم منجر به کاهش طیف ارتباط بین شتاب‌نگاشت‌ها شده است. علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که با افزایش فاصله نقاط از یکدیگر از میزان طیف ارتباط در هر دو وضعیت بارگذاری با وجود سازه کاسته شده و این نمودارها در مقایسه با قسمت قبل که مترو وجود نداشت، با هم انطباق بیشتری پیدا کرده‌اند.



شکل ۱۱- طیف ارتباط بین زوج نقاط مختلف روی سطح زمین با حضور ایستگاه متروی دایکای

است.



شکل ۱۲- تغییر مکان نسبی بین بالا و پایین ستون وسط

متروی دایکای

شکل ۱۱ طیف ارتباط بین نقاط اشاره شده در قسمت قبل را نشان می‌دهد. تفاوت تحلیل‌های انجام شده در این بخش و قسمت قبل در وجود سازه متروی دایکای در زمین می‌باشد. اثرات بارگذاری یکنواخت و غیریکنواخت روی تفرق امواج رسیده به سطح زمین، این بار با حضور سازه مترو مورد بررسی قرار می‌گیرد. چنانکه در این شکل قابل مشاهده می‌باشد، نمودارهای ارائه شده بین دو نقطه در این بخش، با وجود سازه دارای الگوی پیچیده‌تر و طیف ارتباط با نوسانات و پیک‌های بیشتری

تحلیل‌هایی که در بخش‌های قبلی این پژوهش ارائه شد، اثرات نحوه بارگذاری روی تفرق امواج لرزه‌ای در اثر سازه و تأثیرات آن روی بزرگنمایی در سطح زمین را نشان می‌دهد. در این بخش، تأثیرات این عامل بر روی تغییر مکان نسبی سازه بین بالا و پایین سازه در شکل ۱۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بارگذاری به صورت غیریکنواخت موجب تغییر الگوی تغییر مکان جانبی سازه در مقایسه با وضعیت یکنواخت شده است. بیشترین مقدار تغییر مکان نسبی سازه در وضعیت بارگذاری یکنواخت به مقدار ۱۰ میلی‌متر اتفاق افتاده

## ۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از روش ارتعاش تصادفی شتاب‌های غیریکنواخت بر مبنای توابع ارتباطی تولید شد. سپس در ادامه، مدل دوبعدی از ساختگاه ایستگاه مترو در ژاپن با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC تهیه گردید. اثرات حضور سازه بر پدیده بزرگنمایی روی سطح زمین در دو وضعیت بارگذاری لرزه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به مواردی از نتایج حاصل شده در این پژوهش اشاره می‌شود:

۱- یکی از نتایج بارز مطالعه حاضر، تأثیر قطعی وجود سازه بر بزرگنمایی ایجاد شده در سطح زمین می‌باشد. حداکثر بزرگنمایی ۱/۷۵ در محل مجاور سازه مشاهده شد. بنابراین توصیه می‌شود در طراحی لرزه‌ای سازه‌های روی سطح زمین به این مسأله توجه شود.

۲- مقایسه حداکثر بزرگنمایی در نقاط مختلف و

همچنین حداکثر شتاب‌ها نشان‌دهنده تأثیر ملموس این پدیده در نزدیکی سازه می‌باشد. با افزایش فاصله از سازه این اثرات کاسته شده است.

۳- مقایسه بین دو وضعیت بارگذاری یکنواخت و

غیریکنواخت اثرات بارگذاری غیریکنواخت را به‌خصوص روی الگوی بزرگنمایی و مقدار حداکثر آن در نقاط نزدیک سازه نمایان ساخت. بنابراین توصیه می‌شود در طراحی لرزه‌ای برای هرچه واقعی‌تر شدن تحلیل‌ها در نظر گرفته شود.

۴- مقایسه طیف ارتباط بین زوج نقاط در فواصل

مختلف نشان می‌دهد که محدوده فرکانسی، فاصله از سازه و همچنین وضعیت بارگذاری در این طیف تأثیرگذار می‌باشد.

## مراجع

- [1] TaghaviGhalesari, A., Isari, M., Tarinejad, R., & Sohrabi-Bidar, A. (2019). "A procedure to predict the precise seismic response of arch dams in time domain using boundary element formulation", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(4), 790-803.
- [2] Tarinejad, R., Isari, M., & Ghalesari, A. T. (2019). "A new boundary element solution to evaluate the geometric effects of the canyon site on the displacement response spectrum", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 18(2), 267-284.
- [3] Tarinejad, R., Isari, M., & Sohrabi-Bidar, A. (2019). "A New Solution to Estimate the Time Delay on the Topographic Site Using Time Domain 3D Boundary Element Method", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, in Press.
- [4] Sohrabi-Bidar, A. (2008). *Seismic behavior assessment of surface topographies using time-domain 3D boundary elements method* (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran).
- [5] Sohrabi-Bidar, A., Isari, M., & Tarinejad, R. (In press-2017). "Evaluation Topography Effect on the Pacoima Dam Site Using Boundary Element Method", *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*.
- [6] Dowding, C. H., & Rozan, A. (1978). "Damage to rock tunnels from earthquake shaking", *ASCE J Geotech Eng Div*, 104(2), 175-191.
- [7] Jing-Ming, W., & Litehiser, J. J. (1985). "The distribution of earthquake damage to underground facilities during the 1976 Tang-Shan earthquake", *Earthquake Spectra*, 1(4), 741-757.
- [8] Sharma, S., & Judd, W. R. (1991). "Underground opening damage from earthquakes", *Engineering geology*, 30(3-4), 263-276.
- [9] Baziar, M. H., Moghadam, M. R., Kim, D. S., & Choo, Y. W. (2014). "Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44, 10-22.
- [10] Baziar, M.H., Ghalandarzadeh, A., & Moghadam, M.R. (2015). "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.

- [11] Alielahi, H., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M. K., & Panji, M. (2013). "Applying a time-domain boundary element method for study of seismic ground response in the vicinity of embedded cylindrical cavity", *International Journal of Civil Engineering*, 11(1), 45-54.
- [12] Alielahi, H., Kamalian, M., & 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.
- [13] Alielahi, H., & 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).
- [14] Alielahi, H., & 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.
- [15] Panji, M., Kamalian, M., Marnani, J.A., & Jafari, M.K. (2013). "Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM", *Geophysical Journal International*, 194, 1849-1865.
- [16] Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., & 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.
- [17] Jiang, L., Chen, J., & Li, J. (2010). "Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis", *Earthquake engineering and engineering vibration*, 9(4), 555-567.
- [18] Xu, Z., Du, X., Xu, C., Hao, H., & Bi, K. (2019). "Numerical research on seismic response characteristics of shallow buried rectangular underground structure", *Soil Dyn Earthq Eng*, 116, 242-252.
- [19] Xu, Z., Du, X., Xu, C., Jiang, J., & Han, R. (2019). "Simplified equivalent static methods for seismic analysis of shallow buried rectangular underground structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, 1-11.
- [20] Bi, K., & Hao, H. (2012). "Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions", *Probabilistic engineering mechanics*, 29, 92-104.
- [21] Tarinejad, R., & Damadipour, M. (2014). "Modal identification of structures by a novel approach based on FDD-wavelet method", *Journal of Sound and Vibration*, 333(3), 1024-1045.
- [22] Sun, Q., Dias, D., Guo, X., & Li, P. (2019). "Numerical study on the effect of a subway station on the surface ground motion", *Computers and Geotechnics*, 111, 243-254.