

مقایسه اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و زلزله‌های حوزه دور بر پاسخ لرزه‌ای سیستم خاک-شمع-سازه

سعید عباسی کرافشانی^۱، علیرضا اردکانی^{۲*}، منصور یخچالیان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
۲و۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

حرکات لرزه‌ای ثبت شده در مناطق نزدیک گسل که جهت گسیختگی گسل به سمت آنها می‌باشد با حرکات مشاهده شده در مناطق دور از گسل بسیار متفاوت هستند. در این تحقیق برای مقایسه اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و زلزله‌های حوزه دور بر روی یک سیستم خاک، گروه شمع و سازه از مدل‌سازی به روش اجزاء محدود استفاده شده، و امکان رفتار غیرخطی برای سازه در مدل‌سازی لحاظ شده است. جهت مدل‌سازی خاک دانه‌ای (ماسه) از مدل هایپوپلاستیک Von Wolffersdorff با در نظر گرفتن مفهوم کرنش بین‌دانه‌ای استفاده شده است. ۵ رکورد زلزله حوزه نزدیک و ۵ رکورد زلزله حوزه دور، که روی سنگ سخت ثبت شده‌اند، به مدل اعمال شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با عبور امواج زلزله از خاک، زمان تناوب اصلی لایه خاک در اثر تغییر شکل‌های غیرخطی افزایش می‌یابد. همچنین در زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل حرکات پالس-شکل زمین، یک پالس تغییر مکان در شمع ایجاد می‌شود. در صورتی که در زلزله‌های حوزه دور به دلیل توزیع یکنواخت‌تر انرژی در طول مدت زلزله، ماهیت پاسخ تغییر مکان شمع متفاوت است. در زلزله‌های حوزه نزدیک به ازای یک PGA^1 ثابت مقادیر تغییر مکان نسبی شمع با مقادیر PGV^2 و همچنین PGD^3 رکوردها دارای همبستگی مثبت می‌باشند، ولی در هنگام اعمال زلزله‌های حوزه دور این همبستگی دیده نمی‌شود.

کلمات کلیدی: زلزله حوزه نزدیک، زلزله حوزه دور، اندرکنش خاک-شمع-سازه، هایپوپلاستیسیته، روش اجزاء محدود

Comparison between the Effects of Near- and Far-Fault Ground Motions on the Seismic Response of a Soil-Pile-Structure System

Saeed Abbasi Karafshani¹, Alireza Ardakani^{2*}, Mansoor Yakhchalian³

1- MSc student in Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering & Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2,3- Assistant professor, Faculty of Engineering & Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

¹ حداکثر شتاب زمین (Pick Ground Acceleration)

² حداکثر سرعت زمین (Pick Ground Velocity)

³ حداکثر تغییر مکان زمین (Pick Ground Displacement)

* نویسنده مسئول: علیرضا اردکانی، a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۴/۳۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۲/۱۵

Abstract

Ground motions recorded in near-fault sites, where the rupture propagates toward the site, are significantly different from those observed in far-fault regions. In this research, finite element modeling is used to compare the effects of near- and far-fault ground motions on a system consisting of soil, pile group and structure, considering the possibility of non-linear behavior for the structure. The Von Wolffersdorff hypoplastic model with intergranular strain concept is applied for modeling of granular soil (sand). Five fault-normal near-fault ground motion records and five far-fault ground motion records, recorded on rock, are applied to the model. The results show that when seismic waves pass through the soil layer, the fundamental period of the soil layer lengthens, due to non-linear deformations. Also, in near-fault pulse-like ground motions a displacement pulse is generated in the pile response. Whereas, in the far-fault ground motions, due to the more uniform distribution of energy during the record, such pulse-like displacements are not observed in the pile response. Based on the obtained results, for a constant PGA, there are positive correlations between the values of maximum pile displacement, and PGD and PGV values of near-fault ground motion records. But such correlations are not observed in the case of far-fault ground motions.

Keywords: Near-fault ground motions, Far-fault ground motions, Soil-pile-structure interaction, Hypoplasticity, Finite element method

۱- مقدمه

رکوردهای زلزله‌های حوزه نزدیک به شدت به مکانیزم و جهت گسلش وابسته هستند. این نوع رکوردها دارای ویژگی‌هایی مانند دامنه بزرگ و زمان تناوب بلند، نسبت‌های PGV/PGA و PGD/PGA بالا، شکل طیف پاسخ غیرعادی و وجود قسمت عمده انرژی در یک یا چند پالس می‌باشند [۱]. اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها تاکنون موضوع تحقیقات بسیاری بوده است. زلزله‌های اخیر مانند Loma Prieta (1989)، Northridge (1994)، Kobe (1995) و ChiChi (1999) ویژگی‌های منحصربه‌فرد زلزله‌های مناطق نزدیک گسل را بیشتر نشان داده‌اند. حرکات لرزه‌ای که در مناطق حوزه نزدیک و در جهت گسیختگی گسل ثبت می‌شوند با حرکات مشاهده شده در مناطق دور از گسل بسیار متفاوت هستند [۲]. معمولاً فاصله‌ی کمتر از ۲۰ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله، برای ثبت نگاهت‌های حوزه نزدیک در نظر گرفته می‌شود [۲-۵]. بیشترین اثر تخریبی زلزله‌های حوزه نزدیک مربوط به پالس‌های موجود در تاریخچه زمانی سرعت حرکت زمین می‌باشد. از مهم‌ترین ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک می‌توان به اثرات جهت‌داری^۱ و حرکت پرتابی^۲ اشاره کرد [۶]. به‌طورکلی، پالس سرعت ناشی از جهت‌داری پیش‌رونده به‌صورت دوطرفه و پالس سرعت ناشی از حرکت پرتابی به‌صورت یک‌طرفه می‌باشد. این پالس‌های سرعت دوطرفه که در مؤلفه عمود بر گسل زلزله‌های حوزه نزدیک مشاهده می‌شوند مخرب‌تر از پالس‌های یک‌طرفه ناشی از حرکت پرتابی می‌باشند [۷]. جهت‌داری شامل جهت‌داری پیش‌رونده و پس‌رونده است. مطالعات انجام‌شده توسط محققین نشان می‌دهد که جهت‌داری پیش‌رونده مهم‌ترین عامل خرابی در سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل است [۶، ۷]. همچنین در تحقیقات دیگر مشخص شده است که پالس‌های زمان تناوب بلند ناشی از زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌های بلند نسبت به سازه‌های کوتاه، تأثیر بیشتری دارند [۸، ۹].

در بررسی اثرات زلزله بر روی سازه‌های متکی بر شمع، در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع-سازه از مهم‌ترین موضوعات می‌باشد. در حالت کلی اندرکنش خاک-شمع-سازه شامل دو نوع اندرکنش سینماتیکی^۳ و اینرسیال^۴ است. زمانی که اثر روسازه^۵ در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود، ممکن است حرکات پی با حرکات سطح آزاد^۶ زمین متفاوت باشند. این تفاوت به دلیل مکانیزم اندرکنش سینماتیکی است. همچنین حرکات ایجاد شده در پی به دلیل اندرکنش سینماتیکی، باعث ارتعاش سازه می‌شوند. این ارتعاش باعث ایجاد نیروی اینرسی و لنگر در پی شده، و پی و خاک اطراف آن را تحت یک بار دینامیکی اضافی قرار می‌دهد. این اثر به‌عنوان اندرکنش اینرسیال شناخته می‌شود [۱۰]. به‌رغم

¹ Directivity

² Fling step

³ Kinematic

⁴ Inertial

⁵ Superstructure

⁶ Free field

عبور امواج زلزله در طول ده‌ها کیلومتر از اعماق زمین، اغلب لایه خاک با عمق حدود ۱۰۰ متر، نقش مهمی را در تعیین مشخصات حرکت سطح زمین ایفا می‌کند. همچنین محتوای فرکانسی رکورد زلزله به وسیله شرایط محلی ساختگاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. Seed و همکاران (۱۹۷۶) نشان دادند که لایه‌های خاک نرم و عمیق حرکات با زمان تناوب بلندتر ایجاد می‌کنند [۱۱]. همچنین اندرکنش خاک-شمع-سازه جابجایی پی را افزایش می‌دهد. بر همین اساس، اثر اندرکنش خاک-شمع-سازه باید برای سازه‌هایی با زمان تناوب بالا مانند ساختمان‌های بلند و لاغر در نظر گرفته شود [۱۲]. تاکنون محققین زیادی اثر اندرکنش خاک-شمع-سازه را بررسی کرده‌اند. Bentley و همکاران (۲۰۰۰) مطالعه‌ای را روی اثرات اندرکنش سینماتیکی بر روی تحریک ورودی در سطح پی انجام دادند. در این تحقیق عوامل مختلفی نظیر جدشدگی شمع و خاک، پلاستیسیته خاک و انتشار سه‌بعدی امواج در نظر گرفته شده‌اند [۱۳]. Anandarajah و همکاران (۲۰۰۱) یک مدل ساده المان محدود برای آنالیز اندرکنش خاک و شمع ارائه کردند. این مدل توانایی توصیف رفتار تنش-کرنش ماسه روانگرا را دارد [۱۴]. Maheshwari و همکاران (۲۰۰۴) در یک تحلیل سه‌بعدی اثر پلاستیسیته و جدشدگی شمع و خاک بر روی پاسخ دینامیکی تک شمع و گروه شمع را مطالعه کردند [۱۵]. Chau و همکاران (۲۰۰۹) اندرکنش خاک-شمع-سازه را با استفاده از آزمایش میز لرزه و مدل‌سازی عددی بررسی کردند [۱۶]. Maheshwari و همکاران (۲۰۱۱) یک مطالعه پارامتری روی اثر اندرکنش خاک-شمع-سازه انجام دادند. طبق نظر آنها رفتار غیرخطی خاک نقش مهمی بر رفتار لرزه‌ای سیستم خاک-شمع-سازه ایفا می‌کند [۱۷]. Hokmabadi و همکاران (۲۰۱۴) اثر اندرکنش خاک-شمع-سازه را روی رفتار سازه‌های نیمه‌بلند بررسی کردند. در تحقیق آنها اثر پی‌های سطحی و عمیق بر روی رفتار لرزه‌ای سازه، با استفاده از آزمایش میز لرزه و مدل‌سازی عددی بررسی شده است [۱۸].

در بررسی اندرکنش خاک-شمع-سازه شرایط ساختگاه (تأثیر رفتار خاک) باید به صورت دقیق در نظر گرفته شود. مدل‌های هایپوپلاستیک^۱ نوعی از مدل‌های رفتاری غیرخطی هستند که برای بررسی رفتار مصالح دانه‌ای به وجود آمده‌اند. ویژگی بارز مدل‌های هایپوپلاستیک سادگی آنها است. این مدل‌ها به عنوان مدل‌های با تغییرهای غیرارتجاعی شناخته می‌شوند و از هیچ‌یک از مفاهیم اضافی مانند سطح تسلیم^۲ و یا پتانسیل پلاستیک^۳ استفاده نمی‌کنند [۱۹]. باین وجود، در اکثر آنها تنش‌های سیکلی کوچک باعث ایجاد تغییرهای اضافی تجمعی تحت سیکل‌های کم دامنه تنش می‌شوند. جهت رفع این کمبود، مفهوم کرنش بین‌دانه‌ای^۴ توسط Niemunis و Herle (۱۹۹۷) معرفی شد [۲۰]. در این تحقیق از مدل هایپوپلاستیک معرفی شده توسط Von Wolffersdorff (1996) با در نظر گرفتن مفهوم کرنش بین‌دانه‌ای برای مدل‌سازی خاک دانه‌ای (ماسه) استفاده شده است [۲۰، ۲۱].

این مدل به علت در نظر گرفتن نرخ تغییرات تنش بر اساس مقادیر تنش، تخلخل و نرخ تغییرات کرنش، و همچنین استفاده از مفهوم کرنش بین‌دانه‌ای رفتار خاک‌های دانه‌ای را به صورت واقعی‌تری در نظر می‌گیرد. هدف از این تحقیق مقایسه اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و زلزله‌های حوزه دور بر پاسخ لرزه‌ای یک سیستم خاک-شمع-سازه با استفاده از مدل هایپوپلاستیک شرح داده شده در فوق می‌باشد. به این منظور، اثرات ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک شامل اثر پالس و اثر PGA، PGV، PGD و روی پاسخ سیستم بررسی و با اثرات زلزله‌های حوزه دور مقایسه می‌شوند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در زلزله‌های حوزه نزدیک به ازای یک PGA ثابت مقادیر تغییر مکان نسبی شمع با مقادیر PGV و همچنین PGD رکوردها دارای همبستگی مثبت می‌باشند، ولی در هنگام اعمال زلزله‌های حوزه دور این همبستگی دیده نمی‌شود. با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع-سازه شتاب سطح خاک در محل سازه شدیدتر از شتاب سطح آزاد خاک است. در زلزله‌های حوزه نزدیک حرکات ناگهانی پالس‌گونه باعث ایجاد برش پایه بسیار زیادی در سازه شده و سازه به شدت وارد محدود رفتار غیرخطی می‌شود و تغییر شکل پسماند بیشتری نسبت به زلزله‌های حوزه دور در آن ایجاد می‌شود.

¹ Hypoplastic

² Yield surface

³ Plastic potential

⁴ Intergranular strain

۲- تئوری هایپوپلاستیسیته جهت مدل سازی مصالح دانه‌ای

مدل‌های هایپوپلاستیک نوعی از مدل‌های رفتاری غیرخطی هستند که برای بررسی رفتار مصالح دانه‌ای به وجود آمده‌اند. قوانین رفتاری هایپوپلاستیک نرخ تغییرات تنش را به صورت تابعی از تنش، نرخ تغییرات کرنش و نسبت تخلخل شرح می‌دهند [۲۲-۲۴].

حالت کلی مدل هایپوپلاستیک Von Wolffersdorff به صورت زیر است:

$$\dot{T} = F(T, e, D) \quad (1)$$

که در آن \dot{T} نرخ تغییرات تنش، T تانسور تنش کوشی^۱، e نسبت تخلخل و D تانسور نرخ کرنش است. این مدل هایپوپلاستیک شامل سه تابع حدی نسبت تخلخل به عنوان تابع فشار متوسط اسکلت خاک (p_s) است. e_i نسبت تخلخل در سست‌ترین حالت ممکن، e_d نسبت تخلخل در بیشینه تراکم و e_c نسبت تخلخل در حالت بحرانی است. طبق نظر Bauer (۱۹۹۶) این حدود نسبت تخلخل با افزایش p_s کاهش می‌یابند و زمانی که p_s به سمت صفر میل می‌کند، یعنی فشار متوسط اسکلت خاک از بین می‌رود، به مقادیر حدی خود یعنی e_{i0} ، e_{c0} و e_{d0} می‌رسند [۲۵].

به طور معمول تأثیر سطح تنش روی مشخصات خاک (افزایش در سطح تنش منجر به کاهش زاویه اتساع و افزایش سختی می‌شود) در مدل هایپوپلاستیسیته به وسیله فاکتور باروتروپی^۲ (f_b) در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر آن تأثیر دانسیته به وسیله فاکتورهای پیکنوتروپی^۳ یعنی f_e و f_d مشخص می‌شود. برای $e_d < e < e_c$ فاکتور f_d مقدار زاویه اصطکاک حداکثر و همچنین اتساع خاک مرتبط با آن را کنترل می‌کند. فاکتور f_e اثر نسبت تخلخل را روی افزایش سختی کنترل می‌کند [۲۱].

در حالت کلی مدل ارائه شده توسط Von Wolffersdorff شامل ۸ پارامتر می‌باشد. در صورتی که نرخ تنش و نرخ تغییر شکل حجمی برابر با صفر باشند، حالت بحرانی در طول برش یکنواخت حاصل خواهد شد [۲۶]. زاویه اصطکاک داخلی بحرانی (φ_c) را می‌توان با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم یا آزمایش سه محوری به دست آورد. h_s نشان دهنده سختی دانه‌ای مصالح، و توان n بیانگر حساسیت فشاری اسکلت دانه‌ها می‌باشد. برای به دست آوردن h_s و n ، باید یک آزمایش تراکم با نمونه اولیه بسیار سست انجام گردد ولی در عمل یک آزمایش ادومتر انجام می‌شود. توان α انتقال بین حالت پیک و حالت بحرانی را تشریح می‌کند، و توان β نشان دهنده تغییرات سختی در یک چگالی مشخص است. اگر e کوچک‌تر از e_i باشد (یعنی خاک متراکم باشد) توان β نقش مهمی ایفا می‌کند.

مدل هایپوپلاستیک Von Wolffersdorff [۲۱، ۲۳، ۲۵] در محدوده تنش‌های سیکلی کوچک کارایی ندارد. نقص آن در نظر گرفتن تغییر شکل‌های تجمعی اضافی است، که به برآورد غیرواقعی تغییر شکل‌ها منجر می‌شود. این مدل برای مسیر کرنش، به جای یک نمودار حلقه‌ای^۴ یک نمودار دندان‌اره‌ای^۵ پیش‌بینی می‌کند که به عنوان رچتینگ^۶ نامیده می‌شود [۲۰]. طبق اندازه‌گیری‌ها [۲۷ و ۲۸] سختی خاک در یک حالت مشخص که به وسیله تنش و نسبت تخلخل تعریف می‌شود به شدت به تاریخچه‌ی تغییر شکل‌ها و جهت نرخ کرنش وابسته است. برای پیاده کردن مفهوم کرنش بین دانه‌ای، که به منظور رفع نقص مدل هایپوپلاستیک Von Wolffersdorff ارائه شده، ۵ پارامتر مورد نیاز هستند. ضرایب m_R و m_T ضرایب افزایش سختی ناشی از تغییر جهت‌های ۹۰ و ۱۸۰ درجه در مسیر کرنش می‌باشند. شعاع محدوده الاستیک (R) بین 10^{-7} تا 10^{-3} متغیر است و معمولاً برابر با 10^{-4} در نظر گرفته می‌شود. پارامتر β_R سیر تکاملی کرنش بین دانه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پارامتر χ ($\chi > 1$) مقدار افت سختی را تشریح می‌کند. مقادیر پارامترهای کرنش بین دانه‌ای با آزمایش سه محوری سیکلی به دست

¹ Cauchy stress

² Barotropy

³ Pycnotropy

⁴ Loop

⁵ Saw-tooth like

⁶ Ratcheting

می‌آیند. نحوه به دست آوردن پارامترهای مدل هایپوپلاستیک Von Wolffersdorff با در نظر گرفتن مفهوم کرنش بین‌دانه‌ای و توضیحات تکمیلی در مورد این مدل در مراجع [۲۰، ۲۱، ۲۳] شرح داده شده است.

۳- مدل‌سازی عددی

مدل در نظر گرفته شده شامل سه بخش خاک، شمع-کلاهیک و سازه می‌باشد. مدل به صورت متقارن می‌باشد و با استفاده از شرایط تقارن فقط نیمی از مدل در نظر گرفته شده است. ابعاد در نظر گرفته شده برای خاک، شمع، کلاهیک و سازه در جدول ۱ ارائه شده‌اند. ابعاد مربوط به خاک در مدل به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا مرزها تحت تأثیر تنش قرار نگیرند، بنابراین خاک در مدل از هر طرف به اندازه $50d_p$ برابر با قطر شمع است) و در عمق به اندازه $2l_p$ (برابر با طول شمع است) شبیه‌سازی شده است [۲۹]. همچنین فرض شده است که سنگ بستر در این عمق قرار گرفته باشد. برای در نظر گرفتن سازه، از یک سازه یک درجه آزادی، که زمان تناوب آن بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش برابر با ۱ ثانیه و جرم معادل آن هم به مقدار ۴۰ تن می‌باشد، استفاده شده است. با در نظر گرفتن زمان تناوب ۱ ثانیه (زمان تناوب متوسط) سعی شده تا سازه‌ای در نظر گرفته شود که پالس‌های ناشی از پدیده جهت‌داری پیش‌رونده بر روی آن تأثیرگذار باشند.

جدول ۱: ابعاد در نظر گرفته شده برای خاک، شمع، کلاهیک و سازه

اجزاء مدل	طول (جهت x) (متر)	عرض (جهت y) (متر)	ارتفاع (جهت z) (متر)	شعاع (متر)
خاک	۵۰	۵۰	۱۵	-
کلاهیک	۴	۴	۰/۷۵	-
سازه	-	-	۱	۰/۰۴۲
شمع	-	-	۷/۵	۰/۲۵

۳-۱- مصالح مصرفی

برای مدل‌سازی خاک فرض شده است که خاک از نوع ماسه Hochstetten می‌باشد. مقادیر پارامترهای مدل هایپوپلاستیک Von Wolffersdorff و پارامترهای کرنش بین‌دانه‌ای در جدول ۲ ارائه شده‌اند. خاک به صورت خشک می‌باشد و مقدار چگالی و نسبت تخلخل اولیه آن به ترتیب برابر $\rho = 1570 \text{ kg/m}^3$ و $e_0 = 0.7$ در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای مدل هایپوپلاستیک Von Wolffersdorff و پارامترهای کرنش بین‌دانه‌ای [۲۰، ۲۳، ۳۰]

پارامتر	ϕ_c	h_s (GPa)	n	e_{d0}	e_{c0}	e_{i0}	α	β	R	m_R	m_T	β_r	χ
ماسه Hochstetten	۳۳	۱/۵	۰/۲۸	۰/۵۵	۰/۹۵	۱/۰۵	۰/۲۵	۱/۵	۰/۰۰۰۱	۵	۲	۰/۵	۶
ماسه Toyoura	۳۰	۲/۶	۰/۲۷	۰/۶۱	۰/۹۸	۱/۱	۰/۱۸	۱/۱	۰/۰۰۰۱	۵	۲	۰/۱۲	۱

جدول ۴: مشخصات خمیری مربوط به فولاد ST-37

کرنش خمیری	تنش (MPa)
۰	۲۴۰
۰/۱۹۸۸	۳۷۰

جدول ۳: مشخصات ارتجاعی مربوط به بتن و فولاد ST-37

پارامتر	جرم مخصوص (kg/m^3)	مدول ارتجاعی (GPa)	ضریب پواسون
بتن	۲۴۰۰	۲۷/۳	۰/۲
فولاد	۰/۰۰۱	۲۰۰	۰/۳

شمع‌ها و کلاهیک از جنس بتن هستند، و سازه از جنس فولاد ST-37 می‌باشد. مشخصات ارتجاعی مربوط به بتن و فولاد در جدول ۳ ارائه شده‌اند. همچنین رفتار سازه به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده است. مشخصات خمیری مربوط به فولاد در جدول ۴ ارائه شده‌اند. جرم سازه به صورت متمرکز فرض و در قسمت بالای آن اعمال شده، بنابراین در مشخصات فولاد جرم مخصوص برابر با یک مقدار کم در

نظر گرفته شده است. میرایی اعمال شده به سازه به صورت میرایی رایلی در نظر گرفته شده است و فرض شده که نسبت میرایی در زمان تناوب سیستم خاک-سازه و زمان تناوب خاک برابر با ۰/۰۵ باشد. با این فرض مقادیر $\alpha=0/3951$ و $\beta=0/0040$ به دست آمده‌اند. بین کلاهک و خاک یک فاصله‌ی ۳۰ سانتی متری وجود دارد و کلاهک با خاک تماس ندارد. تماس بین شمع و خاک هم به صورت یک تماس کلی^۱ در نرم افزار ABAQUS [۳۱] در نظر گرفته شده و در مدل سازی امکان جداشدگی بین خاک و شمع لحاظ شده است. قانون اصطکاک کولمب برای مدل سازی اصطکاک بین شمع و خاک مورد استفاده قرار گرفته، و ضریب اصطکاک در مدل سازی ۰/۴۲ فرض شده است [۳۲].

۳-۲- بارگذاری و شرایط مرزی

در مدل سازی از سه نوع شرط مرزی استفاده شده است. کف مدل به عنوان سطح سنگ بستر در نظر گرفته شده و در سه جهت X، Y و Z مقید شده است. همچنین به دلیل اینکه از شرط تقارن استفاده شده است، باید وسط مدل با استفاده از قیود تقارن مقید شود. برای مقید کردن مرزهای جانبی، به منظور عدم انتشار امواج زلزله در محیط خاک بعد از برخورد به مرز و ایجاد خطا، از المانهای نیمه بی نهایت^۲ به عنوان مرز جاذب استفاده شده است.

در مطالعه انجام شده توسط Baker (۲۰۰۷) مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله‌های حوزه نزدیک که دارای پالس ناشی از جهت پذیری پیش رونده در تاریخچه زمانی سرعت حرکت زمین هستند، معرفی شده است [۳۳]. با توجه به فرضیات مسئله که محل اعمال شتاب‌نگاشت‌ها روی سنگ بستر فرض شده است، تعداد ۱۰ شتاب‌نگاشت (۵ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک از شتاب‌نگاشت‌های معرفی شده توسط Baker و ۵ شتاب‌نگاشت حوزه دور) ثبت شده روی سنگ سخت، جهت انجام تحلیل‌ها انتخاب شده‌اند. مشخصات این شتاب‌نگاشت‌ها در جداول ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. جهت استفاده از این شتاب‌نگاشت‌ها، هریک از آنها به شتاب حداکثر 0.35g مقیاس شده است. لازم به ذکر است این مقدار به گونه‌ای انتخاب شده است که سازه وارد محدوده رفتار غیرخطی شود.

جدول ۵: شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های حوزه نزدیک انتخاب شده

زلزله‌های حوزه نزدیک						
ردیف	زلزله	سال	ایستگاه	Tp(s)	PGV (cm/s)	M _w
۱	San Fernando	۱۹۷۱	Pacoima Dam (upper left abut)	۱/۶	۲۸	۶/۶
۲	Coyote Lake	۱۹۷۹	Gilroy Array #6	۱/۲	۴	۵/۷
۳	Morgan Hill	۱۹۸۴	Coyote Lake Dam (southwest abut)	۱	۲۷	۶/۲
۴	Cape Mendocino	۱۹۹۲	Petrolia	۳	۴۷	۷
۵	Northridge-01	۱۹۹۴	Pacoima Dam (downstream)	۰/۵	۳۴	۶/۷

جدول ۶: شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های حوزه دور انتخاب شده

زلزله‌های حوزه دور						
ردیف	زلزله	سال	ایستگاه	Tp(s)	PGV (cm/s)	M _w
۱	San Fernando	۱۹۷۱	Lake Hughes #9	-	۱۰	۶/۶
۲	San Fernando	۱۹۷۱	Santa Anita Dam	-	۱۱	۶/۶
۳	Manjil Iran	۱۹۹۰	Abbar	-	۲۹	۷/۴
۴	Taiwan SMART1(45)	۱۹۸۶	SMART1 E02	-	۳۶/۷	۷/۳
۵	Nahanni	۱۹۸۵	Site 1	-	۱۵	۶/۷۶

¹ General contact

² Infinite Element

۳-۳- مراحل حل

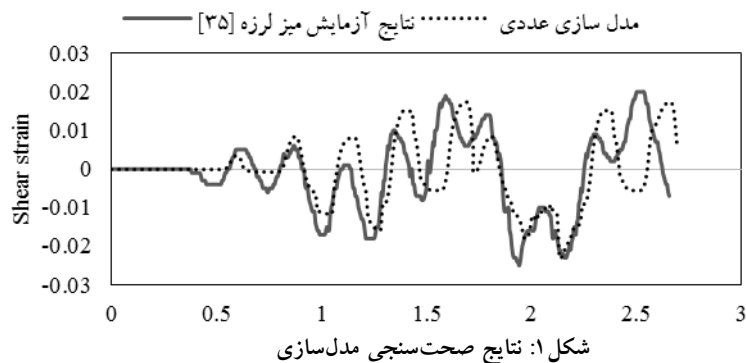
در مراحل حل مسئله فرآیند ساخت در نظر گرفته شده است. در مرحله اول خاک تحت بار وزن خود قرار می‌گیرد، سپس شمع، کلاهک و سازه روی آن نصب می‌شوند. در مرحله آخر هم قید تغییرمکانی ایجاد شده در محل سنگ بستر در جهت اعمال زلزله برداشته شده و اثر زلزله به مدل اعمال می‌شود. جهت استفاده از مدل هایپوپلاستیک Von Wolffersdorff با در نظر گرفتن مفهوم کرنش بین‌دانه‌ای برای خاک، از سابروتین^۱ UMAT نوشته شده برای حالت استاندارد ABAQUS استفاده شده است [۳۴]. برای حل معادلات از روش انتگرال‌گیری ضمنی^۲ استفاده شده است. هر یک از تحلیل‌ها با یک کامپیوتر با پردازشگر ۸ هسته‌ای و ۶ گیگابایت رم، بین ۳۶ تا ۹۰ ساعت به طول می‌انجامد و این محاسبات مربوط به تحلیل‌ها با استفاده از امکانات پردازش سریع مرکز ابر رایانش ملی دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده‌اند.

۴- صحت‌سنجی

جهت صحت‌سنجی مدل از نتایج آزمایش میز لرزه انجام‌شده توسط Matsumoto و همکاران (۲۰۰۴) استفاده شده است [۳۵]. این آزمایش با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-شمع-سازه انجام شده است. این آزمایش شامل یک مدل خاک، گروه شمع و سازه است. سازه به سه صورت با زمان تناوب‌های کوتاه تا بلند در نظر گرفته شده که در مدل صحت‌سنجی سازه با زمان تناوب کوتاه است. همچنین برای بارگذاری مدل از یک بار هارمونیک استفاده شده است. ابعاد مدل در نظر گرفته شده در جدول ۷ ارائه شده‌اند. خاک استفاده شده جهت انجام آزمایش ماسه Toyoura می‌باشد که پارامترهای مدل هایپوپلاستیک Von Wolffersdorff و کرنش بین‌دانه‌ای برای آن در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در شکل ۱ مقایسه‌ای بین کرنش برشی ایجاد شده در آزمایش و کرنش برشی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی نشان داده شده است. کرنش برشی به‌دست‌آمده برابر با نسبت تغییرمکان افقی نسبی بین دو نقطه از خاک در مدل به فاصله دو نقطه (۱۵۰ میلی‌متر) است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایش میز لرزه وجود دارد.

جدول ۷: ابعاد خاک، شمع، کلاهک و سازه برای مدل در نظر گرفته شده جهت صحت‌سنجی [۳۵]

اجزاء مدل	طول (جهت X) (متر)	عرض (جهت Y) (متر)	ارتفاع (جهت Z) (متر)	شعاع (متر)
خاک	۰/۵۶	۰/۲۱	۰/۳۱	-
کلاهک	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۲	-
سازه	-	-	۰/۰۵	۰/۱۳
شمع	-	-	۰/۱۷	۰/۰۰۵



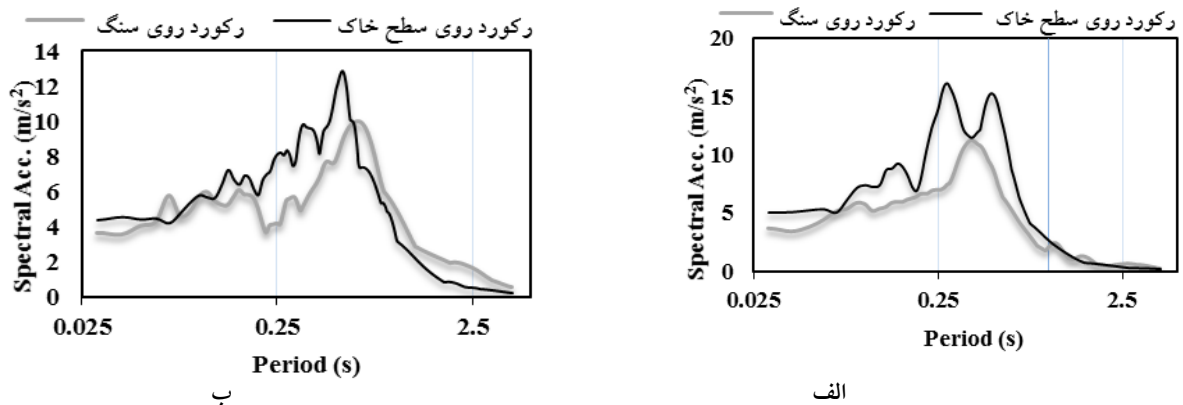
¹ Subroutine

² Implicit

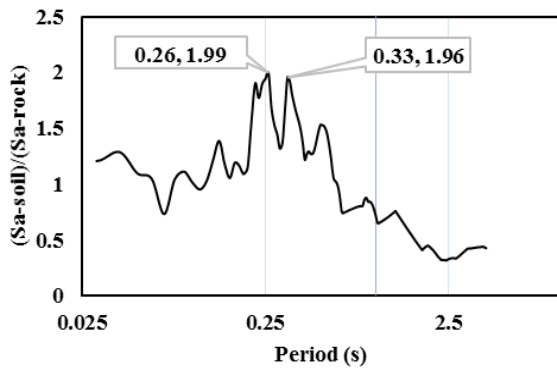
۵- تحلیل نتایج

۵-۱- بررسی عملکرد خاک

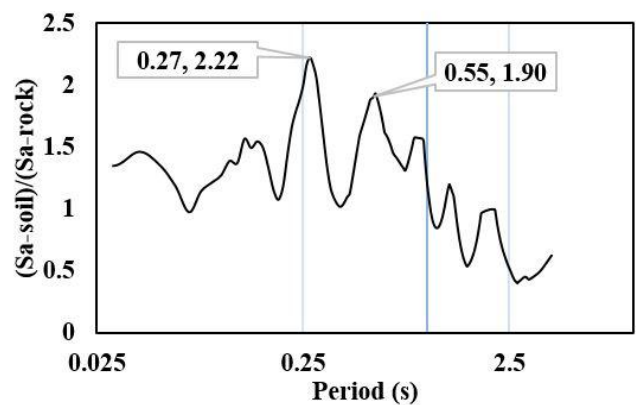
شکل ۲ طیف‌های پاسخ شبه شتاب متناظر با رکورد اعمال شده در محل سنگ بستر و پاسخ شتاب به دست آمده در سطح زمین را به ازای رکوردهای Northridge-01 و Cape Mendocino نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با عبور امواج زلزله از خاک، خاک به‌عنوان فیلتر عمل کرده و دامنه طیف پاسخ شبه شتاب در بعضی از زمان تناوب‌ها افزایش و در بعضی از آنها کاهش یافته است. از آنجایی که نتیجه‌گیری قطعی از روی طیف‌های پاسخ رکوردهای روی خاک و سنگ کمی دشوار است، برای بررسی تغییرات زمان تناوب لایه خاک نسبت مؤلفه‌های این دو طیف در زمان تناوب‌های مختلف برای رکوردهای Northridge-01 و Cape Mendocino در شکل ۳ ارائه شده است. در این شکل، در نمودار مربوط به هر رکورد زمان تناوب متناظر با بلندترین قله بیانگر زمان تناوب لایه خاک در حالت تقریباً خطی و زمان تناوب متناظر با قله دوم بیانگر افزایش زمان تناوب لایه خاک در اثر تغییر شکل‌های غیرخطی می‌باشد. با توجه به بررسی انجام شده توسط نویسندگان مشاهده قله در طیف پاسخ رکورد روی سطح زمین در زمان تناوبی کمتر از زمان تناوب قله طیف پاسخ رکورد روی سنگ (و یا به عبارت دیگر در فرکانسی بیشتر از فرکانس قله طیف پاسخ رکورد روی سنگ) امکان‌پذیر است [۳۶]. اما لازم به توضیح است که در این تحقیق از مدل هایپوپلاستیک استفاده شده است. این مدل برخلاف مدل‌های رایج دیگر (به‌طور مثال موهر-کولمب یا دراگر پراگر) تغییرات تخلخل را لحاظ می‌کند. همچنین لازم به توضیح است که خاک مورد استفاده در این تحقیق، دانه‌ای بوده است و تغییرات تخلخل در خاک‌های دانه‌ای تحت امواج ناشی از زلزله، می‌تواند تابعی از تنش هم‌جانبه باشد. همچنین تغییرات تخلخل می‌تواند منجر به تغییر سختی شود. به‌طوری که بسیاری از مراجع معتبر دینامیک خاک، مانند Ishihara [۳۷]، سختی خاک دانه‌ای را تابعی از تخلخل در نظر گرفته‌اند، که این موضوع باعث پیچیده‌تر شدن رفتار می‌شود.



شکل ۲: طیف‌های پاسخ شبه شتاب متناظر با شتاب ورودی اعمال شده در محل سنگ بستر و پاسخ شتاب خاک تحت اثر رکوردهای Northridge-01 (الف) و Cape Mendocino (ب)



ب

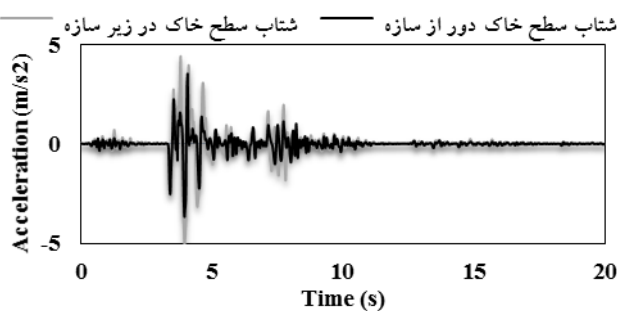


الف

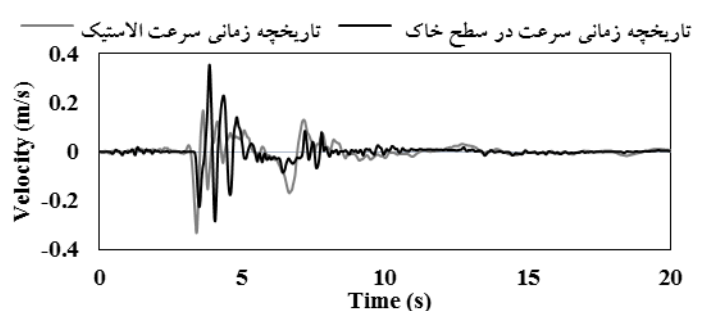
شکل ۳: بررسی تغییرات زمان تناوب اصلی لایه خاک تحت اثر رکوردهای (الف) Northridge-01 و (ب) Cape Mendocino

در شکل ۴ مقایسه‌ای بین تاریخچه زمانی سرعت سطح زمین با در نظر گرفتن رفتار لایه خاک به صورت الاستیک و تاریخچه زمانی سرعت سطح زمین به دست آمده از تحلیل تحت اثر زلزله Northridge-01 نشان داده شده است. در این شکل، تاریخچه زمانی سرعت سطح زمین به دست آمده با فرض رفتار الاستیک برای خاک با استفاده از نرم افزار SEISMOSIGNAL به دست آمده است. همان طور که مشاهده می شود، در ابتدای هر دو تاریخچه زمانی سرعت، پالس ناشی از جهت داری پیش رونده وجود دارد.

در شکل ۵ مقایسه‌ی بین تاریخچه زمانی شتاب سطح خاک در زیر سازه و تاریخچه زمانی شتاب سطح خاک دور از سازه (در نزدیکی مرزهای جانبی) تحت اثر زلزله Northridge-01 نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، در حضور سازه (در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع سازه) شتاب سطح خاک شدیدتر از شتاب سطح آزاد خاک است، و در نتیجه شتاب اعمال شده به سازه بیشتر خواهد بود. دلیل این موضوع اثر اندرکنش سینماتیکی است که در قسمت مقدمه توضیح داده شد. به طور کلی می توان گفت که با مدل سازی خاک و شمع به همراه سازه رفتار لرزه‌ای سازه به صورت واقع گرایانه تری مورد بررسی قرار می گیرد.



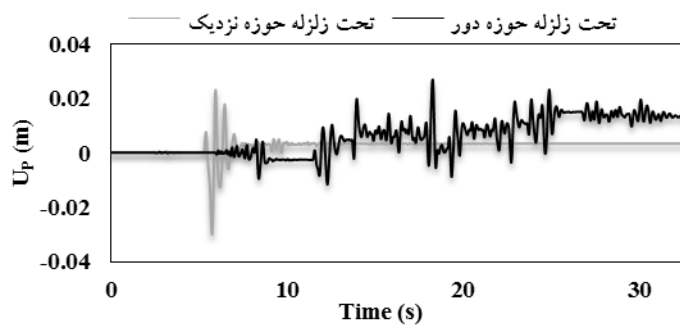
شکل ۵: تاریخچه زمانی شتاب سطح خاک در زیر سازه و تاریخچه زمانی شتاب سطح خاک دور از سازه تحت اثر زلزله Northridge-01



شکل ۴: تاریخچه زمانی سرعت سطح زمین با در نظر گرفتن رفتار لایه خاک به صورت الاستیک و تاریخچه زمانی سرعت سطح زمین به دست آمده از تحلیل تحت اثر زلزله Northridge-01

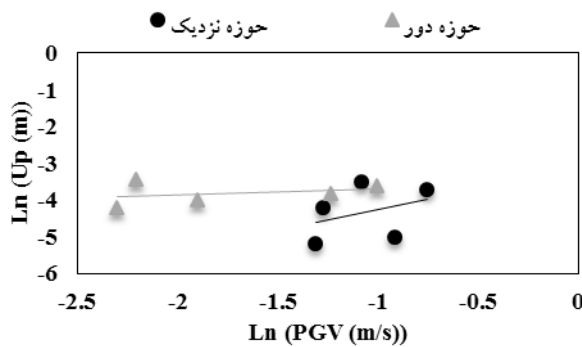
۲-۵- بررسی عملکرد شمع

شکل ۶ تاریخچه زمانی تغییرمکان نسبی ایجاد شده در شمع تحت اثر زلزله حوزه دور (TAIWAN SMART1(45 و زلزله حوزه نزدیک Northridge-01 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زلزله حوزه نزدیک به دلیل ماهیت پالس‌گونه حرکات زمین، یک پالس عمده تغییرمکان در شمع ایجاد شده است. در مقابل در زلزله حوزه دور به دلیل توزیع انرژی در طول زلزله، ماهیت تاریخچه زمانی تغییرمکان نسبی شمع کاملاً متفاوت است، و پالسی که قسمت عمده انرژی ایجاد شده در شمع در آن قرار داشته باشد دیده نمی‌شود. لازم به ذکر است که در همه زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بررسی شده نتایجی مشابه آنچه که در این شکل ارائه شده مشاهده شده است. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که تاریخچه‌های زمانی تغییرمکان نسبی شمع دارای تغییرمکان‌های ماندگار می‌باشند، به نظر می‌رسد که تغییرمکان ماندگار ایجاد شده در شمع به دلیل رفتار غیرخطی خاک اطراف آن است. همچنین با وجود اینکه در ابتدای زلزله حوزه نزدیک تغییرمکان بیشتری در شمع ایجاد شده ولی تغییرمکان ماندگار ایجاد شده در زلزله حوزه نزدیک کمتر از زلزله حوزه دور می‌باشد، دلیل این موضوع انرژی کمتر شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک در مقایسه با شتاب‌نگاشت حوزه دور می‌باشد.

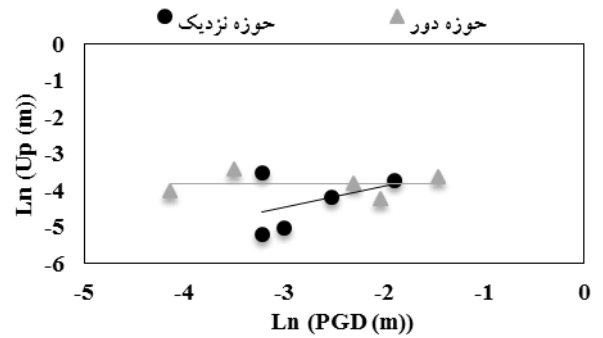


شکل ۶: تاریخچه زمانی تغییرمکان نسبی شمع تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک

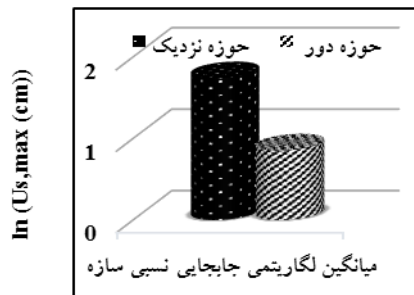
شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب تغییرات حداکثر تغییرمکان نسبی شمع در مقابل حداکثر تغییرمکان و حداکثر سرعت حرکت زمین در محل سنگ بستر را برای زلزله‌های حوزه دور و زلزله‌های حوزه نزدیک نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود در هنگام اعمال زلزله‌های حوزه نزدیک به ازای یک مقدار PGA ثابت مقدار تغییرمکان نسبی شمع دارای همبستگی مثبت با مقادیر PGV و همچنین PGD رکوردها می‌باشد، ولی در هنگام اعمال زلزله‌های حوزه دور این همبستگی دیده نمی‌شود. به عبارت دیگر نسبت PGV به PGA و همچنین نسبت PGD به PGA به خوبی بیانگر شدت رکوردهای پالس شکل است، درحالی‌که در زلزله‌های حوزه دور چنین نیست. البته همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود مقدار تغییرمکان نسبی شمع به طور میانگین در زلزله‌های حوزه دور از زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر است. به منظور بررسی دقیق‌تر این موضوع، شکل ۹-الف مقایسه مقادیر میانگین لگاریتمی تغییرمکان نسبی شمع را تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار میانگین لگاریتمی تغییرمکان نسبی شمع تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از زلزله‌های حوزه دور است. دلیل تغییرمکان نسبی کمتر شمع در زلزله‌های حوزه نزدیک را می‌توان ناشی از رفتار خطی شمع دانست.



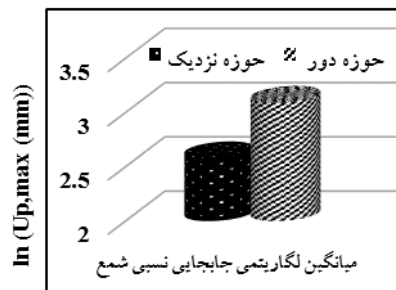
شکل ۸: تغییرات حداکثر تغییر مکان نسبی شمع در مقابل حداکثر سرعت حرکت زمین



شکل ۷: تغییرات حداکثر تغییر مکان نسبی شمع در مقابل حداکثر تغییر مکان حرکت زمین



(ب)



(الف)

شکل ۹: مقایسه مقادیر میانگین لگاریتمی. (الف) تغییر مکان نسبی شمع تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک (ب) تغییر مکان نسبی سازه تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک

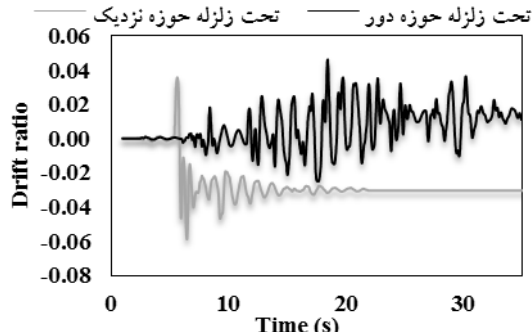
۳-۵- بررسی عملکرد سازه

شکل ۹-ب مقایسه مقادیر میانگین لگاریتمی تغییر مکان نسبی سازه را تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار میانگین لگاریتمی تغییر مکان نسبی سازه تحت اثر زلزله‌های حوزه دور کمتر از زلزله‌های حوزه نزدیک است. این رفتار در تحقیقات محققان قبلی هم مشاهده شده است که نسبت دریافت سازه به‌طور متوسط تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک از مقدار متناظر تحت اثر زلزله‌های حوزه دور بیشتر است [۲، ۶، ۳۸]. همچنین، اثر پالس موجود در رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌های بلندتر مخرب‌تر از سازه‌های کوتاه است [۸، ۹]. دلیل متفاوت بودن پاسخ شمع و سازه را می‌توان در رفتار خطی شمع و رفتار غیرخطی سازه جستجو کرد. لازم به توضیح است که معمولاً در طراحی شمع‌ها ظرفیت ژئوتکنیکی آنها برای مشخص کردن ابعاد تعیین‌کننده است، بنابراین فرض خطی بودن رفتار شمع دور از انتظار نیست.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب تاریخچه‌های زمانی برش پایه و نسبت دریافت^۱ ایجاد شده در سازه تحت اثر زلزله‌های حوزه دور TAIWAN SMART1(45) و حوزه نزدیک Northridge-01 را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ابتدای زلزله حوزه نزدیک برش پایه به‌صورت ناگهانی به سازه وارد شده و پس از پایان پالس موجود در رکورد زلزله برش پایه به‌شدت کاهش یافته است. به همین دلیل یک تغییر مکان پالس‌گونه به سازه وارد و باعث ایجاد تغییر مکان ماندگار در آن شده است. ولی در زلزله حوزه دور به دلیل توزیع یکنواخت‌تر انرژی در طول زلزله برش پایه در طول زمان زلزله به‌صورت رفت و برگشتی تغییر می‌کند و تغییر مکان سازه نیز یک روند رفت و برگشتی را

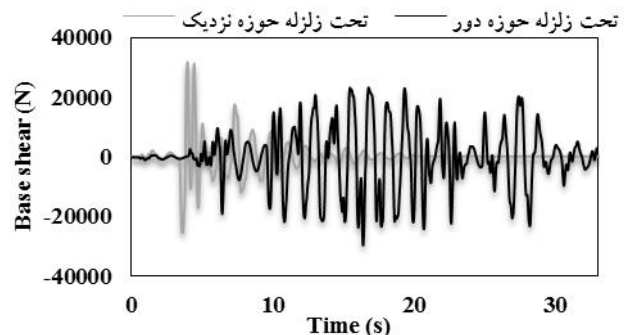
¹ Drift ratio

طی می‌کند. به عبارت دیگر با وجود برش پایه حداکثر کمتر تحت اثر زلزله حوزه دور تعداد قله‌های تاریخچه زمانی برش پایه تحت اثر زلزله حوزه دور بیشتر است و همین تاریخچه زمانی برش پایه به صورت نیرو به بالای شمع‌ها وارد می‌شود و باعث می‌شود که حداکثر تغییرمکان نسبی شمع تحت اثر زلزله حوزه دور بیشتر باشد.



شکل ۱۱: تاریخچه‌های زمانی نسبت دررفت ایجاد شده در سازه

تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک



شکل ۱۰: تاریخچه‌های زمانی برش پایه ایجاد شده در سازه تحت

اثر زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور بر روی پاسخ یک سیستم خاک-شمع-سازه مدلی شامل خاک، سازه و شمع در نظر گرفته شد. این مدل تحت اثر ۱۰ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک و حوزه دور مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به دست آمده عبارت‌اند از:

- ۱- با عبور امواج زلزله از خاک، در آن تغییرشکل‌های غیرخطی ایجاد شده و زمان تناوب اصلی آن افزایش می‌یابد.
- ۲- با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع-سازه شتاب سطح خاک در محل سازه شدیدتر از شتاب سطح آزاد خاک است. به طور کلی می‌توان گفت که با مدل‌سازی خاک و شمع به همراه سازه رفتار لرزه‌ای سازه به صورت واقع‌گرایانه‌تری مورد بررسی قرار می‌گیرد.
- ۳- در زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل ماهیت پالس‌گونه حرکات زمین، یک پالس تغییرمکان در پاسخ تغییرمکان نسبی شمع ایجاد شده است. در صورتی که در زلزله‌های حوزه دور به دلیل توزیع انرژی در طول مدت زلزله، پاسخ تغییرمکان نسبی شمع کاملاً متفاوت است.
- ۴- در هنگام اعمال زلزله‌های حوزه نزدیک به ازای یک مقدار PGA ثابت مقادیر تغییرمکان نسبی شمع دارای همبستگی مثبت با مقادیر PGV و همچنین PGD رکوردها می‌باشند، ولی در هنگام اعمال زلزله‌های حوزه دور این همبستگی دیده نمی‌شود.
- ۵- با توجه به وجود پالس سرعت در زلزله‌های حوزه نزدیک، این پالس باعث اعمال ناگهانی انرژی به سازه شده و تغییرشکل زیادی را در سازه ایجاد می‌کند. به همین دلیل مقدار میانگین تغییرمکان‌های نسبی سازه تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر از مقدار متناظر تحت اثر زلزله‌های حوزه دور است. این رفتار در تحقیقات محققان قبلی هم مشاهده شده است که نسبت دررفت سازه به‌طور متوسط تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک از مقدار متناظر تحت اثر زلزله‌های حوزه دور بیشتر است.
- ۶- در زلزله‌های حوزه نزدیک حرکات ناگهانی پالس‌گونه باعث ایجاد برش پایه بسیار زیادی در سازه شده و سازه به شدت وارد محدود رفتار غیرخطی می‌شود و تغییرشکل پسماند بیشتری نسبت به زلزله‌های حوزه دور در آن ایجاد می‌شود. اما پس از عبور از حرکات پالس‌گونه برش پایه تا حد زیادی کاهش می‌یابد. در زلزله‌های حوزه دور به دلیل توزیع یکنواخت‌تر انرژی ورودی زلزله در طول زمان رکورد زلزله، مقادیر قابل توجه برش پایه در طول زمان بیشتری به سازه وارد می‌شوند. لازم به ذکر است که این برش پایه

به‌عنوان نیرو به قسمت بالای شمع‌ها وارد می‌شود، به همین دلیل و با توجه به رفتار خطی شمع مقدار میانگین تغییر مکان‌های نسبی شمع تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک کمتر از مقدار متناظر تحت اثر زلزله‌های حوزه دور است.

سپاسگزاری

از مرکز ابرایانش دانشگاه صنعتی امیرکبیر (<http://hpcrc.aut.ac.ir>) به دلیل در اختیار قرار دادن امکانات محاسبات پیشرفته این مرکز جهت انجام تحلیل‌ها، سپاسگزاری به عمل می‌آید.

۷- مراجع

- [1] Moustafa, A. and I. Takewaki, "Characterization and modeling of near-fault pulse-like strong ground motion via damage-based critical excitation method", *Structural engineering & mechanics*, 34(6), 755.
- [2] Chopra, A.K. and C. Chintanapakdee, "Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(12), 1769-1789, 2001.
- [3] Alavi, B. and H. Krawinkler, *Effects of near-fault ground motions on frame structures*. John A. Blume Earthquake Engineering Center, 2001.
- [4] Ambraseys, N. and J. Douglas, "Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions", *Soil dynamics and earthquake engineering*, 23(1), 1-18, 2003.
- [5] Bray, J.D. and A. Rodriguez-Marek, "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), 815-828, 2004.
- [6] Kalkan, E. and S.K. Kunnath, "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Earthquake spectra*, 22(2), 367-390, 2006.
- [7] Tothong, P. and C.A. Cornell, "Structural performance assessment under near-source pulse-like ground motions using advanced ground motion intensity measures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(7), 1013-1037, 2008.
- [8] Alavi, B. and H. Krawinkler, "Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 33(6), 687-706, 2004.
- [9] Bertero, V.V., S.A. Mahin, and R.A. Herrera, "Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 6(1), 31-42, 1978.
- [10] Balendra, S., *Numerical modeling of dynamic soil-pile-structure interaction*. Washington State University, Dissertation, 2005.
- [11] Seed, H.B., R. Murarka, J. Lysmer, and I. Idriss, "Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(4), 1323-1342, 1976.
- [12] Kramer, S.L., *Geotechnical earthquake engineering* Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, 1996.
- [13] Bentley, K.J. and M.H.E. Naggar, "Numerical analysis of kinematic response of single piles", *Canadian Geotechnical Journal*, 37(6), 1368-1382, 2000.
- [14] Anandarajah, D., J. Zhang, G. Gnanaranjan, and C. Ealy. Year, Back-calculation of Winkler foundation parameters for dynamic analysis of piles from field-test data. in *Proceedings of NSF international workshop on earthquake simulation in geotechnical engineering*. of Conference. Location.
- [15] Maheshwari, B., K. Truman, M. El Naggar, and P. Gould, "Three-dimensional nonlinear analysis for seismic soil-pile-structure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(4), 343-356, 2004.
- [16] Chau, K., C. Shen, and X. Guo, "Nonlinear seismic soil-pile-structure interactions: shaking table tests and FEM analyses", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(2), 300-310, 2009.
- [17] Maheshwari, B. and R. Sarkar, "Seismic behavior of soil-pile-structure interaction in liquefiable soils: Parametric study", *International Journal of Geomechanics*, 2011.
- [18] Hokmabadi, A.S., B. Fatahi, and B. Samali, "Assessment of soil-pile-structure interaction influencing seismic response of mid-rise buildings sitting on floating pile foundations", *Computers and Geotechnics*, 55, 172-186, 2014.
- [19] Kolymbas, D., *Introduction to Hypoplasticity: Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling 1*. Vol. 1. CRC Press, 1999.
- [20] Niemunis, A. and I. Herle, "Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range", *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 2(4), 279-299, 1997.

- [21] von Wolffersdorff, P.A., "A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface", *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 1(3), 251-271, 1996.
- [22] Kolymbas, D. Year, A generalized hypoelastic constitutive law. in *Proceedings of XI International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering. AA Balkema, San Francisco.* of Conference. Location, 1996.
- [23] Gudehus, G., "A comprehensive constitutive equation for granular materials", *Soils and foundations*, 36(1), 1-12, 1996.
- [24] Bauer, E., "Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials", *Soils and foundations* 36(1), 13-26, 1996.
- [25] Bauer, E., "Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials", 36(1), 13-26, 1996.
- [26] Schofield, A. and C. Wroth. "Critical State Soil Mechanics", McGraw-Hill, London, 1968.
- [27] Atkinson, J., D. Richardson, and S. Stallebrass, "Effect of recent stress history on the stiffness of overconsolidated soil", *Géotechnique*, 40(4), 531-540, 1990.
- [28] Puzrin, A. and J. Burland, "Non-linear model of small-strain behaviour of soils", *Geotechnique*, 48(2), 217-213, 1998.
- [29] Ghorbani, A., H. Hasanzadehshooili, E. Ghamari, and J. Medzvieckas, "Comprehensive three dimensional finite element analysis, parametric study and sensitivity analysis on the seismic performance of soil-micropile-superstructure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 58, 21-36, 2014.
- [30] Arnold, M. Year, Application of the Intergranular Strain Concept to the Hypoplastic Modelling of Non-Adhesive Interfaces, The 12th Int. in *Conference of IACMAG*.
- [31] Simulia, D., "ABAQUS 6.11 analysis user's manual", Abaqus 6.11, 2011.
- [32] RP2A-WSD, A. Year, Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design-. in *Twenty-*. of Conference.
- [33] Baker, J.W., "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), 1486-1501, 2007.
- [34] Nuebel, K., "UMAT for von Wolffersdorff hypoplastic model with intergranular strain extension", Institute of soil and rock mechanics technical university of Karlsruhe, 1998.
- [35] Matsumoto, T., K. Fukumura, K. Horikoshi, and Oki, "Shaking table tests on model piled rafts in sand considering influence of superstructures", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 4(3), 21-38.
- [36] Reyes, D., A. Rodriguez-Marek, and A. Lizcano, "A hypoplastic model for site response analysis", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(1), 173-184, 2009.
- [37] Ishihara, K., *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Clarendon Press; Oxford University Press, 1996.
- [38] Chopra, A.K. and C. Chintanapakdee, "Drift spectrum vs. modal analysis of structural response to near-fault ground motions", *Earthquake Spectra*, 17(2), 221-234, 2001.