

## عوامل مؤثر در لنگر خمشی سینماتیک در گروه شمع‌ها

علی سنایی‌واد (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه اراک

احمدرضا غلامی نژاد\* (دانشجوی دکتری)

دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۵)  
دربی ۲ - ۳۲، شماره ۳/۲، ص. ۹۳-۸۵a-sanaeirad@araku.ac.ir  
ahmadreza.gh@gmail.com

این نوشتار نتایج مطالعه‌ی پارامتری رفتار لرزه‌یی گروه شمع مدفون در توده‌ی خاک لایه‌یی را ارائه می‌دهد. هدف از این پژوهش، بررسی اندرکنش سینماتیک خاک - شمع و چگونگی تأثیر عوامل مختلف در توسعه‌ی لنگرهای خمشی سینماتیک در هنگام زلزله در گروه شمع‌ها بوده است. برای ساخت مدل‌ها از نرم‌افزار تفاضل محدود سه بعدی FLAC 3D استفاده شده است. صحت استاتیکی با مقایسه‌ی مدل با پژوهش‌های قبلی و صحت لرزه‌یی با استفاده از نرم‌افزار SHAKE 2000 سنجیده شده است. تجزیه و تحلیل لرزه‌یی پارامتری با تغییر عوامل اصلی و تأثیرگذار در پاسخ گروه شمع مانند: مشخصات خاک، قطر شمع‌ها، فاصله‌ی شمع‌ها، و عمق لایه‌ی خاک با استفاده از شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ال سنتر و در حوزه‌ی زمانی انجام شده است. نتایج تجزیه و تحلیل‌ها نشان داده است که عوامل ذکر شده تأثیر زیادی در مقدار لنگر خمشی سینماتیک دارند. همچنین در شمع‌های میانی، لنگر خمشی سینماتیک بیشتری نسبت به شمع‌های کناری توسعه می‌یابد.

واژگان کلیدی: آنالیز لرزه‌یی، اندرکنش خاک - شمع، اندرکنش سینماتیک، گروه شمع، تفاضل محدود.

## ۱. مقدمه

جابه‌جایی توده‌ی خاک در اثر عبور موج زلزله موجب تشکیل لنگر خمشی در شمع‌ها می‌شود. این لنگرها حتی در صورت عدم حضور روسازه نیز توسعه می‌یابند و به‌عنوان لنگرهای سینماتیک<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند. برخلاف لنگرهای اینرسی<sup>۲</sup> ناشی از جرم روسازه، که بر سر شمع اعمال می‌شود، لنگرهای سینماتیک در طول شمع توسعه می‌یابند. لنگرهای سینماتیک تا قبل از اواسط دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی جدی تلقی نمی‌شده است. اما بررسی‌های صحرایی انجام شده پس از زلزله‌های: مکزیکوسیتی (۱۹۸۵)، کوبه (۱۹۹۵) و چی چی (۱۹۹۹) نشان داده است که اثرات سینماتیک در آسیب دیدن شمع‌ها در هنگام زلزله نقش مهمی دارد.<sup>[۱]</sup>

اندرکنش لرزه‌یی خاک - شمع مسئله‌یی پیچیده است، که تحت تأثیر هم‌زمان چندین عامل مانند: جنس خاک، ارتفاع لایه‌ی خاک، رفتار غیرخطی خاک، بروز فشار آب منفذی، مشخصات شمع‌ها، اثرات اینرسی، و اندرکنش سینماتیک بین خاک شمع است. به علت این پیچیدگی در کارهای مهندسی همچنان از روش‌های ساده‌سازی شده استفاده و از اندرکنش سینماتیک چشم‌پوشی شده است. با وجود این، مطالعات نسبتاً وسیعی بر اندرکنش سینماتیک شمع تک صورت گرفته و اهمیت آن در برخی آئین‌نامه‌ها نیز ذکر شده است.<sup>[۲]</sup>

به‌طور کلی دو رویکرد در بررسی عددی لنگرهای خمشی سینماتیک شمع‌ها

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۲/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۷/۱۰، پذیرش ۱۳۹۴/۸/۱۲

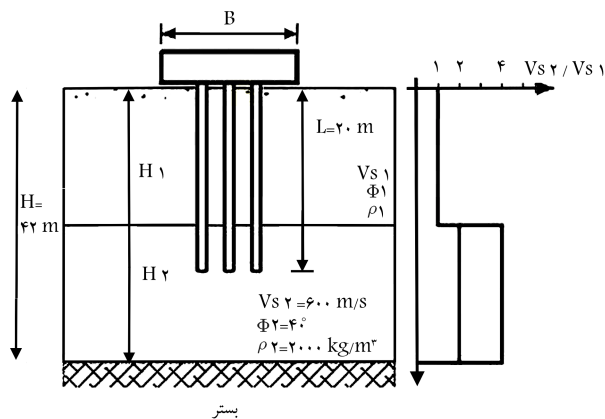
مورد استفاده قرار گرفته است: ۱. استفاده از مدل‌های تقریبی و ساده‌سازی شده مانند روش وینکلر؛<sup>[۳-۹]</sup> ۲. استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر و دقیق‌تر اجزاء محدود با مشابه.<sup>[۱۰-۱۱]</sup> مجموع پژوهش‌های انجام شده نشان داده‌اند: ۱. در خاک همگن و لایه‌یی، بیشینه‌ی لنگر خمشی به ترتیب در وسط شمع و نزدیکی مرز دو لایه ایجاد می‌شود؛ ۲. اندازه‌ی قطر شمع و یا نسبت سختی شمع به سختی خاک، تأثیر زیادی در مقدار لنگر خمشی سینماتیک دارد. همچنین باید ذکر شود که تمام پژوهش‌های انجام شده بر روی شمع تک بوده‌اند، این در حالی است که شمع‌ها به ندرت به صورت تک استفاده می‌شوند.

این نوشتار گزارشی از تحلیل‌های اندرکنش سینماتیک شمع - خاک انجام شده بر روی گروه شمع با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 3D است. هدف از انجام این تجزیه و تحلیل‌ها، بررسی اثر عوامل مختلف مانند: جنس خاک، فاصله‌ی شمع‌ها، قطر شمع‌ها، و عمق لایه‌ی خاک بر لنگر خمشی سینماتیک گروه شمع بوده است.

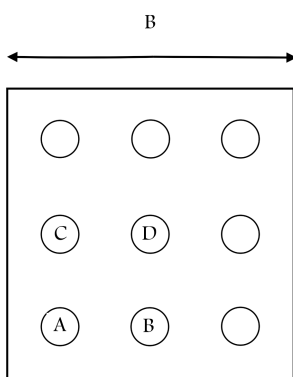
## ۲. مدل‌های تجزیه و تحلیل

## ۲.۱. نرم‌افزار مورد استفاده

برای ساخت مدل‌های تجزیه و تحلیل، از نرم‌افزار تفاضل محدود صریح<sup>۳</sup> FLAC 3D استفاده شده است. صریح در این روش اشاره به این دارد که در هر



شکل ۱. پروفیل خاک و شمع.



شکل ۲. آرایش گروه شمع.

شمع بتنی با مدول کشسانی ۳۰ مگاپاسکال و چگالی (۲۵۰۰ kg/m<sup>۳</sup>) در نظر گرفته شده است. طول شمع‌ها ۲۰ متر است، که قسمتی از آن در لایه‌ی بالا و باقی آن در لایه‌ی سخت زیرین نفوذ کرده است. شمع‌ها قطرهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر دارند، که در ۳ نسبت فاصله به قطرهای ۲، ۴ و ۶ قرار گرفته‌اند. فاصله‌ی شمع‌های کناری از لبه‌ی کلاهی ۱٫۲ متر است. در مجموع ۵۴ حالت مختلف تجزیه و تحلیل برای پارامترهای خاک و شمع وجود دارد، که در جدول ۱ ارائه شده است.

از مدل موهر-کلمب در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده شده است. پوش گسیختگی در این مدل مطابق با معیار موهر-کلمب است، که موقعیت نقطه‌ی تنش در این پوش گسیختگی با قانون جریان غیروابسته برای گسیختگی برشی و قانون جریان وابسته برای گسیختگی کششی کنترل می‌شود. به بیان دیگر، اگر  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  تنش‌های اصلی باشند و این قرارداد برقرار باشد (رابطه‌ی ۸):

$$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 \quad (8)$$

معیار شکست را می‌توان مطابق شکل ۳ نمایش داد. گسیختگی از A تا B براساس تابع تسلیم برشی موهر-کلمب مطابق رابطه‌ی ۹ خواهد بود:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad (9)$$

که در آن،  $N_\phi$  از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \cos \phi} \quad (10)$$

گام محاسباتی، ماتریس سختی تشکیل نمی‌شود و مجهول در زمان  $n+1$ ،  $u^{n+1}$  است و فقط با یک رابطه در یک گام به مقدار  $u$  در زمان  $n$ ،  $u^n$  مرتبط می‌شود، پس نیازی به حل معادلات هم‌زمان نیست و روابط ۱ و ۲ را داریم:

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = f(u^n, t^n) \quad (1)$$

$$u^{n+1} = u^n + \Delta t \cdot f(u^n, t^n) \quad (2)$$

در نتیجه، انجام تجزیه و تحلیل غیرخطی و کرنش بزرگ در زمان کمتری صورت می‌گیرد. در فرمولاسیون حل، معادله‌ی دیفرانسیل حرکت از بقای مومنتم بر حسب تنش‌ها به فرم رابطه‌ی ۳ است:

$$\rho \frac{d\dot{u}_i}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3)$$

از طرفی برای گسسته‌سازی در زمان از فرم تفاضلی در رابطه‌ی ۴ استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} = \frac{\dot{u}_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \dot{u}_i^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} \quad (4)$$

و برای گسسته‌سازی جمله‌ی گرادیان تنش در FLAC، به صورت رابطه‌ی ۵ عمل شده است:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \frac{1}{A} \sum \sigma_{ij} \cdot \delta_{jk} \cdot \Delta x_k \quad (5)$$

که در آن،  $A$  سطح المان و  $\Delta x_k$  طول ضلع المان است.

بدین ترتیب الگوی تفاضلی در FLAC به صورت رابطه‌ی ۶ در می‌آید:

$$\rho \left[ \frac{\dot{u}_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \dot{u}_i^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} \right] = \frac{1}{A} \sum \sigma_{ij} \cdot \delta_{jk} \cdot \Delta x_k \quad (6)$$

که در آن، فقط  $\dot{u}_i^{t+\frac{\Delta t}{2}}$  مجهول است و به صورت صریح به دست می‌آید، و نیز به سادگی با رابطه‌ی ۷ حاصل می‌شود:

$$u = \dot{u} \times \Delta t \quad (7)$$

با مطالعه‌ی سیستم فنر-جرم از طریق روش تفاضل محدود چنین به دست آمده است که بزرگ‌ترین گام زمانی باید از کمینه‌ی دوره‌ی تناوب اصلی کل سیستم کوچک‌تر باشد. این گام زمانی به گام زمانی بحرانی معروف است. در روش عددی حل صریح، باید گام زمانی به قدری کوچک باشد که متغیرهای محاسبه‌شده نتوانند از یک المان به المان دیگر انتشار یابند.

## ۲.۲. فرضیات و مشخصات شمع و خاک

گروه شمع مورد پژوهش از یک گروه شمع ۳×۳ با کلاهی صلب و مدفون در خاک لایه‌ی تشکیلی شده است. لایه‌ی زیرین به‌عنوان یک لایه‌ی ماسه‌یی سخت با سرعت موج برشی ۶۰۰ متر بر ثانیه، چگالی (۲۰۰۰ kg/m<sup>۳</sup>)، و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۴۰ درجه و لایه‌ی بالا از دو نوع خاک ماسه‌یی متراکم و شل با سرعت‌های موج برشی به ترتیب ۳۰۰ و ۱۵۰ متر بر ثانیه، چگالی‌های (۱۶۰۰ kg/m<sup>۳</sup>) و (۱۸۰۰ kg/m<sup>۳</sup>) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۳۰ و ۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. لایه‌ی بالا، ارتفاع ۱۲، ۱۸ و ۱۸ متر دارد. میرایی مصالح شمع و خاک ۵٪ در نظر گرفته شده است. شکل ۱، شمایی از گروه شمع و پروفیل خاک و شکل ۲، آرایش گروه شمع را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مدل‌های مختلف تجزیه و تحلیل.

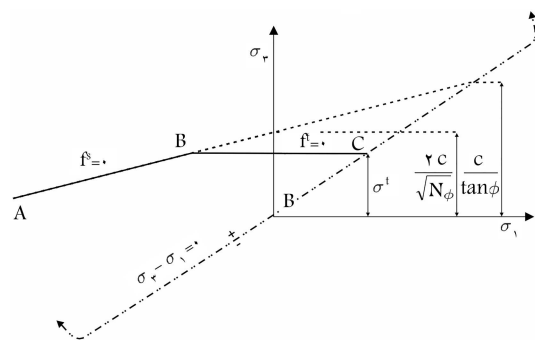
$\Phi_r$	$\Phi_v$	$\rho_v$ (kg/m <sup>۳</sup> )	s/d	D <sub>P</sub> (m)	H <sub>v</sub> (m)	V <sub>Sv</sub> (m/s)	حالت	$\Phi_r$	$\Phi_v$	$\rho_v$ (kg/m <sup>۳</sup> )	s/d	D <sub>P</sub> (m)	H <sub>v</sub> (m)	V <sub>Sv</sub> (m/s)	حالت
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۲	۰٫۴	۶	۳۰۰	S۲-۱	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۲	۰٫۴	۶	۱۵۰	S۱-۱
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۴	۰٫۴	۶	۳۰۰	S۲-۲	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۴	۰٫۴	۶	۱۵۰	S۱-۲
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۶	۰٫۴	۶	۳۰۰	S۲-۳	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۶	۰٫۴	۶	۱۵۰	S۱-۳
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۲	۰٫۶	۶	۳۰۰	S۲-۴	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۲	۰٫۶	۶	۱۵۰	S۱-۴
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۴	۰٫۶	۶	۳۰۰	S۲-۵	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۴	۰٫۶	۶	۱۵۰	S۱-۵
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۶	۰٫۶	۶	۳۰۰	S۲-۶	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۶	۰٫۶	۶	۱۵۰	S۱-۶
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۲	۰٫۸	۶	۳۰۰	S۲-۷	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۲	۰٫۸	۶	۱۵۰	S۱-۷
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۴	۰٫۸	۶	۳۰۰	S۲-۸	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۴	۰٫۸	۶	۱۵۰	S۱-۸
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۶	۰٫۸	۶	۳۰۰	S۲-۹	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۶	۰٫۸	۶	۱۵۰	S۱-۹
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۲	۰٫۴	۱۲	۳۰۰	S۲-۱۰	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۲	۰٫۴	۱۲	۱۵۰	S۱-۱۰
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۴	۰٫۴	۱۲	۳۰۰	S۲-۱۱	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۴	۰٫۴	۱۲	۱۵۰	S۱-۱۱
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۶	۰٫۴	۱۲	۳۰۰	S۲-۱۲	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۶	۰٫۴	۱۲	۱۵۰	S۱-۱۲
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۲	۰٫۶	۱۲	۳۰۰	S۲-۱۳	۴۰	۳	۱۶۰۰	۲	۰٫۶	۱۲	۱۵۰	S۱-۱۳
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۴	۰٫۶	۱۲	۳۰۰	S۲-۱۴	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۴	۰٫۶	۱۲	۱۵۰	S۱-۱۴
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۶	۰٫۶	۱۲	۳۰۰	S۲-۱۵	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۶	۰٫۶	۱۲	۱۵۰	S۱-۱۵
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۲	۰٫۸	۱۲	۳۰۰	S۲-۱۶	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۲	۰٫۸	۱۲	۱۵۰	S۱-۱۶
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۴	۰٫۸	۱۲	۳۰۰	S۲-۱۷	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۴	۰٫۸	۱۲	۱۵۰	S۱-۱۷
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۶	۰٫۸	۱۲	۳۰۰	S۲-۱۸	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۶	۰٫۸	۱۲	۱۵۰	S۱-۱۸
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۲	۰٫۴	۱۸	۳۰۰	S۲-۱۹	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۲	۰٫۴	۱۸	۱۵۰	S۱-۱۹
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۴	۰٫۴	۱۸	۳۰۰	S۲-۲۰	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۴	۰٫۴	۱۸	۱۵۰	S۱-۲۰
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۶	۰٫۴	۱۸	۳۰۰	S۲-۲۱	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۶	۰٫۴	۱۸	۱۵۰	S۱-۲۱
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۲	۰٫۶	۱۸	۳۰۰	S۲-۲۲	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۲	۰٫۶	۱۸	۱۵۰	S۱-۲۲
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۴	۰٫۶	۱۸	۳۰۰	S۲-۲۳	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۴	۰٫۶	۱۸	۱۵۰	S۱-۲۳
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۶	۰٫۶	۱۸	۳۰۰	S۲-۲۴	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۶	۰٫۶	۱۸	۱۵۰	S۱-۲۴
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۲	۰٫۸	۱۸	۳۰۰	S۲-۲۵	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۲	۰٫۸	۱۸	۱۵۰	S۱-۲۵
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۴	۰٫۸	۱۸	۳۰۰	S۲-۲۶	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۴	۰٫۸	۱۸	۱۵۰	S۱-۲۶
۴۰	۳۵	۱۸۰۰	۶	۰٫۸	۱۸	۳۰۰	S۲-۲۷	۴۰	۳۰	۱۶۰۰	۶	۰٫۸	۱۸	۱۵۰	S۱-۲۷

و از B تا C براساس تابع تسلیم کششی به صورت رابطه‌ی ۱۱ خواهد بود:

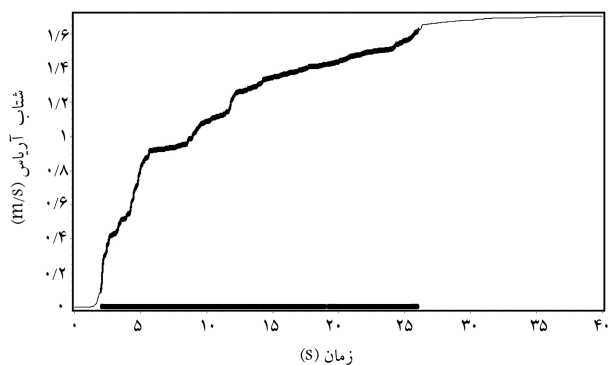
$$f^t = \sigma^t - \sigma_r \quad (11)$$

که در روابط مذکور،  $\phi$ ،  $c$  و  $\sigma^t$  به ترتیب زاویه‌ی اصطکاک، چسبندگی، و مقاومت کششی خاک هستند. فقط تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه در فرمول جاری‌شدگی برشی دخیل هستند و تنش اصلی متوسط هیچ تأثیری ندارد. همچنین مقدار مقاومت کششی از مقدار به‌دست آمده از رابطه‌ی ۱۲ نمی‌تواند بیشتر باشد:

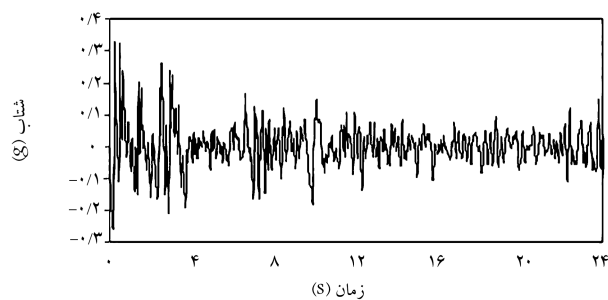
$$\sigma_{\max}^t = \frac{c}{\tan \phi} \quad (12)$$



شکل ۳. معیار گسیختگی موهر - کلمب در ۳D FLAC.



شکل ۴. محدوده‌ی بیشینه‌ی انرژی.



شکل ۵. شتاب‌نگاشت نهایی.

#### ۴.۲. شرایط مرزی

نقاط قرارگرفته در کف مدل در مقابل جابه‌جایی افقی و قائم در تجزیه و تحلیل استاتیکی و دینامیکی ثابت شده‌اند. در تجزیه و تحلیل استاتیکی، نقاط قرارگرفته در سمت چپ و راست به صورت افقی ثابت شده‌اند. برای تجزیه و تحلیل دینامیکی، فاصله‌ی کافی بین سازه و طرفین مدل باید در نظر گرفته شود، تا از تأثیر موج انعکاس یافته در مرزها در پاسخ جلوگیری شود. البته نرم‌افزار ۳D FLAC دارای نوعی خاصی از مرزها موسوم به مرز ساکن (جاذب)<sup>۵</sup> است، که روشی جایگزین به جای استفاده از ابعاد بسیار بزرگ است.<sup>[۱۲]</sup>

#### ۵.۲. ابعاد مدل و اندازه‌ی مش‌بندی

به منظور جلوگیری از تأثیر مرزها در پاسخ تجزیه و تحلیل، ابعاد مدل باید به طور مناسب انتخاب شود. برای این منظور پاسخ شمع مفروضی با مشخصات هندسی، مصالحی و فنری ثابت، که تحت بار جانبی قرار دارد، در مدل‌هایی با ابعاد مختلف به دست آمده و مقایسه شده است. در تمام مدل‌ها سعی شده است که اندازه‌ی مش‌بندی ثابت باشد، تا از تأثیر آن در پاسخ جلوگیری شود. در نهایت طول و عرض مدل ۵۲ متر و ارتفاع مدل ۴۲ متر در نظر گرفته شده است.

از آنجایی که مدل‌های مورد بررسی، خاک دو لایه‌ی دارند، از دو اندازه‌ی متفاوت مش‌بندی به منظور کاهش زمان تجزیه و تحلیل‌ها، برای هر لایه استفاده شده است. محتوای بسامدی موج ورودی به مدل و سرعت حرکت موج در مجموعه‌ی مدل شده بر صحت عددی انتقال موج مؤثر هستند، در نتیجه در تجزیه و تحلیل‌های لرزه‌ی، بزرگ‌ترین بُعد مش‌بندی باید از  $\frac{1}{3}$  تا  $\frac{1}{8}$  طول موج منطبق بر بزرگ‌ترین بسامد ورودی کوچک‌تر باشد.<sup>[۱۲]</sup> در این پژوهش از دو نوع خاک با سرعت‌های موج برشی ۱۵۰ و ۳۰۰ متر بر ثانیه، برای لایه‌ی بالا و خاک متراکم‌تر با سرعت موج برشی ۶۰۰ متر

تابع پتانسیل با استفاده از دو تابع پتانسیل  $g^t$  و  $g^s$  که به ترتیب برای تعریف جریان خمیری برشی و کششی استفاده می‌شوند، توصیف می‌شود. تابع  $g^s$ ، مطابق قانون جریان غیروابسته است، که به صورت رابطه‌ی ۱۳ تعریف می‌شود:

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (13)$$

که در آن،  $\psi$  زاویه‌ی اتساع است و  $N_\psi$  از رابطه‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

$$N_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (14)$$

تابع  $g^t$  مطابق قانون جریان وابسته است و به صورت رابطه‌ی ۱۵ نوشته می‌شود:

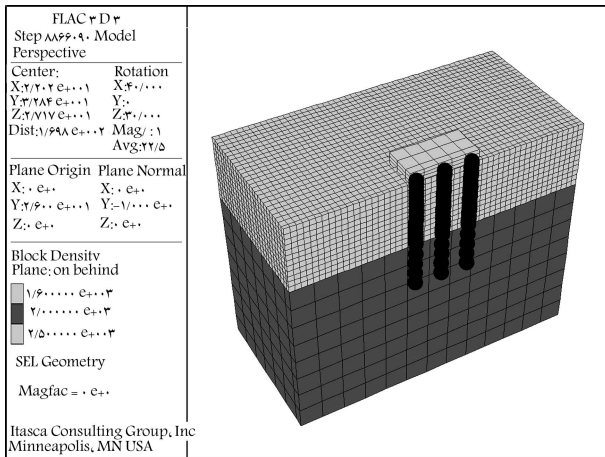
$$g^t = -\sigma_3 \quad (15)$$

دو روش جهت مدل‌کردن شمع در این نرم‌افزار وجود دارد: ۱. مدل‌سازی حجمی و سه‌بعدی: در این روش شمع به صورت استوانه‌ی کشسان مدل می‌شود. هندسه‌ی محیط خاک در این روش باید به گونه‌ی مدل شود که محل‌هایی جهت قرارگیری شمع‌ها پیش‌بینی شود. همچنین باید در محل تماس شمع و خاک از المان‌های فصل مشترک استفاده کرد. از معایب این روش می‌توان به پیچیدگی مدل‌کردن خاک و شمع، دشواری تعیین پارامترهای فصل مشترک، و افزایش زمان تجزیه و تحلیل اشاره کرد. ۲. مدل‌سازی با المان‌سازی شمع: این روش جایگزین روش قبل است و از ویژگی‌های اصلی این نرم‌افزار محسوب می‌شود. در این حالت شمع با یک المان خطی یک‌بعدی، که ابتدا و انتهای شمع را به یکدیگر متصل می‌کند، مدل می‌شود. المان سازه‌ی شمع خود از چند ریزالمان تشکیل می‌شود، که هر گره ۶ درجه آزادی دارد و اتصال این ریزالمان‌ها به یکدیگر صلب است. المان سازه‌ی شمع با ۳ فنر برشی و ۳ فنر نرمال با خاک در ارتباط است. از مزیت‌های این روش می‌توان به سهولت مدل‌سازی، امکان تعریف شمع‌ها با شکل‌های مختلف، قابلیت مدل‌کردن جدایش خاک و شمع، قابلیت مشاهده نیروها و لنگرهای خمشی ایجاد شده در شمع، و سرعت بیشتر تجزیه و تحلیل اشاره کرد. در این پژوهش از روش دوم استفاده شده است.

#### ۳.۲. وضعیت بارگذاری

در این پژوهش به عنوان بارگذاری لرزه‌ی از شتاب‌نگاشت ال‌سنترو استفاده شده است. مدت زمان این زلزله ۴۰ ثانیه است، که مدت بسیار زیادی جهت استفاده در تجزیه و تحلیل لرزه‌ی است.

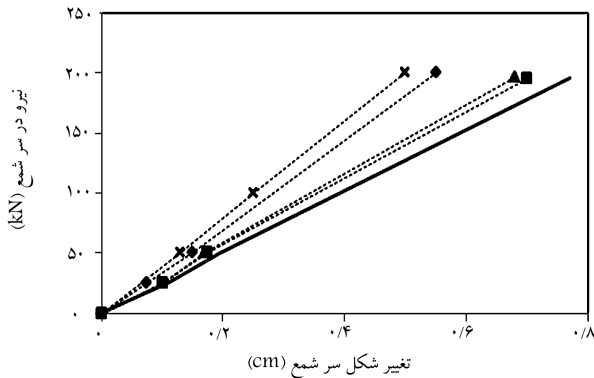
چندین روش جهت بهینه‌کردن مدت زمان شتاب‌نگاشت‌ها وجود دارد، که یکی از پرکاربردترین آنها روش ارائه‌شده‌ی تیری فوناک و برادی است. این روش مدت زمان بهینه را در بیشینه‌ی انرژی در نظر می‌گیرد،<sup>[۱۲]</sup> که در واقع همان مدت زمان در ۵٪ تا ۹۵٪ شدت آریاس<sup>۴</sup> کلی است. با استفاده از نرم‌افزار SeismoSignal، نمودار شدت آریاس رسم و مدت زمان مهم آن به دست آمده است (شکل ۴). در نهایت مدت زمان شتاب‌نگاشت به ۲۴ ثانیه رسیده است. سپس به منظور حذف تغییرشکل‌های ماندگار ناشی از انتگرال‌گیری از شتاب‌نگاشت، خط مبنا‌ی آن با استفاده از تابع اصلاح خطی تصحیح و جزء بسامدهای بالا و پایین غیرضروری نیز فیلتر شده است. در مهندسی عمران این بسامدها به ترتیب ۱۵ و ۰/۱ هرتز است. شکل ۵، شتاب‌نگاشت نهایی استفاده شده به عنوان حرکت ورودی در کف مدل را نشان می‌دهد.



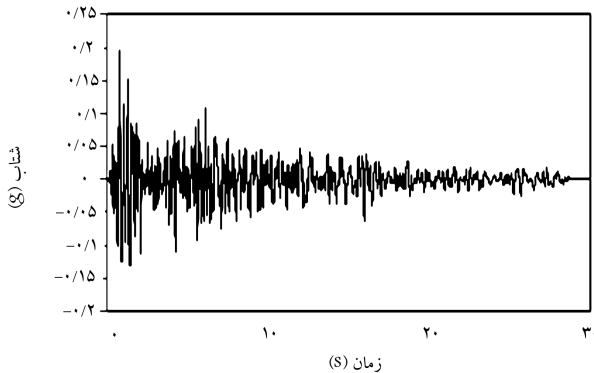
شکل ۶. نمونه‌ی مدل استفاده‌شده در تجزیه و تحلیل.

تورچانیس ۱۹۸۸  
پولوس و دیویس ۱۹۸۰  
این پژوهش

بنتلی و الناگر ۲۰۰۰  
ماهشورای و همکاران ۲۰۰۴



شکل ۷. بررسی صحت استاتیکی مدل.



شکل ۸. تحریک ورودی برای پاسخ سطح آزاد.

میرایی خاک برابر ۵٪ و سایر مشخصات خاک مانند حالت قبل در نظر گرفته شده است.

تحریک ورودی و پاسخ‌های به‌دست‌آمده از FLAC ۳D و SHAKE ۲۰۰۰ به ترتیب در شکل‌های ۸ الی ۱۰ آمده است. می‌توان مشاهده کرد که بیشینه‌ی شتاب سطح آزاد در هر دو مورد از ۲g به تقریباً ۲.۲۵g رسیده است. روند کلی تاریخچه‌های زمانی به‌دست‌آمده از دو روش تجزیه و تحلیل شبیه به یکدیگر بوده و همچنین جزء بیشینه‌ی پاسخ‌ها نیز تقریباً یکسان است.

بر ثانیه، برای لایه‌ی پایین و از شتاب‌نگاشت ال‌سنسترو با بسامد ۱۵ هرتز به‌عنوان موج ورودی به سیستم استفاده شده است (روابط ۱۶ الی ۱۸):

$$\lambda_1 = \frac{V_{S1}}{f} = \frac{150}{15} = 10 \Rightarrow \Delta l_1 = 1 \quad (16)$$

$$\lambda_2 = \frac{V_{S2}}{f} = \frac{300}{15} = 20 \Rightarrow \Delta l_2 = 2 \quad (17)$$

$$\lambda_3 = \frac{V_{S3}}{f} = \frac{600}{15} = 40 \Rightarrow \Delta l_3 = 4 \quad (18)$$

که در آن‌ها،  $\lambda$ ،  $V_S$  و  $f$  به ترتیب طول موج، سرعت موج برشی، و بسامد بارگذاری هستند.

مطابق روابط ۱۶ الی ۱۸، اندازه‌ی مش‌بندی در لایه‌ی بالا به علت نیاز به دقت بیشتر برابر ۱ و برای لایه‌ی زیرین ۴ در نظر گرفته شده است. در این نرم‌افزار هر چه نسبت ابعاد مش‌بندی به ۱ نزدیک‌تر باشد، دقت تجزیه و تحلیل بهتر می‌شود؛ در نتیجه از مش‌بندی مربعی استفاده شده است. شکل ۶، یکی از مدل‌های تجزیه و تحلیل را نشان می‌دهد.

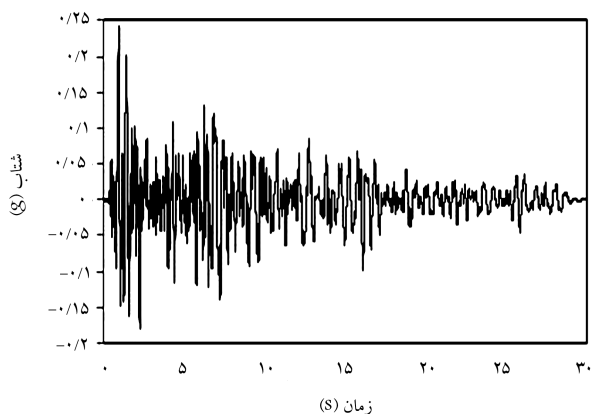
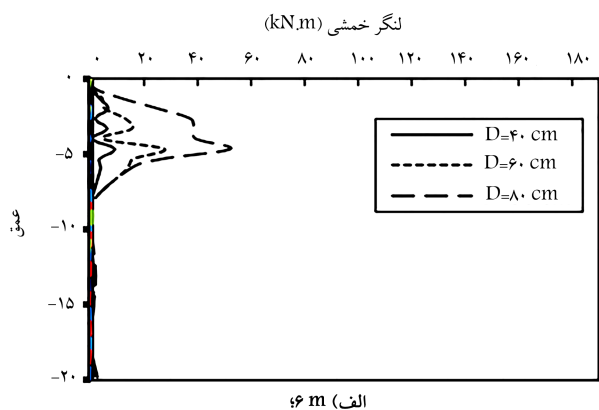
## ۶.۲. صحت‌سنجی استاتیکی

صحت مدل خاک - شمع با انجام تجزیه و تحلیل کشسان بارگذاری جانبی در سر شمع یک شمع گیردار انجام شده است. شمع مورد بررسی، به طول ۱۰ متر و قطر ۰/۵ متر، مدول کشسانی ۲۵ گیگاپاسکال، چگالی ( $\text{kg/m}^3$ ) ۲۴۰۰ و نسبت پواسون ۰/۳ است. خاک نیز مدول کشسانی ۲۰ مگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۴۵ دارد. تغییرشکل افقی سر شمع در مقادیر مختلف بارگذاری افقی برای حالت کشسان بدون جدایش خاک - شمع به‌دست آمده است. شکل ۷، مقایسه‌ی نتایج FLAC ۳D را با نتایج پژوهش اجزاء محدود تورچانیس و همکاران،<sup>[۱۵]</sup> بنتلی و الناگر،<sup>[۱۶]</sup> که با نرم‌افزار ANSYS بررسی کرده بودند و پژوهش اجزاء محدود سه‌بعدی ماهشورای و همکاران،<sup>[۱۷]</sup> و همچنین نتایج به‌دست‌آمده از راه‌حلی که پولوس و دیویس،<sup>[۱۸]</sup> جهت تعیین نشست یا تغییرشکل جانبی سر شمع تک تحت بارگذاری محوری و جانبی در حالت کشسان ارائه داده‌اند؛ نشان می‌دهد. در این راه‌حل شمع به صورت خط در نظر گرفته می‌شود، که با خاک اطراف به‌صورت هم‌ساز حرکت می‌کند (جدایش اتفاق نمی‌افتد).

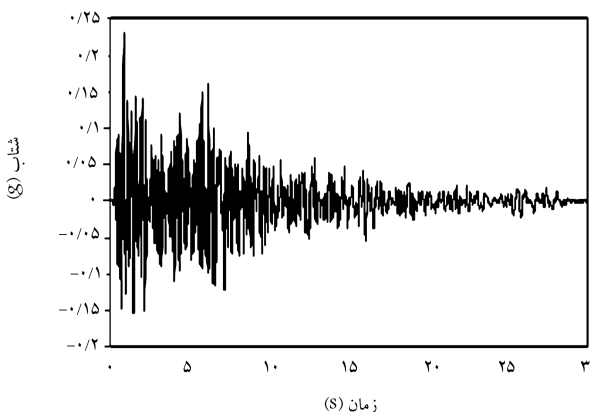
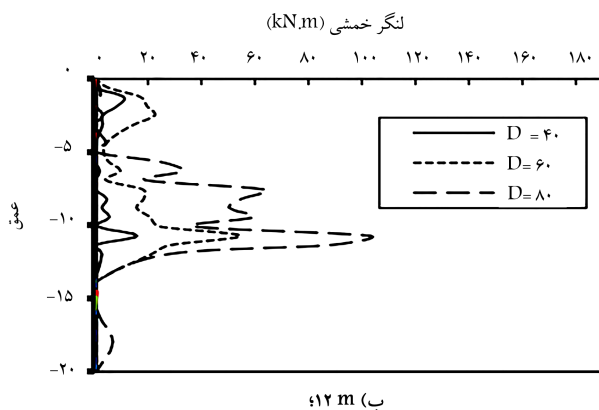
مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده از FLAC ۳D با نتایج پژوهش‌های پولوس و بنتلی نزدیکی دارد، اما تغییرشکل به‌دست‌آمده از این مدل‌سازی در مقایسه با نتایج تورچانیس و ماهشورای بیشتر است. علت این امر می‌تواند این باشد که تورچانیس و ماهشورای مقطع شمع را به‌صورت مربعی در نظر گرفته‌اند، اما در پژوهش حاضر و پژوهش بنتلی شمع به صورت استوانه‌یی فرض شده است. مربع فرض‌کردن مقطع شمع ممکن است به علت افزایش سطح تماس شمع و خاک، موجب افزایش سختی شود.

## ۷.۲. صحت‌سنجی لرزه‌یی

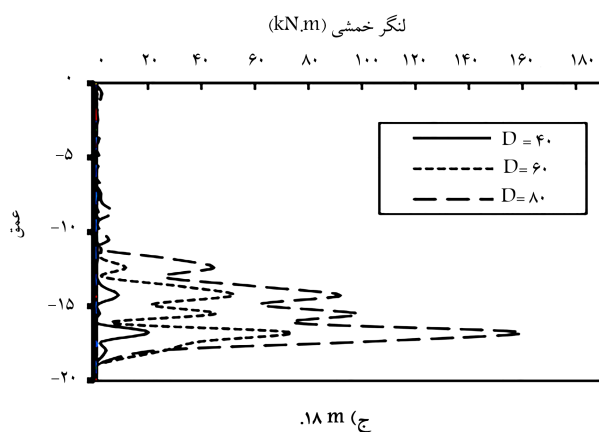
برای راست‌آزمایی لرزه‌یی مدل پاسخ زمین به تحریک زلزله‌ی ال‌سنسترو با استفاده از مدل FLAC ۳D حل و پاسخ کشسان سطح آزاد به‌دست‌آمده با پاسخ به‌دست‌آمده از نرم‌افزار SHAKE ۲۰۰۰ مقایسه شده است. از آنجایی که نرم‌افزار SHAKE ۲۰۰۰ تحلیل یک‌بعدی انجام می‌دهد، در مدل FLAC ۳D نیز فقط در جهت انتشار موج اجازه حرکت داده شده است، تا شرایط یکسانی فراهم شود.



شکل ۹. پاسخ سطح آزاد ۳D Fiac.



شکل ۱۰. پاسخ سطح آزاد ۲۰۰۰ SHAKE.



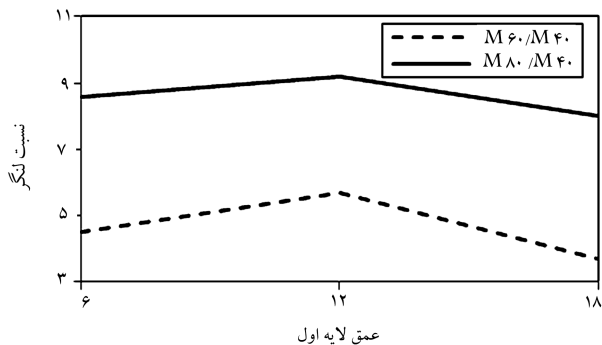
### ۳. بررسی منتخبی از نتایج تجزیه و تحلیل‌ها

#### ۱.۳. اثر قطر شمع در لنگر خمشی سیمناطیک

شکل ۱۱، چگونگی توزیع قدمطلق بیشینه‌ی لنگرهای خمشی در طول شمع D گروه شمع را برای حالتی که لایه‌ی بالا ماسه‌ی سست و با سرعت موج برشی ۱۵۰ متر بر ثانیه (خاک نوع - ماسه‌ی شل) است، را نشان می‌دهد ( $V_{S2}/V_{S1} = 4$ ). هر گراف از نتایج تجزیه و تحلیل‌های مربوط به قطرهای مختلف (۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر) در نسبت فاصله به قطر ۲ و در عمق‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ متر به دست آمده است.

شکل ۱۱. اثر قطر شمع در لنگر خمشی سیمناطیک در  $s/d = 2$  و ضخامت لایه‌ی اول.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، قطر شمع‌ها اثر چشم‌گیری در مقدار لنگر خمشی سیمناطیک ایجاد شده دارد، به طوری که با افزایش قطر شمع‌ها از ۴۰ به ۶۰ و از ۴۰ به ۸۰ سانتی‌متر، تقریباً مقدار لنگر خمشی به ترتیب بین  $3/5$  تا  $5/5$  و  $9/5$  برابر می‌شود. علت افزایش لنگر خمشی سیمناطیک با افزایش قطر شمع‌ها می‌تواند این باشد که سختی شمع با افزایش قطر افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت بیشتری در مقابل تغییر شکل خاک اطراف خود دارد. این موضوع موجب می‌شود که مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در آن افزایش یابد. همچنین بیشترین مقدار لنگر در هر ۳ عمق لایه‌ی اول در شمع D (شمع میانی) تشکیل شده است.



شکل ۱۲، تغییرات نسبت بیشینه‌ی لنگر خمشی در قطر ۸۰ به ۴۰ سانتی‌متر با تغییر عمق لایه‌ی اول نشان می‌دهد. در عمق ۱۲ متری، مقدار این نسبت‌ها افزایش یافته است؛ اما در عمق ۱۸ متری، مقدار این

شکل ۱۲. تغییرات اثر قطر شمع در لنگر خمشی با عمق لایه‌ی اول.

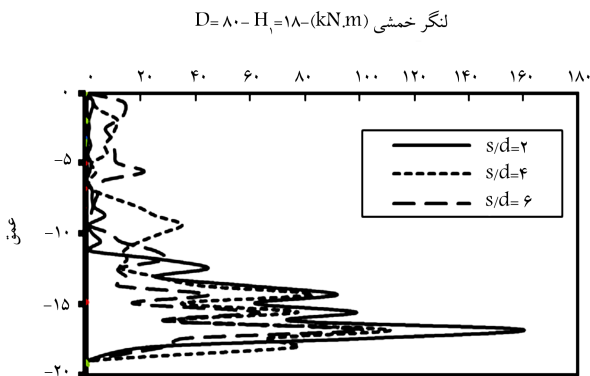
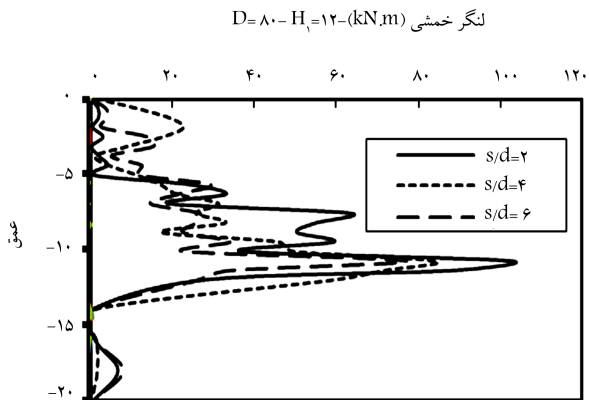
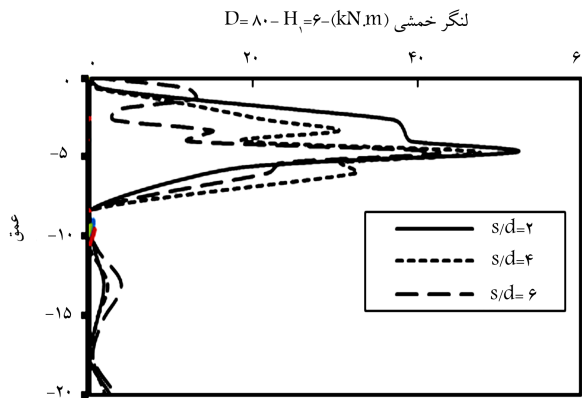
شده است، اما در عمق ۱۸ متر این روند مشاهده نمی‌شود، که به علت عمق نفوذ کم شمع در این حالت است. افزایش نسبت لنگر با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها ممکن است به این دلیل باشد که هر چه شمع‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر باشند، مجموعه‌ی شمع‌ها و خاک اطراف آن‌ها به صورت یک پارچه‌تر عمل خواهد کرد، در نتیجه افزایش سختی شمع تأثیری در شکل‌پذیری آن نخواهد داشت.

### ۲.۳. اثر فاصله‌ی شمع‌ها در لنگر خمشی سینماتیک

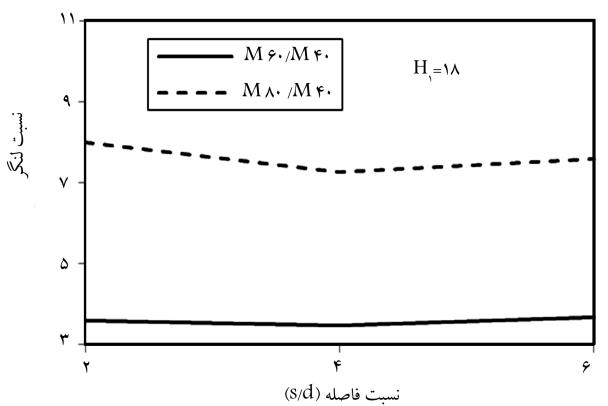
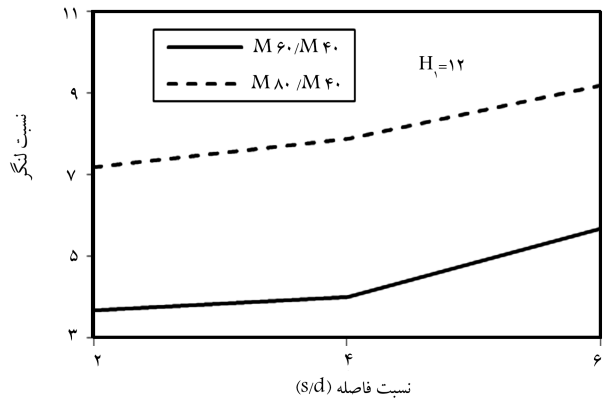
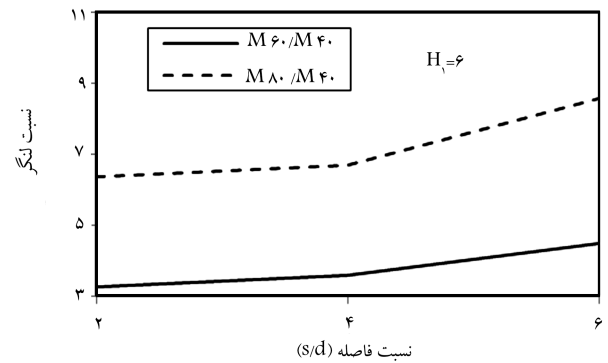
شکل ۱۴، توزیع قدرمطلق بیشینه‌ی لنگرهای خمشی در طول شمع D گروه شمع‌ها را برای حالتی که لایه‌ی بالا، ماسه‌ی سست و با سرعت موج برشی ۱۵۰ متر بر ثانیه (خاک نوع ۱) است، را نشان می‌دهد. هر گراف از نتایج تجزیه و تحلیل‌های مربوط به نسبت فاصله‌ی شمع‌های ۲، ۴ و ۶ و در عمق‌های مختلف

نسبت‌ها کاهش داشته است. این موضوع را شاید بتوان به علت عمق نفوذ شمع در لایه‌ی سخت زیرین دانست. عمق نفوذ شمع در لایه‌ی پایین برای حالت‌هایی که لایه‌ی بالا ۶، ۱۲ و ۱۸ متر است، به ترتیب ۰/۷، ۰/۴ و ۰/۱ (نسبت به طول ۲۰ متر شمع) است. در نتیجه در وضعیت سوم، عمق نفوذ ۰/۱، بیشینه درجه‌ی مقاومت در پایین شمع جهت ایجاد اتصال کاملاً گیردار فراهم نمی‌شود. پس ممکن است بتوان این نتیجه را گرفت که با ثابت نگاه‌داشتن عمق نفوذ شمع در لایه‌ی سخت (که البته از نظر مدل‌سازی عددی با مشکلاتی همراه است)، افزایش ضخامت لایه‌ی بالا موجب افزایش طول آزاد شمع و در نتیجه افزایش اثر قطر شمع در لنگر خمشی سینماتیک می‌شود.

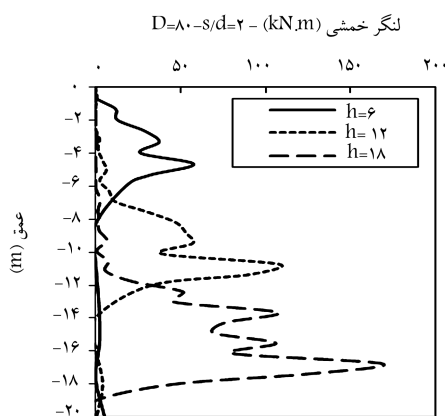
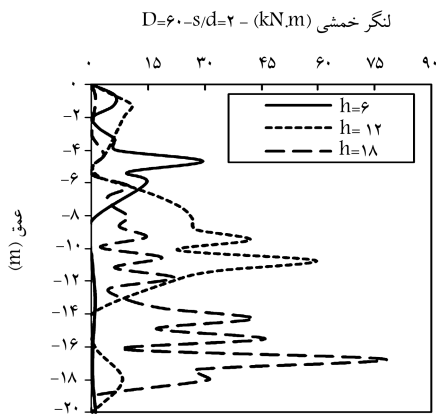
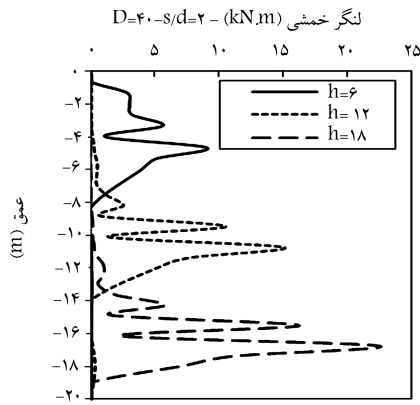
شکل ۱۳، تغییرات نسبت  $M_{60}/M_{40}$  و  $M_{80}/M_{40}$  را در عمق‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ متر با نسبت فاصله به قطر شمع نشان می‌دهد. در عمق‌های ۶ و ۱۲ متر افزایش فاصله‌ی شمع‌ها موجب افزایش اثر قطر شمع در لنگر خمشی سینماتیک



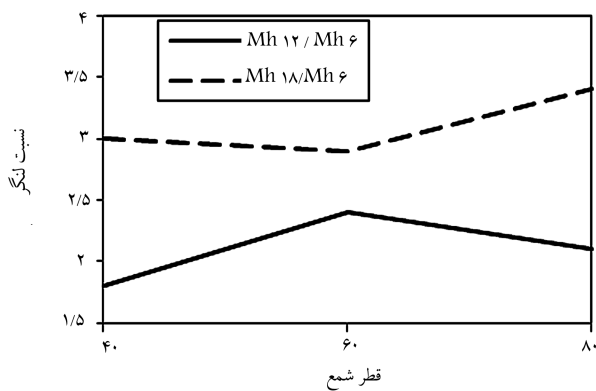
شکل ۱۴. اثر فاصله‌ی شمع‌ها در لنگر خمشی سینماتیک در عمق‌های مختلف لایه‌ی اول.



شکل ۱۳. تغییرات اثر قطر شمع در لنگر خمشی با نسبت فاصله به قطر شمع.



شکل ۱۵. اثر عمق لایه‌ی اول در لنگر خمشی سینماتیک در قطرهای مختلف شمع.



شکل ۱۶. تغییرات اثر عمق لایه‌ی اول در لنگر خمشی سینماتیک با قطر شمع‌ها.

لایه‌ی اول و قطر ۸۰ سانتی‌متر به دست آمده است. در نمودارهای مذکور می‌توان مشاهده کرد که اثر فاصله‌ی شمع‌ها از یکدیگر در لنگر خمشی سینماتیک، کاهشدهنده است. یعنی با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها از یکدیگر، لنگر خمشی سینماتیک کاهش پیدا کرده است. نسبت بیشینه‌ی لنگر خمشی در نسبت فاصله‌ی ۲ (s/d) به بیشینه‌ی لنگر خمشی در نسبت فاصله‌ی ۴ ( $M_{s/d=2}/M_{s/d=4}$ ) تقریباً بین ۱/۱ تا ۱/۵ و نسبت بیشینه‌ی لنگر خمشی در نسبت فاصله‌ی ۲ به نسبت فاصله‌ی ۶ ( $M_{s/d=2}/M_{s/d=6}$ ) تقریباً بین ۱/۲ تا ۲ است. علت کاهش لنگر خمشی سینماتیک با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها این است که با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها، عملکرد یک پارچه‌ی شمع و خاک بین شمع‌ها، که موجب افزایش سختی مجازی شمع می‌شود، از بین خواهد رفت و در فواصل بیشتر، فقط سختی مصالح شمع در مقابل حرکات زمین مقاومت خواهد کرد و چون در این حالت سختی شمع کمتر از حالتی خواهد بود که سختی خاک بین شمع‌ها نیز به سختی شمع افزوده می‌شود، شمع انعطاف پذیرتر است و در نتیجه لنگر خمشی کمتری در آن توسعه می‌یابد. تأثیر تغییر قطر شمع و با عمق لایه‌ی اول بر اثر فاصله‌ی شمع‌ها در لنگر خمشی سینماتیک ناچیز است.

### ۳.۳. اثر عمق لایه‌ی اول در لنگر خمشی سینماتیک

شکل ۱۵، چگونگی توزیع قدرمطلق بیشینه‌ی لنگرهای خمشی در طول شمع D گروه شمع‌ها را برای حالتی که لایه‌ی بالا، ماسه‌ی سست و با سرعت موج برشی ۱۵۰ متر بر ثانیه (خاک نوع ۱) است، را نشان می‌دهد. هر گراف از نتایج تجزیه و تحلیل‌های مربوط به عمق‌های مختلف لایه‌ی اول (۶، ۱۲ و ۱۸ متر) و مقادیر قطرهای شمع ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر و مقدار ثابت نسبت فاصله به قطر شمع برابر با ۲ به دست آمده است.

مشاهده می‌شود که عمق لایه‌ی سست تأثیر زیادی در مقدار بیشینه‌ی لنگر خمشی سینماتیک ایجاد شده در طول شمع دارد، زیرا با افزایش ضخامت لایه‌ی اول، طول آزاد شمع و در نتیجه، لنگر خمشی توسعه یافته در آن افزایش می‌یابد. نسبت بیشینه‌ی مقدار لنگر خمشی هنگامی که عمق لایه‌ی اول ۱۲ متر است، به بیشینه‌ی مقدار لنگر خمشی در حالتی که عمق لایه‌ی اول ۶ متر است ( $M_{h=12}/M_{h=6}$ )، بین ۱/۵ تا ۲/۵ است. بیشینه‌ی مقدار لنگر خمشی در حالتی که عمق لایه‌ی اول ۱۸ متر باشد، بین ۲ تا ۳/۵ برابر بیشینه‌ی مقدار لنگر خمشی در عمق ۶ متر است ( $M_{h=18}/M_{h=6}$ ).

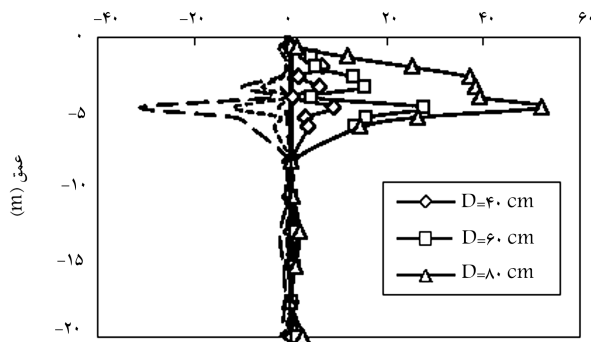
شکل ۱۶، تغییرات نسبت  $M_{12}/M_6$  و  $M_{18}/M_6$  را با قطر شمع‌ها نشان می‌دهد. این دو نسبت با تغییر قطر شمع رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهند. در عین حال تأثیر تغییر قطر شمع در اثر عمق لایه‌ی اول در لنگر خمشی سینماتیک اندک است.

شکل ۱۷، تغییرات نسبت  $M_{12}/M_6$  و  $M_{18}/M_6$  را با نسبت فاصله به قطر شمع در قطرهای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد. به طور کلی افزایش فاصله‌ی شمع‌ها از یکدیگر موجب افزایش اندک اثر عمق لایه‌ی اول در لنگر خمشی سینماتیک می‌شود.

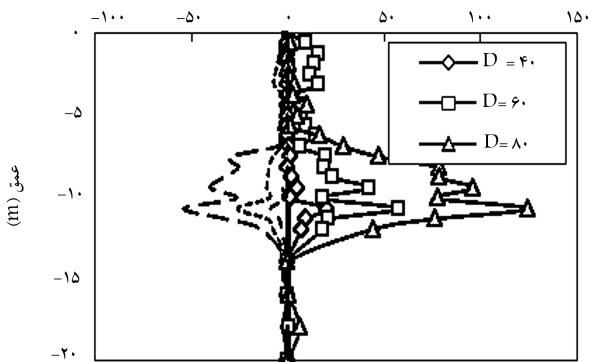
### ۴.۳. اثر سختی خاک لایه‌ی اول در لنگر خمشی سینماتیک

شکل ۱۸، تغییرات مقدار لنگر خمشی برای خاک نرم (نمودارهای نشان‌دهنده) و منفی مقدار لنگر خمشی خاک متراکم (نمودارهای خط‌چین) را نشان می‌دهد. افزایش برابری سختی خاک موجب شده است که مقادیر لنگر خمشی سینماتیک تقریباً

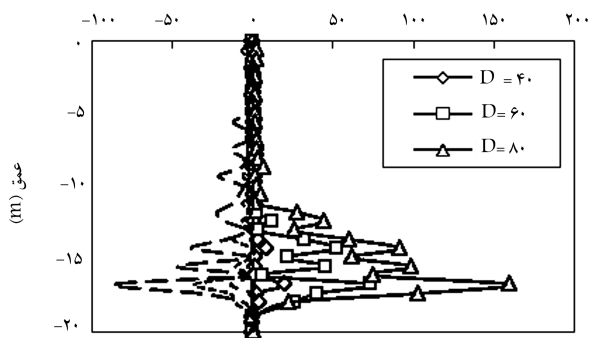




شکل ۱۷. لنگر خمشی  $H_p = 12 - s/d = 2$  - (kN.m)

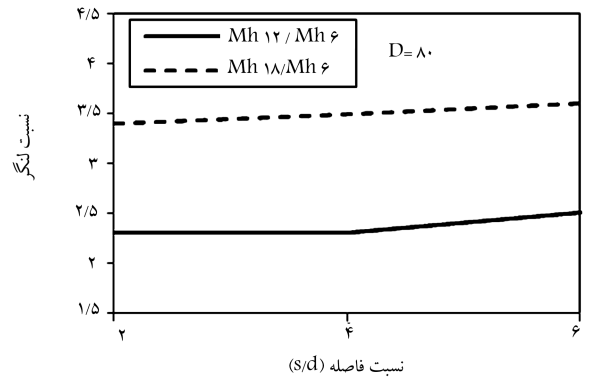
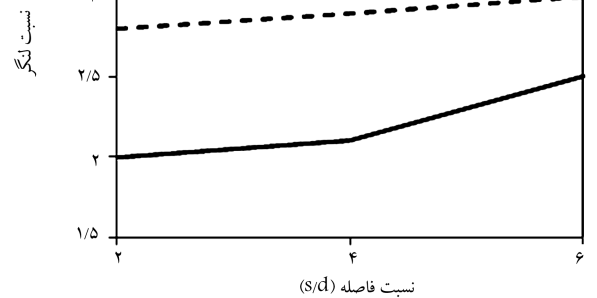
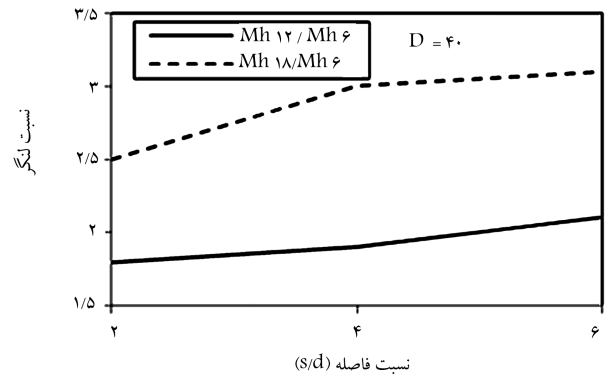


شکل ۱۸. لنگر خمشی  $H_p = 18 - s/d = 2$  - (kN.m)



شکل ۱۹. اثر سختی خاک در لنگر خمشی سینماتیک.

۱. قطر شمع‌ها اثر چشم‌گیری در مقدار لنگر خمشی سینماتیک ایجاد شده دارد، به طوری که با افزایش قطر شمع‌ها از ۴۰ به ۶۰ و همچنین از ۴۰ به ۸۰ سانتی‌متر، تقریباً مقدار لنگر خمشی به ترتیب بین ۳/۵ تا ۵/۵ و ۵/۵ تا ۹/۵ برابر می‌شود.
۲. با ثابت نگاه داشتن عمق نفوذ شمع در لایه‌ی سخت، با افزایش عمق لایه‌ی اول، اثر افزایش قطر شمع در لنگر خمشی سینماتیک همواره مثبت است.
۳. تأثیر قطر شمع‌ها در لنگر خمشی با زیاد شدن نسبت فاصله به قطر شمع‌ها بیشتر می‌شود.
۴. اثر فاصله‌ی شمع‌ها از یکدیگر در لنگر خمشی سینماتیک، کاهشدهنده است. یعنی با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها از یکدیگر لنگر خمشی سینماتیک کاهش پیدا می‌کند.
۵. اثر فاصله‌ی شمع‌ها در لنگر خمشی سینماتیک با تغییر قطر شمع‌ها و یا عمق لایه‌ی اول تغییر چندانی نمی‌کند.
۶. عمق لایه‌ی نسیست تأثیر زیادی در مقدار بیشینه‌ی لنگر خمشی سینماتیک ایجاد شده در طول شمع دارد. بیشینه‌ی مقدار لنگر خمشی هنگامی که عمق



شکل ۱۷. تغییرات اثر عمق لایه‌ی اول در لنگر خمشی سینماتیک با نسبت فاصله به قطر شمع در قطرهای مختلف.

نصف شود، زیرا سختی بیشتر خاک موجب می‌شود شمع کمتر اجازه‌ی تغییر شکل پیدا کند. این کاهش در لنگر خمشی سینماتیک به خصوص در شمع‌های با قطر کمتر بیشتر نمایان است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، نتایج حاصل از مطالعه‌ی پارامتریک بر اندرکنش سینماتیک خاک - شمع و چگونگی تغییر لنگر خمشی سینماتیک در گروه شمع مدفون در خاک دو لایه‌ی بی با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود ۳D FLAC تحت تحریک زلزله‌ی ال‌سترو در حوزه‌ی زمانی بررسی شده است. با مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی لنگر خمشی حاصل از ۵۴ تجزیه و تحلیل، این نتایج به دست آمده است:

۸. تغییر قطر شمع‌ها موجب تغییر اندک در اثر عمق لایه‌ی اول در لرزه‌خمشی سینماتیک می‌شود.
۹. افزایش سختی خاک موجب می‌شود که مقدار لرزه‌خمشی به طور چشم‌گیری کاهش یابد.
۷. لایه‌ی بالا در لرزه‌خمشی سینماتیک می‌شود. افزایش نسبت فاصله به قطر شمع‌ها (s/d) موجب افزایش اندک اثرگذاری عمق لایه‌ی اول ۱۲ متر است، بین ۱٫۵ تا ۲٫۵ برابر و بیشینه‌ی مقدار لرزه‌خمشی در حالتی که عمق لایه‌ی اول ۱۸ متر باشد، بین ۲ تا ۳٫۵ برابر می‌شود.

### پانویس‌ها

1. kinematic moments
2. inertial moments
3. explicit
4. Arias intensity
5. quite boundary

### منابع (References)

1. Gazetas, G., Fan, K., Tazoh, T. and Shimizu, K. "Seismic response of the pile foundation of Ohba Ohashi bridge", *In Proceedings: Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, pp. 1803-1809 (1993).
2. Nikolaou, S., Mylonakis, G., Gazetas, G. and Tazoh, T. "Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements", *Geotechnique*, **51**(5), pp. 425-440 (2001).
3. Eurocode 8, *Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 5: Foundations, Retaining Structures and Geotechnical Aspects*, European Committee for Standardization Technical Committee 250 (CEN/TC 250), Brussels, Belgium (2003).
4. Kavvads, M. and Gazetas, G. "Kinematic seismic response and bending of free-head piles in layered soil", *Geotechnique*, **43**(2), pp. 207-222 (1993).
5. Mylonakis, G., Nikolaou, A. and Gazetas, G. "Soil-pile-bridge seismic interaction: kinematic and inertial effects. Part I: soft soil", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **26**(3), pp. 337-359 (1997).
6. Muroso, Y. and Akihiko, N. "Evaluation of seismic force of pile foundation induced by inertial and kinematic interaction", *In Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, pp.1496 (2000).
7. Nikolaou, S., Mylonakis, G., Gazetas, G. and Tazoh, T. "Kinematic pile bending during earthquakes: Analysis and field measurements", *Geotechnique*, **51**(5), pp. 425-440 (2001).
8. Dezi, F., Carbonari, S. and Leoni, G. "Kinematic bending moments in pile foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(3), pp. 119-132 (2010).
9. Sica, S., Mylonakis, G. and Simonelli, A.L. "Strain effects on kinematic pile bending in layered soil", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **49**, pp. 231-242 (2013).
10. Maiorano, R.M.S., Aversa, S. and Wu, G. "Effects of soil non-linearity on bending moments in piles due to seismic kinematic interaction", *In Proceedings of the Fourth International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Greece, pp. 968-975 (2007).
11. Di Laora, R., Mandolini, A. and Mylonakis, G. "Insight on kinematic bending of flexible piles in layered soil", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **43**, pp. 309-322 (2012).
12. Trifunac, M.D. and Brady, A.G. "A study on the duration of strong earthquake ground motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **65**(3), pp. 581-626 (1975).
13. Itasca Consulting Group, *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua*, vol. I. User's Manual, vol. II. Verification Problems and Example Applications, Second Edition (FLAC3D Version 3.0), Minneapolis, Minnesota 55401 USA (2005).
14. Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*, **99**(5), pp. 421-427 (1973).
15. Trochanis, A.M., Bielak, J. and Christiano, P. "Three-dimensional nonlinear study of piles", *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**(3), pp. 429-447 (1991).
16. 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).
17. Maheshwari, B. K., K. Z. Truman, P. L. Gould, and M. H. El Naggar. "Three-dimensional nonlinear seismic analysis of single piles using finite element model: effects of plasticity of soil." *International Journal of Geomechanics*, **5**(1), pp.35-44, (in Persian) (2005).
18. Poulos, H.G. and Davis, E.H., *Pile Foundation Analysis and Design*, Wiley (1980).