

# بررسی اثر رکوردهای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک حاوی پالس در پاسخ لرزه‌ی یک سیستم خاک - شمع - سازه

سعید عباسی کرافشانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا اردکانی\* (استادیار)

منصور یخچالیان (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۶ (۱۳۹۶)  
دوره ۲-۳۳، شماره ۱/۲، ص. ۱۱۵-۱۲۵، (یادداشت فنی)

در پژوهش حاضر، اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در پاسخ لرزه‌ی یک سیستم خاک - شمع - سازه مورد بررسی قرار گرفته است. اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده، که یک پالس بزرگ در ابتدای تاریخچه‌ی زمانی سرعت حرکت زمین را شامل می‌شود، مخرب‌ترین پدیده‌ی مشاهده‌شده در حرکات شدید زمین در حوزه‌ی نزدیک گسل است. این پالس با دامنه‌ی بزرگ و با زمان تناوب متوسط تا بلند، قسمت عمده‌ی انرژی لرزه‌ی ناشی از گسیختگی در گسل را در بر می‌گیرد. برای بررسی اثرات حوزه‌ی نزدیک، یک مدل سه بعدی خاک - شمع - سازه مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) انجام شده است. مدل هاپوپلاستیک von Wolfersdorff با در نظر گرفتن مفهوم کرنش بین‌دانه‌ی برای مدل‌سازی خاک غیرچسبیده (ماسه) استفاده و رفتار سازه به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده است. ۸ رکورد حوزه‌ی نزدیک ثبت‌شده بر روی سنگ به مدل مورد نظر اعمال شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که پالس‌های سرعت حوزه‌ی نزدیک، اثر قابل توجهی در رفتار سیستم دارند، و تقاضاهای تغییرمکان ناگهانی بزرگ بر روی شمع‌ها و سازه ایجاد می‌کنند. بنابراین سازه، تغییرشکل‌های غیرخطی بزرگی را تحمل می‌کند و زمان تناوب آن افزایش می‌یابد. باید به این نکته توجه کرد که هنگامی که زمان تناوب افزایش‌یافته‌ی سازه نزدیک به زمان تناوب پالس سرعت است، شدت تغییرشکل‌های غیرخطی افزایش می‌یابد. به علاوه، همبستگی‌های مثبتی میان مقادیر PGV و PGD رکوردهای حرکت زمین و تقاضاهای تغییرشکل در شمع‌ها وجود دارند.

واژگان کلیدی: زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک، اندرکنش خاک - شمع - سازه، هاپوپلاستیسیته، روش اجزاء محدود.

## ۱. مقدمه

امروزه با گسترش استفاده از پی‌های عمیق، نیاز به مطالعات بیشتر بر روی رفتار دینامیکی آنها بیش از پیش احساس می‌شود. لازم به ذکر است که با وجود انجام مطالعات گسترده بر روی رفتار شمع‌ها، هنوز هم ابهاماتی در مورد رفتار دینامیکی آنها وجود دارد. اندرکنش خاک - شمع - سازه، یکی از مهم‌ترین موضوعات در بررسی آثار زلزله در سازه‌هاست. به عبارت دیگر، میزان پاسخ یک سازه وابسته به تحریک وارده و اندرکنش خاک - شمع - سازه است. در حالت کلی می‌توان دو نوع اندرکنش سینماتیکی<sup>۱</sup> و اینرسی<sup>۲</sup> را در نظر گرفت. زمانی که اثر روسازه<sup>۳</sup> در مدل‌سازی در

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۴/۱۳۹۴، اصلاحیه ۱۲/۷/۱۳۹۴، پذیرش ۲۵/۷/۱۳۹۴.

ذکر است اثر پالس به دلیل اعمال انرژی زیاد در مدت زمان کم، اهمیت زیادی دارد.

## ۲. مشخصات زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک

در حرکات زمین نزدیک به گسل، امواج منتشرشده توسط زمین فرصت بسیار کمی برای مستهلک شدن دارند، لذا رکوردهای ثبت شده در ایستگاه‌های نزدیک به گسل می‌توانند بسیار شدیدتر از رکوردهایی باشند که در ایستگاه‌هایی در فاصله‌ی دورتر نسبت به گسل ثبت شده‌اند. به هر حال دقیقاً نمی‌توان فاصله‌ی مشخصی برای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک تعریف کرد، اما معمولاً فاصله‌ی کمتر از ۲۰ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله، برای ثبت نگاشت‌های حوزه‌ی نزدیک در نظر گرفته می‌شود. [۱۸-۲۰] همچنین در مطالعات اخیر نشان داده شده است که تأثیر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک می‌تواند در فاصله‌ی بیشتر از ۲۰ کیلومتر هم وجود داشته باشد. [۲۱] زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، ۲ ویژگی مهم دارند: ۱. اثر جهت پذیری، که به مکانیزم گسیختگی و جهت گسترش گسلش وابسته است؛ ۲. اثر حرکت پرتابی، که به علت تغییرشکل دائمی ناشی از لغزش گسل به وجود می‌آید و پالس‌های سرعت یک طرفه ایجاد می‌کند. جهت پذیری شامل دو نوع پیش‌رونده و پس‌رونده است. هنگامی که جهتی گسیختگی گسل با سرعتی نزدیک به سرعت امواج برشی در سنگ به سمت سایت موردنظر انتشار پیدا می‌کند، پدیده‌ی جهت‌پذیری پیش‌رونده رخ می‌دهد و باعث می‌شود که قسمت بزرگی از انرژی لرزه‌ی ناشی از شکست به صورت یک پالس سرعت قوی با زمان تناوب بلند در زمان کمی بعد از شروع زلزله به سایت موردنظر برسد. [۲۲] به‌طور کلی، پالس‌های سرعت ناشی از پدیده‌ی جهت‌پذیری پیش‌رونده به صورت دوطرفه هستند. این پالس‌های سرعت دوطرفه، که در مؤلفه‌ی عمود بر گسل زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک مشاهده می‌شوند، مخرب‌تر از پالس‌های یک‌طرفه ناشی از حرکت پرتابی هستند. [۲۳] مطالعات انجام‌شده‌ی دیگری نشان می‌دهد که جهت‌پذیری پیش‌رونده، مهم‌ترین عامل خرابی در سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل است. [۲۳، ۲۴] برخلاف زلزله‌های حوزه‌ی دور، که انرژی زلزله در کل زمان ارتعاش توزیع می‌شود، در این زلزله‌ها بخش عمده‌ی انرژی زلزله در یک یا چند پالس ابتدایی قرار دارد. یکی دیگر از تفاوت‌هایی که معمولاً بین زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور وجود دارد، اختلاف در نسبت بیشینه‌ی سرعت حرکت زمین<sup>۱۶</sup> به بیشینه‌ی شتاب حرکت زمین<sup>۱۷</sup> (PGV/PGA) است. معمولاً این نسبت برای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، بزرگ‌تر از حوزه‌ی دور است و مقدار آن اثر پدیده‌ی جهت‌پذیری را در نگاشت نشان می‌دهد. [۲۴] یکی دیگر از ویژگی‌های زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، اثر مؤلفه‌ی قائم زلزله است. در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، نسبت بیشینه‌ی شتاب مؤلفه‌ی قائم به بیشینه‌ی شتاب مؤلفه‌ی افقی در مقایسه با زلزله‌های حوزه‌ی دور بزرگ‌تر است. [۲۵]

## ۳. نظریه هایپوپلاستیسیته جهت مدل‌سازی مصالح

### دانه‌ی

همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شده است، در پژوهش حاضر، از یک مدل هایپوپلاستیک برای مدل‌سازی رفتار خاک استفاده شده است. نظریه هایپوپلاستیسیته در سال ۱۹۸۵ معرفی شده است، [۲۶] و براساس آن نرخ تنش به صورت تابعی از تانسور تنش و نرخ کرنش در نظر گرفته می‌شود. پس از مدتی در مطالعات دیگری، نسبت

اندرکنش خاک - شمع - سازه، جابه‌جایی ناشی از انتقال و چرخش 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. [۲] در نهایت ممکن است، این جابه‌جایی‌های اضافی و نتایج آن، (اثرات  $P - \Delta$ ) پایداری کلی سازه را تحت تأثیر قرار دهند. تاکنون پژوهشگران بسیاری اثر اندرکنش خاک - شمع - سازه را بررسی کرده‌اند. در مطالعه‌ی اثرات اندرکنش سینماتیکی در تحریک ورودی در سطح پی، عوامل مختلفی نظیر: جداسدگی شمع و خاک، حالت خمیری خاک، و انتشار سه بعدی امواج در نظر گرفته شده‌اند. [۲] در یک تحلیل سه بعدی، به مطالعه‌ی اثر حالت خمیری و جداسدگی شمع و خاک در پاسخ دینامیکی تک شمع و گروه شمع پرداخته شده است. [۵] همچنین با استفاده از آزمایش میز لرزه و مدل‌سازی عددی، اندرکنش خاک - شمع - سازه بررسی شده است. [۶] و نیز در یک مطالعه‌ی پارامتری روی اثر اندرکنش خاک - شمع - سازه نتیجه گرفته شده است که رفتار غیرخطی خاک نقش مهمی در رفتار لرزه‌ی سیستم خاک - شمع - سازه ایفا می‌کند. [۷] همچنین در بررسی اندرکنش خاک - شمع - سازه روی رفتار سازه‌های نیمه‌بلند، اثر پی‌های سطحی و عمیق در رفتار لرزه‌ی سازه با استفاده از آزمایش میز لرزه و مدل‌سازی عددی بررسی شده است. [۸]

اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در سازه‌ها تاکنون موضوع پژوهش‌های بسیاری بوده است. زلزله‌های اخیر، مانند: لوما پرتاب<sup>۵</sup>، نورث ریج<sup>۶</sup>، کوبه<sup>۷</sup>، کوکانلی<sup>۸</sup>، و چی چی<sup>۹</sup> ویژگی‌های منحصر به فرد زلزله‌های مناطق نزدیک گسل را بیشتر آشکار کرده‌اند. حرکات لرزه‌ی که در مناطق حوزه‌ی نزدیک و در جهت گسیختگی گسل ثبت می‌شوند با حرکات مشاهده‌شده در مناطق دور از گسل بسیار متفاوت هستند. [۹] بیشترین اثر تخریبی حرکات حوزه‌ی نزدیک مربوط به پالس‌های موجود در تاریخچه‌ی زمانی سرعت حرکت زمین است. البته نظرات مختلفی وجود دارند، برخی از پژوهشگران عقیده دارند که پتانسیل تخریبی حرکات حوزه‌ی نزدیک با مقدار جابه‌جایی رخ داده در پالس سرعت ارتباط دارد. [۱۰] برخی پژوهشگران اعتقاد دارند که باید به پالس‌های شتاب نسبت به پالس‌های سرعت، توجه بیشتری داشت. [۱۱] همچنین در برخی مطالعات مشخص شده است که پالس‌های زمان تناوب بلند ناشی از زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در سازه‌های بلند نسبت به سازه‌های کوتاه، تأثیر بیشتری دارند. [۱۲، ۱۳] از مهم‌ترین ویژگی‌های زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک می‌توان به اثرات جهت‌پذیری<sup>۱۰</sup> و حرکت پرتابی<sup>۱۱</sup> اشاره کرد. [۱۴]

در بررسی اندرکنش خاک - شمع - سازه، شرایط ساختگاه تأثیر زیادی در رفتار و پاسخ سیستم دارد. از همین رو، رفتار خاک باید به صورت دقیق مورد بررسی قرار گیرد. مدل‌های هایپوپلاستیک<sup>۱۲</sup> نوعی از مدل‌های رفتاری غیرخطی هستند که جهت بررسی رفتار مصالح دانه‌ی به وجود آمده‌اند. خصوصیت برجسته‌ی مدل‌های هایپوپلاستیک سادگی آنهاست. این مدل‌ها به عنوان مدل‌های با تغییرشکل‌های غیرارتجاعی شناخته می‌شوند و از هیچ مفهوم اضافی مانند سطح تسلیم<sup>۱۳</sup> و یا پتانسیل خمیری<sup>۱۴</sup> استفاده نمی‌کنند. [۱۵] با وجود این، تغییرشکل‌های ناشی از تنش‌های سیکلی کوچک در بیشتر آنها مشاهده نشده است. این پدیده باعث ایجاد یک تغییرشکل اضافی تجمعی تحت سیکل‌های کم‌دامنه‌ی تنش می‌شود. برای رفع این کمبود، مفهوم کرنش بین‌دانه‌ی<sup>۱۵</sup> معرفی شده است. [۱۶] در پژوهش حاضر، از مدل هایپوپلاستیک معرفی‌شده‌ی von Wolfersdorff با در نظر گرفتن مفهوم کرنش بین‌دانه‌ی برای مدل‌سازی خاک غیرچسبنده (ماسه) استفاده شده است. [۱۷، ۱۶] همچنین در پژوهش حاضر، به بررسی اثر پالس‌های ناشی از زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در پاسخ سیستم خاک - شمع - سازه با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - شمع - سازه پرداخته شده است. لازم به

مدل هایپوپلاستیک von Wolffersdorff [۲۸، ۲۷] در محدوده‌ی تنش‌های سیکلی کوچک کارایی ندارد. نقص آن در نظر گرفتن یک تغییرشکل جمعی اضافی است، و به همین دلیل تغییرشکل‌ها بیشتر برآورد می‌شوند، که به‌عنوان رتجینگ<sup>۲۱</sup> نامیده می‌شود. [۱۶] طبق اندازه‌گیری‌ها، [۳۱، ۳۰] سختی خاک در یک حالت مشخص، که با استفاده از تنش و نسبت تخلخل تعریف می‌شود، به شدت به تاریخچه‌ی تغییرشکل‌ها و جهت نرخ کرنش وابسته است.

وقتی مفهوم کرنش بین‌دانه‌یی در مدل هایپوپلاستیک در نظر گرفته می‌شود، سختی خاک به‌وسیله‌ی تفاوت بین جهت نرخ کرنش واقعی و نرخ کرنش بین‌دانه‌یی و همچنین به‌وسیله‌ی بزرگی نرخ کرنش بین‌دانه‌یی کنترل می‌شود. برای پیاده‌کردن مفهوم کرنش بین‌دانه‌یی، ۵ پارامتر موردنیاز هستند. ضرایب  $m_T$  و  $m_R$  ضرایب افزایش سختی ناشی از تغییرجهت‌های  $90^\circ$  و  $180^\circ$  درجه در مسیر کرنش هستند. شعاع محدوده‌ی کشسان ( $R$ ) بین  $10^{-7}$  تا  $10^{-2}$  متغیر است و معمولاً برابر با  $10^{-4}$  در نظر گرفته می‌شود. پارامتر  $\beta_R$  سیر تکاملی کرنش بین‌دانه‌یی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پارامتر  $\chi$  ( $\chi > 1$ ) مقدار افت سختی را تشریح می‌کند. مقادیر پارامترهای کرنش بین‌دانه‌یی به‌وسیله‌ی آزمایش سه محوری سیکلی به‌دست می‌آیند. پارامترهای کرنش بین‌دانه‌یی و مفاهیم فیزیکی آنها در جدول ۲ توضیح داده شده‌اند. نحوه‌ی به‌دست‌آوردن پارامترهای مدل هایپوپلاستیک von Wolffersdorff با در نظر گرفتن مفهوم کرنش بین‌دانه‌یی و توضیحات تکمیلی در مورد ذکرشده در برخی مطالعات پژوهشی [۲۸، ۱۷، ۱۶] شرح داده شده است.

#### ۴. مدل‌سازی عددی

مدل در نظر گرفته‌شده شامل ۳ بخش خاک، شمع - کلاهدک و سازه است. مشخصات مربوط به مدل عددی در نظر گرفته‌شده در شکل ۱ ارائه شده است. مدل به‌صورت متقارن است، به همین دلیل با استفاده از شرایط تقارن فقط نیمی از مدل در نظر گرفته می‌شود. ابعاد در نظر گرفته‌شده برای خاک، شمع، کلاهدک و سازه در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. پارامترهای مفهوم کرنش بین‌دانه‌یی و مفاهیم فیزیکی آنها.

پارامتر	مفهوم فیزیکی
$m_T$	ضریب افزایش سختی برای $90^\circ$ درجه تغییر در جهت مسیر کرنش
$m_R$	ضریب افزایش سختی برای $180^\circ$ درجه تغییر در جهت مسیر کرنش
$R$	شعاع محدوده‌ی کشسان
$\beta_R$	ثابت مصالح - کنترل نرخ کرنش بین‌دانه‌یی ( $\dot{h}$ )
$\chi$	ثابت مصالح - کنترل نرخ افت سختی

جدول ۳. ابعاد در نظر گرفته‌شده برای خاک، شمع، کلاهدک و سازه.

اجزاء مدل	طول (جهت $x$ ) (متر)	عرض (جهت $y$ ) (متر)	عمق (جهت $z$ ) (متر)
خاک	۵۰	۵۰	۱۵
کلاهدک	۴	۴	۰٫۵
اجزاء مدل	ارتفاع (جهت $z$ ) (متر)	شعاع (متر)	
سازه	۱	۰٫۴۲	--
شمع	۷٫۵	۰٫۲۵	--

تخلخل هم به‌عنوان یک متغیر اضافی به این نظریه اضافه شده است. [۲۸، ۲۷] در پژوهش حاضر، مدل هایپوپلاستیک von Wolffersdorff به‌دلیل کامل‌تر بودن آن در مقایسه با مدل‌های دیگر انتخاب شده است.

حالت کلی مدل هایپوپلاستیک von Wolffersdorff به‌صورت رابطه‌ی ۱ است:

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

که در آن،  $\dot{T}$  نرخ تغییرات تنش،  $T$  تانسور تنش کوشی<sup>۱۸</sup>،  $e$  نسبت تخلخل و  $D$  تانسور نرخ کرنش است.

مدل هایپوپلاستیک von Wolffersdorff شامل سه تابع حدی نسبت تخلخل به‌منزله‌ی تابع فشار متوسط اسکلت خاک ( $p_s$ ) است، که به این صورت بیان می‌شوند:

- $e_i$  نسبت تخلخل را در سست‌ترین حالت ممکن نشان می‌دهد.
- $e_c$  متناظر با نسبت تخلخل در حالت بحرانی است.
- $e_d$  نسبت تخلخل مربوط به حالت بیشینه‌ی تراکم است.

این ضرایب در جایی که  $p_s$  به سمت صفر میل می‌کند، یعنی فشار متوسط اسکلت خاک ناپدید می‌شود، به مقادیر حدی خود یعنی  $e_{c^*}$ ،  $e_i^*$  و  $e_{d^*}$  می‌رسند. [۲۷] در حالت وجود فشار  $p_s$ ، معادلات به‌صورت رابطه‌ی ۲ خواهند بود:

$$\frac{e_i}{e_{i^*}} = \frac{e_c}{e_{c^*}} = \frac{e_d}{e_{d^*}} = \exp \left[ - \left( \frac{3p_s}{h_s} \right)^n \right] \quad (2)$$

در حالت کلی مدل ارائه‌شده‌ی von Wolffersdorff شامل ۸ پارامتر است، که قادر به توصیف رفتار غیرارتجاعی مصالح دانه‌یی در محدوده‌ی وسیعی از تنش‌هاست. پارامترهای این مدل و مفاهیم فیزیکی آنها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

در صورتی که نرخ تنش و نرخ تغییرشکل حجمی برابر با صفر باشند، حالت بحرانی در طول برش یکنواخت حاصل خواهد شد. [۲۹] برای تخمین سادگی از  $\varphi_c$  می‌توان مقدار آن را با استفاده از اندازه‌گیری زاویه‌ی ایستادن خاکریز مصالح دانه‌یی خشک نسبت به افق به‌دست آورد.  $h_s$  نشان‌دهنده‌ی سختی دانه‌یی<sup>۱۹</sup> مصالح است و توان  $n$  به حساسیت فشاری<sup>۲۰</sup> اسکلت دانه‌ها اشاره می‌کند و بیانگر افزایش غیرمتناسب سختی افزایشی توأم با افزایش فشار متوسط مصالح دانه‌یی ( $p_s$ ) است. برای به‌دست‌آوردن  $n$  و  $h_s$  باید یک آزمایش تراکم با نمونه‌ی اولیه‌ی بسیار سست انجام شود، ولی عملاً یک آزمایش آدومتر انجام می‌شود. توان  $\alpha$  انتقال بین حالت پیک و حالت بحرانی را تشریح می‌کند و به‌وسیله‌ی آزمایش سه محوری تعیین می‌شود. توان  $\beta$  نشان‌دهنده‌ی تغییرات سختی در یک چگالی مشخص است. اگر  $e$  کوچک‌تر از  $e_i$  باشد، (یعنی خاک متراکم باشد)، توان  $\beta$  نقش مهمی ایفا می‌کند.

جدول ۱. پارامترهای مدل هایپوپلاستیک وُلفِرْسُدِرُوف.

پارامتر	مفهوم فیزیکی
$\phi_c$	زاویه‌ی اصطکاک بحرانی
$e_{c^*}$ ، $e_{d^*}$ ، $e_i^*$	نسبت‌های تخلخل کمینه، بیشینه و بحرانی
$h_s$	سختی دانه‌یی
$n$	توان مربوط به حساسیت اسکلت دانه‌یی به تغییرات فشار
$\alpha$	توان مربوط به حالت انتقال بین تنش بیشینه و بحرانی
$\beta$	توان مربوط به تغییر سختی در تراکم موجود خاک

جدول ۵. مقادیر پارامترهای کرنش بین دانه‌یی. [۱۶]

پارامتر	$R$	$m_R$	$m_T$	$\beta_r$	$\chi$
مقدار	۰٫۰۰۰۱	۵	۲	۰٫۵	۶

جدول ۶. مشخصات مربوط به بتن.

پارامتر	جرم مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )	مدول کشسانی (GPa)	ضریب پواسون
مقدار	۲۴۰۰	۲۷٫۳	۰٫۲

جدول ۷. مشخصات کشسان مربوط به فولاد.

پارامتر	جرم مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )	مدول کشسانی (GPa)	ضریب پواسون
مقدار	۰٫۰۰۰۱	۲۰۰	۰٫۳

جدول ۸. مشخصات خمیری مربوط به فولاد.

کرنش خمیری	تنش (MPa)
۰	۲۴۰
۰٫۱۹۸۸	۳۷۰

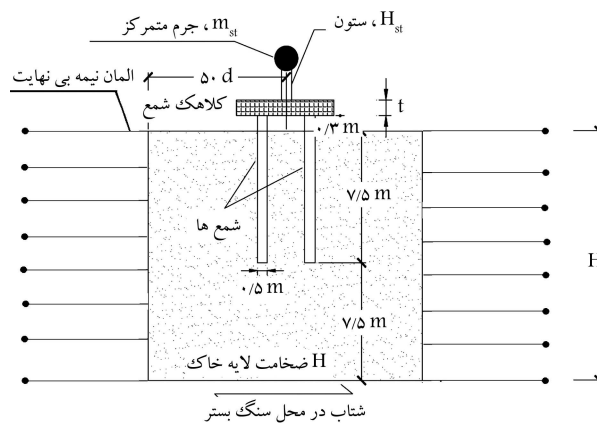
در جدول‌های ۷ و ۸ هم مشخصات مربوط به مصالح در نظر گرفته شده برای سازه ارائه شده‌اند. سازه‌ی مورد نظر به صورت فولادی در نظر گرفته شده و فولاد آن هم از جنس فولاد ساختمانی ST-۳۷ است. همچنین رفتار سازه به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده است. جرم سازه به صورت متمرکز فرض و در قسمت بالای آن اعمال شده است. بنابراین 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 و فرض شده است که نسبت میرایی در زمان تناوب سیستم خاک - سازه و زمان تناوب خاک برابر با  $0.05$  باشد. با این فرض مقادیر  $\alpha = 0.3951$  و  $\beta = 0.0040$  به دست آمده‌اند. مقدار  $\alpha$  به جرم و مقدار  $\beta$ ، که متناسب با سختی است، به سازه اعمال شده است.

بین کلاهک و خاک یک فاصله‌ی  $30$  سانتی‌متری وجود داشته و کلاهک با خاک تماس نداشته است. در پژوهش حاضر، از تماس کلی  $22$  با امکان لغزش محدود در نرم‌افزار ABAQUS، [۲۳] استفاده شده و تماس از نوع سخت  $23$  در نظر گرفته شده است. تماس از نوع سخت، امکان نفوذ سطح فرعی به داخل سطح اصلی را به میزان کمیته می‌رساند و اجازه‌ی انتقال تنش کششی در سطح تماس را نمی‌دهد. در این نوع تماس وقتی سطوح در تماس با هم قرار می‌گیرند، هرگونه فشار تماسی بین آنها منتقل می‌شود. در مدل‌سازی امکان جداسازی بین خاک و شمع در نظر گرفته شده است. اگر این فشار تماسی به صفر برسد، سطوح از یکدیگر جدا می‌شوند. قانون اصطکاک کولمب برای مدل‌سازی اصطکاک بین شمع و خاک مورد استفاده قرار گرفته است. ضریب اصطکاک در مدل‌سازی  $0.42$  فرض شده است. [۲۴]

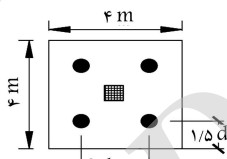
#### ۲.۴. بارگذاری و شرایط مرزی

در مدل‌سازی از ۳ نوع شرط مرزی استفاده می‌شود. کف مدل به عنوان سطح سنگ بستر در نظر گرفته شده است و در سه جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  مقید می‌شود (درجات آزادی بسته می‌شوند) همچنین به دلیل اینکه از شرط تقارن استفاده شده است، باید وسط مدل با استفاده از قیود تقارن  $24$  مقید شود. در صورت مقید کردن مرزهای جانبی، به دلیل انتشار امواج زلزله در محیط خاک، با برخورد امواج به مرز و منعکس شدن آنها



شتاب در محل سنگ بستر

الف) مشخصات خاک، سازه و گروه شمع؛



ب) مشخصات کلاهک شمع.

شکل ۱. مشخصات مدل عددی در نظر گرفته شده.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای مدل هایپوپلاستیک von Wolffersdorff. [۱۶]

پارامتر	$\phi_c$	$h_s$ (GPa)	$n$	$e_{d0}$	$e_{c0}$	$e_{i0}$	$\alpha$	$\beta$
مقدار	۳۳	۱٫۵	۰٫۲۸	۰٫۵۵	۰٫۹۵	۱٫۰۵	۰٫۲۵	۱٫۵

ابعاد مربوط به خاک در مدل به گونه‌ی انتخاب شده‌اند تا مرزها تحت تأثیر تنش قرار نگیرند، بدین منظور خاک در مدل از هر طرف به اندازه‌ی  $d_p$  (۵ برابر قطر شمع است) و در عمق به اندازه‌ی  $2 I_p$  (۲ برابر با طول شمع است) شبیه‌سازی شده است. [۲۲] همچنین فرض شده است که سنگ بستر در عمق ذکر شده قرار گرفته باشد.

برای در نظر گرفتن سازه، از یک سازه‌ی یک درجه آزادی استفاده شده است. همچنین فرض شده است که زمان تناوب آن بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش برابر با ۱ ثانیه باشد و جرم معادل آن هم به مقدار  $40$  تن فرض شده است. جرم به صورت متمرکز روی سازه اثر داده شده است. با در نظر گرفتن زمان تناوب ۱ ثانیه (زمان تناوب متوسط) سعی شده است تا سازه‌ی در نظر گرفته شود که پالس‌های ناشی از پدیده‌ی جهت‌پذیری در آن تأثیرگذار باشند.

#### ۱.۴. مصالح مصرفی

برای مدل‌سازی خاک فرض شده است که خاک از نوع ماسه‌ی Hochstetten است. خاک به صورت خشک در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای مدل هایپوپلاستیک von Wolffersdorff و پارامترهای کرنش بین‌دانه‌یی به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. مقدار چگالی برای خاک  $\rho = 1570 \text{ kg/m}^3$  و مقدار نسبت تخلخل اولیه  $e_0 = 0.7$  در نظر گرفته شده است. [۱۷] شمع‌ها و کلاهک از جنس بتن هستند. مشخصات مربوط به بتن در نظر گرفته شده در جدول ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است که رفتار بتن به صورت کشسان فرض می‌شود.

به گونه‌یی انتخاب شده است که سازه وارد محدوده‌ی رفتار غیرخطی شود. در شکل ۲، طیف فوریه مربوط به شتاب‌نگاشت زلزله‌های سن فرناندو، نورث‌ریج-۱، مورگان‌هیل<sup>۲۶</sup>، و کپ مندوسینو<sup>۲۷</sup> نشان داده شده است.

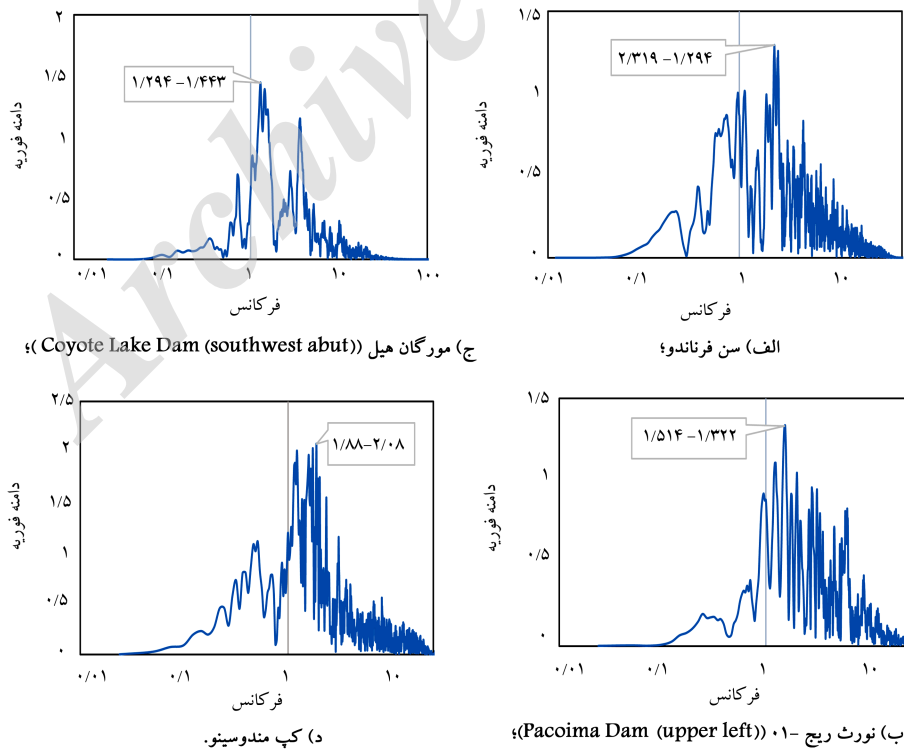
### ۳.۴. مراحل حل

مراحل کلی حل مسئله به صورتی در نظر گرفته شده‌اند که فرایند ساخت نیز در مدل‌سازی لحاظ شود. در مرحله‌ی اول، خاک تحت بار وزن خود قرار می‌گیرد، سپس شمع، کلاهک و سازه روی آن نصب می‌شوند. در مرحله‌ی آخر هم، اثر زلزله به مدل اعمال می‌شود. جهت استفاده از مدل هابیوپلاستیک Wolfersdorff von با در نظر گرفتن مفهوم کرنش بین‌دانه‌یی برای خاک، از UMAT<sup>[۳۶]</sup> مخفف واژه‌ی برای حالت استاندارد ABAQUS استفاده شده است.<sup>[۳۶]</sup> UMAT مخفف واژه‌ی USER MATERIAL است و سابروتین UMAT برای پیاده‌کردن مدل‌های

به داخل محیط در تحلیل خطا ایجاد می‌شود. بدین منظور پژوهشگران معمولاً در دیواره‌ها برای جلوگیری از ایجاد خطا، از مرزهای جاذب استفاده می‌کنند. در پژوهش حاضر، مرزهای جانبی انتخاب شده از نوع المان‌های نیمه بی‌نهایت<sup>۲۵</sup> هستند. در مطالعه‌ی انجام شده‌ی در سال ۲۰۰۷، تعداد ۹۱ رکورد مربوط به زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، که پالس ناشی از جهت‌پذیری پیش‌رونده در تاریخچه‌ی زمانی سرعت حرکت زمین دارند، معرفی شده‌اند،<sup>[۳۵]</sup> و از یک روش مبتنی بر استفاده از تبدیل موجک برای به دست آوردن مقادیر دوره‌ی تناوب پالس رکوردها استفاده شده است. با توجه به فرضیات مسئله، که محل اعمال شتاب‌نگاشت‌ها روی سنگ بستر فرض شده است، تعداد ۸ شتاب‌نگاشت ثبت شده روی سنگ سخت از میان این ۹۱ رکورد، جهت انجام تحلیل‌ها انتخاب شده‌اند. مشخصات این شتاب‌نگاشت‌ها در جدول ۹ ارائه شده است. جهت استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مذکور، هر یک از آنها به شتاب بیشینه‌ی ۰/۳۵ g مقیاس شده است. لازم به ذکر است این مقدار

جدول ۹. شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده.<sup>[۳۵]</sup>

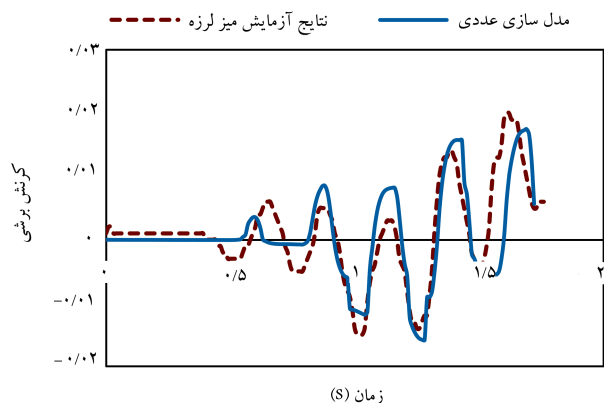
ردیف	زلزله	سال	ایستگاه	TP (s)	PGV (cm/s)	M <sub>w</sub>
۱	San Fernando	۱۹۷۱	Pacoima Dam (upper left abut)	۱/۶	۱۱۶/۵	۶/۶
۲	Coyote Lake	۱۹۷۹	Gilroy Array #۶	۱/۲	۵۱/۵	۵/۷
۳	Morgan Hill	۱۹۸۴	Coyote Lake Dam (southwest abut)	۱	۶۲/۳	۶/۲
۴	Morgan Hill	۱۹۸۴	Gilroy Array #۶	۱/۲	۳۵/۴	۶/۲
۵	Cape Mendocino	۱۹۹۲	Petrolia	۳	۸۲/۱	۷
۶	Northridge-۰۱	۱۹۹۴	Pacoima Dam (downstream)	۰/۵	۵۰/۴	۶/۷
۷	Northridge-۰۱	۱۹۹۴	Pacoima Dam (upper left)	۰/۹	۱۰۷/۱	۶/۷
۸	Kocaeli, Turkey	۱۹۹۹	Gebze	۵/۹	۵۲	۷/۵



شکل ۲. طیف فوریه‌ی مربوط به شتاب‌نگاشت زلزله.

جدول ۱۰. ابعاد خاک، شمع، کلاهک و سازه برای مدل در نظر گرفته شده جهت صحت‌سنجی. [۳۷]

اجزاء مدل	طول (جهت $x$ ) (متر)	عرض (جهت $y$ ) (متر)	عمق (جهت $z$ ) (متر)
خاک	۰٫۵۶	۰٫۲۱	۰٫۳۱
کلاهک	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۲
اجزاء مدل	ارتفاع (جهت $z$ ) (متر)	شعاع (متر)	—
سازه	۰٫۰۵	۰٫۱۳	—
شمع	۰٫۱۷	۰٫۰۰۵	—



شکل ۳. نتایج صحت‌سنجی مدل‌سازی.

جدول ۱۱. مقادیر پارامترهای مدل هایپوپلاستیک von Wolfersdorff برای ماسه‌ی Toyoura. [۲۸]

پارامتر	$\phi_c$	$h_s$ (GPa)	$n$	$e_{d0}$	$e_{c0}$	$e_{i0}$	$\alpha$	$\beta$
مقدار	۳۰	۲٫۶	۰٫۲۷	۰٫۶۱	۰٫۹۸	۱٫۱	۰٫۱۸	۱٫۱

جدول ۱۲. مقادیر پارامترهای کرنش بین‌دانه‌یی برای ماسه‌ی Toyoura. [۳۸]

پارامتر	$R$	$m_R$	$m_T$	$\beta_r$	$\chi$
مقدار	۰٫۰۰۰۱	۵	۲	۰٫۱۲	۱

مقادیر مثبت و منفی، به دلیل وجود پالس شدید در رکوردهای زلزله‌ی اعمال شده به سیستم خاک - شمع - سازه، سازه دچار یک تغییرشکل غیرخطی پسماند شدید مثبت و یا منفی شده و در ادامه، بقیه‌ی نوسان‌ها حول این تغییرشکل پسماند مثبت و یا منفی رخ داده‌اند. به عبارت دیگر، وجود انرژی زیاد در ابتدای رکوردهای حوضه‌های نزدیک و اعمال ناگهانی (پالس‌گونه) آن به سازه باعث ایجاد کرنش‌های بسیار زیادی در آن می‌شود. به همین دلیل، در این حالت سازه وارد محدوده‌ی رفتار غیرخطی می‌شود و تغییرمکان ماندگار در آن ایجاد می‌شود. این رفتار در سایر زلزله‌های حوضه‌ی نزدیک هم مشاهده می‌شود. در شکل ۵، تاریخچه‌ی زمانی برش پایه‌ی ایجاد شده در سازه تحت اثر رکوردهای کوپوت لیک ۳، نورث‌ریچ-۱۰ و سن فرناندو نشان داده شده است، که در آن هم می‌توان اثر پالس سرعت ناشی از رکورد زلزله‌ی اعمال شده به سازه را مشاهده کرد، که باعث شده است در ابتدای زلزله، نیروی برشی به صورت ناگهانی به سازه وارد شود و در آن کرنش خمیری ایجاد کند. در شکل ۶، کانتور کرنش خمیری ایجاد شده در سازه نشان داده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که رفتار سازه در اثر اعمال زلزله‌های حوضه‌ی نزدیک حاوی پالس، روندی کلی دارد و آن ایجاد یک تغییرشکل ناگهانی بزرگ در سازه است، که در اثر ماهیت پالس‌گونه‌ی تحریک ورودی به وجود آمده است. به نظر می‌رسد با توجه به تأثیر عمده‌ی پالس سرعت در پاسخ سازه، در نظر گرفتن اثر پالس سرعت زلزله‌های حوضه‌ی نزدیک در طراحی سازه‌ها، اهمیت بسیاری دارد. شتاب بیشینه، نقش مهمی در بررسی پاسخ لرزه‌یی سازه ایفا می‌کند. در شکل ۷، تغییرات لگاریتم بیشینه‌ی نسبت دررفت ایجاد شده در سازه بر حسب لگاریتم شتاب طیفی نشان داده شده است. شتاب بیشینه در زمان تناوب سازه به دست آمده است. طبق شکل ۷، با افزایش شتاب طیفی، تغییرشکل در سازه افزایش می‌یابد. این اتفاق به دلیل افزایش کرنش‌های ایجاد شده در سازه با افزایش شتاب است.

در شکل ۸، مقدار بیشینه‌ی تغییرمکان ایجاد شده در سازه در مقابل زمان تناوب پالس نرمال شده نشان داده شده است. زمان تناوب پالس نرمال شده برابر با نسبت زمان تناوب پالس رکورد حوضه‌ی نزدیک براساس تعریف ارائه شده‌ی در سال ۲۰۰۷ [۳۵]، به زمان تناوب اصلی سیستم خاک - شمع - سازه است. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، بیشترین پاسخ به اِزاء رکوردی ایجاد شده است که زمان تناوب پالس متناظر با آن، کمی بیشتر از زمان تناوب سیستم خاک - شمع - سازه است. به طور کلی می‌توان گفت وقتی سازه وارد محدوده‌ی رفتار غیرخطی شده است، زمان تناوب سیستم خاک - شمع - سازه افزایش یافته و باعث شده است تا بیشترین پاسخ به اِزاء پالسی که زمان تناوب آن کمی بزرگ‌تر از زمان تناوب

رفتاری که به صورت پیش فرض در نرم افزار ABAQUS موجود نیستند. در نرم افزار مذکور مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای حل معادلات از روش انتگرال‌گیری ضمنی [۲۸] استفاده می‌شود. المان‌های استفاده شده برای مش بندی خاک، شمع، کلاهک و سازه از نوع سه بعدی ۸ گره‌یی، C3D8R، هستند. هر یک از تحلیل‌ها با یک رایانه با پردازشگر ۸ هسته‌یی و ۶ گیگابایت رم، بین ۳۶ تا ۹۰ ساعت به طول می‌انجامد. محاسبات مربوط به تحلیل‌ها با استفاده از امکانات پردازش سریع مرکز ابرپایانش ملی شیخ‌بهایی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است.

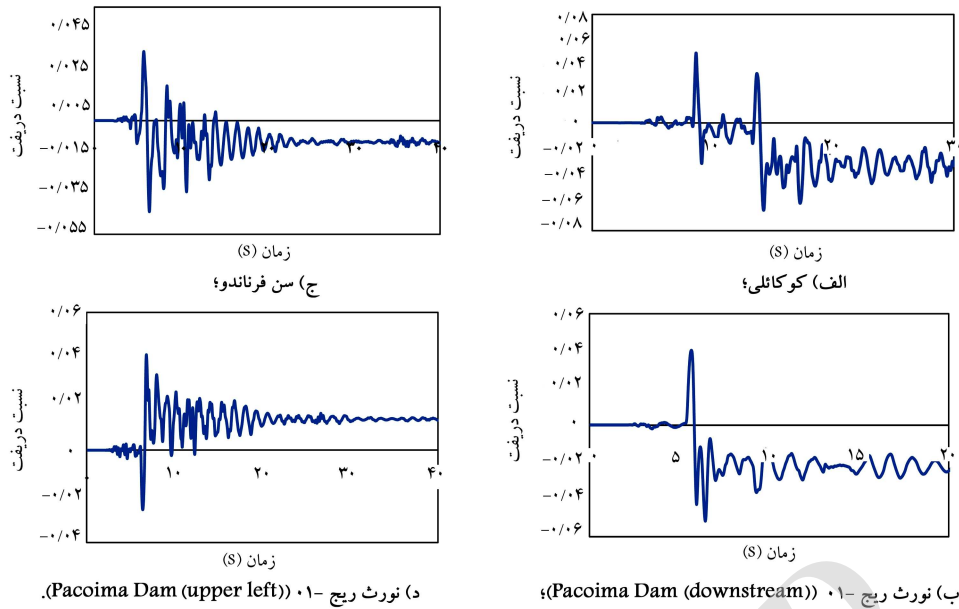
## ۵. صحت‌سنجی

جهت صحت‌سنجی مدل از نتایج آزمایش میز لرزه استفاده شده است. [۳۷] این آزمایش با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک - شمع - سازه انجام شده است. ابعاد مدل در نظر گرفته شده در جدول ۱۰ ارائه شده‌اند. خاک استفاده شده جهت انجام آزمایش ماسه‌ی Toyoura است، که پارامترهای مدل هایپوپلاستیک von Wolfersdorff و کرنش بین‌دانه‌یی برای آن به ترتیب در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده‌اند. در شکل ۳، مقایسه‌ی بین کرنش برشی ایجاد شده در آزمایش و کرنش برشی به دست آمده از مدل‌سازی عددی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایش میز لرزه وجود دارد.

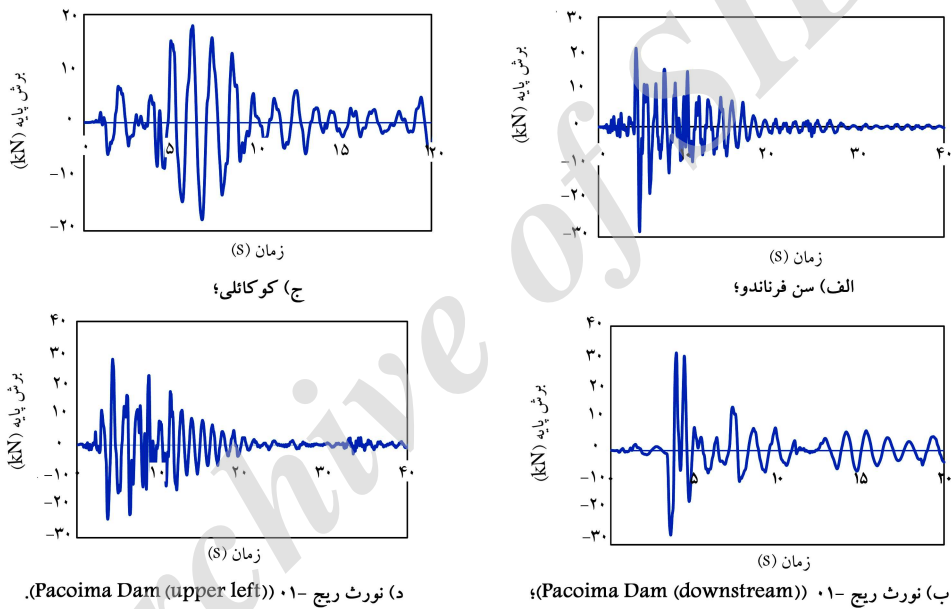
## ۶. تحلیل نتایج

### ۶.۱. بررسی عملکرد سازه

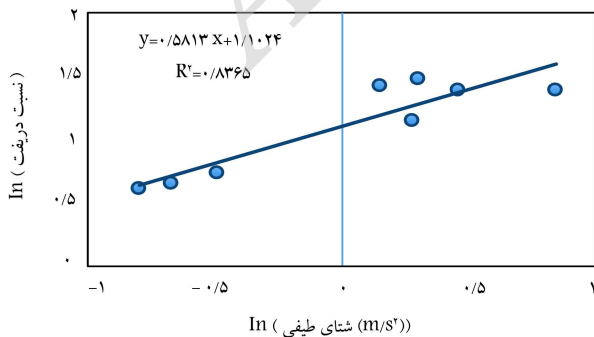
شکل ۴، تاریخچه‌ی زمانی نسبت دررفت [۲۹] (تغییرمکان نسبی سازه تقسیم بر ارتفاع سازه) را تحت اثر رکوردهای کواکالی، نورث‌ریچ-۱۰، و سن فرناندو نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پس از نوسان‌های اولیه، نسبت دررفت در محدوده‌ی



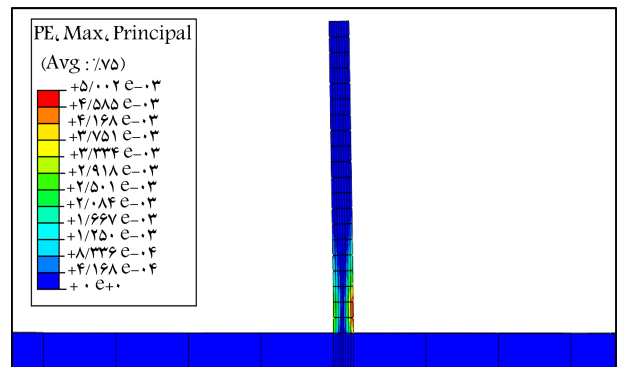
شکل ۴. تاریخچه‌ی زمانی نسبت دررفت سازه تحت اثر رکورد.



شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی برش پایه‌ی سازه تحت اثر رکورد.



شکل ۷. تغییرات لگاریتم بیشینه‌ی نسبت دررفت ایجادشده در سازه در مقابل لگاریتم شتاب طیفی.



شکل ۶. کانتور کرنش خمیری ایجادشده در سازه تحت اثر رکورد نورت ریج - ۰۱.

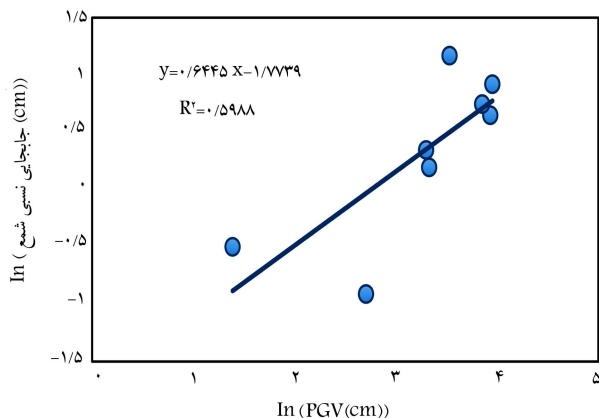
شکل ۱۰، تغییرات بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی شمع را بر حسب بیشینه‌ی سرعت حرکت زمین در محل سنگ بستر نشان می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت، به ازاء یک مقدار PGA ثابت، هر چه PGV رکورد موردنظر بیشتر باشد، بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی ایجادشده در شمع افزایش می‌یابد. البته باید در این موارد اثر پالس سرعت را هم در نظر گرفت. شکل ۱۱، تغییرات بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی شمع در مقابل بیشینه‌ی تغییرمکان حرکت زمین (PGD)<sup>۲۲</sup> را نشان می‌دهد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش PGD مقدار جابه‌جایی نسبی شمع هم افزایش می‌یابد. این نتایج با پژوهش انجام‌شده‌ی در سال ۲۰۰۹ همخوانی دارد.<sup>[۲۹]</sup> با مقایسه‌ی نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که

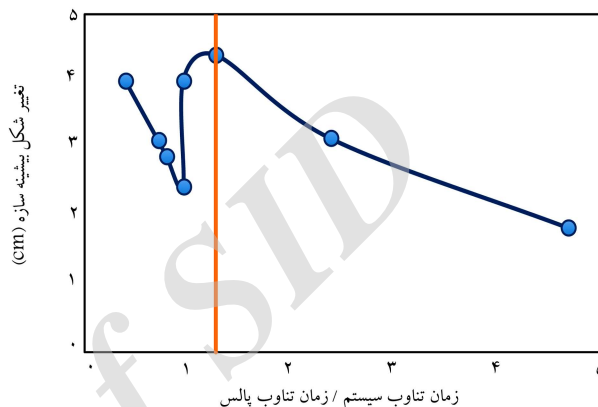
اصلی سیستم خاک - شمع - سازه است، رخ دهد. به همین دلیل در بررسی سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، در نظر گرفتن رفتار غیرخطی در مشاهده‌ی پاسخ لرزه‌ی صحیح سازه بسیار اهمیت دارد.

## ۲.۶. بررسی عملکرد شمع‌ها

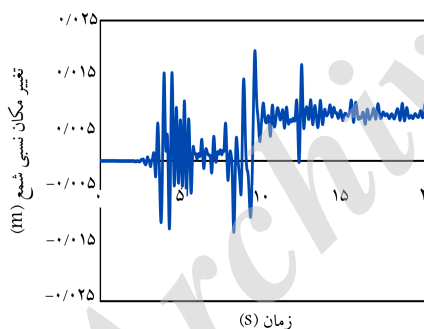
شکل ۹، تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان نسبی شمع را تحت رکوردهای کوچک‌انلی، سان فرناندو، و مورگان هیل نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، در اثر وجود پالس شدید در هر یک از رکوردهای زلزله، که باعث وقوع تغییرشکل‌های غیرخطی پسماند در خاک شده است، تغییرمکان نسبی شمع به یک مقدار مثبت و یا منفی متمایل شده و بقیه‌ی نوسانات حول این تغییرمکان رخ داده‌اند.



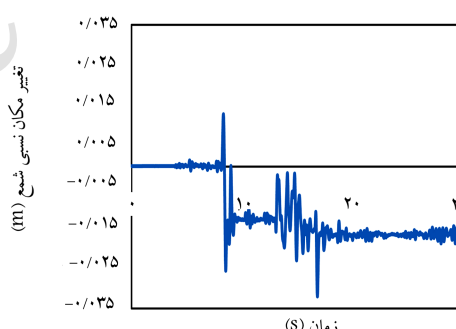
شکل ۱۰. تغییرات بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی شمع در مقابل بیشینه‌ی سرعت حرکت زمین.



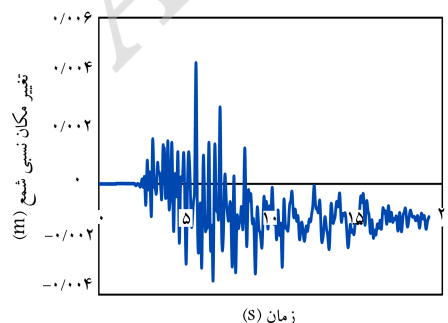
شکل ۸. تغییرشکل بیشینه‌ی ایجادشده در سازه در مقابل زمان تناوب پالس نرمال شده به زمان تناوب اصلی سیستم خاک - شمع - سازه.



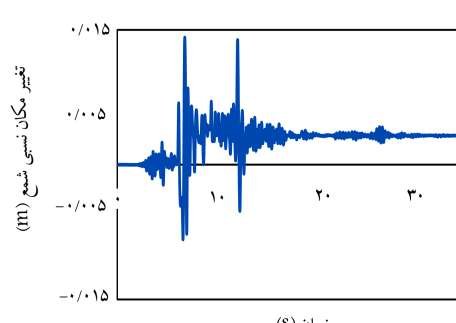
ج) مورگان هیل (Gilroy Array # ۶)



الف) کورکالی؛



د) مورگان هیل (Coyote Lake Dam (southwest abutment))



ب) سن فرناندو؛

شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان نسبی شمع تحت اثر رکورد.



همان‌طور که مشاهده می‌شود با عبور امواج زلزله از خاک، زمان تناوب غالب خاک تغییر کرده و همچنین محدوده‌ی وسیع‌تری از زمان تناوب تحت تأثیر قرار گرفته است. جهت بررسی تغییرات زمان تناوب اصلی لایه‌ی خاک در اثر اعمال یک رکورد زلزله‌ی مشخص می‌توان در هر زمان تناوب، نسبت دامنه‌ی طیف پاسخ شبه شتاب مربوط به شتاب به دست آمده در سطح زمین به دامنه‌ی طیف پاسخ شبه شتاب رکورد اعمال شده در محل سنگ بستر را به دست آورد. از رسم مقدار این نسبت در برابر زمان تناوب نموداری به دست می‌آید که زمان تناوب‌های متناظر با قله‌های آن، بیان‌گر نحوه‌ی تغییر زمان تناوب خاک در اثر اعمال زلزله هستند. شکل ۱۳، این نمودار را برای رکورد نورث ریچ-۱<sup>۵</sup> نشان می‌دهد. در شکل مذکور، زمان تناوب متناظر با بلندترین قله، بیان‌گر زمان تناوب لایه‌ی خاک در حالت تقریباً خطی و زمان تناوب‌های بزرگ‌تر متناظر با قله‌های بعدی بیان‌گر افزایش زمان تناوب لایه‌ی خاک در اثر تغییر شکل‌های غیرخطی هستند. این رفتار در سایر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک هم مشاهده می‌شود.

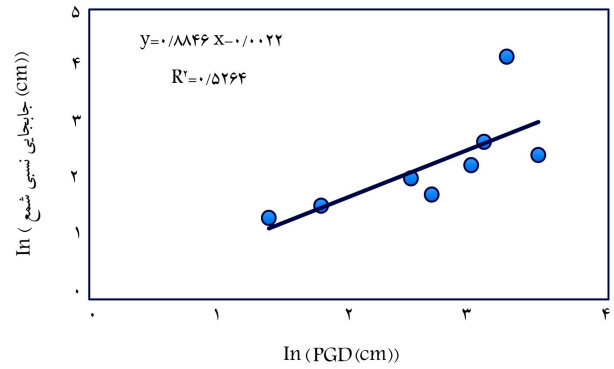
## ۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در پاسخ سیستم خاک - شمع - سازه با استفاده از روش اجزاء محدود، مدلی شامل خاک، شمع و سازه در نظر گرفته شده است، که تحت اثر ۸ شتاب‌نگاشت حوزه‌ی نزدیک، که روی سنگ سخت ثبت شده‌اند، تحلیل شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها به این صورت خلاصه شده‌اند:

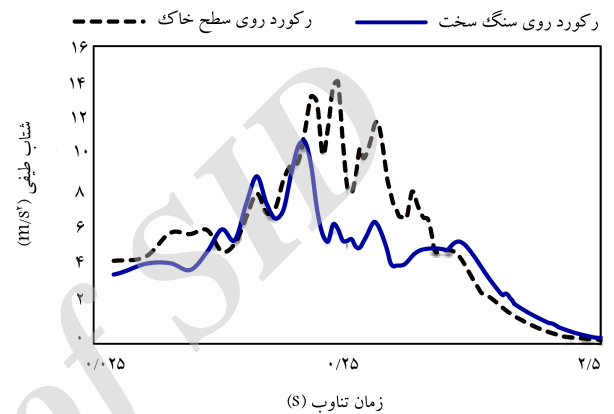
- با توجه به وجود پالس سرعت در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، این پالس باعث اعمال ناگهانی انرژی به سازه شده است و تنش و تغییر شکل زیادی را در سازه ایجاد می‌کند.
- این حرکات ناگهانی (پالس‌گونه) باعث ایجاد برش پایه‌ی بسیار زیادی در سازه می‌شوند و سازه وارد محدوده‌ی رفتار غیرخطی می‌شود.
- غیرخطی شدن سازه باعث نرم شدن آن و افزایش زمان تناوب سیستم خاک - شمع - سازه می‌شود. این افزایش زمان تناوب باعث می‌شود تا زلزله‌هایی با زمان تناوب پالس تا حدی بیشتر از زمان تناوب سیستم خاک - شمع - سازه در سازه اثر بیشتری داشته باشند.
- حرکت پالس‌گونه‌ی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در تغییر شکل شمع‌ها هم اثر دارد و باعث ایجاد تغییر مکان ناگهانی در شمع می‌شود.
- به ازاء یک مقدار PGA ثابت، رکورد با PGV بیشتر تغییر مکان بیشتری در شمع ایجاد می‌کند.
- به ازاء یک مقدار PGA ثابت، رکورد با PGD با PGD بیشتر تغییر شکل بیشتری در شمع ایجاد می‌کند.

## تقدیر و تشکر

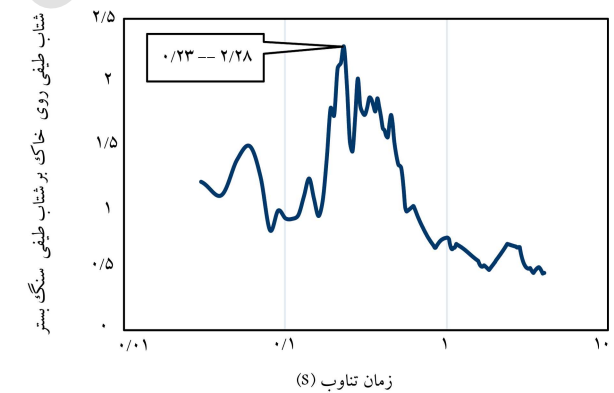
از مرکز ابرارپایش شیخ‌نهایی دانشگاه صنعتی اصفهان (<http://nhpcc.iut.ac.ir>) به دلیل در اختیار قراردادن امکانات محاسبات پیشرفته‌ی این مرکز جهت انجام تحلیل‌ها، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.



شکل ۱۱. تغییرات بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی شمع در مقابل بیشینه‌ی تغییر مکان حرکت زمین.



شکل ۱۲. طیف پاسخ شتاب ورودی و شتاب پاسخ خاک تحت زلزله‌ی نورث ریچ-۱<sup>۵</sup>.



شکل ۱۳. بررسی تغییرات زمان تناوب اصلی لایه‌ی خاک تحت اثر رکورد نورث ریچ-۱<sup>۵</sup>.

بیشینه‌ی تغییر مکان نسبی شمع، همبستگی بیشتری با PGV در مقایسه با PGD دارد.

## ۳.۶. بررسی عملکرد خاک

خاک به عنوان اولین محل عبور امواج زلزله، نقش مهمی در پاسخ لرزه‌ی سازه ایفا می‌کند. عبور امواج از خاک سست باعث بزرگ‌نمایی آنها می‌شود. شکل ۱۲، طیف‌های پاسخ شبه شتاب متناظر با رکورد نورث ریچ-۱<sup>۵</sup> اعمال شده در محل سنگ بستر و پاسخ شتاب ثبت شده در سطح زمین را نشان می‌دهد.

پانوشتها

1. kinematic
2. inertial
3. superstructure
4. free field
5. Loma Prieta
6. Northridge
7. Kobe
8. Kocaeli
9. ChiChi
10. directivity
11. fling step
12. hypoplastic
13. yield surface
14. plastic potential
15. intergranular strain
16. peak ground velocity
17. peak ground acceleration
18. cauchy stress
19. granulate hardness
20. pressure sensitivity
21. ratcheting
22. general contact
23. hard
24. symmetry
25. infinite element
26. Morgan Hill
27. Cape Mendocino
28. implicit
29. drift ratio
30. coyote Lake
31. contour
32. peak ground displacement

منابع (References)

1. Balendra, S., *Numerical Modeling of Dynamic Soil-Pile-Structure Interaction*, Washington State University, Dissertation, 118 p. (2005).
2. Seed, H.B., Murarka, R., Lysmer, J. and Idriss, I. "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), pp. 1323-1342 (1976).
3. Kramer, S.L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. (1996).
4. Bentley, K.J. and Naggar, M.H.E. "Numerical analysis of kinematic response of single piles", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(6), pp. 1368-1382 (2000).
5. Maheshwari, B., Truman, K., El Naggar, M. and Gould, P. "Three-dimensional nonlinear analysis for seismic soil-pile-structure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(4), pp. 343-356 (2004).
6. Chau, K., Shen, C. and Guo, X. "Nonlinear seismic soil-pile-structure interactions: Shaking table tests and FEM analyses", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(2), pp. 300-310 (2009).
7. Maheshwari, B. and Sarkar, R. "Seismic behavior of soil-pile-structure interaction in liquefiable soils: Parametric study", *International Journal of Geomechanics*, **11**(4), pp. 335-347 (2011).
8. Hokmabadi, A.S., Fatahi, B. and Samali, B. "Assessment of soil-pile-structure interaction influencing seismic response of mid-rise buildings sitting on floating pile foundations", *Computers and Geotechnics*, **55**, pp. 172-186 (2014).
9. Chopra, A.K. and Chintanapakdee, C. "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), pp. 1769-1789 (2001).
10. Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. and Wald, D.J. "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthquake Spectra*, **11**(4), pp. 569-605 (1995).
11. Makris, N. and Black, C.J. "Dimensional analysis of inelastic structures subjected to near fault ground motions", *Earthquake Engineering Research Center*, University of California (2003).
12. Alavi, B. and Krawinkler, H. "Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **33**(6), pp. 687-706 (2004).
13. Bertero, V.V., Mahin, S.A. and Herrera, R.A. "Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **6**(1), pp. 31-42 (1978).
14. Kalkan, E. and Kunnath, S.K. "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Earthquake Spectra*, **22**(2), pp. 367-390 (2006).
15. Kolymbas, D., *Introduction to Hypoplasticity: Advances in Geotechnical Engineering and Tunneling*, CRC Press, **1**(1), 104 p. (1999).
16. Niemunis, A. and Herle, I. "Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range", *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, **2**(4), pp. 279-299 (1997).
17. von Wolfersdorff, P.A. "A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface", *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, **1**(3), pp. 251-271 (1996).
18. Alavi, B. and Krawinkler, H., *Effects of Near-Fault Ground Motions on Frame Structures*, John A. Blume Earthquake Engineering Center, 298 p. (2001).
19. Ambraseys, N. and Douglas, J. "Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **23**(1), pp. 1-18 (2003).
20. Bray, J.D. and Rodriguez-Marek, A. "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(11), pp. 815-828 (2004).
21. Zhang, J. and Tang, Y. "Dimensional analysis of structures with translating and rocking foundations under near-fault ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(10), pp. 1330-1346 (2009).
22. *Uniform Building Code*, International Conference of Building Officials 574 p. (1997).
23. Tothong, P. and Cornell, C.A. "Structural performance assessment under near-source pulse-like ground motions using advanced ground motion intensity measures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **37**(7), pp. 1013-1037 (2008).

24. Moustafa, A. and Takewaki, I. "Deterministic and probabilistic representation of near-field pulse-like ground motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(5), pp. 412-422 (2010).
25. Wang, G.-Q., Zhou, X.-Y., Zhang, P.-Z. and Igel, H. "Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(1), pp. 73-96 (2002).
26. Kolymbas, D. "A generalized hypoelastic constitutive law", in *Proceedings of XI International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, AA Balkema, San Francisco of Conference (1985).
27. Bauer, E. "Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials", *Soils and Foundations*, **36**(1), pp. 13-26 (1996).
28. Gudehus, G. "A comprehensive constitutive equation for granular materials", *Soils and Foundations*, **36**(1), pp. 1-12 (1996).
29. Schofield, A. and Wroth, C., *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London (1968).
30. Atkinson, J., Richardson, D. and Stallebrass, S. "Effect of recent stress history on the stiffness of overconsolidated soil", *Géotechnique*, **40**(4), pp. 531-540 (1990).
31. Puzrin, A. and Burland, J. "Non-linear model of small-strain behaviour of soils", *Geotechnique*, **48**(2), pp. 217-213 (1998).
32. Ghorbani, A., Hasanzadehshooili, H., Ghamari, E. and Medzvieckas, J. "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**, pp. 21-36 (2014).
33. SIMULIA, *ABAQUS 6.11 Analysis User's Manual*, **IV**, Elements (2011).
34. *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design*, RP2A-WSD, Twenty (2000).
35. Baker, J.W. "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(5), pp. 1486-1501 (2007).
36. Nuebel, K. "UMAT for von Wolffersdorff hypoplastic model with intergranular strain extension", Institute of Soil and Rock Mechanics Technical University of Karlsruhe (1998).
37. Matsumoto, T., Fukumura, K., Horikoshi, K. and Oki, A. "Shaking table tests on model piled rafts in sand considering influence of superstructures", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, **4**(3), pp. 21-38 (2004).
38. Arnold, M. "Application of the intergranular strain concept to the hypoplastic modelling of non-adhesive interfaces", *The 12th Int. Conference of IACMAG* (2008).
39. Bradley, B.A., Cubrinovski, M., Dhakal, R.P. and MacRae, G.A. "Intensity measures for the seismic response of pile foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(6), pp. 1046-1058 (2009).