



Evaluation of the parameters affecting the seismic response of underground cavities considering earthquakes in near and far fault fields

M. Jafarpour¹, M. Mokhtari^{1*}, N. Soltani²

¹ Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, P.O. Box 184, Ardakan, Iran

ABSTRACT: The existence of underground cavities such as aqueducts and water supply pipelines causes changes in the estimated seismic response on the ground. Since the characteristics of an earthquake are different near and far from the seismogenic source and the corresponding regulations have not considered near- and far-field effects on loading, it is necessary to study and compare such effects. This study has used the finite element method and the two-dimensional Plaxis software to investigate seismic responses on the ground while there are underground circular cavities. To this end, a set of near- and far-field accelerograms belonging to Bam, Landers and Loma Prieta were selected. Those recordings were different in terms of frequency. To examine the effect of soil type, four types with different mechanical characteristics were selected, and the seismic responses on the surface of the ground were studied in the presence and absence of an underground cavity. The effect of the buried depth of the cavity was evaluated with regard to two different buried depths ($H/R = 1, 3$). The results showed that the presence of an underground cavity leads to an amplified response of the ground. For instance, the amplification index of the displacement on the ground with and without cavities in the most critical conditions (Landers earthquake) was found to be 4.8 and 6 as recorded in near-field and far-field accelerograms, respectively. Moreover, the farther from the cavity center ($X/R > 4$), the less amplification was clearly observed on the ground under different loadings. The selected parameters also proved to have significant effects on the acceleration and displacement on the surface of the ground. To gain more insight about these effects, further research is needed.

Review History:

Received: Jan. 29, 2022

Revised: Oct. 19, 2022

Accepted: Oct. 23, 2022

Available Online: Nov. 27, 2022

Keywords:

Numerical analysis

Earthquake

Underground cavities

1- Introduction

Considering the structural damages due to the 1994 Northridge Earthquake in Los Angeles, the 1995 Kobe Earthquake in Japan, and the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan, there are obvious differences among the responses of structures against near- and far-field earthquakes. The destructive earthquake in the city of Bam recalled the attention of engineers to the unique features of such earthquakes in our country [1]. Near-fault ground movements have unique characteristics that differ from the ground movements in areas far from a fault. The most prominent studies investigating the aspects of near- and far-field earthquakes were conducted by Hudson and Housner [2], Bolt [3], and Bertero et al. [4]. They used the recorded motions of the Port Hueneme earthquake.

The present study investigates the effects of various factors such as the parameters of near- and far-field earthquakes, the type of soil, and the depth of the cavity on the seismic response of underground cavities. To this end, numerical modeling and the validation of the numerical model are conducted. The results prove the significant impact of underground cavities on the seismic response of the ground.

2- Problem statement and verification

The current study has used the two-dimensional Plaxis finite element software for numerical modeling. This software can dynamically analyze geotechnical issues to model harmonic, earthquake, and explosion loads. The model dimensions were determined based on the results of the study estimated in the validation section. According to Figure 1, H and R indicate the maximum height of an underground cavity from the ground surface and its cavity, respectively. Two depth ratios of $H/R = 1, 3$ have also been used to check the burial depth of the cavity.

To investigate the effect of soil type on the seismic response of the construction, four types of soil with different values of shear wave velocity were selected, and the seismic response of the ground was evaluated in the presence of an underground cavity and free surface. Also, the data of some earthquakes with different frequencies were used as a basis to investigate the impacts of near- and far-field earthquakes.

The study conducted by Soltani [6] and the recorded results of the Gilroy region were used to verify the results of the software and validate the numerical model. To evaluate

*Corresponding author's email: mokhtari@yazd.ac.ir



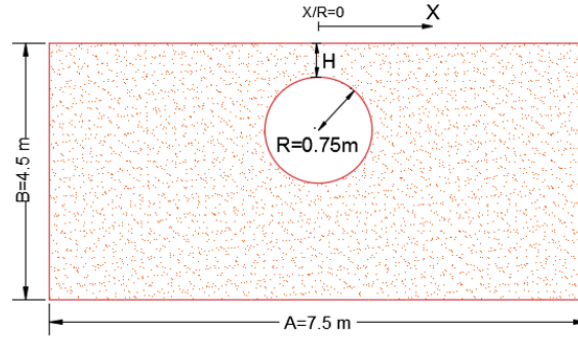


Fig. 1. Schematic view of the geometry and the primary dimensions of the numerical model

Table 1. The maximum rates of ground acceleration in far- and near-field earthquakes at distances of one and three times the cavity radius ($X/R = 1, 3$)

Earthquake	Earthquake field	The maximum ground surface acceleration (m/s^2)	Amplification factors of the maximum ground surface acceleration in the near- and far-field states	
			$X/R=1$	$X/R=3$ / $X/R=1$
Bam	Far-field	-1.24	1.27	1.02
	Near-field	-2.69	-2.71	1.07
Landers	Far-field	0.61	0.63	1.04
	Near-field	2.01	2.26	1.12
Loma Prieta	Far-field	0.95	1.22	1.3
	Near-field	2.63	3.45	1.31

the performance of the numerical model, the Gilroy area with two stations, namely Gilroy 1 (bedrock) and Gilroy 2 (ground surface), and the soil stratification characteristics of the area were simulated. Also, the acceleration time history of Coyote Lake earthquake (recorded in Gilroy 1) was applied as the input wave to the model.

3- Results and discussion

3- 1- Ground surface response in the presence of an underground cavity

A dynamic analysis was performed with various near- and far-field accelerograms of type III soil as a reference soil to compare the ground response in the presence and absence of a cavity.

The results suggested some amplification in the presence compared to the absence of the cavity, and the amplification reduction on the ground surface under different loading types was completely evident as the distance from the cavity center increased. At a distance of approximately four times the cavity radius ($X/R = 4$), the convergence of the ground surface displacement occurred in both cases. This distance, which was previously confirmed by other researchers such as Soltani and Bagheripour [7], is the distance where the effect of the cavity presence is significantly lost, and the response of the ground surface with the presence of the underground cavity is equal to the response of the free surface. It is

noteworthy that the distance is very important in determining the size of the finite element model. On the other hand, the ground surface response was amplified in the presence of an underground cavity in all the investigated cases.

3- 2- Investigating the responses of the near- and far-field ground surfaces

Dynamic analyses were conducted to obtain acceleration time history graphs and acceleration response spectra on the ground surface by applying near- and far-field earthquakes. At this stage of the study, the height of the soil on the cavity was equal to the cavity radius ($H/R = 1$), and the studied area was modeled with type III soil according to the table provided in the full text of the article.

The results also showed that the maximum ground surface acceleration in both near- and far-field earthquakes was larger at a distance three times the cavity radius ($X/R = 3$) compared to the distance equal to the cavity radius ($X/R = 1$). This can clearly be observed in the displacement diagrams. Therefore, the maximum amplification in the ground surface acceleration in both near- and far-field accelerograms would not necessarily occur at distances close to the cavity, but there were significant amplifications at distances far from the cavity. Thus, the response taken on the ground surface was closely correlated to the distance, which is especially important in the design of linear structures. Table 1 shows

the maximum acceleration of the ground surface under the accelerograms.

The study also addressed the seismic responses of the ground in different soil types and at various underground cavity depths.

4- Conclusion

The current study used the finite element method and the Plaxis software to investigate the ground surface seismic responses in the presence of an underground cavity under a set of near- and far-field accelerograms, different soil types, and various burial depths of the underground cavity. The analysis of parametric studies yielded the following results:

As the graphs of horizontal displacement and acceleration clearly showed, there was seismic amplification in the presence rather than absence of underground cavities, leading to ground surface displacements of more than 12 times of that in the conditions without cavities.

Based on the results, the maximum ground surface acceleration in both near- and far-field earthquakes was larger at a distance three times the cavity radius ($X/R = 3$) than at the distance equal to the cavity radius ($X/R = 1$), which is completely evident in the displacement diagrams. The largest ground surface amplification in both near- and far-field accelerograms did not necessarily occur at distances close to the cavity center; there was a significant amplification at far distances, which was completely influenced by the input loading and the geometric characteristics.

The investigations carried out on the burial depth of the cavity indicated that seismic amplification would not necessarily be observed at shallow depths. In other words, larger amplification was expected in the study area by getting closer to the source of the incoming wave, which was associated with the multiple scattering of waves in the environment. However, the amplification would change if the location of the load was changed.

In the study carried out on different soil types, the maximum displacement ratio decreased in both near- and

far-field earthquakes with the increase of soil hardness. On the other hand, as the soil hardness decreased, larger amplification values were achieved. Therefore, amplification not only depends on the cavity size but also on different soil types.

References

- [1] M.R. Ghaem-maghamian, B. Khalili, The effects of faulting parameters and site location on near-fault pulse characteristics, Journal of Faculty of Engineering (University of Tehran 42(4 (114)), (2008) 487-496.(in persian)
- [2] D. E. Hudson, G. W. Housner, An analysis of strong-motion accelerometer data from the San Francisco earthquake of March 22, 1957, Bulletin of the seismological society of America, 48(3) (1958) 253-268.
- [3] B. A. Bolt, The San Fernando Valley, California, earthquake of February 9 1971: Data on seismic hazards, Bulletin of the seismological society of America, 61(2) (1971). 501-510.
- [4] V. V. Bertero, S. A. Mahin, R. A. Herrera, A seismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records, Earthquake engineering & structural dynamics, 6(1) (1978) 31-42.
- [5] G. Abdollahzadeh, H. Faghihmaleki, H. Esmaili, Comparing hysteretic energy and inter-story drift in steel frames with V-shaped brace under near and far fault earthquakes, Alexandria Engineering Journal, 57(1) (2018) 301-308.
- [6] N. Soltani, Seismic response evaluation of strip footing on geogrid-reinforced slope, Innovative Infrastructure Solutions, 6(4) (2021) 1-9.
- [7] N. Soltani, M.H. Bagheripour, Seismic wave scatter study in valleys using coupled 2D finite element approach and absorbing boundaries, Scientia Iranica, 24(1) (2017) 110-120.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Jafarpour, M. Mokhtari, N. Soltani, Evaluation of the parameters affecting the seismic response of underground cavities considering earthquakes in near and far fault fields, Amirkabir J. Civil Eng., 55(1) (2023) 15-18.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21045.7605





ارزیابی پارامترهای تاثیرگذار بر پاسخ لرزه‌ای حفره‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل

مهديه جعفرپور^۱، مریم مختاری^{۱*}، نوید سلطانی^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

کلمات کلیدی:

حفرات زیرزمینی

پاسخ لرزه‌ای زمین

زلزله حوزه نزدیک گسل

زلزله حوزه دور گسل

اجزاء محدود

خلاصه: وجود حفره‌های زیرزمینی نظیر قنات‌ها و لوله‌های خطوط انتقال آب باعث تغییراتی در پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین می‌شود. از آن جا که خصوصیات زلزله برای ساختگاه‌ها در فواصل نزدیک و دور از چشمه لرزه‌زا متفاوت است و در آیین‌نامه‌های مختلف اثرات حوزه نزدیک و دور از گسل در بارگذاری به طور دقیق لحاظ نشده، لذا مطالعه چنین اثراتی ضروری است. در این مطالعه پاسخ لرزه‌ای سطح زمین با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس دو بعدی در اثر وجود حفره‌ی زیرزمینی مدور بررسی شد. بدین منظور، مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک شامل سه زلزله‌ی بم، لندرس و لوماپریتا که از لحاظ محتوای فرکانسی متفاوت می‌باشند، انتخاب و پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در حضور حفره بررسی شد. به منظور ارزیابی تاثیر نوع خاک، چهار نوع خاک با مشخصات مکانیکی متفاوت در نظر گرفته شده و پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در حالت حضور و عدم حضور حفره‌ی زیرزمینی تحت این چهار نوع خاک بررسی گردید. تاثیر عمق مدفون حفره با در نظر گرفتن دو نسبت عمق متفاوت ($H/R=1, 3$) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که وجود حفره‌ی زیرزمینی باعث ایجاد بزرگنمایی در پاسخ زمین خواهد شد به عنوان نمونه ضریب بزرگنمایی جابه‌جایی سطح زمین در حالت حضور به عدم حضور حفره در بحرانی‌ترین حالت (زلزله لندرس) به $4/8$ در حوزه نزدیک و 6 در حوزه دور گسل می‌رسد. همچنین با فاصله گرفتن از مرکز حفره ($4 < X/R$) کاهش بزرگنمایی در سطح زمین تحت انواع بارگذاری کاملاً مشخص است. مطابق با نتایج تحقیق مشاهده می‌شود که پارامترهای مورد بررسی تاثیر قابل توجهی در شتاب و جابه‌جایی در سطح زمین داشته و بنابراین ارزیابی دقیق تر آن‌ها ضروری می‌باشد.

۱- مقدمه

سوی دیگر خرابی‌های ناشی از زلزله‌های اخیر اهمیت تاثیر شرایط توپوگرافی را نمایان کرده است. تفرق امواج مهاجم توسط عوارض توپوگرافی پدیده‌ای پیچیده بوده که حل این مسائل مستلزم استفاده از روش‌های مناسب عددی است.

خسارت‌های سازه‌ها، در اثر زلزله‌های ۱۹۹۴ نورث‌ریج^۱ لس‌آنجلس، ۱۹۹۵ کوبه^۲ ژاپن، ۱۹۹۹ ازمیت^۳ ترکیه، ۱۹۹۹ چیچی^۴ تایوان، اختلاف آشکار بین پاسخ سازه‌ها در برابر زمینلرزه‌های حوزه دور و نزدیک را نشان می‌دهد. در کشور ما نیز پس از وقوع زلزله و خانمان برانداز بم، توجه مهندسين را به ویژگی‌های خاص این زمین‌لرزه معطوف کرد [۱]. جنبش زمین در نزدیک گسل دارای

با توسعه و گسترش روزافزون شهرهای بزرگ در مناطق لرزه‌خیز از جهت جمعیتی، اقتصادی، سیاسی و اجتماعی، آسیب‌پذیری این شهرها در مقابل زمین‌لرزه‌های مخرب رو به افزایش است. صدمات جانی و مالی گسترده‌ای که در اثر وقوع زلزله در این مناطق متوجه ساختار اجتماعی و اقتصادی کشور می‌گردد ضرورت تلاش همه جانبه را برای کاهش این خطر ایجاب می‌کند. با توجه به محدودیت‌های موجود ساخت برخی از تونل‌ها و متروها در مناطق لرزه‌خیز، اهمیت بررسی تاثیر سازه‌های زیرزمینی یا حفره‌های طبیعی را در اثر زلزله بر سطح زمین و سازه‌های واقع بر آن نمایان می‌سازد. به طور کلی سازه‌های زیرزمینی منجر به حذف توده‌ای از خاک یا سنگ محل و بروز تغییرات قابل توجه در وضعیت تنش اطراف آن‌ها می‌شود. از

- 1 Northridge Earthquake
- 2 Kobe Earthquake
- 3 Izmit Earthquake
- 4 Chi Chi Earthquake

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mokhtari@yazd.ac.ir



بر روی انتشار و بزرگنمایی امواج لرزه‌ای در سطح زمین دارند که به این مسئله تأثیرات ساختگاهی گفته می‌شود. ساختگاه ممکن است به گونه‌ای باشد که باعث تشدید امواج ایجاد شده گردد و یا بالعکس، باعث تضعیف امواج گردد. تحلیل پاسخ دینامیکی لایه‌های زمین از اهمیت زیادی در ژئوتکنیک لرزه‌ای برخوردار است. روش‌های مختلفی برای تحلیل پاسخ زمین به وجود آمده‌اند که از آن می‌توان روش‌های خطی معادل، غیرخطی، خطی معادل وابسته به فرکانس و وابسته به زمان نام برد.

لی و تریفوناک [۵] در سال ۱۹۷۹ پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای را، با روش تحلیلی و استفاده از توابع هنکل، برای امواج مهاجم افقی برشی (SH) را در یک محیط همگن و همسان الاستیک در ناحیهی نیم صفحه مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه تأثیر زوایای تابش مختلف امواج، تأثیر فرکانس بدون بعد، و همچنین اثر نسبت سختی دیوارهی تونل به سختی اطراف تونل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد افزایش زاویه تابش موج نسبت به افق، باعث افزایش پیچیدگی حرکت لرزه‌ای سطح زمین می‌گردد. لی و کارل [۶] در سال ۱۹۹۲ پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای و استوانه‌ای شکل برای امواج مهاجم افقی و قائم برشی (SV,SH) در محیط همگن و همسان الاستیک در ناحیه نیم فضا در دو حالت دو بعدی و سه بعدی را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بزرگنمایی‌ها در حدود ۴ تا ۸ برابر نسبت به حالت بدون تونل در حالت $X/R=2/5$ (فاصله مرکز حفره به شعاع حفره می‌باشد. لیانگ و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۴ به بررسی بزرگنمایی حرکت زمین به علت گروه حفره‌های زیرزمینی با استفاده از روش بسط سری بس-فوریه^۲ پرداختند. در این مطالعه گروه حفره‌های زیرزمینی به طور قابل توجهی باعث تشدید حرکت سطح زمین گردید. حداکثر بزرگنمایی جابه‌جایی سطحی برای حفره تکی $2/5$ برابر حالت بدون حفره و حداکثر بزرگنمایی جابه‌جایی سطحی برای حالت دو حفره $2/5$ برابر حالت حفره تکی و ۶ برابر حالت بدون حفره است.

لوکو و دیبارز [۸] با روش محاسبه انتگرال مرزی غیرمستقیم^۳ بر مبنای توابع گرین برای یک نیم فضای ویسکوالاستیک^۴، به بررسی پراکندگی امواج هارمونیک توسط یک حفره‌ی استوانه‌ای

خصوصیات ویژه‌ای است که با حرکات زمین در مناطق دور از گسل متفاوت است. در مناطق نزدیک گسل، حرکات زمین شدیداً تحت تأثیر مکانیزم شکست، جهت گسترش گسلش نسبت به ساختگاه و تغییر مکان ماندگار زمین قرار دارد. زلزله‌های حوزه نزدیک به نقاطی از زمین اطلاق می‌شود که فاصله آن‌ها از مرکز سطحی زلزله کمتر از ۱۵ کیلومتر است. مهم‌ترین خصوصیات متمایز کننده‌ی جنبش‌های حوزه نزدیک، تولید پالس‌هایی به علت اثر جهت‌پذیری و اثر تغییر مکان ماندگار می‌باشد. این نوع پالس‌های حرکت عموماً به صورت یک یا چند پالس مجزا در تاریخچه‌ی زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان دیده می‌شوند. در مجموع مهم‌ترین خصوصیات که جنبش‌های حوزه‌ی نزدیک را از جنبش‌های حوزه‌ی دور متمایز می‌کند عبارت‌اند از: شدت بالاتر؛ تاریخچه زمانی پالس مانند؛ تجمع انرژی در بازه‌ی زمانی کوتاه؛ دامنه بلند در محدوده پریودهای بلند طیف؛ نسبت بزرگ سرعت حداکثر به شتاب حداکثر زمین؛ نسبت بزرگ جابه‌جایی حداکثر به شتاب حداکثر زمین؛ تغییر شکل‌های دائمی بزرگ در زمین. این خصوصیات در نتیجه تأثیر عواملی نظیر جهت‌پذیری پیش‌رونده و تغییر مکان ماندگار زمین ناشی می‌شوند که از پدیده‌های مهم و برجسته در ایجاد نگاشت‌های حوزه نزدیک می‌باشند. همچنین، علاوه بر موارد ذکر شده بسیاری خصوصیات جدید دیگر به علت اثر فرادیواره و اثر مولفه قائم به وجود می‌آید. مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی بررسی خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک و دور را هادسون و هاسنر [۲]، بولت [۳] و برترو و همکاران [۴] با بررسی حرکات ثبت شده زلزله پورت هیونم^۱ انجام دادند. هادسون و هاسنر [۲] دریافتند که زلزله‌های حوزه نزدیک دارای پالس بحرانی انرژی می‌باشند، اگر چه ممکن است این زلزله‌ها دارای بزرگای و یا دامنه‌ی کوچکی باشند، ولی قابلیت تخریبی بالایی دارند. برترو و همکاران از جمله کسانی بودند که متوجه شدند چیزی که باعث اثر تخریبی زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌ها می‌گردد وجود پالس با طول پریود یک تا یک و نیم ثانیه است. این موضوع بعد از زلزله‌های کوبه و نورث‌ریچ که در نزدیکی شهرها اتفاق افتاده و اثرات مخرب آن‌ها مورد توجه قرار گرفت، توسط مهندسين زلزله‌شناسی و عمران در آیین‌نامه‌های طراحی با دقت بیشتری مورد مطالعه قرار گرفت. شرایط ساختگاهی شامل خصوصیات هندسی و رفتاری رسوب، تأثیر مهمی

2 Fourier-Bessel series expansion method

3 Indirect Boundary Integral Method

4 Viscoelastic Half-Space

1 Port Hueneme

توسط بخش بالایی حفره در بیشتر حفره‌های بیضوی می‌تواند دلیل اصلی نتایج ذکر شده باشد، در واقع حفره‌های بیضوی شکل دامنه جابه‌جایی بالاتری را به علت گسترش امواج پایدار بین سطح زمین و بخش بالایی حفره ایجاد می‌کنند. علی‌الهی و آدمپیرا [۱۲] در سال ۲۰۱۶ به بررسی دو بعدی تاثیر حضور حفره‌های زیرزمینی با استفاده از حوزه‌ی زمانی BEM^۴ پرداختند. در این مطالعه حفره‌ها در سه شکل شامل حفره‌های دایره‌ای، مربعی، نعلی شکل در یک آنالیز دو بعدی با فرض کرنش صفحه‌ای تحلیل گردیدند. سه نسبت عمق مختلف برای حفرات در این مطالعه در نظر گرفته شد. در این مطالعه فرکانس بدون بعد تاثیر مهمی بر افزایش جابه‌جایی زمین به علت حفره‌های زیرزمینی دارد. نتایج نشان می‌دهد افزایش پاسخ شتاب در مقادیر بالای فرکانس بدون بعد مهم بوده و در موارد ناچیزی می‌توان تاثیر آن را در نظر نگرفت. تاثیر حفره بر روی پاسخ زمین به تدریج با افزایش عمق مدفون حفره کاهش یافته، به صورتی که بیشترین مقدار جابه‌جایی در کمترین فاصله بین سطح حفره و سطح زمین ($d/a=0.5$) اتفاق می‌افتد. تاثیر لرزه‌های حفره مدفون بر سطح زمین در فاصله دور از حفره ($x/a < 3$) از بین رفته و پاسخ لرزه‌های یکسانی در تمام مقاطع برداشت می‌شود. علی‌الهی و همکارانش [۱۳] در سال ۱۳۹۵ با به کارگیری روش عددی اجزای مرزی دو بعدی در حوزه زمان در یک محیط همگن و همسان، به بررسی پاسخ لرزه‌های و الگوی بزرگنمایی سطح زمین واقع بر تونلهای زیرزمینی دوقلو و منفرد تحت تاثیر امواج مهاجم برشی درون صفحه‌های در فرکانسهای مختلف پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که وجود تونلهای زیرزمینی می‌تواند مولفه‌های افقی و قائم جابه‌جایی سطح زمین را $2/3$ برابر در مقایسه با حالت تونل منفرد و $2/6$ برابر سطح میدان آزاد تحت تاثیر قرار دهد. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در مقاطع مختلف هندسی الگوی بزرگنمایی یکسانی مشاهده می‌شود، در صورتی که تفاوت اصلی در اندازه مقادیر بزرگنمایی لرزه‌ای ایجاد شده توسط آنها است. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پاسخ لرزه‌های سطح زمین برای هر دو مولفه‌ی افقی و قائم در محدوده‌ی پریودهای بلند تا خیلی بلند (طول موج ۲ تا ۸ برابر قطر تونل) به صورت بزرگنمایی و برای پریودهای کوتاه به صورت کوچک‌نمایی ظاهر می‌شود. از نتایج دیگر این تحقیق ایجاد حداکثر

بدون پوشش پرداختند. در این تحقیق حفره در محیط نیم‌فضا در معرض امواج مهاجم P, SV, SH و موج رابلی با زاویه تابش قائم و مایل نسبت به محور حفره قرار گرفت. یوتا میترا و همکاران [۹] به منظور بررسی اثر سازه‌های زیرزمینی بر حرکت لرزه‌های سطح زمین، تحلیل‌های عددی دینامیکی کرنش مسطح را انجام دادند که در آن یک تونل دایره‌ای در یک محیط نیم صفحه ویسکوالاستیک تحت اثر موج هارمونیک SV قرار گرفته است. روش عددی این تحقیق روش تفاضل محدود و استفاده از نرم افزار فلک بوده و در این تحقیق به بررسی اثرات ویژگی‌های خاک، فرکانس تحریک، ابعاد تونل، عمق ساخت تونل و انعطاف پذیری پوشش تونل در مقایسه با خاکهای اطراف تونل بر پاسخ لرزه‌های سطح زمین پرداخته شده است. لیانگ و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۲ به بررسی تاثیر حفره‌های زیرزمینی بر حرکت لرزه‌های زمین پرداختند. در این مطالعه تاثیر فاصله و طیف امواج ورودی با استفاده از روش المان مرزی اجزای محدود در حوزه زمان با استفاده از تبدیل فرکانس مورد مطالعه قرار گرفت. این تحقیق نشان داد که ماکزیمم شتاب زمین و ماکزیمم طیف پاسخ می‌تواند تا $38/8$ و $64/7$ درصد برای مطالعه موردی مترویی تیانجین^۱ در چین که تحت تاثیر امواج تافت^۲ و ال‌سنترو^۳ قرار گرفته‌اند بالا برود. علی‌الهی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۶ به مطالعه تاثیرات لرزه‌های سطح زمین به منظور دستیابی به روابط و جداول برای اصلاح طیف طراحی استاندارد سازه‌های واقع بر حفره‌های زیرزمینی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که حفره‌های زیرزمینی منجر به تشدید در دسته دوره تناوب طولانی و کاهش در دسته دوره تناوب کوتاه می‌شود، و ماکزیمم بزرگنمایی در امواجی با طول موج بزرگ‌تر اتفاق می‌افتد. همچنین تاثیر حفره بر پاسخ لرزه‌های زمین به تدریج با افزایش عمق مدفون حفره از بین رفته می‌رود. از طرفی بیشترین مقادیر بزرگنمایی در نزدیک‌ترین فاصله بین سطح حفره و سطح زمین به علت امواج پراکنده به دام افتاده و اندرکنش‌های بین بخش بالایی حفره و سطح زمین اتفاق می‌افتد. تغییر شعاع حفره از یک دایره به شکل بیضوی تاثیر زیادی بر پاسخ لرزه‌های زمین داشته که به عنوان نتیجه حفره‌هایی با شعاع کمتر (حفره‌های بیضوی) الگوی بزرگنمایی بیشتری در مقایسه با حفره‌های دایره‌ای دارند. فضای محصور شده

- 1 Tianjin
- 2 Taft
- 3 El Centro

4 Boundary Element Method

بارهای هارمونیک، بار زلزله و انفجار و همچنین تحلیل مدل‌های کرنش صفحه‌ای، تنش صفحه‌ای و تقارن محوری می‌باشد. همچنین باید توجه داشت پلکسیس جزء محدود نرم‌افزارهای تجاری می‌باشد که علی‌رغم داشتن قابلیت‌های مناسب برای مدل‌سازی مسائل ژئوتکنیکی، قادر است با اعمال شرایط مرزی خاص در شبیه‌سازی محیط‌های بینهایت و نیمه بی‌نهایت خاکی و سنگی، از انعکاس و برگشت امواج به داخل مدل و در نتیجه تحریف نتایج، جلوگیری کند. ابعاد مدل بر اساس نتایج مطالعه‌ای که در بخش صحت‌سنجی استفاده شد انتخاب گردیده است. شکل ۱-الف نمونه‌ای از مش‌بندی مدل مورد بررسی را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۲، H ارتفاع تاج حفره از سطح زمین و R شعاع حفره زیرزمینی بوده و دو نسبت عمق $H/R = 1.3$ به منظور بررسی عمق مدفون حفره استفاده گردیده است. در مدل‌سازی مطالعه حاضر از مدل کرنش مسطح برای حل مسئله استفاده گردیده است و المان‌ها به صورت مثلثی ۱۵ گرهی انتخاب شده‌اند. لیسمر و کولیمر [۱۵] پیشنهاد داده‌اند که اندازه زون‌های موجود در محیط پیوسته به منظور انتشار صحیح موج در مدل مورد مطالعه کوچک‌تر از مقادیر حاصله در رابطه (۱) شود، در این رابطه λ طول موج معادل بیشترین فرکانس در محیط و ΔL برابر اندازه بزرگ‌ترین المان می‌باشد.

$$\Delta L \leq \lambda/10 \quad (1)$$

مش‌بندی مورد استفاده در مدل مورد مطالعه به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که شرایط توصیه شده توسط لیسمر و کولیمر [۱۵] اقلان گردد.

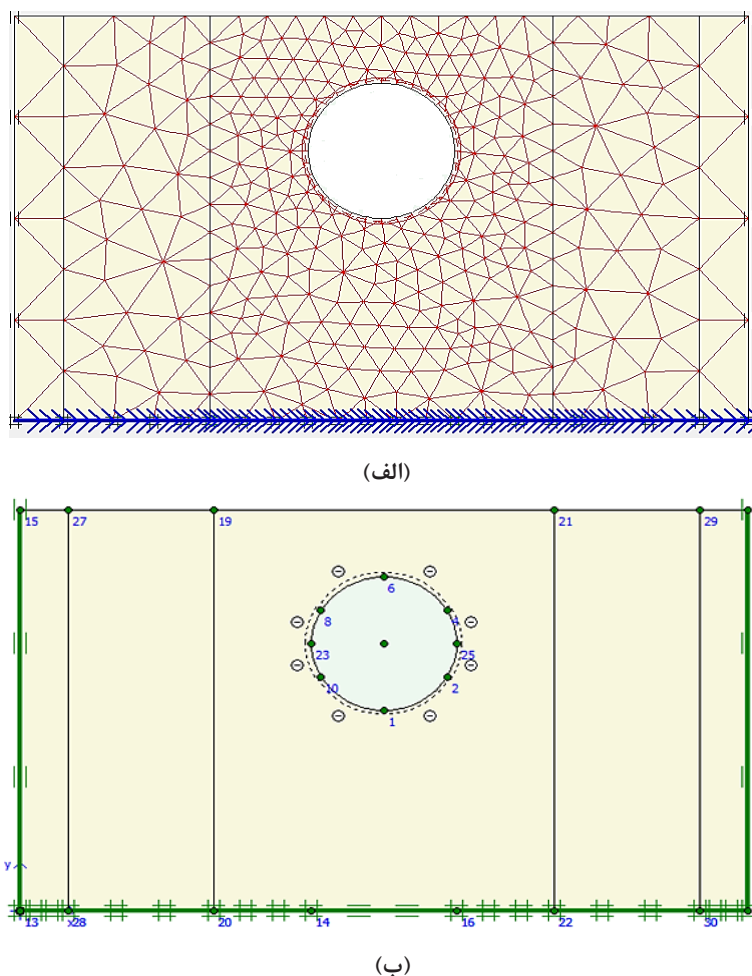
در محاسبات دینامیک، مرزها در اصل باید دورتر از آنالیز استاتیک باشند. چون در غیر این صورت موج‌های تنش بازتاب خواهد شد و در نتایج محاسبه شده تحریف خواهد شد. با این وجود، قرارگیری مرزها در فاصله دور به المان‌های اضافی زیاد و نیز به زمان محاسباتی و حافظه بیشتر نیاز دارد. از طرفی در روش‌های عددی، محیط محدودی از فضای اطراف خاک مدل‌سازی می‌گردد و انعکاس امواج منتشر شده به داخل مدل، باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌شود. برای جلوگیری از این خطاها می‌توان از مدلی با ابعاد بزرگ استفاده

مقادیر جابه‌جایی سطح زمین برای تونلهای کم عمقتر ($DR > 1/5$) می‌باشد. تاثیر لرزه‌های متقابل حفره‌های دو قلوئی نزدیک به هم در مقایسه با حفره‌های منفرد، بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین را افزایش می‌دهد که به دلیل ناحیه حبس موج بزرگ‌تر در بالای حفره‌های مجاور هم نسبت به حفره‌های منفرد است. در تحقیقی دیگر از یک مورد واقعی از سلطانی و همکارش [۱۴] آنالیز لرزه‌ای زمین با استفاده از یک برنامه دو بعدی در محیط متلب مطالعه گردیده است. نمودارهای تابع انتقال پیشنهادی تشدید و میرایی حرکت ورودی زمین را حین عبور از لایه‌های خاک نشان می‌دهند که نتایج روش پیشنهادی صحت و کارایی آن را برای ارزیابی حرکت زمین در هنگام زمین‌لرزه با استفاده از مدل دو بعدی تایید می‌کند.

پژوهش حاضر به دنبال ارزیابی پارامترهای تاثیرگذار بر پاسخ لرزه‌های حفره‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل می‌باشد. در این مطالعه ابتدا، مدل‌سازی عددی صورت گرفته و پس از اعتبارسنجی مدل عددی با نتایج ثبت شده منطقه گیلروی و تحقیقات انجام شده پیشین، تاثیر عوامل مختلف از جمله پارامترهای زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل، نوع خاک و عمق مدفون حفره بر پاسخ لرزه‌های حفره‌های زیرزمینی مورد مطالعه قرار گرفته است. قابل ذکر اینکه در مطالعه حاضر مدل‌سازی به صورت دو بعدی صورت گرفته است، بنابراین تغییرات امواج حین عبور از لایه خاک قابل ارزیابی می‌باشد. همچنین در مدل‌های بررسی شده پیشین تونل‌هایی همراه با تجهیزات سازه‌ای (عموما غلاف‌های بتنی) در نظر گرفته شده‌اند که در واقع این تجهیزات سازه‌ای بر روی پاسخ زمین تاثیرگذار می‌باشند. از آنجایی که در کشور ما حفره‌های زیر سطحی بدون المان سازه‌ای خاص (مانند قنات‌ها) بسیار زیاد هستند، در مدل حاضر سعی بر آن شده است که تاثیرات این قبیل حفره‌های زیرسطحی به همراه یک مدل دو بعدی و زلزله‌های واقعی بررسی گردد. نتایج حاصل از تحقیق، تاثیر قابل توجه این گونه المان‌ها بر پاسخ لرزه‌ای زمین را نشان می‌دهد.

۲- مدل‌سازی عددی و راستی‌آزمایی نتایج

در مطالعه حاضر جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار اجزا محدود پلکسیس دو بعدی استفاده شده است. از قابلیت‌های شایان این نرم‌افزار توانایی تحلیل دینامیکی مسائل ژئوتکنیکی جهت مدل‌سازی



شکل ۱. (الف) مش‌بندی مدل عددی (ب) مدل با مرزهای جاذب اختصاص یافته

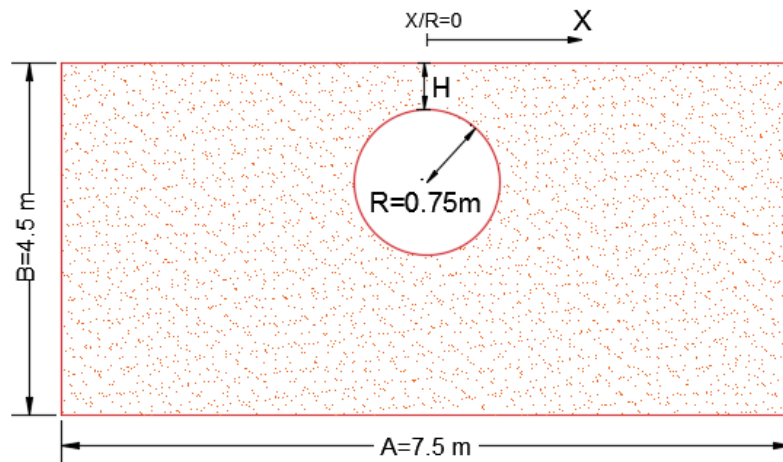
Fig. 1. (a) Meshing of the numerical model, (b) Model with assigned absorbing boundaries

$$\sigma_n = -C_1 \rho V_p \dot{u} \quad (2)$$

$$\tau = -C_2 \rho V_s \dot{u} \quad (3)$$

مدل رفتاری اعمال شده به مصالح در این مطالعه مدل رفتاری مور-کلمب در نظر گرفته شده است. در این مطالعه به منظور بررسی اثر نوع خاک در پاسخ لرزه‌ای ساختگاه، چهار تیپ خاک با مقادیر متفاوت سرعت موج برشی مطابق با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ در نظر گرفته شده و پاسخ لرزه‌ای زمین در شرایط وجود حفره زیرزمینی و نیز سطح آزاد مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین به

کرد تا امواج برگشتی در فاصله کافی فرصت میرا شدن پیدا کنند. البته محدودیت‌های مدل‌سازی و تعداد تحلیل‌های بالا، استفاده از ابعاد بزرگ برای مدل دینامیکی را دچار مشکل می‌نماید. راه‌حل دیگر استفاده از مرزهای جاذب که منجر به جذب امواج منعکس شده می‌گردد. روش‌های مختلفی برای ایجاد چنین مرزهایی وجود دارد که هر یک از این روش‌ها معایب و مزایایی دارند. در نرم‌افزار پلکسیس در مرزهای جاذب با آخرین روش ایجاد می‌گردد. در پلکسیس در برگزیدن مرزهای جاذب، میراگر به جای به کار بردن گیرداری‌ها در جهت معین استفاده می‌شود. اساس مولفه‌های تنش برشی و عمودی جذب شده به وسیله میراگر در نرم‌افزار پلکسیس بر پایه روابط زیر می‌باشد که منجر به جذب امواج منعکس شده می‌گردد.



شکل ۲. شماتیک هندسه و ابعاد اولیه مدل عددی

Fig. 2. Schematic display of the geometry and initial dimensions of the numerical model

جدول ۱. انواع خاک در نظر گرفته شده در این تحقیق [۱۶]

Table 1. Soil types investigated in this research [16]

ضریب پواسون ν	وزن مخصوص خاک $\gamma(kN/m^3)$	زاویه اصطکاک داخلی ϕ	چسبندگی خاک $C(kPa)$	مدول الاستیک $E(kPa)$	سرعت موج برشی $V_s(m/s)$	نوع خاک
۰/۳۳	۱۸	۳۲	۵	۱۷۰۰۰۰۰	۶۰۰	I
۰/۳۳	۱۸	۳۲	۵	۱۰۰۰۰۰۰	۴۵۰	II
۰/۳۳	۱۶	۲۸	۵	۴۰۰۰۰۰	۳۰۰	III
۰/۳۳	۱۵	۲۸	۵	۱۰۰۰۰۰	۱۵۰	IV

جدول ۲. مشخصات زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در این تحقیق [۱۷]

Table 2. Characteristics of far- and near-field earthquakes in this research [17]

مشخصات زلزله‌های حوزه دور گسل

Characteristics of far-field earthquakes

ایستگاه	مولفه	شتاب حداکثر (g)	سرعت حداکثر (cm/s)	جابه‌جایی حداکثر (cm)	فاصله افقی گسل (km)	بزرگای زلزله	زلزله
Puerta La Cruz	PLC000	۰/۰۴۶	۱/۹۸۹	۰/۴۰۹	۹۴/۴۸	۷/۲۸	لندرس
Diamond Heights	DMH000	۰/۰۹۸	۱۰/۰۵۴	۲/۵۶۵	۷۱/۲۳	۶/۶۹	لوماپ ریتا
Abaragh	ABAR-L	۰/۱۶۸	۴/۲۴	۲۲/۲۸	۴۷/۱۶	۶/۶۰	بم

مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک گسل

Characteristics of near-field earthquakes

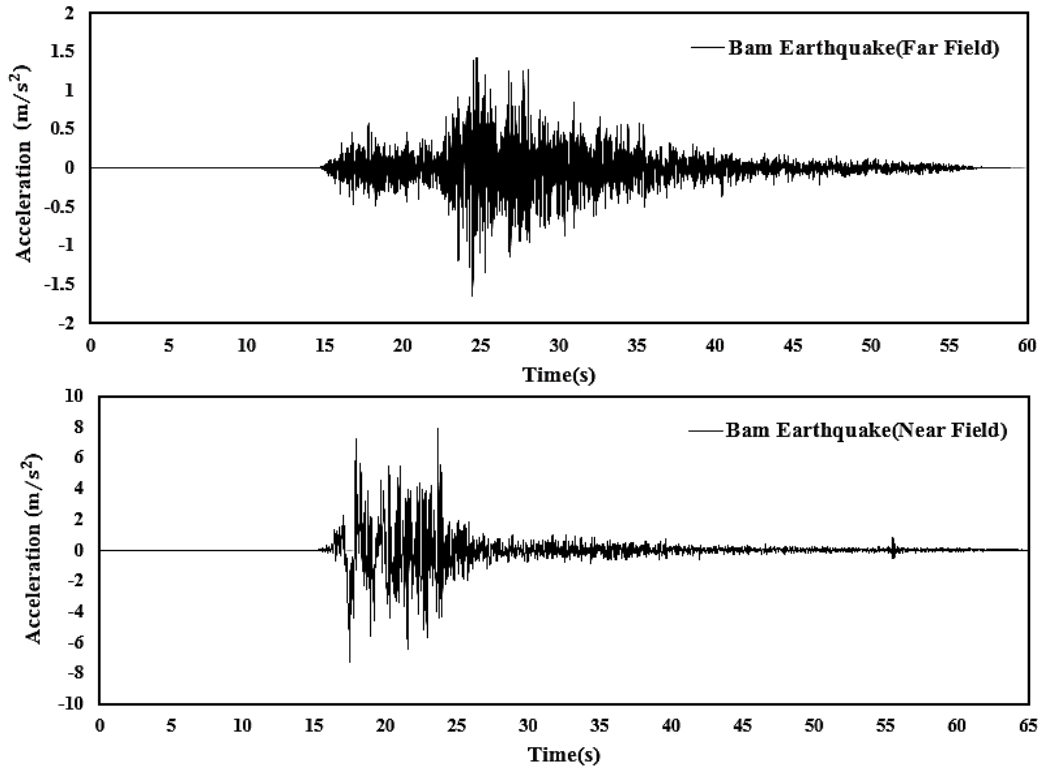
ایستگاه	مولفه	شتاب حداکثر (g)	سرعت حداکثر (cm/s)	جابه‌جایی حداکثر (cm)	فاصله افقی گسل (km)	بزرگای زلزله	زلزله
Morongo Valley Fire	MVH045	۰/۲۲۳	۲۹/۹۴۴	۵/۰۱	۱۷/۳۶	۷/۲۸	لندرس
Bran	BRN000	۰/۴۵۶	۵۱/۳۹	۸/۱۱۷	۳/۸۵	۶/۶۹	لوماپ ریتا
Bam	BAM-L	۰/۸۰۸	۱۲۳/۹۶	۳۴/۷۵	۰/۰۵	۶/۶۰	بم

شبیه‌سازی گردید. همچنین تاریخچه زمانی شتاب زلزله کایوت لیک^۱ (که در منطقه گیلروی ۱ ثبت شده است) به عنون موج ورودی به مدل اعمال گردید. تاریخچه زمانی شتاب و طیف فوریه زلزله‌ی کایوت لیک در گیلروی ۱ (سنگ بستر) در شکل ۶ نشان داده شده است، این مشخصات در جدول ۴ خلاصه شده است. مطالعه سلطانی [۱۸] که یک مطالعه عددی به روش المان محدود بوده و به صورت دو بعدی و با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس انجام شده است. در مدل مطالعه سلطانی مشخصات خاک منطقه گیلروی به صورت لایه‌بندی مدل شده و اثر تداخل امواج در خاک نیز به خوبی نشان داده شده است همچنین مرزهای جاذب زلزله نیز مدل‌سازی شده و بار ورودی زلزله نیز به صورت زلزله واقعی کایوت لیک در نظر گرفته شده است. مدل حاضر با نتایج مطالعه سلطانی [۱۸] به دلیل شباهت‌های ذکر شده نیز مقایسه گردیده است. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه و

منظور بررسی تاثیر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل، زلزله‌هایی با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ و محتوای فرکانسی متفاوت در نظر گرفته شده است، در مدل‌های مورد بررسی کف مدل‌ها به عنون مرز و سنگ بستر در نظر گرفته شده است و هر کدام از شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک زلزله‌های انتخاب شده به صورت جداگانه به کف مدل اعمال گردیده و تغییرات جابه‌جایی و پاسخ شتاب در فواصل مختلفی از مرکز حفره مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در شکل‌های ۳ تا ۵ تاریخچه زمانی زلزله‌های ذکر شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

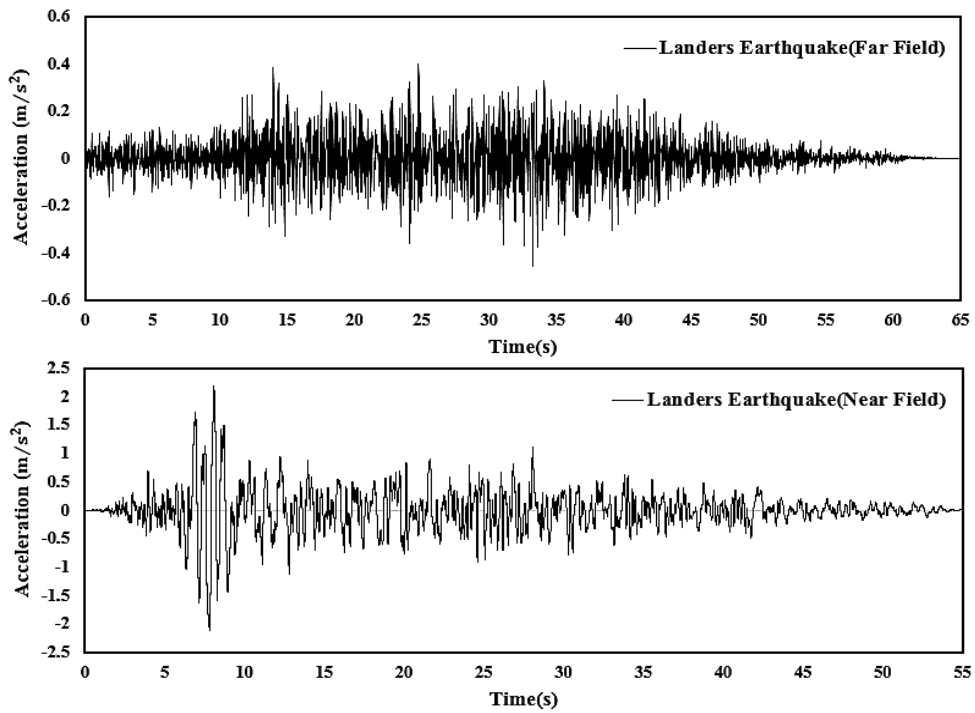
به منظور راستی‌آزمایی نتایج نرم‌افزار، جهت اعتبارسنجی مدل عددی از مطالعه سلطانی [۱۸] و نتایج تجربی ثبت شده منطقه گیلروی استفاده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد مدل عددی، منطقه گیلروی با دو ایستگاه گیلروی ۱ (سنگ بستر) و گیلروی ۲ (سطح زمین) و مشخصات لایه‌بندی منطقه مطابق جدول ۳

1 Coyote Lake



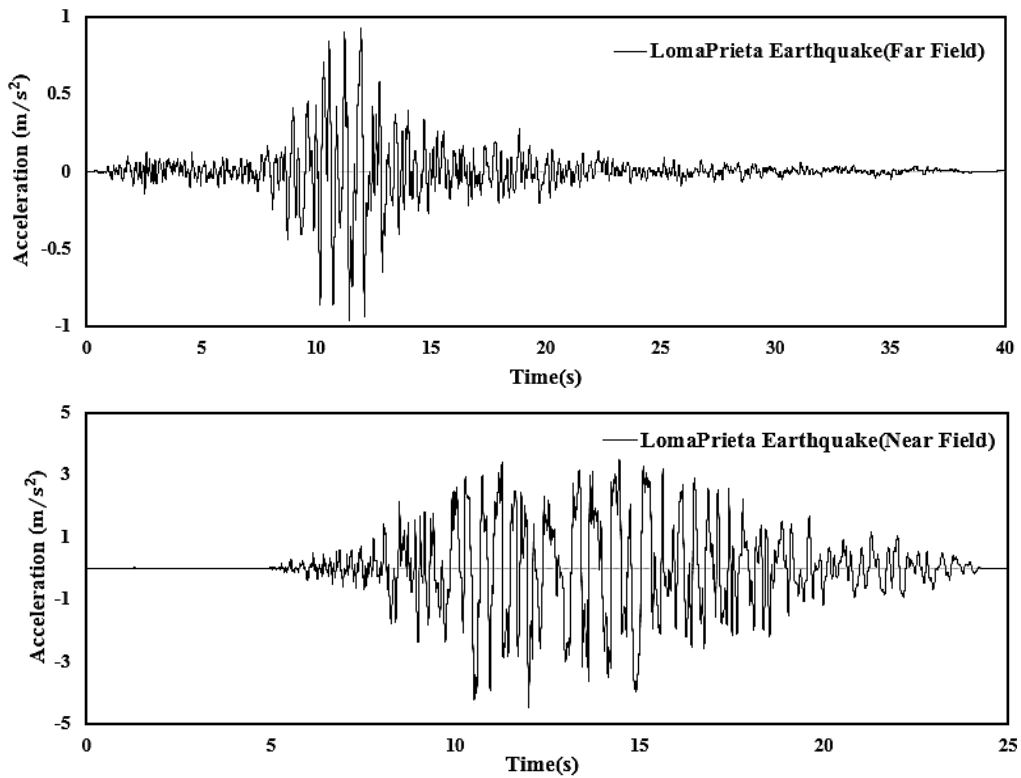
شکل ۳. تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌های حوزه نزدیک و دور بم

Fig. 3. Acceleration time history of the near- and far-field earthquake in Bam



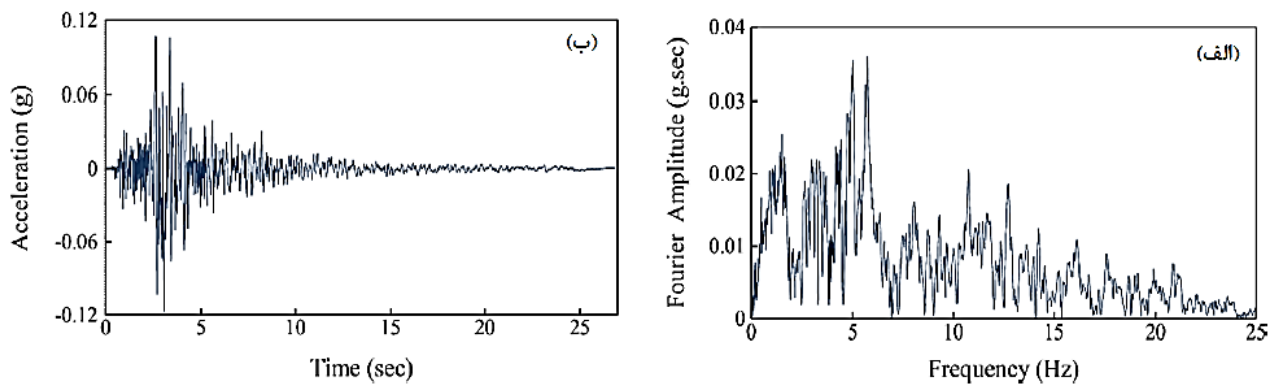
شکل ۴. تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌های حوزه نزدیک و دور لندرس

Fig. 4. Acceleration time history of the near- and far-field earthquake in Landers



شکل ۵. تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌های حوزه نزدیک و دور لوماپریتا

Fig. 5. Acceleration time history of the near- and far-field earthquake in Loma Prieta



شکل ۶. (الف) طیف فوریه (ب) تاریخچه‌ی زمانی شتاب زلزله‌ی کایوت لیک، برداشت شده بر روی سنگ بستر [۱۸]

Fig. 6. (a) Fourier spectrum and (b) acceleration time history of Coyote Lake earthquake taken on bedrock [18]

جدول ۳. مشخصات لایه‌های خاک منطقه گیلروی [۱۸]

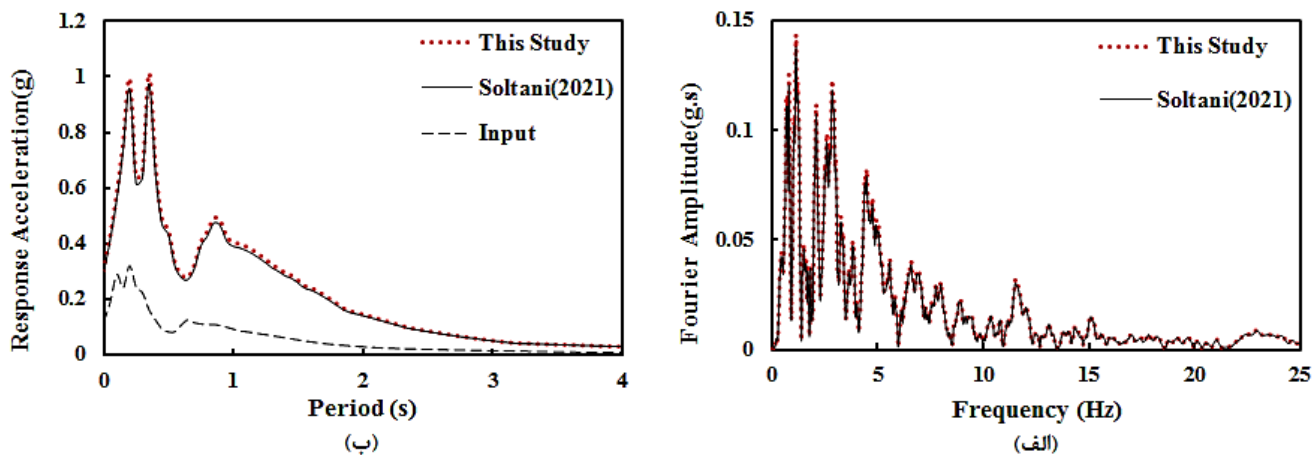
Table 3. Characteristics of the soil layers in Gilroy region [18]

شماره لایه	ضخامت خاک (m)	نوع خاک	سرعت موج برشی m/s^2	وزن مخصوص خاک kN/m^3
۱	۳	ماسه	۱۸۴	۱۸/۹
۲	۵/۱	ماسه	۲۶۹	۱۸/۹
۳	۳/۱	شن	۳۴۱	۱۸/۹
۴	۳/۸	ماسه	۳۴۱	۱۸/۹
۵	۴/۵	رس	۴۳۰	۱۸/۹
۶	۲/۳	شن	۴۳۰	۱۸/۹
۷	۱۲/۹	رس	۲۷۰	۱۸/۹
۸	۳/۳	ماسه	۳۳۴	۲۰/۹
۹	۲	ماسه	۵۰۴	۲۰/۹
۱۰	۱۲	شن	۵۰۴	۲۰/۹
۱۱	۳	شن	۷۱۷	۲۰/۹
۱۲	۵/۸	ماسه	۷۱۷	۲۰/۹
۱۳	۲/۲	رس	۷۱۷	۲۰/۹
۱۴	۱۱	شن	۷۱۷	۲۰/۹
۱۵	۴/۲	شن	۵۲۷	۲۰/۹
۱۶	۱۶/۶	رس	۵۲۷	۲۰/۹
۱۷	۴/۲	شن	۵۲۷	۲۰/۹
۱۸	۲۶	شن	۷۰۴	۲۰/۹
۱۹	سنگ بستر	-	۱۱۹۰	۲۲/۶۰

جدول ۴. مشخصات زلزله‌ی کایوت لیک [۱۸]

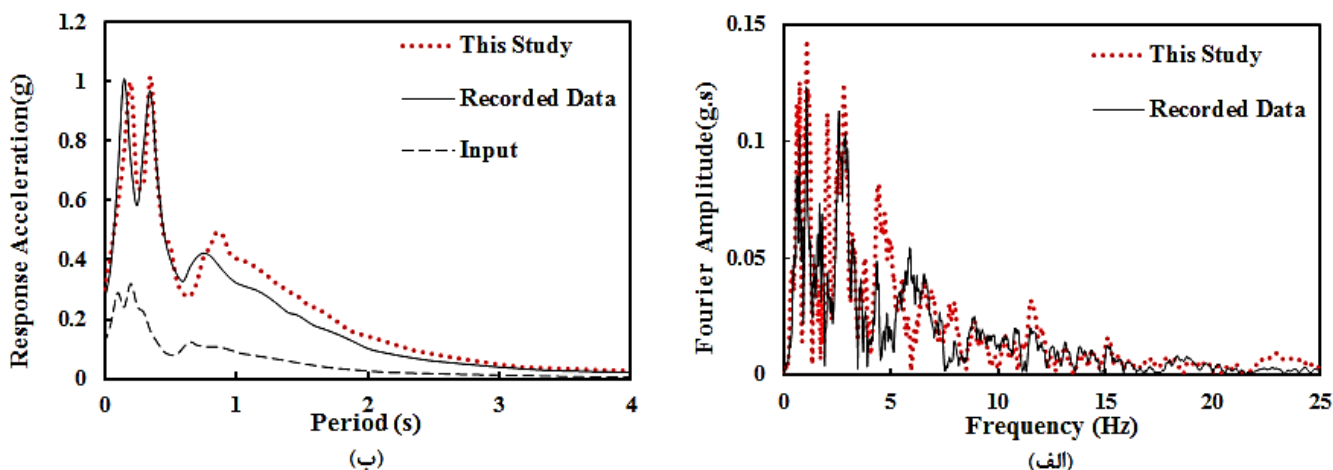
Table 4. Characteristics of Coyote Lake earthquake

زلزله	سال وقوع	شتاب حداکثر (g)	بزرگای زلزله	ایستگاه زلزله
کایوت لیک	۱۹۷۹	۰/۱۱۶	۷/۵۰	گیلروی ۱



شکل ۷. مقایسه (الف) طیف دامنه فوری و (ب) طیف پاسخ در سطح زمین در مطالعه حاضر و نتایج به دست آمده در تحقیقات سلطانی [۱۸]

Fig. 7. Comparison of (a) the Fourier amplitude spectrum and (b) the response spectrum on the ground surface in the present study and the results obtained in Soltani's research [18]

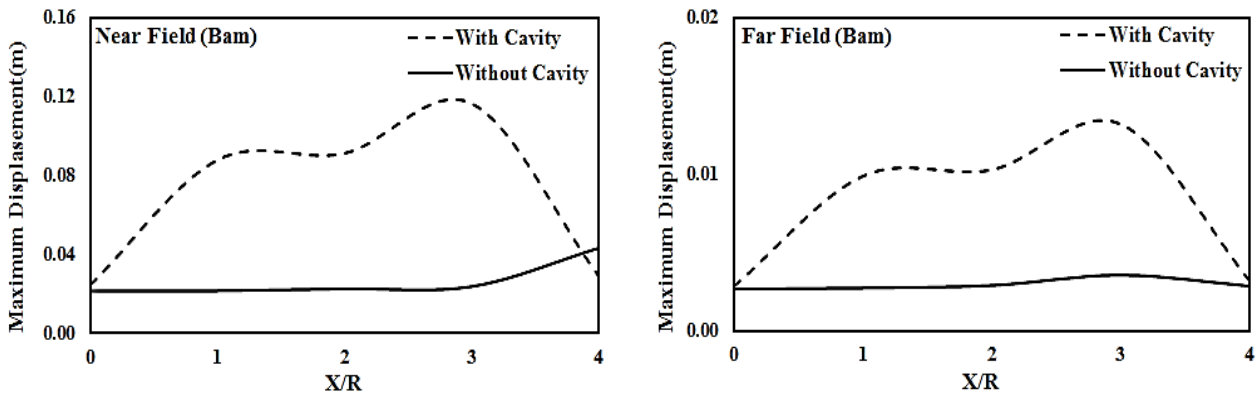


شکل ۸. مقایسه (الف) طیف دامنه فوری و (ب) طیف پاسخ در سطح زمین، در مطالعه حاضر و نتایج ثبت شده منطقه گیلروی حاصل از زلزله ورودی در سنگ بستر

Fig. 8. Comparison of (a) the Fourier amplitude spectrum and (b) the response spectrum on the ground surface in the present study and the results recorded for the Gilroy area resulting from the incoming earthquake in the bedrock

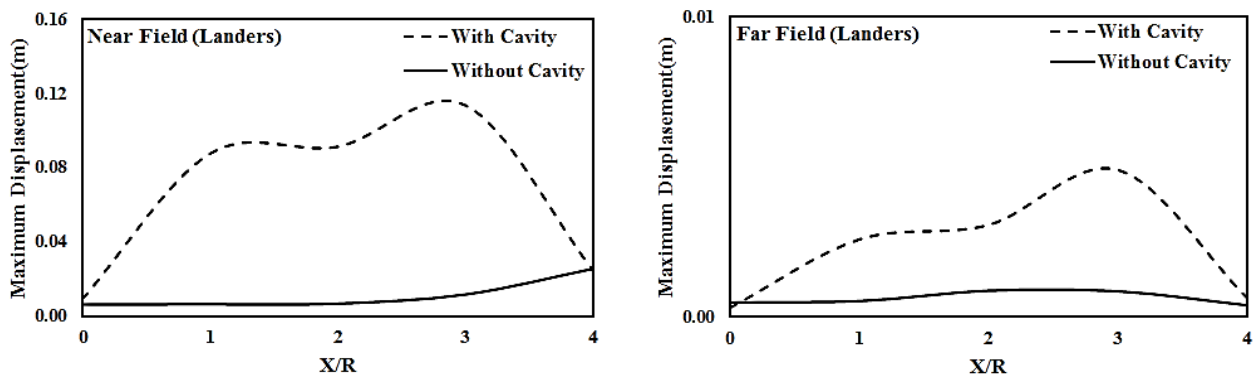
مقایسه واقع‌بینانه‌تر نتایج، طیف پاسخ شتاب (پارامترهای طیفی) در نظر گرفته شده که نتایج آن نشان دهنده انطباق مناسب نمودارهای حاصل از مدل حاضر و نیز داده‌های واقعی ثبت شده در سطح زمین می‌باشد (شکل ۸-ب). همچنین حد بالای شتاب طیفی در پرپود متناظر مدل مورد مطالعه با حد بالای شتاب طیفی در پرپود متناظر مطالعات مورد مقایسه هم‌خوانی داشته و دارای رفتار یکسانی می‌باشد.

تحقیقات سلطانی [۱۸] نشان دهنده تطابق مناسب مدل حاضر با نتایج به دست آمده از مطالعات تایید شده پیشین می‌باشد، نتایج این مقایسه در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده همچنین با نتایج برداشت شده در ایستگاه گیلروی ۲ جهت ارزیابی بهتر مقایسه و در شکل ۸ ارائه شده است. بررسی روند تغییرات دامنه فوری در فرکانس‌های مختلف در نمودارهای طیف دامنه فوری (شکل ۸-الف) عملکرد مناسب مدل حاضر را نشان می‌دهد. به منظور



شکل ۹. جابه‌جایی افقی حداکثر در سطح زمین در حالت حضور و عدم حضور حفره زیرزمینی در معرض زلزله حوزه نزدیک و دور زلزله بم

Fig. 9. Maximum horizontal displacement on the ground surface in the presence and absence of an underground cavity in the near- and far-field earthquake in Bam



شکل ۱۰. جابه‌جایی افقی حداکثر در سطح زمین در حالت حضور و عدم حضور حفره زیرزمینی در معرض زلزله حوزه نزدیک و دور زلزله لندرس

Fig. 10. Maximum horizontal displacement on the ground surface in the presence and absence of an underground cavity in the near- and far-field earthquake in Landers

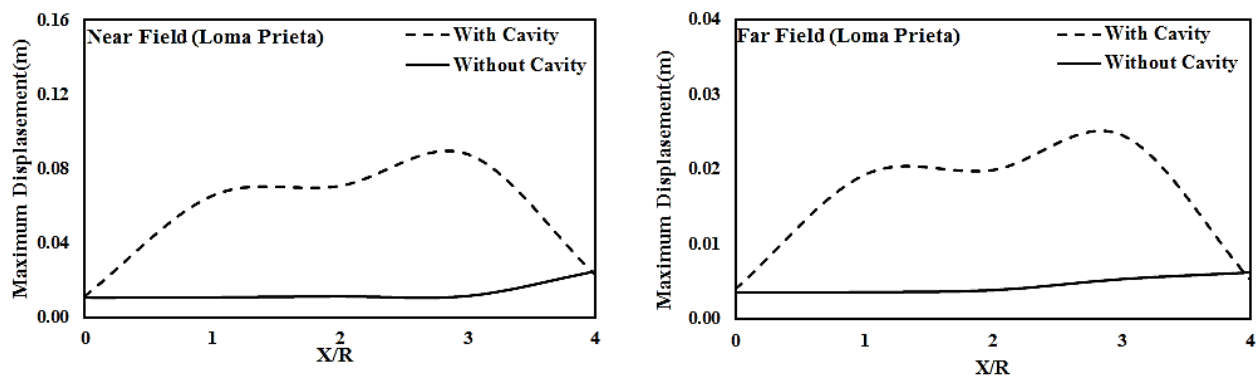
در دو حالت حضور و عدم حضور حفره تحت انواع شتاب‌نگاشت‌ها نشان می‌دهد.

نتایج به دست آمده نشان دهنده وجود بزرگنمایی در حالت باحفره نسبت به حالت بدون حفره می‌باشد و با فاصله گرفتن از مرکز حفره کاهش بزرگنمایی در سطح زمین تحت انواع بارگذاری در نظر گرفته شده در این تحقیق کاملاً مشخص است، به صورتی که در فاصله‌ی تقریباً چهار برابر شعاع حفره ($X/R=4$) همگرایی جابه‌جایی سطح زمین در هر دو حالت اتفاق می‌افتد، این فاصله که بیشتر نیز توسط

۳- نتایج و بحث

۳-۱ بررسی پاسخ سطح زمین در حضور حفره زیرزمینی

در این بخش به منظور مقایسه پاسخ زمین در حالت حضور و عدم حضور حفره تحلیل دینامیکی تحت انواع شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک گسل در خاک تیپ III به عنوان خاک مرجع انجام گردید. شکل‌های ۹ تا ۱۱ نمودار جابه‌جایی افقی سطح زمین در نقاط $X/R=0, 1, 2, 3, 4$ (همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است) در روی سطح زمین در مرکز حفره انتخاب شده است) را



شکل ۱۱. جابه‌جایی افقی حداکثر در سطح زمین در حالت حضور و عدم حضور حفره زیرزمینی در معرض زلزله حوزه نزدیک و دور زلزله لوما پریتا

Fig. 11. Maximum horizontal displacement on the ground surface in the presence and absence of an underground cavity in the near- and far-field earthquake in Loma Prieta

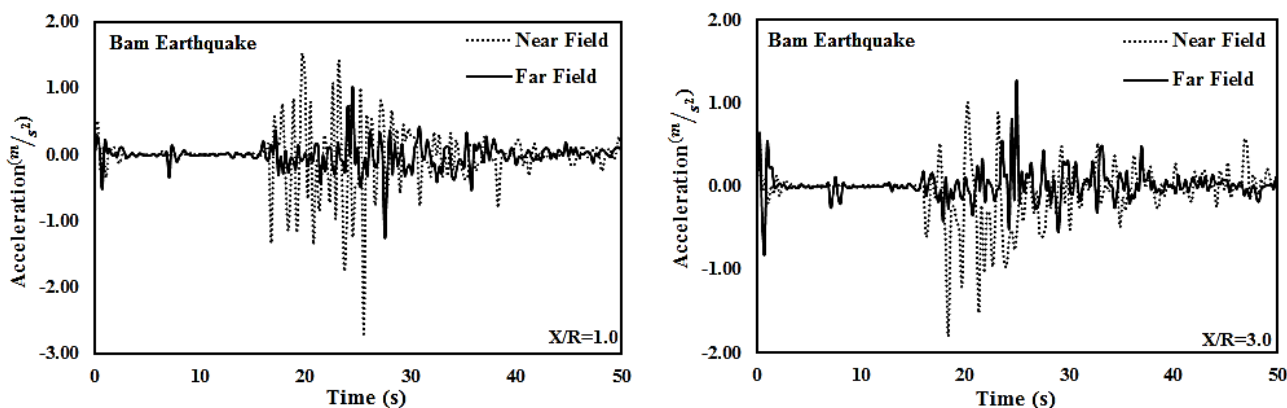
جدول ۵. حداکثر جابه‌جایی افقی سطح زمین تحت انواع شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک در حالت حضور و عدم حضور حفره

Table 5. Maximum horizontal displacement of the ground surface under various types of far- and near-field accelerograms in the presence and absence of a cavity

ضریب بزرگنمایی جابه‌جایی		عدم حضور حفره زیرزمینی		حضور حفره زیرزمینی		زلزله
نسبت حالت باحفره به بدون حفره		ماکزیمم جابه‌جایی افقی (m)		ماکزیمم جابه‌جایی افقی (m)		
حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	حوزه دور	حوزه نزدیک	
گسل	گسل	گسل	گسل	گسل	گسل	بم
۳/۳۳	۳	۰/۰۰۳	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۱۲	
۶	۴/۸	۰/۰۰۰۸	۰/۰۲۵	۰/۰۰۴۸	۰/۱۲	لندرس
۳/۳۳	۴/۵	۰/۰۰۶	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۹	لوما پریتا

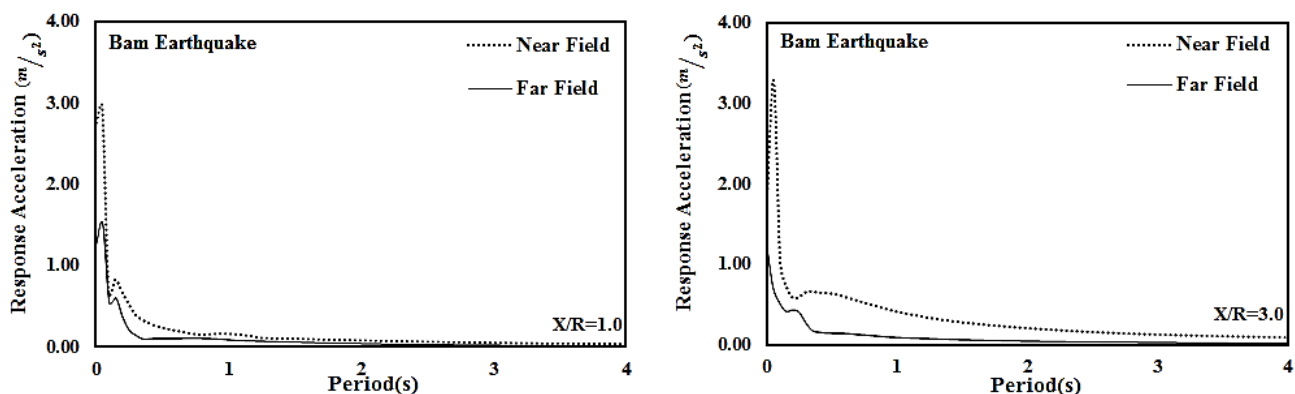
می‌دهد، باید توجه داشت با تغییر مشخصات هندسی حفره این میزان تقویت می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. این نتایج نشان دهنده اهمیت عوارض زیرزمینی در برآورد پاسخ لرزه‌ای زمین در نقاط مختلف می‌باشد. همچنین مطابق نتایج به دست آمده جابه‌جایی برداشت شده تحت شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر از شتاب‌نگاشت زلزله‌های حوزه دور می‌باشد. مقایسه حداکثر جابه‌جایی افقی سطح زمین تحت انواع شتاب‌نگاشت‌های معرفی شده در جدول ۲، در جدول ۵ خلاصه شده‌است. نتایج به دست آمده لزوم بررسی دقیق ابعاد مدل اجزاء محدود به منظور برآورد پاسخ واقع‌بینانه را نشان می‌دهد.

محققین دیگری از جمله سلطانی و باقری‌پور [۱۹] تایید شده بود، فاصله‌ای است که تاثیر وجود حفره به طور قابل ملاحظه‌ای از بین رفته و بنابراین پاسخ سطح زمین با وجود حفره زیرزمینی با پاسخ سطح آزاد برابر شده است. باید توجه داشت فاصله مورد بحث در تعیین اندازه مدل اجزا محدود بسیار حائز اهمیت است. از طرف دیگر در تمامی موارد مورد بررسی پاسخ سطح زمین در حالت وجود حفره زیرزمینی تقویت شده است. این میزان تقویت در جابه‌جایی برداشت شده در سطح زمین که در برخی نقاط تا بیش از ۱۲ برابر حالت بدون حفره نیز می‌رسد، اهمیت ارزیابی تاثیر این عوارض زیرزمینی در تحلیل پاسخ زمین را نشان



شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی شتاب تحت زلزله‌ی حوزه دور و نزدیک زلزله بم در $X/R=1, 3$

Fig. 12. Acceleration time history of the near- and far-field earthquake in Bam at $X/R=1, 3$

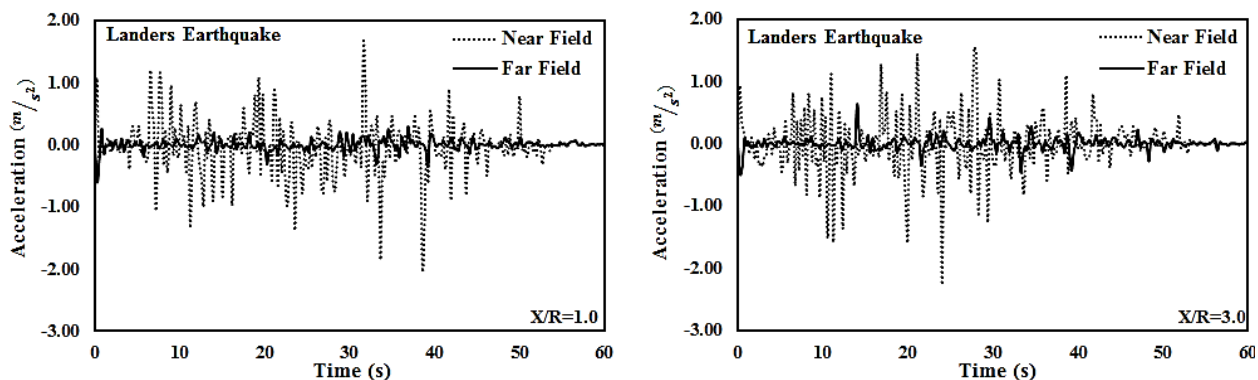


شکل ۱۳. طیف پاسخ شتاب تحت زلزله‌ی حوزه دور و نزدیک زلزله بم در $X/R=1, 3$

Fig. 13. Acceleration response spectrum of the near- and far-field earthquake in Bam at $X/R=1, 3$

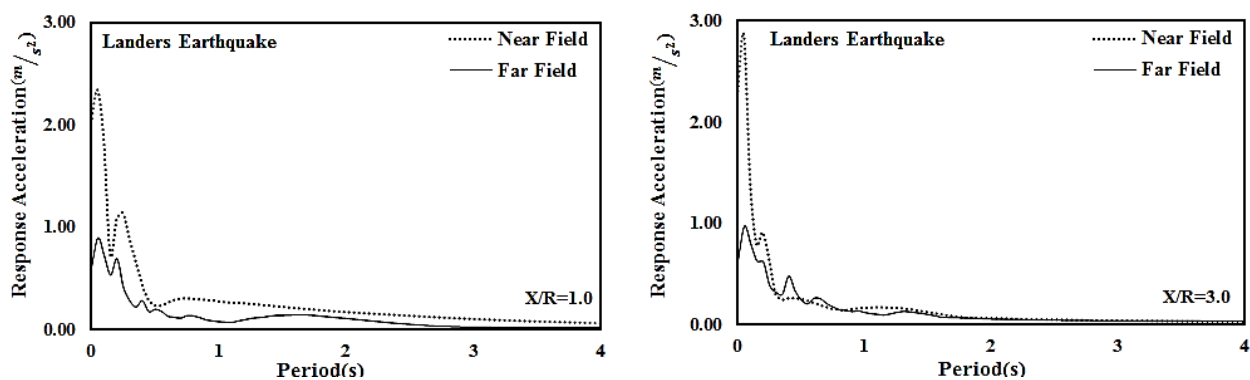
حفره روی سطح زمین ($X/R=1/3$) برای زلزله‌ی حوزه نزدیک گسل (تحت انواع بارگذاری‌ها) از زلزله‌ی حوزه دور گسل بیشتر بوده که نشان دهنده‌ی اهمیت مطالعه به صورت گسترده‌تر در حوزه نزدیک گسل می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که حداکثر شتاب سطح زمین در هر دو زلزله‌ی نزدیک و دور از گسل در فاصله سه برابر شعاع حفره ($X/R=3$) نسبت به فاصله‌ی برابر با شعاع حفره ($X/R=1$) بزرگ‌تر شده و این موضوع به طور کامل در نمودارهای جابه‌جایی نیز قابل مشاهده است. بنابراین مشاهده می‌گردد بیشترین بزرگنمایی در شتاب سطح زمین در هر دو شتاب‌نگاشت حوزه دور و نزدیک گسل لزوماً در فواصل نزدیک به حفره اتفاق نمی‌افتد و در فواصل دور

۳-۲- بررسی پاسخ سطح زمین در حوزه نزدیک و دور از گسل
تحلیل دینامیکی به منظور به دست آوردن نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی شتاب و طیف پاسخ شتاب در سطح زمین و با اعمال زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک و دور از گسل انجام شده است. در این مرحله از مطالعه ارتفاع خاک روی حفره برابر با شعاع حفره ($H/R=1$) و محدوده مورد مطالعه با خاک تیپ III (مطابق جدول ۱)، مدل‌سازی شده است. در ادامه نتایج نمودار تاریخچه‌ی زمانی شتاب و طیف پاسخ شتاب در شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ برای فاصله‌ی افقی یک و سه برابر شعاع حفره ($X/R=1/3$) نشان داده شده است.
مطابق نتایج، حداکثر شتاب سطح زمین در هر دو فاصله از مرکز



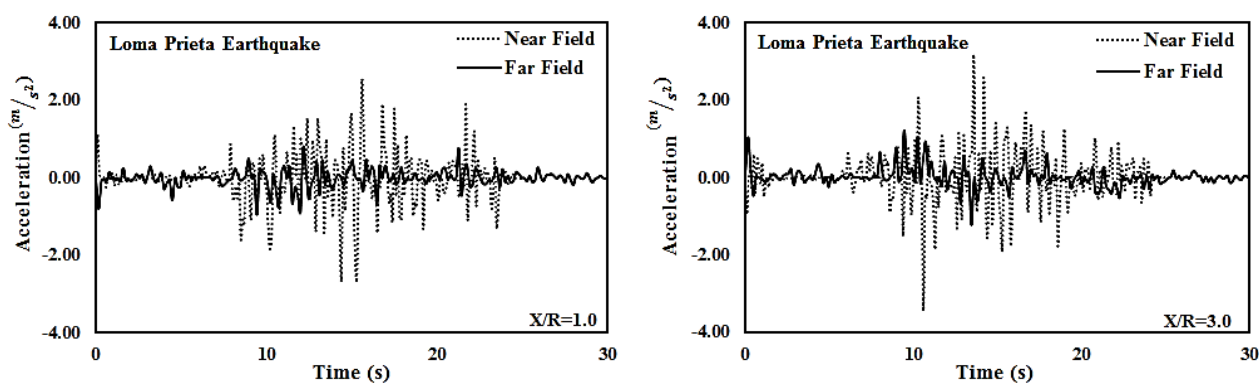
شکل ۱۴. تاریخچه‌ی زمانی شتاب تحت زلزله‌ی حوزه دور و نزدیک زلزله لندرس در $X/R = 1, 3$

Fig. 14. Acceleration time history of the near- and far-field earthquake in Landers at $X/R = 1, 3$



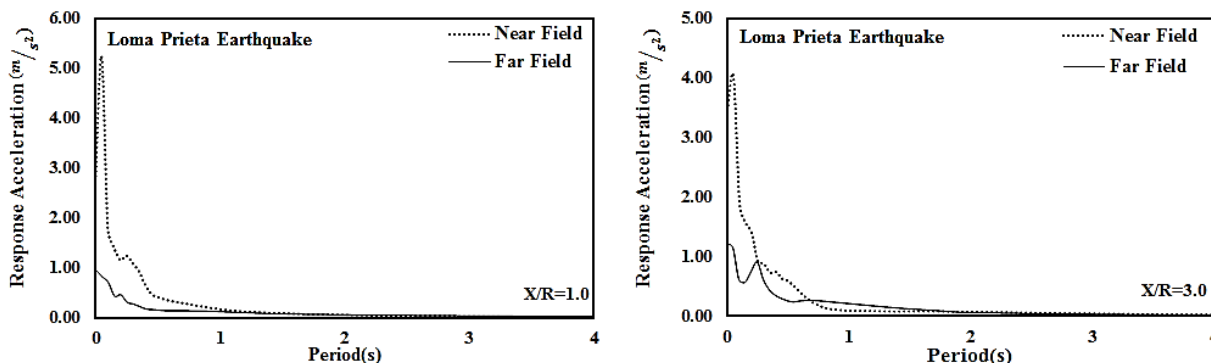
شکل ۱۵. طیف پاسخ شتاب تحت زلزله‌ی حوزه دور و نزدیک زلزله لندرس در $X/R = 1, 3$

Fig. 15. Acceleration response spectrum of the near- and far-field earthquake in Landers at $X/R = 1, 3$



شکل ۱۶. تاریخچه‌ی زمانی شتاب تحت زلزله‌ی حوزه دور و نزدیک زلزله لوماپریتا در $X/R = 1, 3$

Fig. 16. Acceleration time history of the near- and far-field earthquake in Loma Prieta at $X/R = 1, 3$



شکل ۱۷. طیف پاسخ شتاب تحت زلزله‌ی حوزه دور و نزدیک زلزله لوماپریتا در $X/R = 1, 3$

Fig. 17. Acceleration response spectrum of the near- and far-field earthquake in Loma Prieta at $X/R = 1, 3$

جدول ۶. شتاب حداکثر زمین در حوزه زلزله‌ی حوزه دور و نزدیک گسل در فاصله‌ی یک و سه برابر شعاع حفره ($X/R = 1, 3$)

Table 6. Maximum near- and far-field ground acceleration at a distance of one and three times the cavity radius ($X/R = 1, 3$)

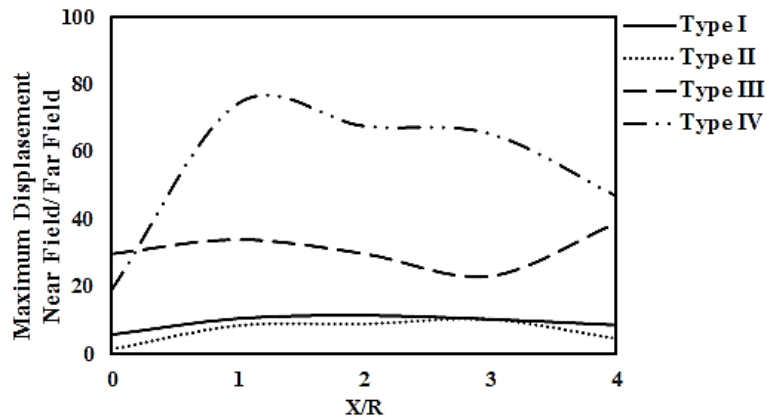
ضریب بزرگنمایی شتاب حداکثر	حداکثر شتاب سطح زمین m/s^2			
سطح زمین حوزه دور و نزدیک در	$X/R=3$	$X/R=1$	حوزه زلزله	زلزله
حالت				
$X/R=3 / X/R=1$				
۱/۰۲	۱/۲۷	-۱/۲۴	حوزه دور	بم
۱/۰۷	-۲/۷۱	-۲/۶۹	حوزه نزدیک	
۱/۰۴	۰/۶۳	۰/۶۱	حوزه دور	لندرس
۱/۱۲	۲/۲۶	۲/۰۱	حوزه نزدیک	
۱/۳	۱/۲۲	۰/۹۵	حوزه دور	لوماپریتا
۱/۳۱	۳/۴۵	۲/۶۳	حوزه نزدیک	

اعمال زلزله حوزه نزدیک به حوزه دور لندرس را در نقاط مختلف سطح زمین نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است این نسبت با افزایش سختی خاک کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر اثر تقویت امواج لرزه‌ای در حین عبور از لایه‌های خاک در خاک‌های نرم مقادیر بزرگ‌تری را شامل می‌شود. همچنین این شکل نشان می‌دهد که با دور شدن از مرکز حفره تاثیر آن بر پاسخ لرزه‌ای زمین کاهش می‌یابد (نزدیک شدن نمودارها در فواصل دور از حفره). همچنین مطابق نتایج شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ می‌توان نتیجه گرفت میزان تقویت نه تنها به دلیل اندازه حفره می‌باشد بلکه با تغییر نوع خاک میزان این تاثیرپذیری متفاوت می‌شود. در جدول ۷ مقادیر شتاب حداکثر سطح زمین برای انواع خاک معرفی شده در جدول ۱ در فاصله‌ی برابر شعاع حفره در سطح زمین ($X/R=1$) تحت زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس

از حفره دارای بزرگنمایی‌های قابل توجهی می‌باشد. بنابراین میزان پاسخ برداشت شده در سطح زمین کاملاً با فاصله از عارضه مورد بررسی در ارتباط است، این مورد خصوصاً در طرح سازه‌های خطی دارای اهمیت می‌باشد. در جدول ۶ حداکثر شتاب سطح زمین تحت انواع شتاب‌نگاشت‌های معرفی شده در جدول ۲، نشان داده شده است.

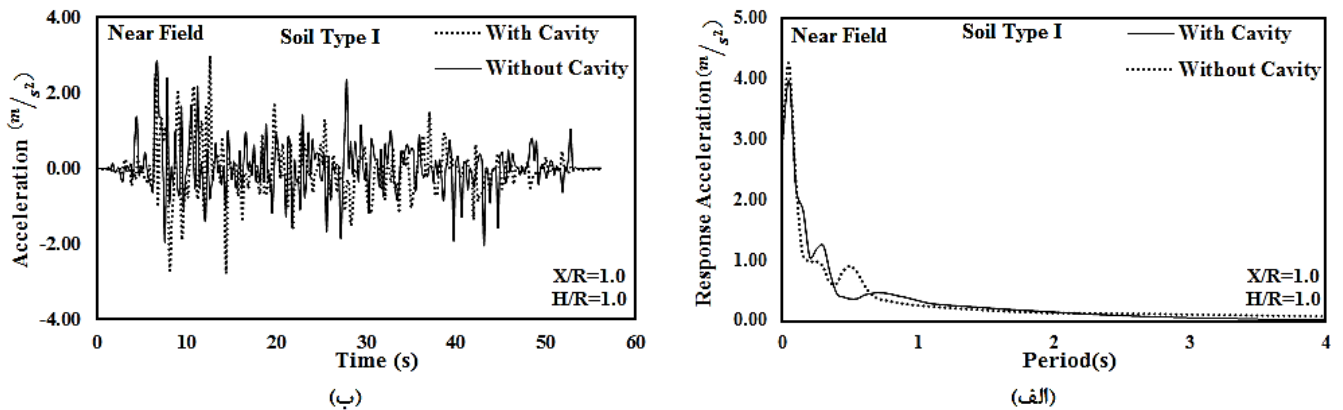
۳-۳- بررسی پاسخ سطح زمین در حضور انواع مختلف خاک

به منظور بررسی تاثیر نوع خاک بر روی پاسخ سطح زمین، تحلیل دینامیکی مدل بر اساس تیپ خاک‌های معرفی شده در جدول ۱ در معرض شتاب‌نگاشت زلزله‌ی حوزه نزدیک و دور لندرس قرار گرفت. ارتفاع خاک روی حفره در این بخش از مطالعات برابر با شعاع حفره ($H/R=1$) می‌باشد. شکل ۱۸ نسبت جابه‌جایی حداکثر در دو حالت



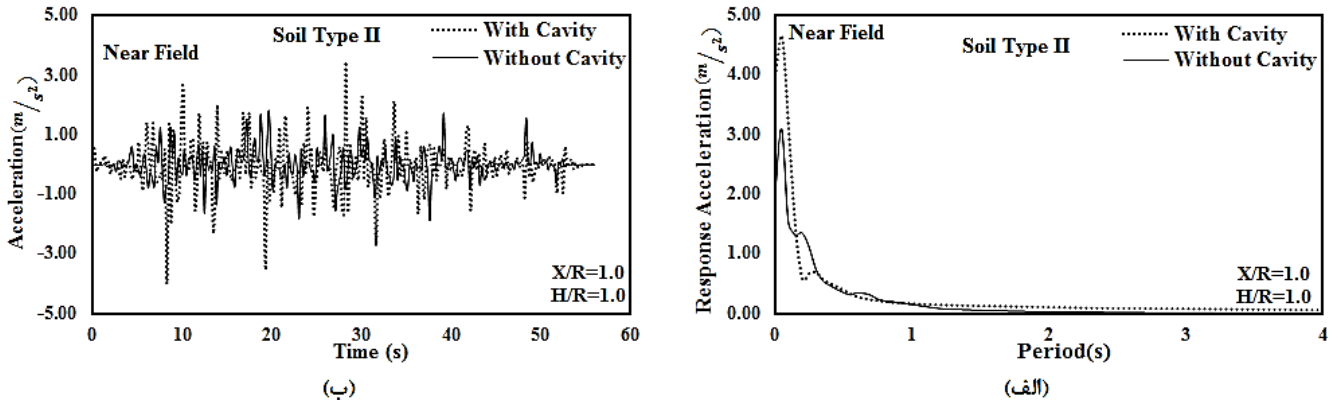
شکل ۱۸. نمودار نسبت جابه‌جایی افقی حداکثر سطح زمین حوزه نزدیک به حوزه دور در انواع خاک‌ها تحت شتاب‌نگاشت زلزله لندرس در حالت $H/R = 1$

Fig. 18. Diagram of the maximum near-field to far-field horizontal displacement on the ground surface in all the soil types at $H/R = 1$ under Landers earthquake accelerograms



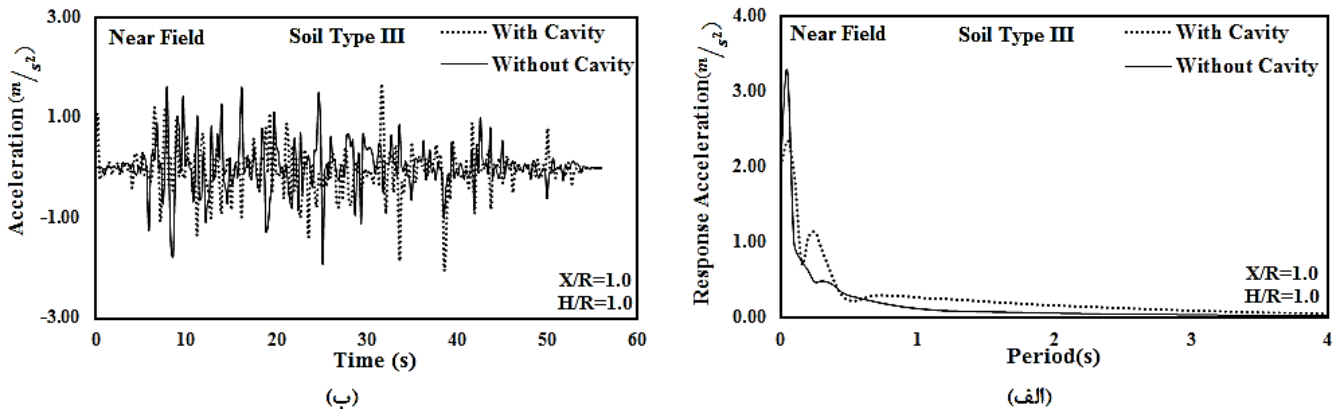
شکل ۱۹. (الف) طیف پاسخ شتاب (ب) تاریخچه‌ی زمانی شتاب مدل خاک تیپ I تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس

Fig. 19. (a) Acceleration response spectrum and (b) acceleration time history of type I soil model under Landers near-field accelerograms



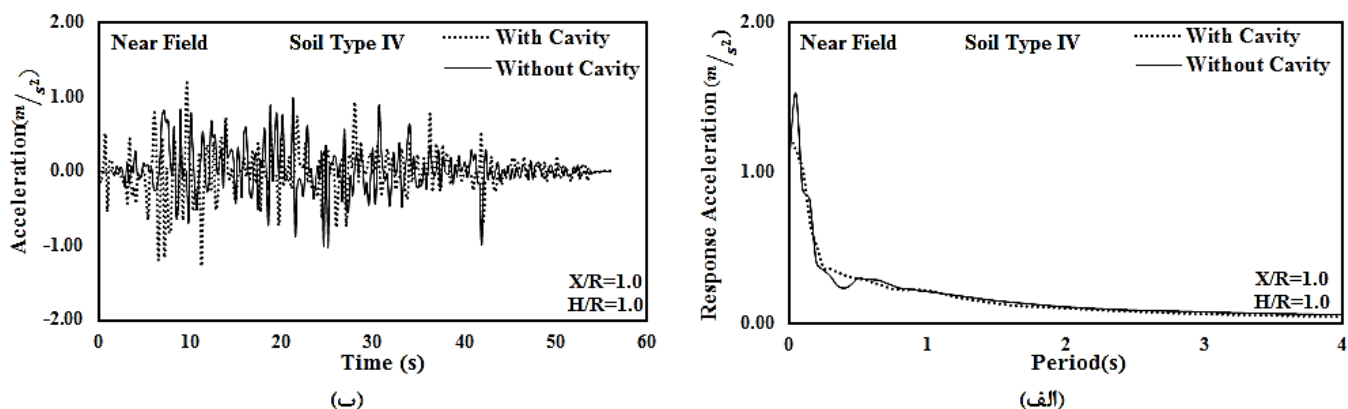
شکل ۲۰. (الف) طیف پاسخ شتاب (ب) تاریخچه‌ی زمانی شتاب مدل خاک تیپ II تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس

Fig. 20. (a) Acceleration response spectrum and (b) acceleration time history of type II soil model under Landers near-field accelerograms



شکل ۲۱. (الف) طیف پاسخ شتاب (ب) تاریخچه‌ی زمانی شتاب مدل خاک تیپ III تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس

Fig. 21. (a) Acceleration response spectrum and (b) acceleration time history of type III soil model under Landers near-field accelerograms



شکل ۲۲. (الف) طیف پاسخ شتاب (ب) تاریخچه‌ی زمانی شتاب مدل خاک تیپ IV تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس

Fig. 22. (a) Acceleration response spectrum and (b) acceleration time history of type IV soil model under Landers near-field accelerograms

جدول ۷. مقادیر شتاب حداکثر زمین برای انواع خاک معرفی شده در جدول ۱ در فاصله‌ی برابر شعاع حفره در سطح زمین ($X/R=1$) تحت زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس

Table 7. Maximum ground acceleration for different soil types introduced in Table 1 at a distance equal to the cavity radius on the ground surface ($X/R = 1$) under Landers near-field earthquake

نوع خاک	حضور و عدم حضور حفره	حداکثر شتاب سطح زمین m/s^2	ضریب بزرگنمایی شتاب حداکثر در حالت با حفره به بدون حفره
I	با حفره	۲/۹۹	۱/۲۹
	بدون حفره	۲/۳۲	
II	با حفره	-۳/۹۹	۲/۱۲
	بدون حفره	-۱/۸۸	
III	با حفره	-۲/۰۱	۱/۰۶
	بدون حفره	-۱/۹۰	
IV	با حفره	۱/۲۶	۱/۲۴
	بدون حفره	۱/۰۲	

شکل‌های ۲۴ و ۲۵ مقدار شتاب بیشینه و طیف پاسخ در $H/R=3$ بزرگ‌تر از $H/R=1$ می‌باشد. با توجه به اینکه در این مطالعه بار ورودی به سنگ بستر اعمال می‌گردد، بنابراین H/R بزرگ‌تر نشان دهنده نزدیک‌تر بودن حفره به محل اعمال تحریک لرزه‌ای می‌باشد. در حالت H/R بزرگ‌تر تاثیر حفره در پراکنش و شکست امواج در لایه خاک سریع‌تر اتفاق افتاده بنابراین میزان تقویت بیشتری در سطح زمین برآورد می‌شود. با این حال چنانچه محل اعمال بار تغییر یابد این میزان بزرگنمایی در این موقعیت قرارگیری عارضه تغییر خواهد یافت. جدول ۸ مقادیر شتاب حداکثر سطح زمین را در دو حالت $H/R=1$ و $H/R=3$ برای زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس نشان می‌دهد.

نشان داده شده است.

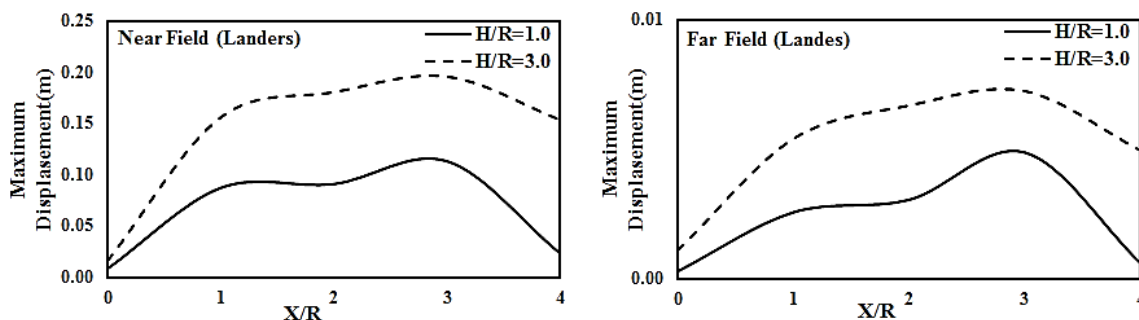
۳-۴- بررسی پاسخ سطح زمین در اثر تغییر عمق قرارگیری حفره

نتایج تغییرات عمق مدفون حفره با ثابت ماندن شعاع حفره پس از اعمال شتاب‌نگاشت زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس برای فاصله برابر با شعاع حفره ($X/R=1$) در سطح زمین در شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ نشان داده شده است. در این بخش از مطالعات از دو نسبت عمق حفره ($H/R=1/3$) استفاده گردید و محدوده مورد مطالعه با خاک تیپ III (مطابق جدول ۱)، مدل‌سازی شد. مطابق نتایج نمودار شکل ۲۳ جابه‌جایی حداکثر سطح زمین در نسبت $H/R=3$ از جابه‌جایی حداکثر در نسبت $H/R=1$ بیشتر شده است. همچنین مطابق نمودار

جدول ۸. مقادیر شتاب حداکثر در سطح زمین در حالت $H/R=1$ و $H/R=3$ برای زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس

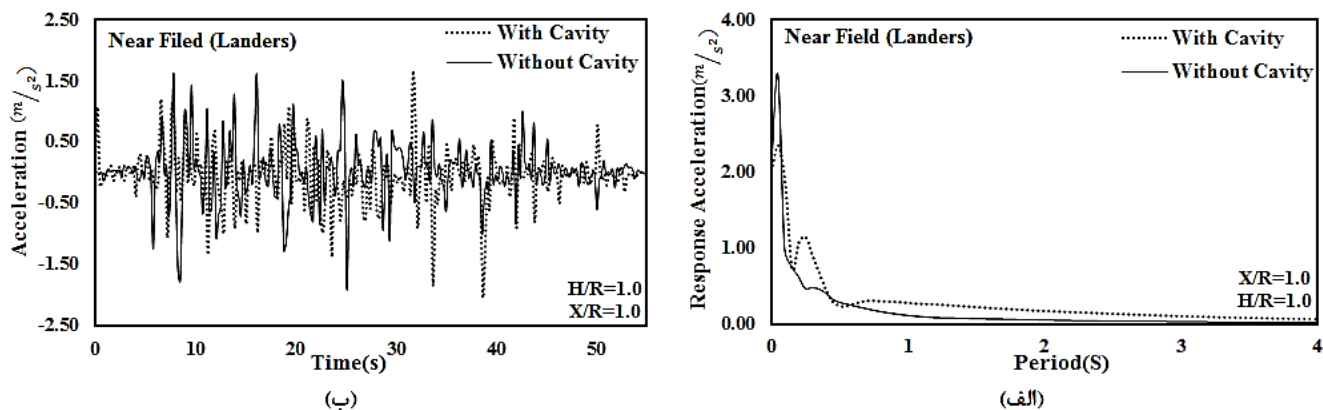
Table 8. Maximum acceleration on the ground surface at $H/R = 1$ and $H/R = 3$ under Landers near-field earthquake

نسبت بزرگنمایی شتاب حداکثر در حالت حضور حفره به عدم حضور حفره		حداکثر شتاب سطح زمین m/s^2		حضور و عدم حضور حفره	زلزله
$H/R=3$	$H/R=1$	$H/R=3$	$H/R=1$		
۱/۱۵	۱/۰۵	-۲/۱۹	-۲/۰۱	با حفره	لندرس
		-۱/۹۱	-۱/۹۱	بدون حفره	



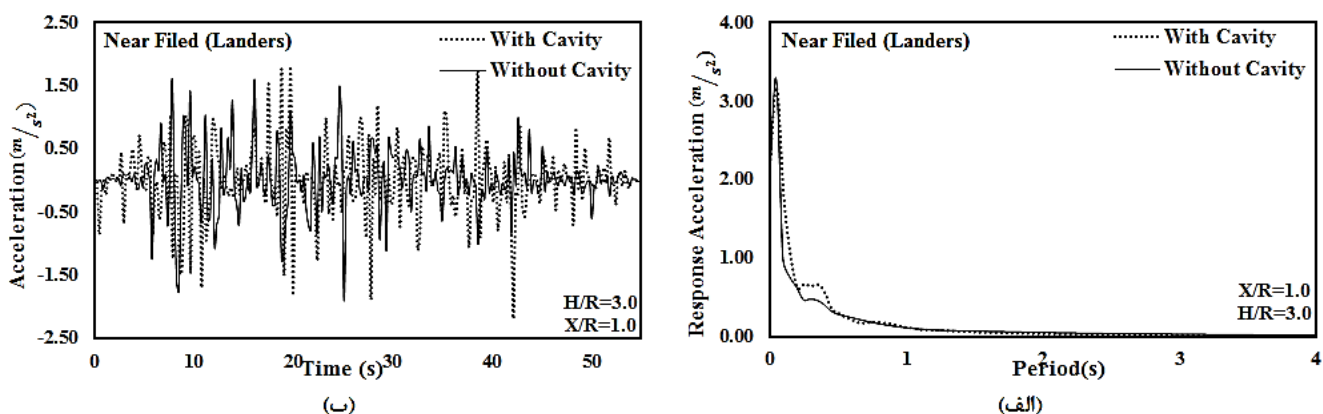
شکل ۲۳. جابه‌جایی افقی حداکثر در سطح زمین در نقاط مختلف از مرکز حفره تحت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک و دور زلزله‌ی لندرس در دو عمق مختلف حفره ($H/R=1/3$)

Fig. 23. Maximum horizontal displacement on the ground surface at different points from the cavity center under the near- and far-field accelerograms of Landers earthquake at two different cavity depths ($H/R = 1, 3$)



شکل ۲۴. الف) طیف پاسخ شتاب (ب) تاریخچه زمانی شتاب تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس برای عمق مدفون برابر با شعاع حفره ($H/R = 1$)

Fig. 24. Acceleration response spectrum and (b) acceleration time history under near-field accelerograms for Landers earthquake at a burial depth equal to the cavity radius ($H/R = 1$)



شکل ۲۵. الف) طیف پاسخ شتاب (ب) تاریخچه زمانی شتاب تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی حوزه نزدیک لندرس برای عمق مدفون سه برابر با شعاع حفره ($H/R = 3$)

Fig. 25. Acceleration response spectrum and (b) acceleration time history under near-field accelerograms for Landers earthquake at a burial depth three times the cavity radius ($H/R = 3$)

- همانطور که از نمودارهای جابه‌جایی افقی و شتاب مشخص است، تقویت لرزه‌ای در حضور حفره‌های زیرزمینی نسبت به حالت عدم حضور حفره کاملاً مشهود بوده، به صورتی که در برخی نقاط جابه‌جایی سطح زمین تا بیش از ۱۲ برابر حالت بدون حفره است.
- حداکثر جابه‌جایی افقی سطح زمین تحت انواع شتاب‌نگاشت‌های معرفی شده در این تحقیق و در معرض خاک تپ III، در فاصله به تدریج کاهش یافته و با حرکت پاسخ آزاد زمین

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه پاسخ لرزه‌ای سطح زمین با استفاده از روش اجزا محدود و نرم‌افزار پلکسیس در اثر وجود حفره‌ی زیرزمینی تحت اثر اعمال مجموعه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک از گسل، تغییر نوع خاک، تغییر عمق مدفون حفره‌ی زیرزمینی از سطح زمین، مورد بررسی قرار گرفت. از تحلیل مطالعات پارامتری صورت گرفته نتایج زیر حاصل گردید:

- (University of Tehran 42(4 (114)), (2008) 487-496.(in persion)
- [2] D. E. Hudson, G. W. Housner, An analysis of strong-motion accelerometer data from the San Francisco earthquake of March 22, 1957, Bulletin of the seismological society of America, 48(3) (1958) 253-268.
- [3] B. A. Bolt, The san fernando valley, california, earthquake of february 9 1971: Data on seismic hazards, Bulletin of the seismological society of America, 61(2) (1971). 501-510.
- [4] V. V. Bertero, S. A. Mahin, R. A. Herrera, Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records, Earthquake engineering & structural dynamics, 6(1) (1978) 31-42.
- [5] V. W. Lee, M. D. Trifunac, Response of tunnels to incident SH-waves, Journal of the Engineering Mechanics Division, 105(4) (1979) 643-659.
- [6] V. Lee, J. Karl, Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 11(8) (1992) 445-456.
- [7] J.-w. Liang, H. Zhang, V.W. Lee, A series solution for surface motion amplification due to underground group cavities: Incident P waves, Acta Seismologica Sinica, 17(3) (2004) 296-307.
- [8] J. Luco, F. De Barros, Dynamic displacements and stresses in the vicinity of a cylindrical cavity embedded in a half-space, Earthquake engineering & structural dynamics, 23(3) (1994) 321-340.
- [9] P. Yiouta-Mitra, G. Kouretzis, G. Bouckovalas, A. Sofianos, Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures, Dynamic response and soil properties, (2007) 1-10.
- [10] J. Liang, J. Zhang, Z. Ba, The effect of underground cavities on design seismic ground motion, Proceedings of 15 world conference earthquake engineering, Lisbon, Paper ID, (2012).
- [11] H. Alielahi, M. Adampira, Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: amplification patterns and engineering applications, International Journal of Civil Engineering,

همگرا می‌شود. این فاصله می‌تواند با تغییر شرایط هندسی حفره و بار ورودی تغییر یابد.

• نتایج نشان می‌دهد که حداکثر شتاب سطح زمین در هر دو زلزله‌ی نزدیک و دور از گسل در فاصله سه برابر شعاع حفره ($X/R=3$) نسبت به فاصله‌ی برابر با شعاع حفره ($X/R=1$) بزرگ‌تر شده و این موضوع به طور کامل در نمودارهای جابه‌جایی نیز قابل مشاهده است، به صورتی که بحرانی‌ترین ضریب بزرگنمایی شتاب حداکثر در حوزه دور و نزدیک زلزله لندرس در حالت $X/R=3$ به $X/R=1$ برابر $1/12$ در زلزله‌ی حوزه نزدیک و $1/04$ در حوزه دور به دست آمده است. بنابراین مشاهده می‌گردد بیشترین بزرگنمایی در شتاب سطح زمین در هر دو شتاب‌نگاشت حوزه دور و نزدیک گسل لزوماً در فواصل نزدیک به حفره اتفاق نمی‌افتد و در فواصل دور از حفره دارای بزرگنمایی‌های قابل توجهی می‌باشد. بیشترین مقدار بزرگنمایی در هر دو شتاب‌نگاشت حوزه دور و نزدیک، الزاماً در فواصل نزدیک به مرکز حفره، اتفاق نمی‌افتد و همانطور که از نتایج مشخص است در فواصل دور دارای بزرگنمایی قابل توجهی هستیم. این پدیده کاملاً تحت تاثیر بار ورودی و مشخصات هندسی عارضه است.

• بررسی‌های انجام شده در زمینه عمق مدفون حفره حاکی از آن است که الزاماً تقویت لرزه‌ای در اعماق کم مشاهده نمی‌شود و با نزدیک‌تر شدن عارضه به منبع موج ورودی به دلیل پراکنش‌های متعدد امواج در محیط می‌توان انتظار بزرگنمایی‌های بیشتری را در محدوده مورد مطالعه داشت. با این حال چنانچه محل اعمال بار تغییر یابد این میزان بزرگنمایی در این موقعیت قرارگیری عارضه تغییر خواهد یافت.

• مطالعه صورت گرفته بر روی جنس خاک‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سختی خاک، نسبت جابه‌جایی حداکثر در دو حالت اعمال زلزله حوزه نزدیک به دور کاهش می‌یابد و با نرم‌تر شدن لایه‌های خاک مقادیر بزرگنمایی بیشتری به وجود می‌آید. بنابراین میزان تقویت نه تنها به دلیل اندازه حفره می‌باشد بلکه با تغییر نوع خاک میزان این تاثیرپذیری متفاوت می‌شود.

منابع

- [1] M.R. Ghaem-maghamian, B. Khalili, The effects of faulting parameters and site location on near-fault pulse characteristics, Journal of Faculty of Engineering

- building adjacent to deep excavation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79 (2015) 149-170.
- [16] R. Pour-Hosseini, N. Soltani, A Study of the interaction of soil-unreinforced basement walls, *Sharing Journal of Civil Engineering*, (2015) 79-86. (in persian)
- [17] G. Abdollahzadeh, H. Faghihmaleki, H. Esmaili, Comparing hysteretic energy and inter-story drift in steel frames with V-shaped brace under near and far fault earthquakes, *Alexandria Engineering Journal*, 57(1) (2018) 301-308.
- [18] N. Soltani, Seismic response evaluation of strip footing on geogrid-reinforced slope, *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(4) (2021) 1-9.
- [19] N. Soltani, M.H. Bagheripour, Seismic wave scatter study in valleys using coupled 2D finite element approach and absorbing boundaries, *Scientia Iranica*, 24(1) (2017) 110-120.
- 14(4) (2016) 233-251.
- [12] H. Alielahi, M. Adampira, Site-specific response spectra for seismic motions in half-plane with shallow cavities, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80 (2016) 163-167.
- [13] H. Alielahi, M. Adampira, M. Asgari, Seismic Response Assessment of the ground surface induced by twin tunnels subjected to incident in-plane shear waves, *Tunneling and Underground Space Engineering*, 35(1) (2016) (35-52.(in persian)
- [14] N. Soltani, M. H. Bagheripour, Applied 2D equivalent linear program to analyze seismic ground motion: real case study and parametric investigations, *Geomechanics and Engineering*, 30(1) (2022) 1-10.
- [15] N. Yeganeh, J. Bolouri-Bazaz, A. Akhtarpour, Seismic analysis of the soil-structure interaction for a high rise

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Jafarpour, M. Mokhtari, N. Soltani, Evaluation of the parameters affecting the seismic response of underground cavities considering earthquakes in near and far fault fields, Amirkabir J. Civil Eng., 55(1) (2023) 61-84.

DOI: 10.22060/mej.2019.15465.6128



