

The effect of slope angle on the seismic response of buildings constructed near slopes

Ali Ghanbari^{1✉}, Fatemeh Mirdar²

1. Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: Ghanbari@khu.ac.ir

2. Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: Fatemehmirdar736@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 21 October 2024

Received in revised form 27
November 2024

Accepted 27 December 2024

Keywords:

Topographic, Soil-structure
interaction, Slope,
Earthquake, 3D numerical
analysis.

ABSTRACT

The investigation of the seismic response of the ground surface and its impact on structures due to topographic effects and soil-structure interaction (TSSI) is highly significant. If the site has sloping topography, the importance of this study is further amplified, and the effect of slope on soil-structure interaction must be considered. This research uses Loma Prieta (1989) earthquake records to analyze the seismic response of a 5-story concrete building located 5 meters from the top of the slope for four angles: 15, 30, 45, and zero degrees (SSI), using 3D numerical analysis. Modeling was conducted with MIDAS GTS NX software for both TSSI and SSI systems. An elastic model and an HSS model were used for the building and soil, respectively. The seismic response of the building was evaluated by comparing maximum lateral displacements, base shear forces, inter-story drifts, and horizontal accelerations in the TSSI and SSI analyses. As the slope angle increased from zero degrees (SSI) to 15, 30, and 45 degrees (TSSI), the average lateral displacement of the floors increased by 44%, and the average maximum horizontal acceleration increased by 21%. Additionally, with the slope angle increasing from zero degrees (SSI) to 15, 30, and 45 degrees (TSSI), the average ratios of inter-story drift and maximum base shear force increased by 14% and 21%, respectively.

Introduction

Currently, earthquakes are one of the most destructive natural forces, causing damage to buildings constructed on the earth's surface. When a site has a slope, the effect of the slope on the interaction between the soil and structure must be considered, and the necessary investigations should be carried out. In fact, when seismic waves encounter a slope, they generate a new set of surface waves that will influence the seismic response of the structure. It has been reported that in many destructive earthquakes, structures located on hilltops in uneven regions tend to sustain more damage than similar structures located off the hill area (Gazetas et al., 2002). Therefore, the topographic effects of slopes can lead to increased displacements, amplified acceleration

responses, and greater base shear forces. Studies show that the dynamic response of a free surface and the soil-structure system are significantly influenced by the topographic shape, soil properties (plasticity, shear modulus, internal friction angle, and cohesion), and parameters such as the position of the structure relative to the slope, the distance from the slope crest, slope angle and height, input excitation frequency, nonlinear soil behavior, and the depth of the bedrock. Consequently, it is crucial to address this issue in a comprehensive and detailed manner. In the present study, the effect of slope angle on the seismic response of the ground surface and the analysis of the topography-soil-structure interaction on the seismic response of buildings near slopes have been investigated. The results of this study expand the knowledge

Cite this article: Ghanbari, A., Fatemeh Mirdar, F. (2024). The effect of slope angle on the seismic response of buildings constructed near slopes. *Journal of Engineering Geology*, 18 (4), 565-584. <https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.10395>

of the seismic performance of buildings located near slopes and provide designers with a better understanding of how to create safe and reliable designs based on this knowledge.

Materials and Methods

Subtitle

Numerical modeling can provide a practical approach for understanding soil behavior, provided that the problem is accurately simulated. This is due to the unique conditions of each geotechnical project, the inability of empirical relationships to account for specific conditions, the lack of analytical solutions for most projects, and the high costs associated with field and laboratory methods. MIDAS GTS NX software is a comprehensive and powerful tool in geotechnical engineering, and in this study, the 2022 version was used.

Numerical Analysis Program:

In this study, the impact of slope topography on the seismic response at the ground surface near the slope crest was first examined through 3D analyses, followed by a comparison of the effects of SSI and TSSI on the seismic response of buildings. A 5-story concrete building with an elastic behavior model (Figure1), located 5 meters from the slope crest, was modeled and analyzed at various slope angles. For the soil, the Hardening Soil with Small-Strain Stiffness (HSS) model was used, based on correlation relationships provided for sandy soil in the study by Brinkgreve et al, 2010. The input excitation was the 1989 Loma Prieta earthquake record-1989, with a peak acceleration amplitude close to 0/25g, as shown in Figure 2.

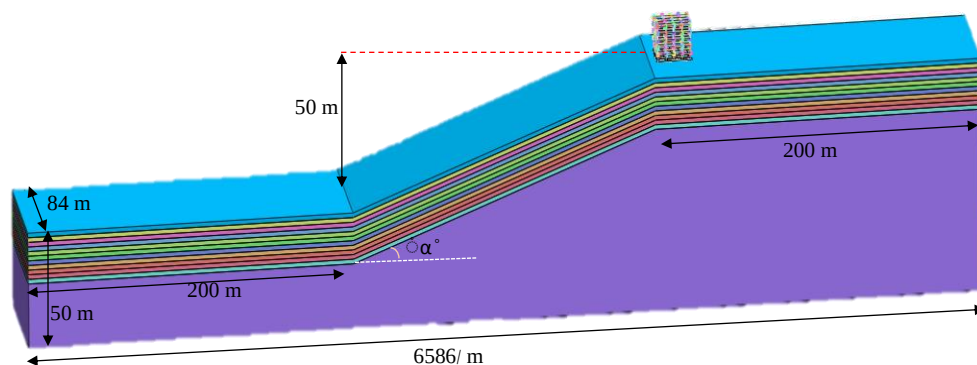


Fig. 1. The basic model for the analysis performed in the present research

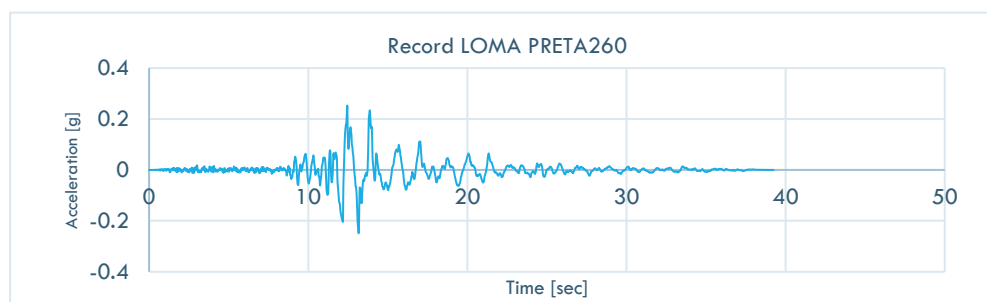


Fig. 2. Loma Prieta-1989 earthquake record

By comparing the seismic response of the ground surface near the slope in the TSSI condition, the SSI condition, and input wave excitation under the Loma Prieta earthquake

record, and analyzing the seismic excitation results presented in Figure 3, the maximum acceleration response values in the TSSI, SSI, and input excitation conditions are 3/25, 2/54,

and $2/31 \text{ m/s}^2$, respectively. The results indicate that the topographic effects of the slope (TSSI) lead to an increase in acceleration in most cases

compared to the input excitation and in the absence of the slope (SSI).

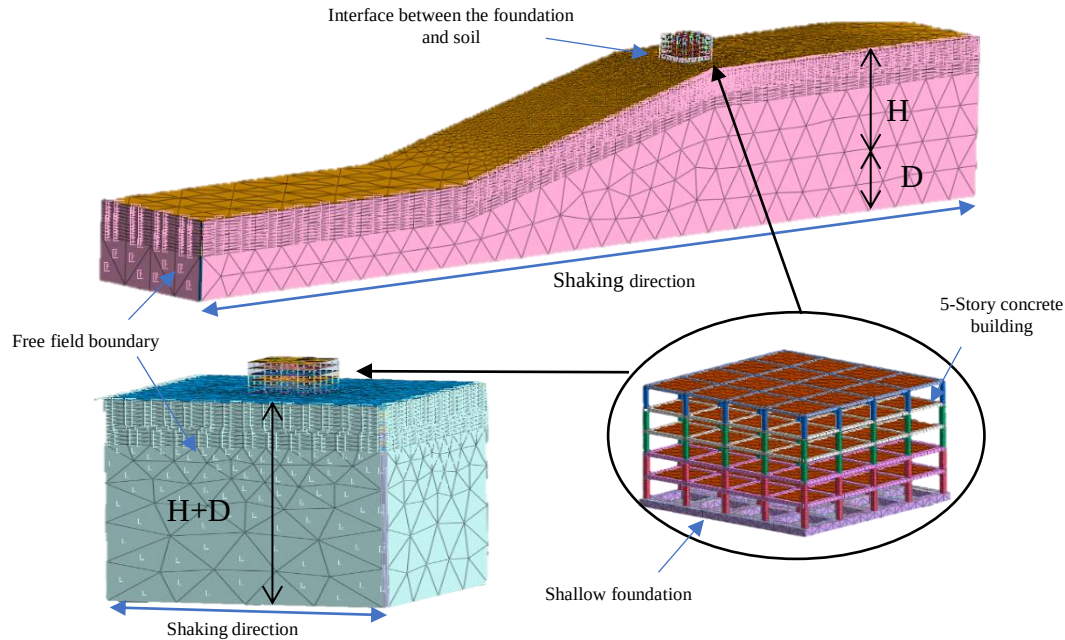


Fig. 4. Modeling done in TSSI, SSI conditions

The results of the study, including maximum lateral displacement of floors, maximum horizontal acceleration (PHA), base shear values of floors, and inter-story drift ratios, were examined based on the building's position at different slope angles (α) of 15, 30, and 45 degrees, as well as at a slope angle of zero, which corresponds to the SSI condition. The geometry of the analyses performed is shown in Figure 4.

Results and Discussion

As can be seen from the acceleration response curve in Figure 3, the amplification level in the TSSI condition is greater than in the SSI condition relative to the input wave excitation. In these figures, the increase in horizontal acceleration due to the topographical effects of the slope near the crest is higher than on flat

ground. As illustrated in the curve in Figure 3, the horizontal acceleration amplification in the TSSI condition is $1/27$ times that in the SSI condition. Furthermore, the results presented in this study indicate the maximum values of lateral displacement, horizontal acceleration, base shear, and inter-story drift in the presence of a slope differ from those without a slope. An increase in slope angle, on average, results in greater lateral displacement of floors, maximum horizontal acceleration, maximum base shear, and inter-story drift ratios. However, this increase in base shear does not occur when the slope angle is 30 degrees under the Loma Prieta record. Overall, it can be concluded that the topographic effect can amplify the response of a building near the slope crest compared to a building on flat ground.

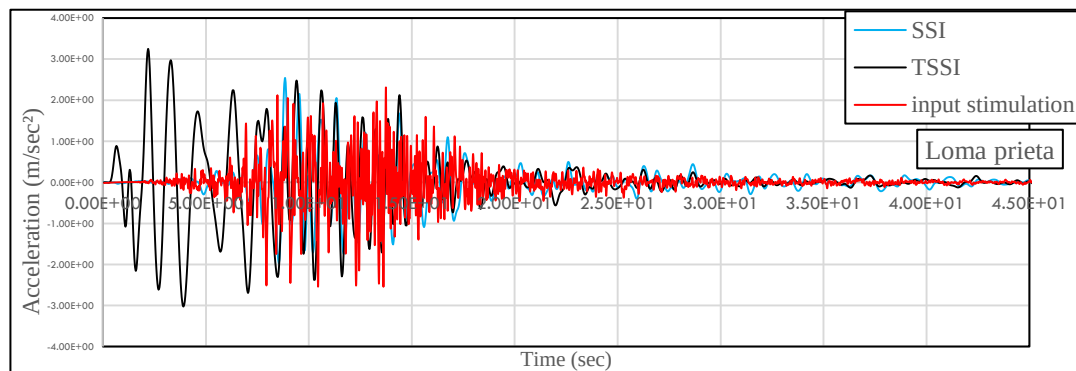


Fig. 3. Comparison of acceleration response in SSI, TSSI and input excitation modes, under Loma Prieta-1989 earthquake record

Conclusions

Based on the results obtained and their comparison in the two TSSI and SSI conditions in the present study, it can be generally concluded that the topographic effects of the slope on the amplification occurring at the crest are more significant than on the flat ground. Additionally, changes in the slope angle affect the seismic response of buildings located near slopes. From the analysis results, lateral displacement in the SSI condition is, on average, 44% less than in the TSSI condition. Moreover, the maximum horizontal acceleration (PHA) in the SSI condition is, on average, 49% lower than in the TSSI condition. The increase in lateral displacement and horizontal acceleration is

particularly noticeable in the upper floors of the building, with lower floors experiencing less impact from the increased slope angle. The maximum base shear and the maximum inter-story drift ratio in the TSSI condition are, 51% and 21% higher than in the SSI condition, respectively. Although previous studies by other researchers have highlighted the importance of this issue under various conditions, it is still not addressed in many modern building codes. Therefore, it is recommended that dynamic analysis be performed for buildings near slopes, taking into account the topographic effects of the slope (TSSI) with various slope angles during the design process.



تأثیر زاویه شیب بر روی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بنا شده در مجاورت شیب

علی قنبری^۱، فاطمه میردار^۲

۱. استاد، گروه ژئوتکنیک، مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: Ghanbari@khu.ac.ir

۲. کارشناسی ارشد، گروه ژئوتکنیک، مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: Fatemehmirdar736@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷

کلیدواژه‌ها:

توپوگرافی، اندرکنش خاک-سازه، شیب، زلزله، تحلیل عددی 3D.

بررسی چگونگی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و تأثیر آن بر سازه‌ها به دلیل اثرات توپوگرافی و اندرکنش خاک-سازه (TSSI) بسیار حائز اهمیت می‌باشد. حال اگر ساختمان دارای توپوگرافی شیب باشد، اهمیت بررسی این موضوع را دو چندان می‌کند و اثر شیب ساختمان در اندرکنش خاک و سازه باید در نظر گرفته شود. در این تحقیق با استفاده از رکورد زلزله Loma Prieta-1989 پاسخ لرزه‌ای یک ساختمان بتنی ۵ طبقه در فاصله ۵ متری از تاج شیب برای چهار زاویه ۱۵، ۳۰، ۴۵ و صفر درجه (SSI) با استفاده از تحلیل عددی 3D مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی با استفاده از نرم افزار MIDAS GTS NX برای سیستم SSI و TSSI انجام گرفته است. در این تحقیق از مدل رفتاری الاستیک و HSS به ترتیب برای ساختمان و خاک استفاده شده است. پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها به صورت مقایسه حداکثر تغییر شکل جانبی ساختمان، نیروی برش پایه، دررفت طبقات و شتاب افقی طبقات در تحلیل‌های SSI و TSSI مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش زاویه شیب از صفر درجه (SSI) به ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه (TSSI) تغییر مکان جانبی طبقات، به طور میانگین ۴۴٪ افزایش یافته است این مقدار افزایش برای حداکثر شتاب افقی به طور میانگین ۲۱٪ می‌باشد. همچنین با افزایش زاویه شیب از صفر درجه (SSI) به ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه (TSSI) به طور میانگین نسبت دررفت طبقات و حداکثر برش پایه طبقات به ترتیب ۱۴٪ و ۲۱٪ افزایش یافته است.

مقدمه

را ایجاد می‌نمایند که پاسخ لرزه‌ای سازه را تحت تأثیر قرار خواهند داد. افزایش جمعیت، گسترش شهرها، کمبود زمین‌های مسطح با کاربری مسکونی، تقاضای بشر به ساخت‌وساز در نواحی مرتفع برای داشتن مناظر خاص، باعث ایجاد سازه‌ها در مناطق کوهستانی، کوه، تپه و دره‌ها با شیب‌های مسئله‌ساز شده است. این ناهمواری‌های سطحی زمین که به توپوگرافی سطحی زمین یاد می‌شود، باعث کانونی شدن امواج در تپه و کوه و در دره‌ها باعث پراکندگی امواج لرزه‌ای می‌گردد. با بررسی زلزله‌های اخیر و مطالعات میدانی، روشن است که

در حال حاضر زلزله یکی از مخرب‌ترین عوامل طبیعی در تخریب سازه‌های بنا شده در سطح زمین است. هنگامی که زلزله‌ای رخ می‌دهد، امواج لرزه‌ای تولید شده از منبع زلزله به سرعت به اطراف منتشر شده و در لایه‌های زمین حرکت می‌کنند. سپس این امواج به سطح زمین می‌رسند و لرزش ایجاد می‌کنند که ممکن است ثانیه‌ها تا دقیقه‌ها به طول انجامد. حال اگر ساختمان دارای شیب باشد اثر شیب ساختمان در اندرکنش خاک و سازه باید در نظر گرفته شود و بررسی‌های لازم انجام شود. در واقع امواج وقتی به شیب برخورد می‌کنند، دسته‌ای جدید از امواج سطحی از نوع ریلی

تحریک ورودی، رفتار غیرخطی خاک و عمق سنگ بستر بر پاسخ کل سیستم مؤثر هستند. از این رو بررسی این مورد بسیار حائز اهمیت می‌باشد که باید به طور جدی و کامل به آن پرداخته شود.

محققین مختلفی با در نظرگیری رفتار خطی و غیرخطی به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله ارتفاع و زاویه شیب، عمق سنگ‌بستر، فرکانس تحریک ورودی، لایه‌بندی خاک ساختمانی، نسبت امیدانس بستر، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک ساختمانی بر رفتار توپوگرافی شیب پرداخته‌اند (Papadimitriou and Bouckovalas, 2005; Assimaki et al., 2005; Gazetas et al., 2002; Tripe et al., 2013; Rizzitano et al., 2014; Dhakal, 2004; Assimaki and Kausel, 2007; Shabani et al., 2021; Shabani et al., 2020).

مطالعات گذشته که با فرضیات ساده‌ای در تحلیل پاسخ ساختمانی توپوگرافی شیب از قبیل رفتار الاستیک خاک همراه بوده و از طرف دیگر مطالعات مربوط به اندرکنش توپوگرافی_خاک_سازه (TSSI) نیز اکثراً به صورت دو بعدی بوده و فقط شبیه‌سازی ساختمان در مجاورت تاج و پای شیب بررسی شده است. بر اساس مطالب ارائه شده، در این تحقیق با استفاده از تحلیل‌های سه بعدی به بررسی تأثیر توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و ساختمان‌ها در مجاورت تاج، پای و روی شیب پرداخته است. در مطالعه حاضر، با استفاده از نرم افزار MIDAS GTS NX با انجام تحلیل عددی تأثیر زاویه شیب بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و تحلیل اندرکنش توپوگرافی_خاک_سازه بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان مجاور شیب مورد توجه قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی، مطالعات و بررسی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های قرارگرفته در مجاورت شیب را وسیع‌تر کرده و در اختیار طراحان قرار داده که می‌توان با شناخت آن طرح ایمن و مطمئنی را ارائه دهند.

ناهمگونی توپوگرافی سطح یا عمق می‌تواند اثرات قابل توجهی بر رکوردهای زلزله و آسیب‌های ایجاد شده داشته باشد. اغلب در مورد زلزله‌های مخرب گزارش شده است که در مناطق ناهموار، سازه‌های واقع در بالای تپه‌ها در مقایسه با سازه‌های مشابه خارج از منطقه تپه، خسارات بیشتری را متحمل می‌شوند (Gazetas et al., 2002). بنابراین می‌توان به تأثیر توپوگرافی شیب بر افزایش تغییر مکان، افزایش پاسخ شتاب و افزایش برش پایه اشاره کرد. به دلیل مطالعه تحلیلی پیچیده و هزینه‌بردار بودن تعیین اندازه‌گیری داده‌های صحرایی در زمینه توپوگرافی شیب، این مسئله کمتر مورد توجه قرار گرفته است. تا اینکه در اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی اهمیت مطالعه این نوع توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای زمین مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. با مطالعه زلزله‌های رخ داده در گذشته، به تأثیر بی‌نظمی‌های توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و آسیب‌های جدی ناشی از آن خواهیم رسید. از زلزله‌های مخربی که تأثیر این نوع توپوگرافی در آن‌ها مشهود بوده است می‌توان به Chile Beagle Canal-1985 ، Athens Greece-1999 ، Narrows Whittier- 1987 ، Aegion Greece-1995، زلزله ۶/۴ ریشتری سرپل ذهاب در سال ۲۰۱۷ در کرمانشاه و زلزله‌ی قهرمان ماراش ترکیه در سال ۲۰۲۳ با بزرگای ۷/۷ و بیشینه شتاب نزدیک به ۲g، اشاره نمود. زلزله‌ها قابل پیش‌بینی نمی‌باشند و این موضوع به عنوان یک پدیده‌ی طبیعی پذیرفته شده است، اما آنچه که باعث ایجاد خسارت و تلفات جانی می‌شود عدم رعایت نکات فنی، در ساخت‌وساز ساختمان‌ها می‌باشد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی سطح آزاد و سیستم خاک_سازه به شدت تحت تأثیر شکل توپوگرافی، مشخصات مربوط به جنس خاک محل (پلاستیسیته، مدول برشی، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) می‌باشند و پارامترهایی از جمله محل قرارگیری سازه در مجاورت شیب، فاصله سازه از تاج شیب، زاویه و ارتفاع شیب، فرکانس

بررسی تأثیر زاویه شیب بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها

با در نظر گرفتن تجربه‌های به‌دست‌آمده از زلزله‌های گذشته و مطالعات میدانی کاملاً واضح است که ناهمگونی‌های توپوگرافی چه به صورت سطحی و چه به صورت عمقی، اثرات قابل ملاحظه‌ای بر روی رکوردهای ثبت شده بر اثر زلزله و خسارات وارده ایفا می‌کند. توپوگرافی غیرمتعارف و هندسه حوزه‌ی آبرفتی مسئله‌ی پیچیده‌ای می‌باشد که اثرات آن بر حرکات زمین بسیار مهم است. شاید بهترین مثال مشهود از اثرات توپوگرافی توسط یک لرزه‌نگار که بر روی پایه سد Pacoima در جنوب کالیفرنیا نصب شده، ثبت گردیده است. لرزه‌نگار سد Pacoima شتاب‌های افقی ماکزیمم حدود $1/25g$ در هر دو جهت عمود بر هم در زلزله ۱۹۷۱ سان فرناندو ($M_L=6/4$) را ثبت نمود. مقادیر ثبت شده به میزان قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از حد انتظار برای زلزله‌ای با این بزرگی بود. لرزه‌نگار مذکور در تاج یک تپه سنگی باریک در مجاورت سد نصب شده بود (Hudson and Trifunac, 1971). در مطالعات انجام‌شده توسط محققین گذشته در زمینه تأثیرات زاویه شیب بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها توپوگرافی شیب در مقایسه با توپوگرافی‌های تپه‌ای و دره‌ای شکل کمتر مورد توجه قرار گرفته است بطوریکه در اواخر دهه ۱۹۶۰ اهمیت این نوع توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای زمین مورد توجه قرار گرفت که در ادامه به چند مورد از پرداخته می‌شود. مطالعات داکال (Dhokal, 2004) با فرض رفتار الاستوپلاستیک کامل با معیار تسلیم موهر-کولمب و بر اساس روش المان محدود به وسیله نرم‌افزار FLAC 2D تحت تحریک موج هارمونیک سینوسی با فرکانس‌های مختلف به مطالعه توپوگرافی شیب پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که با بزرگ‌تر شدن زاویه شیب از زاویه اصطکاک داخلی خاک، پاسخ در سطح زمین نامنظم می‌شود و در

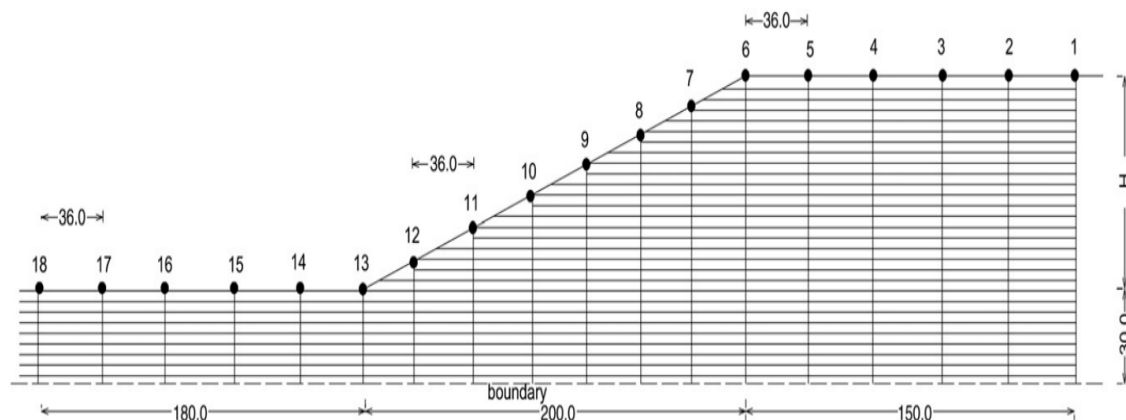
شیب‌های تندتر شاهد نامنظمی‌های شدیدتر در پاسخ سطح زمین مجاور شیب هستیم.

مطالعات دی فیرو (Di Firor, 2010) پاسخ لرزه‌ای توپوگرافی شیب را با تغییرات زاویه و با استفاده از مدل‌سازی عددی با برنامه المان محدود مورد بررسی قرار داده است. شکل (۱) و (۲) به ترتیب مدل شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن را با در نظر گرفتن زوایای مختلف برای شیب‌ها نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد حداکثر بزرگنمایی در تاج شیب بیشترین مقدار را نشان می‌دهد. در شکل مذکور شیب‌ها را سه بخش طبقه بندی گردیده است. CZ ناحیه تاج شیب که شامل نقاط گره‌ی ۳ تا ۷ است، SZ نواحی روی شیب که محدوده نقاط گره‌ی ۸ تا ۱۱ است و در نهایت VZ که ناحیه دره بوده که شامل نقاط گره‌ی ۱۲ تا ۱۸ است. با توجه به این شکل در سمت راست نقطه گره‌ی ۳ و در چپ نقاط گره‌ی ۱۷، SA (بزرگنمایی) به یک نزدیک بوده که نشان از عدم تأثیرات توپوگرافی است. از شکل (۲) آشکار است که رفتار در ۳ ناحیه متفاوت است. ابتدا در ناحیه SZ هیچ تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد. در واقع مقدار SA از $1/4$ در شیب با زاویه 40° درجه تا مقدار $1/85$ در شیب با زاویه 10° درجه متغیر بوده که حداکثر اختلاف آن $0/45$ شده است. در ناحیه CZ شروع از مقدار $1/72$ در شیب 10° درجه تا مقدار $3/3$ برای شیب 40° درجه است. در این مورد حداکثر اختلاف $1/58$ شده است که قابل اغماض نیست. در نهایت در ناحیه VZ مقدار SA از $1/42$ برای شیب 10° درجه تا مقدار $2/2$ برای شیب 40° درجه می‌باشد.

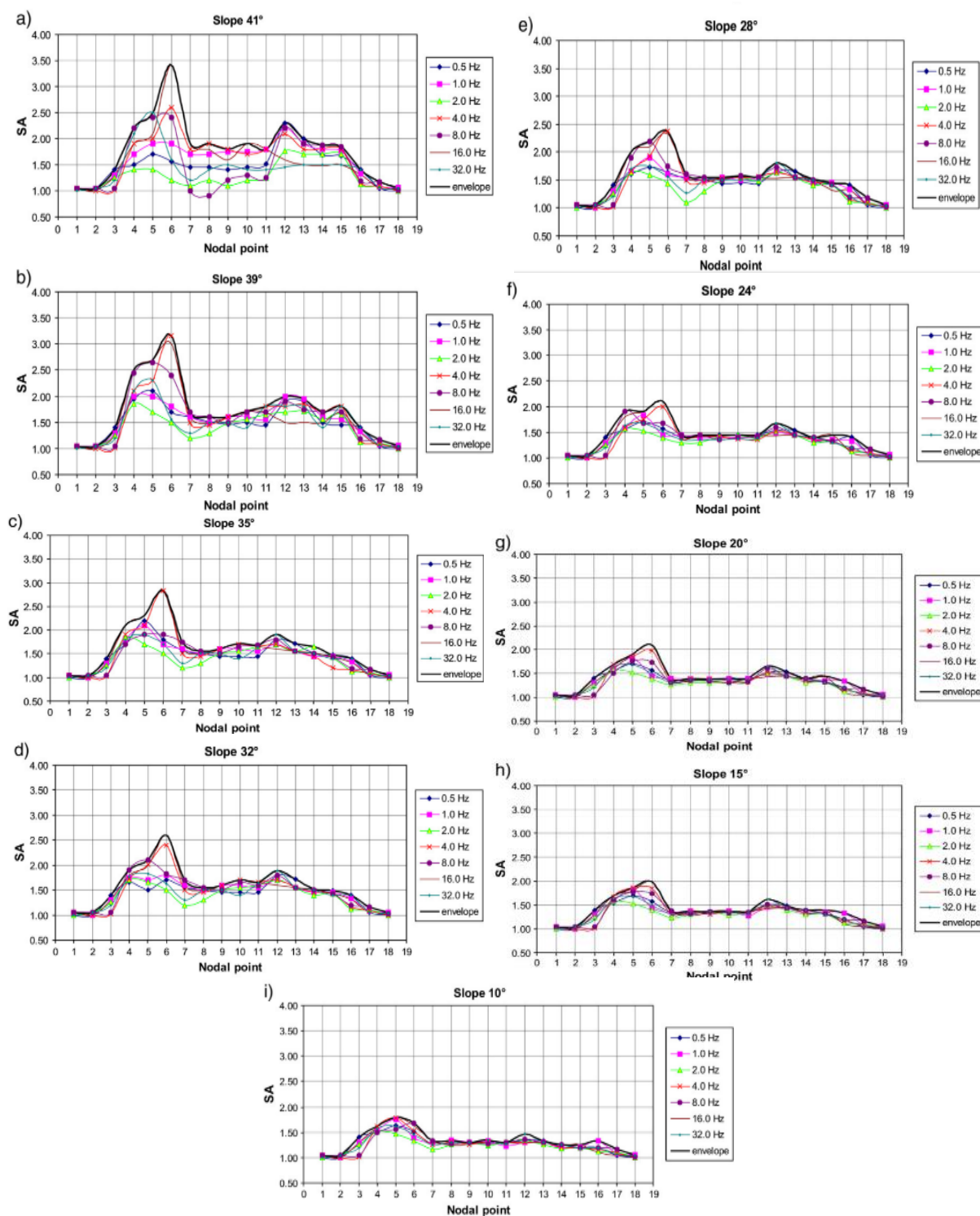
مطالعات مسعودی و همکاران (Messaudi et al., 2012) به بررسی نقش پارامترهای کلیدی توپوگرافی در بزرگنمایی حرکت‌های سطح زمین بر اساس روش المان محدود و به وسیله نرم‌افزار SHAKE تحت تحریک امواج SH پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نیز نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌های افقی و قائم در تاج شیب افزایش یافته و نیز

است که در خاک سخت ($V_s = 800 \text{ m/s}$) به علت بزرگ بودن طول موج تحریک ورودی (λ) نسبت به ارتفاع شیب (H) بزرگنمایی پاسخ ناشی از حضور توپوگرافی ناچیز است اما در خاک نرم مقدار λ بسیار کوچک شده و شاهد بزرگنمایی اثر توپوگرافی هستیم و نکته جالب توجه این است که در این حالت در دو شرایط زلزله Near field و Far

در بالا و روی شیب دست‌خوش نوسانات شدیدی در تغییر مکان‌های لرزه‌ای افقی بوده و تغییر مکان‌های قائم نیز در کنار شیب ایجاد شده است. همچنین با افزایش زاویه شیب تأثیرات توپوگرافی در افزایش تغییر مکان‌ها بیشتر می‌شود بنابراین بطور کلی می‌توان بیان کرد که در بالای شیب شاهد افزایش و در پایین آن شاهد کاهش پاسخ شتاب



شکل ۱. مدل مورد نظر جهت تحلیل لرزه‌ای (Di firor, 2010)
Fig. 1. The desired model for seismic analysis (Di firor, 2010)

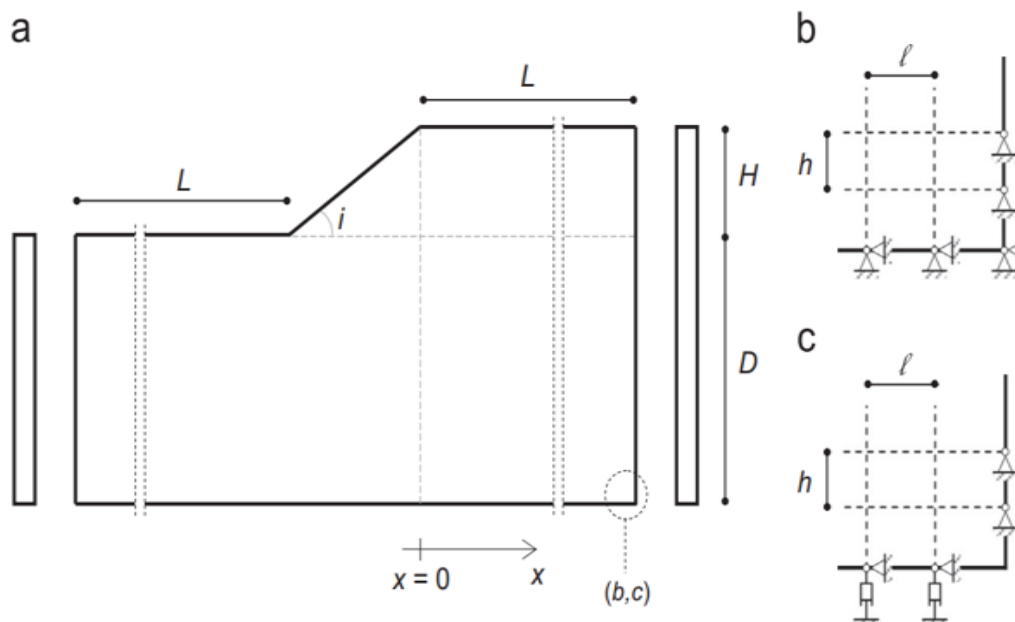


شکل ۲. تأثیر زوایای مختلف شیب بر بزرگنمایی لرزهای در نقاط گرهی سطح (Di firor, 2010)

Fig. 2. The effect of different slope angles on seismic magnification at nodal points of the surface (Di firor, 2010)

مطالعه در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج مطالعات این محققین نیز نشان می‌دهد که با افزایش زاویه شیب میزان پاسخ‌ها در سطح زمین مجاور آن افزایش می‌یابد که مشابه نتایج بدست‌آمده در مطالعات عددی برارپور و همکاران در سال ۲۰۱۶ بوده است (Bararpour et al., 2016).

ریزیتانو و همکاران (Rizzitano et al., 2014) با فرض رفتار ویسکوالاستیک و خطی معادل تحت تحریک هارمونیک سینوسی با دامنه $0.1g$ بر اساس روش المان محدود به وسیله نرم‌افزار QUAKE/W به مطالعه رفتار لرزه‌ای توپوگرافی شیب پرداخته‌اند. مدل المان محدود به کار رفته در این



شکل ۳. (a) هندسه ی بکار رفته در دو حالت یک و دو بعدی در مطالعات (Rizzitano et al., 2014) ، (b) شرایط مرزی سنگ بستر صلب، (c) شرایط مرزی سنگ بستر ارتجاعی

Figure 3. (a) The geometry used in one- and two-dimensional scenarios in studies (Rizzitano et al., 2014), (b) boundary conditions of rigid bedrock, (c) boundary conditions of elastic bedrock

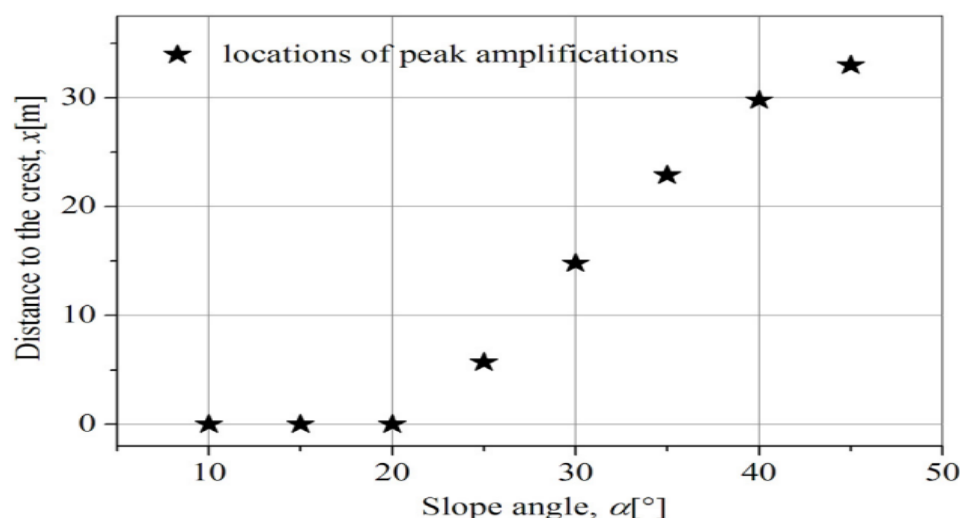
تاریخچه زمانی تحریک با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS محاسبه می‌شود. سازه‌های مورد مطالعه شامل سه نوع مدل (۶، ۹ و ۱۲ طبقه) بوده و به صورت سازه‌های قاب خمشی فولادی طراحی شده‌اند. مسئله پیچیده برهمکنش توپوگرافی دینامیکی _خاک_ سازه به دقت شبیه‌سازی شده است. در مدل‌سازی عددی، مدل‌های غیرخطی الاستیک-پلاستیک و سه خطی سینماتیکی به ترتیب برای خاک سیمانی و عناصر سازه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که رفتار لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی فولادی در مجاورت شیب تحت تأثیر دو عامل سختی جانبی شیب و امواج بازتابی از سطح شیب

بر اساس بررسی‌های عددی ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2018) بر روی توپوگرافی شیب با رفتار ویسکوالاستیک خاک مشاهده گردیده است که حداکثر بزرگنمایی شتاب در شیبی با زاویه $32/9$ درجه ایجاد می‌شود. مطابق این مطالعه، همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، زاویه شیب تا $22/2$ درجه تأثیری بر محل حداکثر بزرگنمایی نداشته و برای شیب‌هایی با زوایای بزرگ‌تر، محل حداکثر بزرگنمایی تغییر می‌یابد.

عرفانی و همکاران (Erfani et al., 2019) با در نظر گرفتن ویژگی‌های غیرخطی خاک و پاسخ لرزه‌ای غیر ارتجاعی سازه‌ها، اثرات توپوگرافی شیب بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها تحت

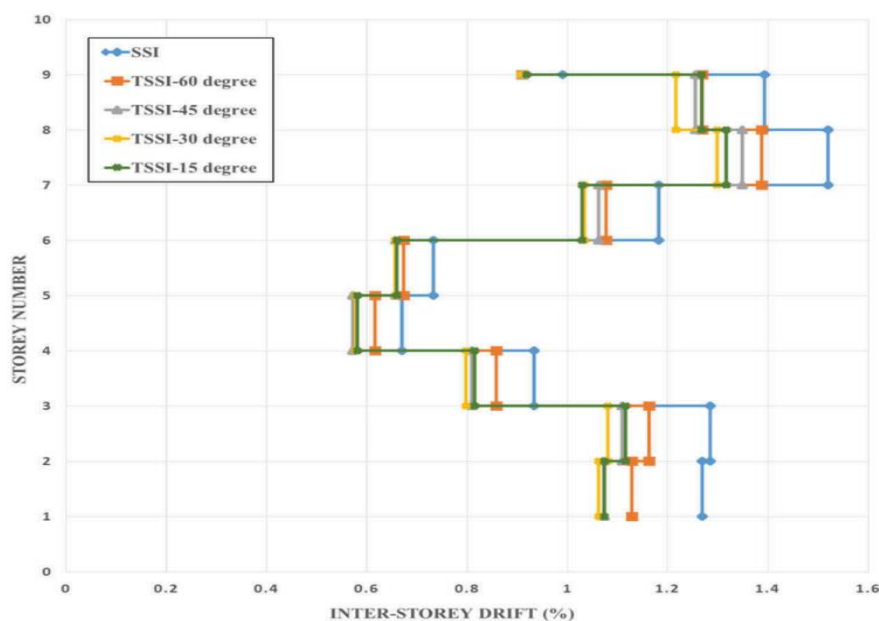
زاویه شیب به دلیل کاهش سختی جانبی شیب، مقدار جابجایی افزایش می‌یابد که این رفتار مطابق با رفتار مطالعات قبلی می‌باشد.

می‌باشد و با افزایش فاصله از تاج، به دلیل کاهش اثر موج بازتابی از سطح شیب، نقش توپوگرافی در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها کاهش می‌یابد. شکل (۵) نشان می‌دهد که با افزایش



شکل ۴. تأثیر زاویه شیب بر محل حداکثر بزرگنمایی شتاب (Zhang et al., 2018)

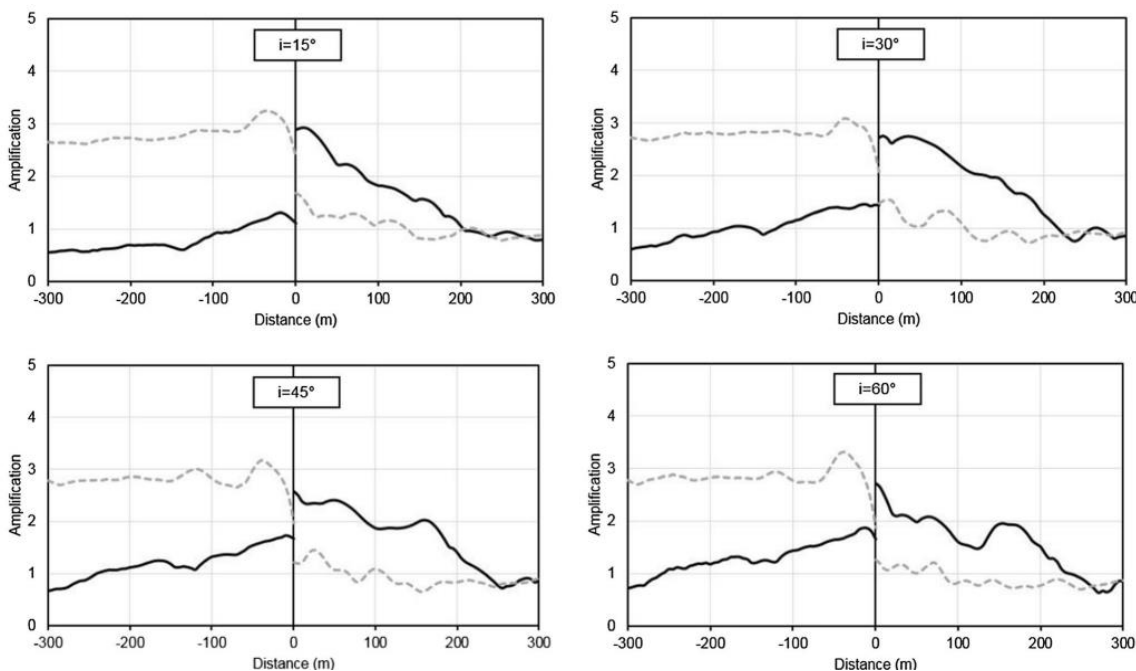
Fig. 4. The influence of the tilt angle on the location of the maximum magnification of the acceleration (Zhang et al., 2018)



شکل ۵. تأثیر زاویه شیب بر میانگین نتایج حداکثر رانش بین طبقاتی در سیستم‌های TSSI و SSI (Erfani et al., 2019)

Fig. 5. The influence of the slope angle on the average results of maximum drift between floors in TSSI and SSI systems (Erfani et al., 2019)

ترتیب در محدوده ۱-۳/۵ و ۳-۱/۵ خواهد بود. بررسی زاویه شیب نشان داده است که نتایج مربوط به سطح مجاور شیب در خاک نوع D بیشتر از خاک نوع C است. در مقابل، نتایج مربوط به سطح مجاور شیب پنجه در خاک نوع C است. تغییرات ضریب تقویت تحت تأثیر زوایای شیب مختلف در تاج شیب و خاک‌های نوع C و D به ترتیب در محدوده ۱/۱۹-۱/۶۴ و ۲/۶۵-۲/۹۲ بوده است. روند فوق در شیب پنجه و خاک‌های تیپ C و D به ترتیب در محدوده ۱/۹-۲/۳۷ و ۱/۱۹-۱/۶۸ بوده است. در شکل (۶) تأثیر زاویه شیب را در این مطالعه نشان داده است (Shabani et al., 2020).



شکل ۶. تأثیر زاویه شیب بر ضریب تقویت شتاب (خط توپر: خاک نوع D، خط چین: خاک نوع C) (Shabani et al., 2020)
Fig. 6. The influence of the slope angle on the acceleration amplification factor (solid line: soil type D, dashed line: soil type C) (Shabani et al., 2020)

تجربی، عدم دسترسی به روابط تحلیلی برای اکثر پروژه‌ها و هزینه اجرایی بالا در روش‌های صحرایی و آزمایشگاهی می‌تواند به عنوان یک روش کاربردی برای درک رفتار خاک به شرط شبیه‌سازی درست مسئله مطرح گردد. در این

مطالعات شعبانی و همکاران (Shabani et al., 2020, 2021) اثر توپوگرافی شیب را با در نظر گرفتن رفتار واقعی (الاستوپلاستیک) مواد و اثرات افزایش سختی با عمق بر پاسخ سطح زمین با استفاده از تحلیل عددی و روش مدل‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار داده است. نتایج مطالعه به عنوان ضریب تقویت شتاب ارائه شده است، که نسبت حداکثر شتاب زمین 2D به حداکثر شتاب زمین 1D است. با توجه به پارامترهای ارزیابی شده، نواحی تحت تأثیر از توپوگرافی در انواع زمین متراکم و متوسط به ترتیب به $x/H = 1/5$ و $x/H = 0.67$ تاج می‌رسد. در این شرایط، ضریب تقویت شتاب برای انواع زمین متراکم و متوسط به

تحلیل‌های عددی

معرفی نرم‌افزار مورد استفاده در تحقیق حاضر

مدل‌سازی‌های عددی به علت منحصر به فرد بودن شرایط در هر پروژه ژئوتکنیکی، عدم برآورد شرایط خاص در روابط

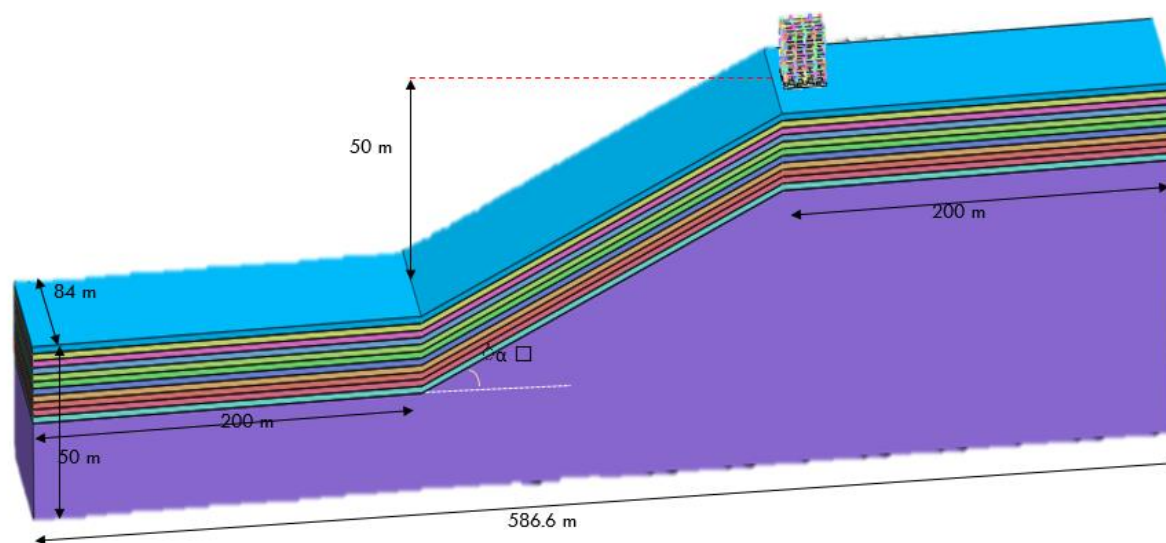
واقع در فاصله‌ی ۵ متری از تاج شیب در چند زاویه متفاوت مدل‌سازی و مورد استفاده قرار گرفته است. در اکثر مطالعات پیشین از رفتار خطی مصالح در بررسی تحلیل لرزه‌ای توپوگرافی شیب استفاده شده است. به دلیل اهمیت رفتار غیرخطی خاک طی زمین‌لرزه در پاسخ لرزه‌ای زمین و با توجه به اینکه رفتار غیرخطی مصالح در زمان زلزله نتایج واقع‌بینانه‌تری را با توجه به کرنش اعمالی ایجاد می‌کند، از این‌رو در این مطالعه با استفاده از مدل رفتاری خاک سخت‌شونده با سختی کرنش‌های کوچک (HSS) تحلیل غیرخطی توپوگرافی شیب مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات خاک استفاده شده در تحلیل حاضر با توجه به مشخصات موجود از روابط همبستگی ارائه شده در مطالعه برینگریو و همکاران (Brinkgreve et al., 2010) برای خاک ماسه‌ای، انتخاب شده است. برای تحریک ورودی از رکورد زلزله لوما پریا (Loma Prieta) مطابق شکل (۸) با حداکثر دامنه شتاب نزدیک $0.25g$ استفاده شده است.

تحقیق از نرم‌افزار اجزا محدود MIDAS GTS NX 2022 استفاده شده است. از قابلیت‌ها و امتیازات این نرم‌افزار نسبت به سایر نرم‌افزارها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. مدل‌های رفتاری جامع و قوی
۲. گرافیک فوق‌العاده و رابط کاربری نه‌چندان دشوار
۳. عدم نیاز به ساده‌سازی مسائل ژئوتکنیکی و تطبیق مدل با شرایط واقعی
۴. پارامترهای اندرکنش قدرتمند
۵. سرعت تحلیل بالا و مدیریت خوب حافظه

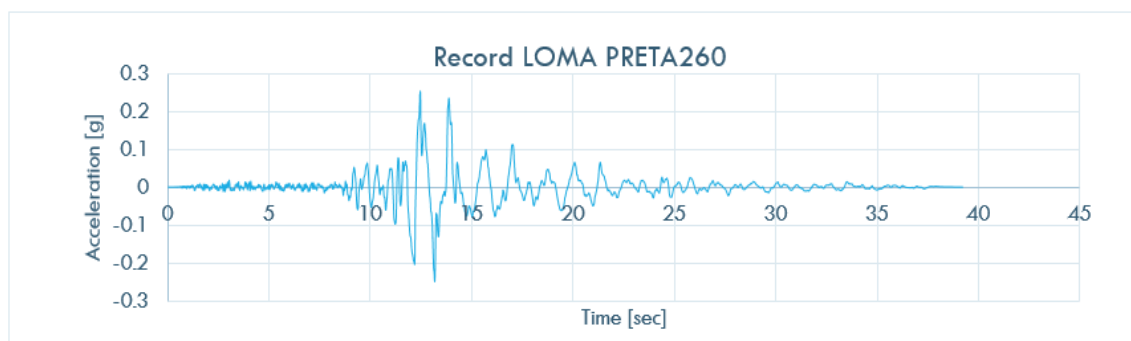
برنامه تحلیل‌های عددی

در مطالعه‌ی حاضر ابتدا با تحلیل‌های 3D تأثیر توپوگرافی شیب بر پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین مجاور تاج شیب بررسی شد و در ادامه نیز تأثیرات SSI و TSSI بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. در مطالعه حاضر یک ساختمان ۵ طبقه بتنی با مدل رفتاری الاستیک شکل (۷)



شکل ۷. مدل پایه برای تحلیل‌های انجام شده در تحقیق حاضر

Fig. 7. The basic model for the analysis performed in the present research



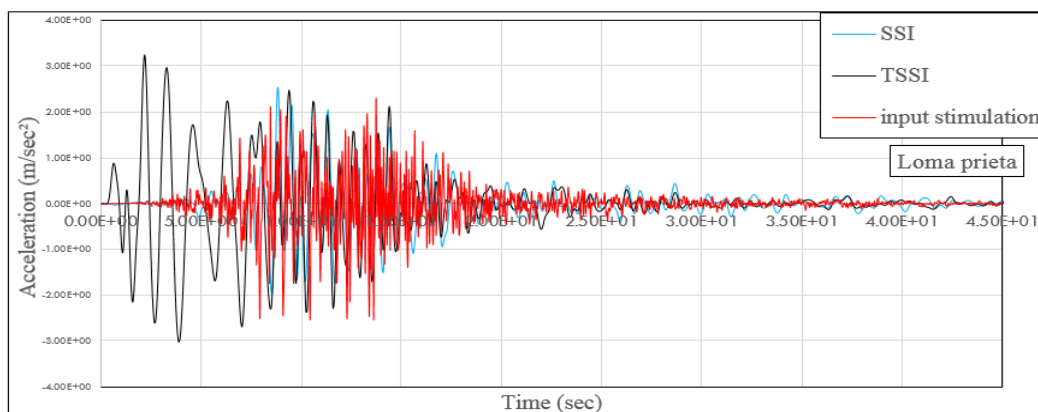
شکل ۸. رکورد زلزله لوما پریا ۱۹۸۹ Loma Prieta, 1989

Fig. 8. Loma Prieta earthquake record, 1989

مشکل بوده است، از این رو برای مدل‌سازی فرض گردیده است که مدل مورد نظر از عمق ۲۵ متری به بعد از نوع بسترسنگی و با سرعت موج برشی 1000 m/s بوده است. مطابق مطالعه خان بابازاده و آیيسان (2014) (Khanbabazadeh and Iyisan) بستر سنگی با مدل ویسکوالاستیک مدل‌سازی شده است همچنین نسبت پواسون در این تحقیق برای تمام لایه‌های خاک ۰/۳ فرض شده است. در شکل (۹) پاسخ شتاب افقی مدل با ارتفاع شیب ۵۰ متر و زاویه شیب ۱۵ درجه در تاج شیب، نقطه‌ای در سطح زمین بدون حضور شیب و تحریک ورودی زلزله که در بستر مدل اعمال شده است، نشان داده شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که حداکثر مقدار شتاب در حالت TSSI، حالت SSI و تحریک ورودی بستر به ترتیب ۳/۲۵، ۲/۵۴ و ۲/۳۱ متر بر مجذور ثانیه است. توپوگرافی شیب (TSSI) منجر به افزایش مقدار شتاب در اکثر زمان‌ها نسبت به تحریک ورودی و در حالتی که شیب وجود ندارد (SSI) شده است. تحریک ورودی به شکل امواج برشی SV به مرز پایینی مدل اعمال شده و به صورت قائم در محیط منتشر می‌شود.

مقایسه پاسخ زمین در دو حالت SSI و TSSI نسبت به تحریک ورودی زلزله

در این بخش پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مجاور شیب TSSI، حالت SSI و تحریک موج ورودی تحت رکورد زلزله‌ی Loma Prieta با پریود غالب ۰/۱۶ ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج تحریک لرزه‌ای مربوط به تحلیل‌ها در شکل (۹) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. معیار انتخاب رکورد بر اساس توصیه (2015) IBC-2800 و منطبق بر طیف شتاب خاک نوع I (سنگ بستر) است. بنا به توصیه این آیین‌نامه حداقل مدت زمان تحریک لرزه‌ای (D5-D95) ۱۰ ثانیه می‌باشد. جهت اصلاح شتاب نگاشت‌ها از یک محدوده فرکانسی استفاده گردیده است که مورد تایید نشریه (1392) ۶۲۴ و کتاب مهندسی زلزله است (Bozorgnia and Berter, 2006). محدوده فرکانسی مورد استفاده بین ۱/۰ تا ۱۵ هرتز می‌باشد که هر چه فرکانس امواج زلزله بیشتر باشد، شبکه المان‌های ریزتری برای تحلیل دینامیکی مورد نیاز خواهد بود که در عمل منجر به افزایش حجم و زمان محاسبات خواهد شد. با توجه به اینکه حفاری با دستگاه‌های مورد استفاده در عمق‌های بیش از ۲۵ متر بسیار

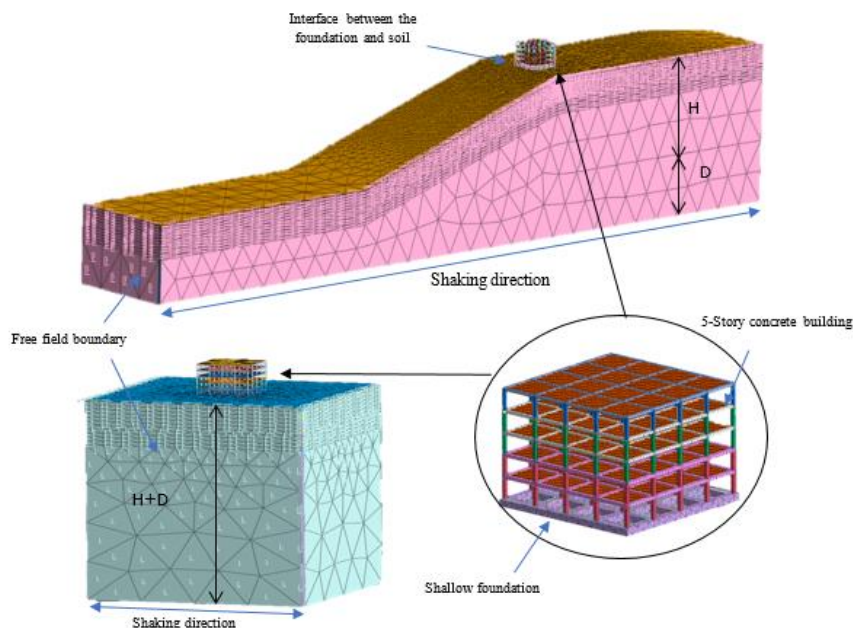


شکل ۹. مقایسه‌ی پاسخ شتاب در حالت‌های SSI، TSSI و تحریک ورودی، تحت رکورد زلزله Loma Prieta، 1989
 Fig. 9. Comparison of acceleration response in SSI, TSSI and input excitation modes, under Loma Prieta earthquake record, 1989

نتایج تحلیل‌های عددی

تحلیل سازه‌های قرارگرفته در مجاورت شیب بسیار حائز اهمیت می‌باشد و زاویه توپوگرافی شیب به عنوان یک پارامتر هندسی، پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های در مجاورت شیب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در تحقیق حاضر با توجه به موقعیت

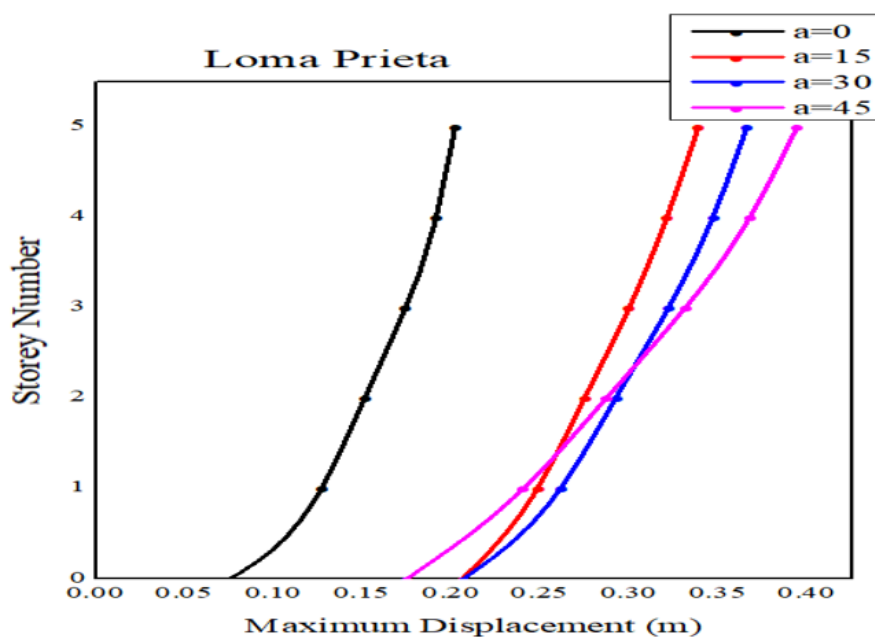
قرارگیری ساختمان در زاویه شیب‌های متفاوت با انتخاب مقادیر زاویه شیب (α) ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه و زاویه شیب صفر که همان شرایط SSI می‌باشد، به مطالعه تأثیر این پارامتر بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها در مجاورت شیب پرداخته می‌شود که در شکل (۱۰) هندسه تحلیل‌های انجام شده نشان داده شده است.



شکل ۱۰. مدل‌سازی‌های انجام‌شده در شرایط TSSI، SSI
 Fig. 10. Modeling done in TSSI, SSI conditions

TSSI کمتر می‌باشد. وقتی زاویه شیب از حالت افقی به ۱۵ درجه افزایش می‌یابد، حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات ۴۰ درصد بیشتر می‌شود. این افزایش برای شیب ۳۰ درجه ۴۴ درصد و برای شیب ۴۵ درجه ۴۸ درصد است.

تأثیر تغییرات زاویه‌ی شیب بر حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات در شکل (۱۱) ارائه شده است که کمترین میزان تأثیر تغییر مکان جانبی مربوط به حالت SSI (زاویه شیب صفر درجه) می‌باشد. با بررسی نتایج تحلیل‌ها، به طور میانگین ۴۴ درصد تغییر مکان جانبی در حالت SSI نسبت به حالت



شکل ۱۱. تأثیر زاویه شیب (a) بر حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات

Fig. 11. Influence of inclination angle (a) on maximum lateral displacement of floors

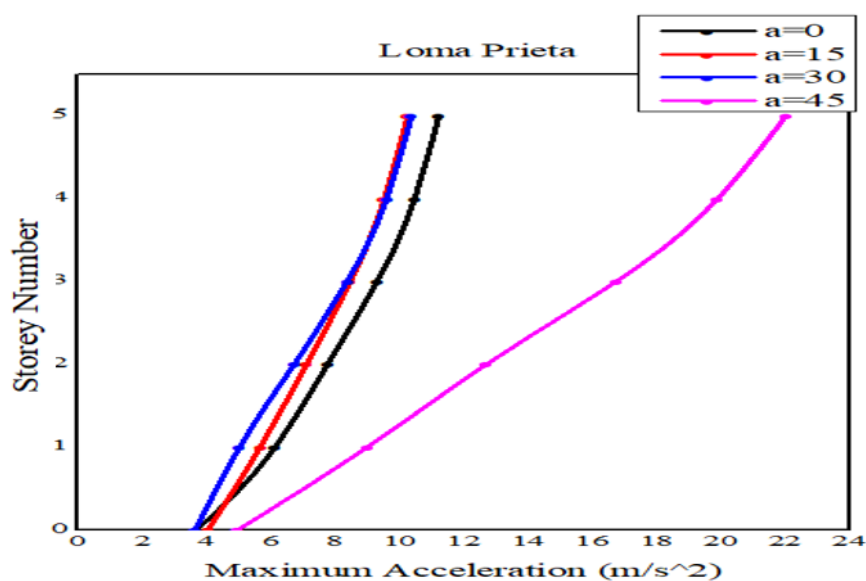
در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) تأثیر زاویه شیب بر مقادیر برش پایه طبقات و نسبت دریافت طبقات ارائه شده است. وقتی زاویه شیب از حالت افقی به ۱۵ درجه افزایش می‌یابد، حداکثر برش پایه ۱ درصد بیشتر می‌شود. این تغییر برای شیب ۳۰ درجه ۱۰ درصد کاهش و برای شیب ۴۵ درجه ۵۱ درصد افزایش داشته‌است.

در منحنی شکل (۱۴) حداکثر نسبت دریافت طبقات با افزایش زاویه شیب از حالت افقی به ۱۵ درجه، ۱۶ درصد کمتر می‌شود. در حالیکه برای شیب ۳۰ درجه ۵ درصد و

با توجه به شکل (۱۲) حداکثر شتاب افقی (PHA) با تغییر زاویه شیب از صفر به ۴۵ درجه به طور میانگین ۴۹ درصد کمتر گردیده است. زمانی که زاویه شیب از حالت افقی به ۱۵ درجه افزایش می‌یابد، حداکثر شتاب افقی طبقات (PHA) ۸ درصد بیشتر می‌شود. این افزایش برای شیب ۳۰ درجه ۷ درصد و برای شیب ۴۵ درجه ۴۹ درصد است. میزان افزایش تغییر مکان جانبی و شتاب افقی به خصوص در طبقات بالای ساختمان دیده می‌شود و طبقات پایین به میزان کمتری از افزایش زاویه شیب تأثیر می‌پذیرند.

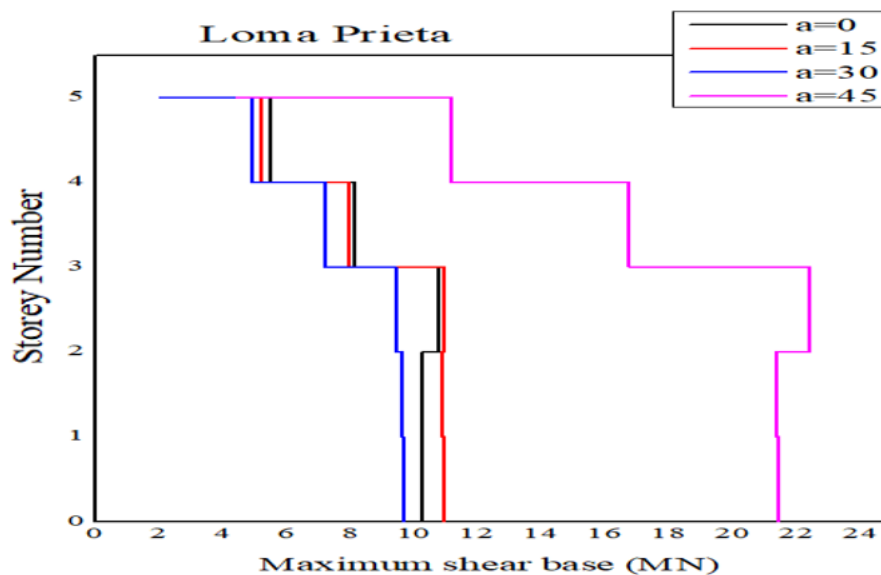
پایه و نسبت دریافت طبقات شده است درحالیکه این افزایش
برای مقادیر برش پایه درحالتی که زاویه شیب ۳۰ درجه
وجود نداشته است.

برای شیب ۴۵ درجه ۲۱ درصد افزایش داشته است، که این
مقادیر کمتر از مقادیر مجاز در آیین نامه ۲۸۰۰ می باشند.
در نتیجه افزایش زاویه شیب، به طور میانگین باعث افزایش
تغییر مکان جانبی طبقات، حداکثر شتاب افقی، حداکثر برش



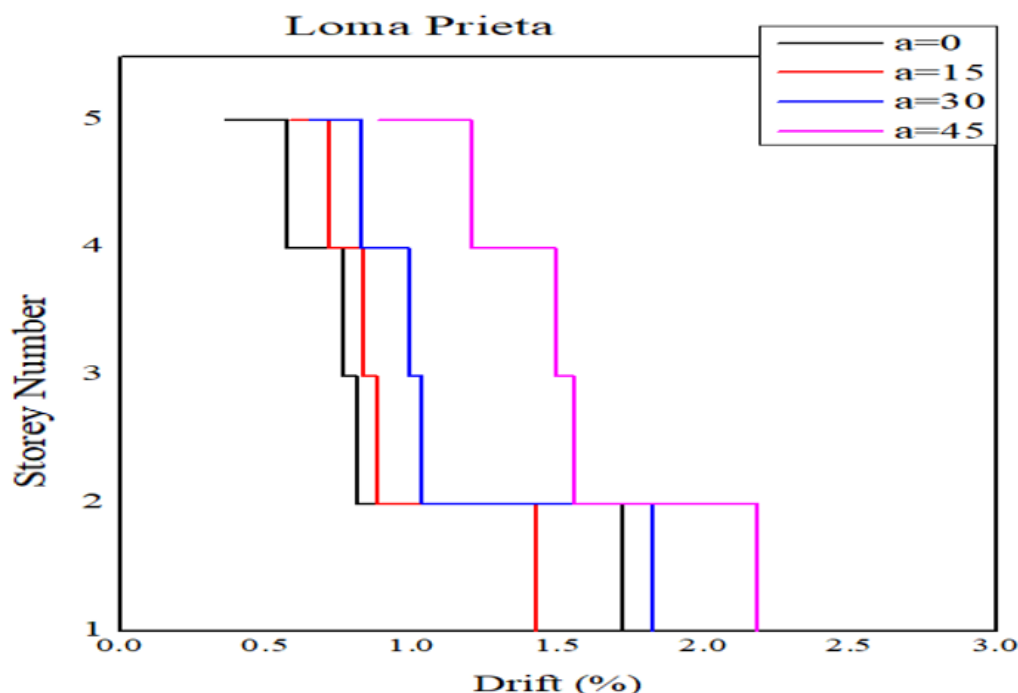
شکل ۱۲. تأثیر زاویه شیب (a) بر حداکثر شتاب جانبی طبقات

Fig. 12. The influence of the slope angle (a) on the maximum lateral acceleration of floors



شکل ۱۳. تأثیر زاویه شیب (a) بر حداکثر برش پایه طبقات

Fig. 13. The influence of the slope angle (a) on the maximum shear of the base of the floors



شکل ۱۴. تأثیر زاویه شیب (a) بر نسبت دررفت طبقات

Fig. 14. The influence of the slope angle (a) on the drift ratio of floors

نتایج و بحث

مجاور تاج شیب در زاویه شیب‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه مورد

بررسی قرار گرفت.

در منحنی پاسخ شتاب در شکل (۹)، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مجاور شیب TSSI، حالت SSI و تحریک موج ورودی با یکدیگر مقایسه شده‌اند، نتایج نشان می‌دهد مقادیر پاسخ شتاب در مدت زمان بسیار کوتاهی (کمتر از ۰/۰۲ ثانیه) مقدار قابل توجهی داشته‌است. معمولاً وقوع شتاب‌های بالا در مدت زمان بسیار کوتاه نمی‌تواند اثرات مخربی بر روی سازه ایجاد کند. بنابراین آیین‌نامه‌ها چنین شتاب‌هایی که در مدت زمان بسیار کوتاهی ایجاد می‌شوند، معیار طراحی قرار نمی‌دهند و از طیف‌های هموار شده استفاده می‌کنند. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل انجام شده، مقدار تشدید در حالت TSSI بیشتر از حالت SSI نسبت به تحریک موج ورودی می‌باشد. در این ارقام، افزایش شتاب افقی تحت اثرات

باوجود مطالعات گسترده محققین گذشته بر توپوگرافی شیب، هنوز این مسئله نیاز به بررسی بیشتر و تأثیرات آن بر روی زمین دارد. اکثر مطالعات انجام گرفته در این زمینه با فرضیات ساده‌ای همراه بوده است، و در آیین‌نامه‌ها به طور کامل به اهمیت این موضوع پرداخته نشده است. در مطالعه‌ی حاضر، مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود MIDAS GTS NX برای سیستم‌های توپوگرافی_خاک_سازه (TSSI) و خاک_سازه (SSI) تحت رکورد زلزله Loma Prieta انجام گرفته است. ابتدا با تحلیل‌های 3D پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین در حالت SSI، TSSI و تحریک موج ورودی با یکدیگر مقایسه شدند سپس تأثیر توپوگرافی شیب بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان ۵ طبقه

شده در روی تاج نسبت به حالت زمین مسطح بیشتر بوده است و تغییر زاویه شیب، پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های قرارگرفته در مجاورت شیب را تحت تأثیر قرارمی‌دهد. با بررسی نتایج تحلیل‌ها، تغییر مکان جانبی در حالت SSI به‌طور میانگین ۴۴ درصد کمتر از حالت TSSI می‌باشد. همچنین حداکثر شتاب افقی (PHA) در حالت SSI به‌طور میانگین ۴۹ درصد کمتر از حالت TSSI گردیده است. میزان افزایش تغییر مکان جانبی و شتاب افقی به خصوص در طبقات بالای ساختمان دیده می‌شود و طبقات پایین به میزان کمتری از افزایش زاویه شیب تأثیر می‌پذیرند. مقدار حداکثر برش پایه و حداکثر نسبت دررفت طبقات در حالت TSSI، به ترتیب ۵۱ درصد و ۲۱ درصد بیشتر از حالت SSI می‌باشد. در مطالعات انجام شده توسط محققین دیگر اهمیت این موضوع در شرایط مختلف آورده شده است اما هنوز در بیشتر آیین‌نامه‌های مدرن، اجرایی نشده است. بنابراین توصیه می‌گردد که در طراحی ساختمان‌ها در مجاورت شیب، تحلیل دینامیکی را با در نظر گرفتن اثرات توپوگرافی شیب (TSSI) با مقادیر زاویه شیب مختلف، انجام شود.

References

- Assimaki, D., Kausel, E., 2007. Modified topographic amplification factors for a single-faced slope due to kinematic soil-structure interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(11): 1414-1431.
- Assimaki, D., Kausel, E., Gazetas, G., 2005. Wave propagation and soil-structure interaction on a cliff crest during the 1999 Athens Earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(7): 513-527.
- Bararpour, M., Janalizade, A., Tavakoli, H. R., 2016. The Effect of 2D Slope and Valley on Seismic Site Response. *Arabian Journal of Geosciences* 9 (2): 93.
- Bouckovalas, G. D., Papadimitriou, A. G., 2005. Numerical Evaluation of Slope Topography

توپوگرافی شیب مجاور تاج بیشتر از حالت زمین مسطح بوده است و مقدار بزرگنمایی شتاب افقی در حالت TSSI، ۱/۲۷ برابر حالت SSI است. در ادامه نتایج ارائه شده در تحقیق حاضر نشان می‌دهند، مقادیر حداکثر تغییر مکان جانبی، شتاب افقی، برش پایه طبقات و دررفت طبقات در حالت حضور شیب متفاوت از حالتی است که شیب حضور ندارد. همچنین افزایش زاویه شیب، به‌طور میانگین باعث افزایش تغییر مکان جانبی طبقات، حداکثر شتاب افقی، حداکثر برش پایه و نسبت دررفت طبقات شده است. این افزایش برای مقادیر برش پایه درحالتی که زاویه شیب ۳۰ درجه تحت رکورد Loma Prieta می‌باشد، وجود نداشته‌است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که اثر توپوگرافی می‌تواند پاسخ ساختمان مجاور تاج شیب را در مقایسه با پاسخ ساختمان بر روی زمین مسطح تشدید کند.

نتیجه‌گیری

باتوجه به نتایج بدست‌آمده و مقایسه آن‌ها در دو حالت TSSI و SSI در تحقیق حاضر، می‌توان به‌طور کلی در نظرگرفت که تأثیرات توپوگرافی شیب بر بزرگنمایی ایجاد

- Effects on Seismic Ground Motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25: 547-558.
- Bozorgnia, Y., Bertero, V.V., 2004. *Earthquake Engineering, From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*, CRC press.
- Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., Engin, H.K., 2010. Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands. *Numerical methods in geotechnical engineering*, pp: 137-142.
- Dhaka, S., 2004. Empirical relations for earthquake response of slopes. Master thesis in Civil Engineering, International Institute for Geoinformation Science and Earthquake observatuion, Univ of Tribhuvan, Netherlands, 122p.
- Di Fiore, V., 2010. Seismic site amplification induced by topographic irregularity: Results of a

- numerical analysis on 2D synthetic models. *Engineering Geology*, 114(3): 109-115.
- Erfani, A., Ghanbari, A., Massumi, A., 2019. Seismic Behaviour of Structures Adjacent to Slope by Considering SSI Effects in Cemented Soil Mediums. *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- Gazetas, G., Kallou, P. V., Psarropoulos, P. N., 2002. Topography and soil effects in the Ms 5/9 Parnitha (Athens) earthquake: the case of Adames. *Natural Hazards*, 27(1-2): 133-169.
- Ghanbari, A., Hosseini, Sh., 1395. Basics of soil-structure interaction. Kharazmi University, Tehran, 506p.
- Khanbabazadeh, H., Iyisan, R., 2014. A numerical study on the 2D behavior of the single and layered clayey basins. *Bulletin of earthquake engineering*, 12(4): 1515-1536.
- Messaoudi, A., Laouami, N., Mezouer, N., 2012. Topographic effects on the seismic responses of slopes, 15 WCEE.
- Rizzitano, S., Cascone, E., Biondi, G., 2014. Coupling of Topographic and Stratigraphic Effects on Seismic Response of Slopes through 2D Linear and Equivalent Linear Analyses. *Soil dynamics and earthquake engineering* 67: 66-84.
- Rizzitano, S., Cascone, E., Biondi, G., 2014. Coupling of Topographic and Stratigraphic Effects on Seismic Response of Slopes through 2D Linear and Equivalent Linear Analyses. *Soil dynamics and earthquake engineering* 67: 66-84.
- Shabani, M.J., Ghanbari, A., 2020. Design Curves for Estimation of Amplification Factor in the Slope Topography Considering Nonlinear Behavior of Soil. *Indian Geotech J.*
- Shabani, M.J., Shamsi, M., Ghanbari, A., 2021. Slope topography effect on the seismic response of mid-rise buildings considering topography-soil-structure interaction. *Earthquakes and Structures*, Vol. 20, No. 2 (2021): 187-200.
- Trifunac, M.D., Hudson, D.E., 1971. Analysis of the Pacoima dam accelerogram—San Fernando, California, earthquake of 1971. *Bulletin of the Seismological Society of America* (1971) 61 (5): 1393–1411.
- Tripe, R., Kontoe, S., Wong, T. K. C., 2013. Slope topography effects on ground motion in the presence of deep soil layers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50: 72-84.
- Zhang, Z., Fleurisson, J. A., Pellet, F., 2018. The Effects of Slope Topography on Acceleration Amplification and Interaction between Slope Topography and Seismic Input Motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 113: 420-431.