

# پاسخ لرزه‌ی ریزشمع‌های زاویه‌دار در خاک‌های لایه‌دار

واحد قیاسی\* (استادیار)

فرانک محمدی دهشال (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی هندی عمران و معماری، دانشگاه ملایر

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۷ (درداشت‌ش) ۲- ۳۴، شماره ۲/۳، ص. ۱۲۵-۱۳۳، (پادداشت‌ش)

همواره پیچیدگی نیروهای وارده به پی‌های عمیق از قبیل شمع‌ها و ریزشمع‌ها باعث اهمیت تحلیل دینامیکی آن‌ها می‌شود. ریزشمع به‌عنوان المان مقاوم مجاور خاک، حساسیت بالایی دارد، تا هرگونه نقص فنی در طراحی و اجرای آن کاسته شود. بررسی دینامیکی ریزشمع به علت کاربرد وسیع در انواع مختلف شرایط زمین، حائز اهمیت است. در نوشتار حاضر، به مدل‌سازی ریزشمع‌ها به‌صورت گروه‌های دوتایی با اعمال زاویه‌های مختلف  $90^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $20^\circ$  با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS پرداخته شده است. محیط خاک در ۲ حالت تک‌لایه و با لایه‌بندی مدل شده است. تحلیل دینامیکی با اعمال بار قائم روسازه به کلاهک ریزشمع‌ها و اعمال شتاب به کف مدل به‌صورت رکورد زلزله‌ی ال - سنترو و نیز شتاب هارمونیک سینوسی انجام شده است. مطالعات حاصل نشان می‌دهد که زاویه‌های ریزشمع‌ها از حالت قائم تا زاویه‌ی  $25^\circ$  باعث کاهش میزان تنش وارده در خاک می‌شود. از طرفی، مقدار بیشینه‌ی لنگر خمشی و نیروی محوری در نزدیکی کلاهک ریزشمع اتفاق می‌افتد.

واژگان کلیدی: بررسی دینامیکی، ریزشمع، خاک تک‌لایه، خاک با لایه‌بندی، اندرکنش دینامیکی لایه‌های خاک.

v.ghiasi@malayeru.ac.ir  
faranakmohamadi.ce@gmail.com

## ۱. مقدمه

در ناحیه‌هایی که خاک منطقه، جواب‌گوی تحمل و پایداری سازه و انتقال بارهای آن به کف بستر نباشد، گزینه‌ی پیشنهادی برای در نظر گرفتن پی سازه، استفاده از فونداسیون‌های عمیق است. ریزشمع‌ها به‌عنوان یک نوع المان مقاوم در خاک برای انتقال نیرو از سازه به لایه‌ی خاک با قابلیت باربری کافی استفاده می‌شوند. ریزشمع، غالباً جزء شمع‌های حفاری و درجا، البته با قطر کوچک (عمدتاً کمتر از  $300$  میلی‌متر) است که اغلب با آرما تور تقویت می‌شود. همچنین ریزشمع‌ها در مواردی که پی سازه دچار تخریب و عدم پاسخ‌گویی به سازه باشد، استفاده می‌شوند. با توجه به نحوه‌ی اجرای ریزشمع‌ها که نسبت به دیگر عوامل تسلیحی مشابه خود مزیت‌هایی دارند، بررسی دینامیکی ریزشمع در خاک‌های لایه‌دار مسئله‌ی حائز اهمیت تلقی می‌شود. پژوهش حاضر با در نظر گرفتن مزیت ذکر شده برای ریزشمع، به بررسی عددی آن از طریق نرم‌افزار المان محدود ABAQUS پرداخته است. این موضوع با در نظر گرفتن زاویه‌های مختلف برای ریزشمع در گروه‌های دوتایی در ۲ حالت خاک‌های تک‌لایه و لایه‌دار و نیز اعمال شتاب هارمونیک و شتاب زلزله‌ی ال - سنترو بررسی شده است. عملکرد لرزه‌ی مناسب ریزشمع‌ها به قدری قابل توجه است که می‌توان گفت در طول زلزله‌هایی با شدت ارتعاش بالا، ریزشمع‌ها به علت

\* نویسنده مسئول  
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۷/۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۹/۲۲، پذیرش ۱۳۹۵/۱۰/۵.  
DOI: 10.24200/J30.2018.1419

داشتن ظرفیت باربری بالا، به‌صورت خطی عمل می‌کنند؛ در صورتی که شمع‌های درجا و پیش‌ساخته تسلیم می‌شوند که این موضوع نشان از بهبود شکل‌پذیری و مقاومت در زلزله توسط عضو باربر مذکور است.<sup>[۱]</sup>

بسیاری مطالعات صحرایی، آزمایشگاهی و عددی به بررسی رفتار گروه شمع در برابر بارهای جانبی پرداخته‌اند.<sup>[۲]</sup> برای مثال، در مطالعه‌ی در سال ۲۰۰۴، نتیجه گرفته شده است که در حالت ریزشمع مایل، شیب‌دار بودن آن باعث تجهیز بهتر ریزشمع به علت سختی محوری مناسب می‌شود، لذا میزان نیروهای برشی و لنگر خمشی وارده به خاک کاهش می‌یابد.<sup>[۳]</sup> در واقع ریزشمع‌های مایل مجبور هستند که نیروی محوری بیشتری از سر شمع دریافت کنند، در نتیجه ممکن است ظرفیت خمشی آن‌ها با دریافت نیروی محوری بزرگ مذکور کاهش یابد.<sup>[۴]</sup> تأثیر زاویه‌ی قرارگیری ریزشمع (مایل بودن ریزشمع) باعث کاهش میزان جابه‌جایی جانبی می‌شود.<sup>[۵]</sup> همچنین باید به این موضوع اشاره کرد که گروهی بودن ریزشمع، تأثیر بهتری در کاهش خمش توزیع‌شده در عمق ریزشمع‌ها دارد و باعث کاهش مقادیر جابه‌جایی نسبی در خاک نسبت به حالت منفرد می‌شود که این موضوع در مطالعات دیگری در سال ۲۰۰۴ مطرح شده است.<sup>[۶]</sup> از طرفی، تأثیر زاویه‌ی قرارگیری ریزشمع در یک گروه باعث افزایش در میزان ظرفیت باربری آن می‌شود و این موضوع تأثیر مستقیمی در کاهش نشست دارد و پارامتری مهم در افزایش سختی خاک است.<sup>[۷]</sup>

همچنین در تحلیل دینامیکی گروه ریزشمع تحت خاکریز در سال ۲۰۱۲

جدول ۱. خواص خاک و ریزش‌م در خاک تک‌لایه.

ریزش‌م	خاک		مصالح
کشسان	خمیری (دراگر - پراگر)	کشسان	مدل رفتاری
۲۵۰۰	۱۶۰۰	۱۷۰۰	$\rho(kg/m^3)$
۲۴	۱۵۴,۴۲	۸	$E(Mpa)$
۰,۳	۰,۳۳	۰,۴۵	$\mu$
-	۳۸,۵۹°	-	$\varphi$
-	۱	-	$\psi$
-	۰,۸	-	$f$
۵	-	۵	$\zeta(\%)$

جدول ۲. خواص خاک و ریزش‌م در مدل خاک لایه‌دار.

ریزش‌م	خاک			مصالح
	خمیری (دراگر - پراگر)			
	لایه‌ی اول	لایه‌ی دوم	لایه‌ی سوم	
کشسان	۱۰	۳	۲	ضخامت (متر)
۲۵۰۰	۱۷۰۰	۱۸۵۰	۱۶۰۰	$\rho(kg/m^3)$
۲۴	۲۷۱	۱۵۴,۴۲	۱۵۴,۴۲	$E(Mpa)$
۰,۳	۰,۳۴	۰,۳۳	۰,۳۳	$\mu$
-	۴۰,۵۶°	۳۸,۵۹°	۳۸,۵۹°	$\varphi$
-	۰,۸۵	۲	۱	$\psi$
-	۲,۵	۰,۹	۰,۸	$f$
۵	-	-	-	$\zeta(\%)$

جدول ۳. ابعاد محیط خاک و ریزش‌م و کلاهدک ریزش‌م.

$t(m)$	$A(m^2)$	مقاطع
۱۵	۱۰ × ۱۰	محیط خاک
۱	۰,۱۲π	ریزش‌م (مقطع دایره‌یی)
۵-۱۰	۰,۱۷۷۲ × ۰,۱۷۷۲	ریزش‌م (مقطع مربعی)
۰,۲۵	۲,۱۵ × ۰,۷	کلاهدک ریزش‌م دایره‌یی
۰,۲۵	۲,۱۰۴۴ × ۰,۶۷۷۲	کلاهدک ریزش‌م مربعی

در جدول‌های ۴ و ۵، خصوصیات موردنیاز برای وجوه مشترک در خاک‌های تک‌لایه و لایه‌دار عنوان شده است. بار اعمالی روسازه معادل ۱۰ تن فرض شده است. در نهایت مش‌بندی مدل به صورت (node linear integration, hourglass) Continuum (An Acontoro) با ۸ گره‌یی با ۳ درجه آزادی در هر گره به صورت مرتبه‌ی اول خطی به روش انتگرال کاهش‌یافته برای المان‌های خاک و ریزش‌م و سر شمع انجام شده است.

### ۳. صحت‌سنجی مدل

در جهت اطمینان از نتایج مدل‌سازی انجام‌شده‌ی ریزش‌م در خاک، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و با توجه به فرضیات و ساده‌سازی‌هایی که در مراحل مدل‌سازی در نظر گرفته شده است، صحت‌سنجی انجام شده است و برای آن از

مشخص شد که با افزایش شتاب زلزله از ۰,۱g به ۰,۲g و ۰,۳g، مقدار شتاب وارد به روسازه افزایش می‌یابد که نشان از تأثیر مهم پارامتر شتاب روسازه در تحلیل دینامیکی است. [۸] از طرفی تأثیر خاصیت خمیری خاک در نوع بارگذاری هارمونیک و زلزله‌ی واقعی متفاوت است. پاسخی که از سیستم روسازه در حالت رفتاری کشسان گرفته می‌شود، بیشتر از حالت خمیری است که به علت اتلاف انرژی توسط تغییرشکل‌های خمیری و نیز تأثیر رفتار خمیری در کاهش سختی سیستم است که همین عوامل باعث کاهش بسامد سیستم می‌شوند. [۹]

در نظر گرفتن زبری سطح ریزش‌م (همان اصطکاکی که در تماس با خاک ایجاد می‌شود)، باعث تمایل بیشتر خاک ماسه‌یی به اتساع (بالازدگی) می‌شود و به نوعی باعث افزایش زاویه‌ی اصطکاک خاک در تماس با ریزش‌م می‌شود. [۱۰] ریزش‌م به‌عنوان المان مقاوم در مجاورت خاک، حساسیت بالایی دارد تا هرگونه نقص فنی در طراحی و اجرای آن کاسته شود. از این رو شیوه‌ی اجرا با کمترین آثار تخریب لرزه‌یی مدنظر است و بررسی دینامیکی ریزش‌م‌های زاویه‌دار با کاربرد وسیع در انواع مختلف شرایط زمین اهمیت می‌یابد. در نوشتار حاضر، خاک‌های تک‌لایه و لایه‌دار بررسی شده‌اند.

## ۲. شرح مسئله

### ۲.۱. مدل‌سازی گروه ریزش‌م در خاک‌های تک‌لایه و لایه‌دار

برای مدل‌سازی از نرم‌افزار ABAQUS نسخه‌ی ۱-۱۰-۶ استفاده شده است. گروه ریزش‌م دوتایی با زاویه‌های ۹۰°، ۳۰°، ۲۵° و ۲۰° مدل شده‌اند. شرح خواص خاک و ریزش‌م به‌طور کامل در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. ابعاد محیط خاکی و ابعاد ریزش‌م و سر شمع ریزش‌م هم در جدول ۳ مطرح شده است. برای مدل‌سازی خاک و ریزش‌م از المان solid از نوع Homogeneous استفاده شده است. المان solid، یک المان ۶ وجهی ۸ گره‌یی است که هر گره ۳ درجه آزادی دارد. محیط خاک با ابعاد ۱۰ × ۱۵ × ۱۵ متر و ریزش‌م‌ها با مقطع دایره‌یی به قطر ۰,۲ متر و با مقطع مربعی به ابعاد ۰,۱۷۷۲ × ۰,۱۷۷۲ مدل شده است، البته شایان ذکر است که ریزش‌م‌های مربعی و دایره‌یی، سطح مقطع معادل دارند. خاک مسئله با دو حالت رفتاری کشسان و خمیری با مدل رفتاری دراگر - پراگر در نظر گرفته شده است. کف مدل برای هر ۶ درجه آزادی بسته و شرایط مرزی گیردار برای آن تعریف شده است. شکل ۱ (الف و ب) مدل مش‌بندی‌شده برای ریزش‌م‌های قائم و مایل را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۲، جزئیات ابعادی مدل‌سازی مشخص شده است. شتاب اعمالی به دو صورت شتاب هارمونیک سینوسی ۰,۲g و شتاب زلزله‌ی واقعی ال - سنترو ۰,۳۲g با فرض میرایی خطی به کف مدل اعمال شده است. شتاب نگاشت هارمونیک و شتاب نگاشت زلزله‌ی واقعی ال - سنترو در شکل ۳ (الف و ب) مشاهده می‌شود.

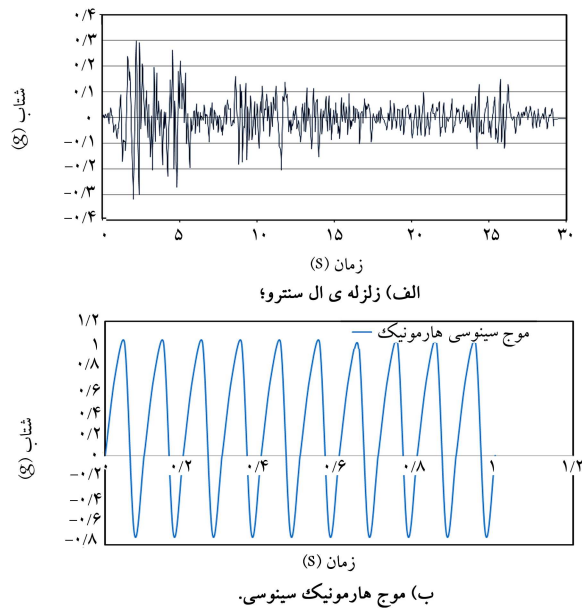
بسامد بنیادی خاک ( $f_{soil}$ ) برابر ۰,۳۶۷ Hz تعریف شده است. برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک و ریزش‌م و سر شمع ریزش‌م که در تماس با خاک است، دو نوع سطح تماس بین ریزش‌م و خاک تعریف شده است. سطح تماس یا به صورت کاملاً چسبیده و یا به صورت اصطکاکی است که امکان لغزش را بین آن‌ها فراهم می‌کند. تماس‌ها از نوع اصطکاکی و تماس عمودی است که تماس اصطکاکی با فرمول‌بندی penalty و تماس عمودی با فرمول‌بندی penalty و hard contact تعریف شده است. وجوه جانبی ریزش‌م در تماس با خاک از نوع اصطکاکی و وجه تماس کف ریزش‌م و سر شمع با خاک به صورت عمودی است.

جدول ۴. خصوصیات وجوه مشترک خاک و ریزشمع در خاک تک لایه.

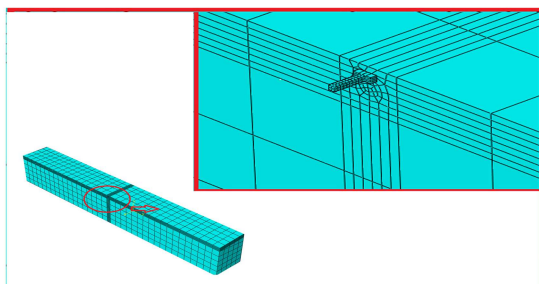
رفتار عمودی	رفتار مماسی	اندرکنش
تماس سخت	تماس اصطکاکی، $f = 0.8$	اصطکاک خاک (ناشی از اصطکاک)
تماس سخت	-	باربری خاک در انتهای ریزشمع (نرمال)

جدول ۵. خصوصیات وجوه مشترک خاک و ریزشمع در خاک لایه دار.

رفتار عمودی	رفتار مماسی	اندرکنش
تماس سخت	تماس اصطکاکی، $f = 0.6$	خاک (۱)
تماس سخت	تماس اصطکاکی، $f = 0.4$	اصطکاک خاک (ناشی از اصطکاک)
تماس سخت	تماس اصطکاکی، $f = 0.8$	خاک (۳)
تماس سخت	-	باربری خاک در انتهای ریزشمع (نرمال)

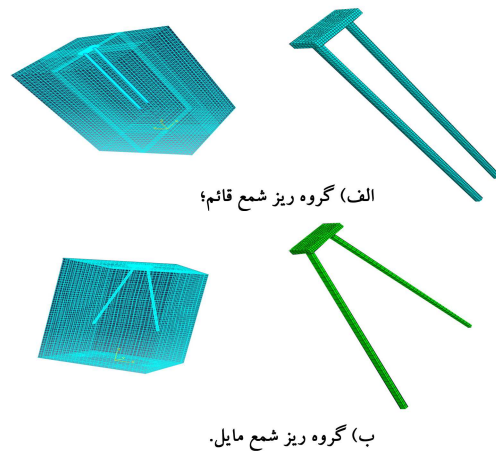


شکل ۳. شتاب نگاشت.

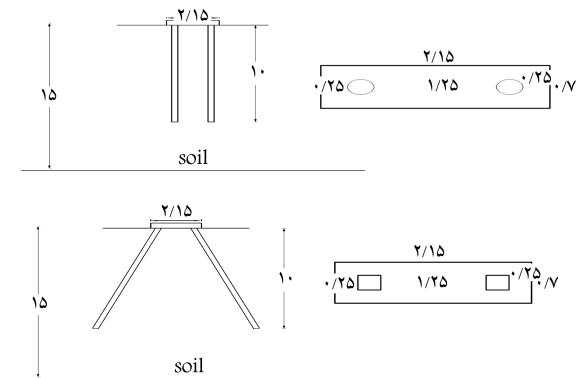


شکل ۴. مدل سازی انجام شده از مدل ساخته شده در پژوهشی در سال ۲۰۰۱ [۱۱].

خمش در عمق ابتدایی ریزشمع و در نزدیکی کلاهک برابر  $302 \text{ KN.m}$  بوده است که این مقدار در مدل اخیر برابر  $308 \text{ KN.m}$  و پس از آن در میانه ی عمق برابر با مقدار  $112 \text{ KN.m}$  بوده است. مقدار به دست آمده در پژوهش حاضر با مقدار به دست آمده در مطالعه ی مذکور، [۱۱] تطابق نزدیکی دارد. میزان میانگین اختلاف در حدود  $4\%$  بوده است.

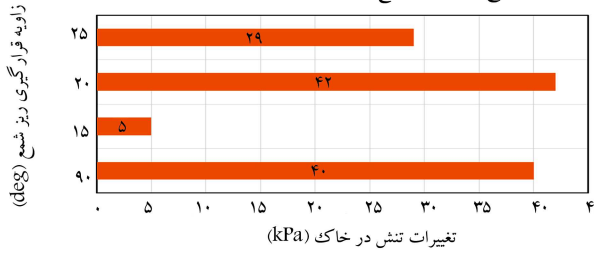
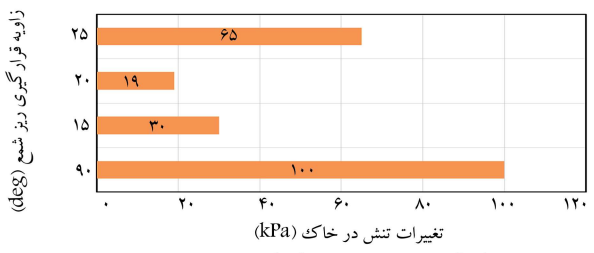
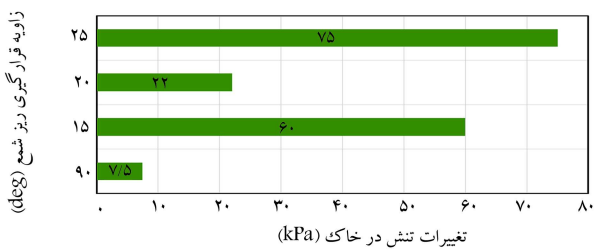
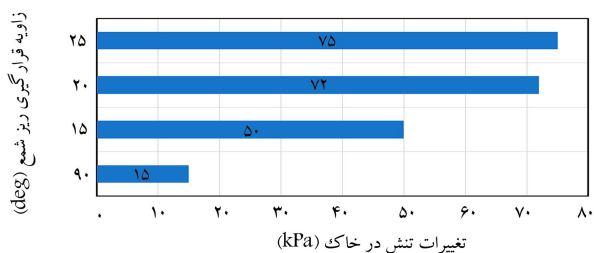


شکل ۱. مدل سازی گروه ریزشمع دوتایی با نرم افزار ABAQUS.



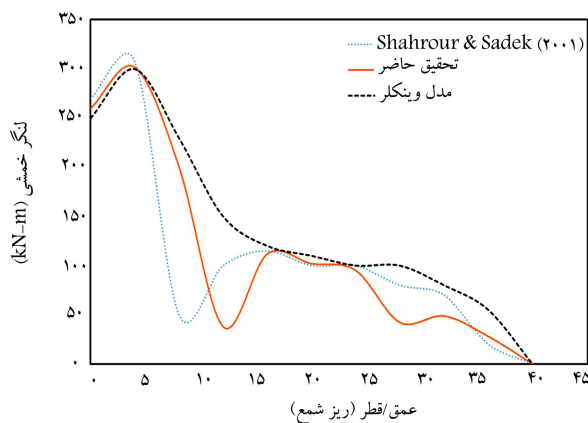
شکل ۲. جزئیات مدل سازی از نظر ابعاد کلاهک ریزشمع و محل قرارگیری آن ها در گروه.

مدل ساخته شده یی در سال ۲۰۰۱ [۱۱] استفاده شده است. شکل ۴، مدل سازی انجام شده ی مشابه با مدل مذکور را نشان می دهد؛ که مطابق آن، ابعاد خاک  $120 \times 17 \times 15$  متر است. برای انجام تحلیل دینامیکی، بار متمرکز  $10$  تن در مرکز کلاهک ریزشمع وارد شده است. در شکل ۵، پاسخ ریزشمع در مورد خمش با مدل سازی توسط نرم افزار ABAQUS و نیز مدل وینکلر مقایسه و مطابقت مدل مذکور (۲۰۰۱) [۱۱] با مدل ساخته شده نشان می دهد. با توجه به شکل ۵، پیشینه ی



شکل ۶. تغییرات تنش در خاک تک‌لایه با اعمال شتاب هارمونیک.

سر شمع ریزشمع در زاویه‌ی ۱۵ درجه برابر با بیشینه‌ی مقدار ۶۰ کیلوپاسکال برای شتاب ال - سنتر و ۸۰ کیلوپاسکال برای شتاب هارمونیک است. و همچنین در شکل ۸ (ج و د)، مقدار تنش دریافتی خاک در نوک ریزشمع که در تماس با لایه‌ی خاک است، در بین زاویه‌های مطرح شده کمینه‌ی مقدار ۹۵ کیلوپاسکال در شتاب ال - سنتر و ۴۸ کیلوپاسکال در شتاب هارمونیک را نشان می‌دهد. با وجود این، مقدار تنش برای هر دو شرایط تنش اعمالی ال - سنتر و هارمونیک تا حدودی تطبیق دارند. پس زاویه‌ی ۱۵ درجه، بهترین زاویه برای دریافت تنش در خاک لایه‌دار است. در جدول ۶، مقایسه‌ی مقادیر تنش خاک در محدوده‌ی سر شمع ریزشمع و نوک آن برای حالت همگن و لایه‌دار با زاویه‌ی مناسب عنوان شده است. مطابق جدول مذکور مشخص است که زاویه‌های مناسبی که باید برای اعمال ریزشمع در خاک در نظر گرفته شوند، در خاک‌های تک‌لایه و لایه‌دار متفاوت است. در خاک تک‌لایه با شتاب لرزه‌یی واقعی، زاویه‌ی ۲۰ درجه و در خاک لایه‌دار، زاویه‌ی ۱۵ درجه مناسب است. همچنین لایه‌بندی خاک باعث کاهش مقدار زاویه‌ی قرارگیری ریزشمع در خاک به منظور کاهش توزیع تنش در خاک است.



شکل ۵. مقایسه‌ی تغییرات خمش در ریزشمع منفرد.

#### ۴. نتایج تحلیل پارامتریک

##### ۴.۱. توزیع تنش در خاک

همواره توزیع تنش در محدوده‌ی اتصال ریزشمع به سر شمع و در لایه‌های بالایی خاک واقع در قسمت کلاهک ریزشمع به مقدار بیشینه است و با پیشروی از کلاهک به سمت نوک ریزشمع، تنش‌ها در خاک اطراف ریزشمع‌ها کاهش می‌یابند؛ که این امر به دلیل میرایی خاک است و با افزایش عمق، اثر نیروی ثقلی روسازه واقع بر خاک کاهش می‌یابد و در واقع نیروی وارده از بار مذکور را مستهلک می‌گرداند. در بخش بعد، توزیع تنش در خاک با وجود ریزشمع‌ها در دو حالت خاک تک‌لایه و لایه‌دار بررسی و در نهایت، بهترین زاویه برای اعمال گروه ریزشمع ۲ تایی در خاک مطرح شده است.

##### ۴.۱.۱. مقادیر توزیع تنش در خاک تک‌لایه (با اعمال شتاب هارمونیک)

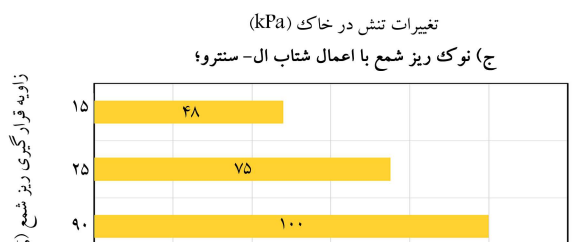
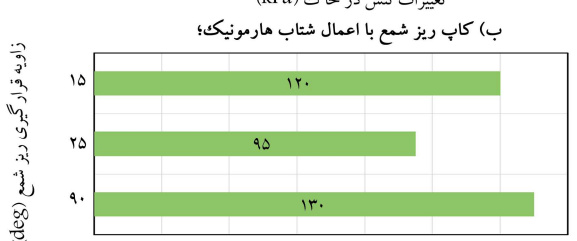
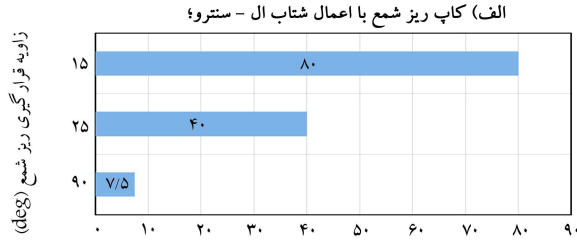
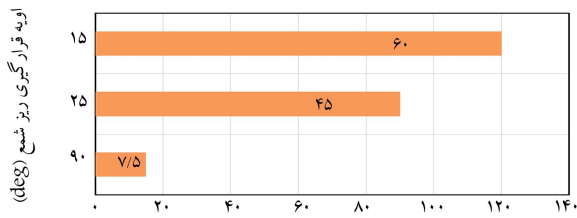
شکل ۶، تغییرات تنش خاک تک‌لایه در حالت اعمال شتاب هارمونیک را نشان می‌دهد. در شکل ۶ (الف و ب) مشخص است که بیشینه‌ی تنش دریافتی برای هر دو فرض خاک با رفتار کشسان و خمیری در سر شمع ریزشمع معادل ۷۵ کیلوپاسکال است که در زاویه‌ی ۲۵ درجه صورت گرفته است. شکل ۶ (ج و د)، کمینه‌ی تنش در نوک ریزشمع با فرض رفتار کشسان برای خاک در زاویه‌ی ۲۰ درجه معادل ۱۹ کیلوپاسکال و با فرض رفتار خمیری برای خاک در زاویه‌ی ۱۵ درجه معادل ۵ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. پس زاویه‌ی ۲۵ درجه، مناسب‌ترین زاویه برای گروه ریزشمع دو تایی در خاک تک‌لایه با شتاب هارمونیک در جهت توزیع تنش در خاک است.

##### ۴.۱.۲. مقادیر توزیع تنش در خاک تک‌لایه (شتاب ال - سنتر)

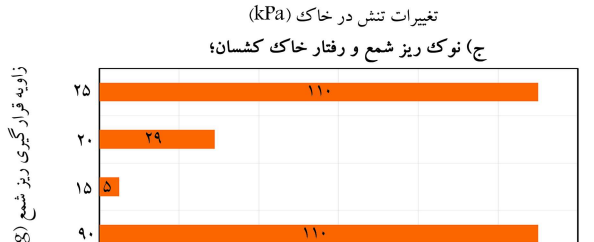
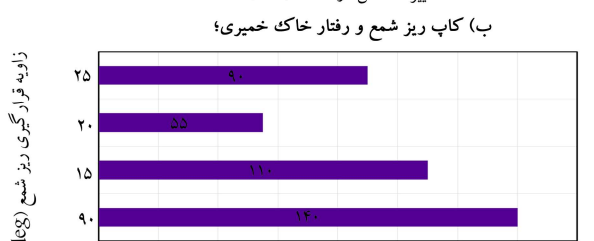
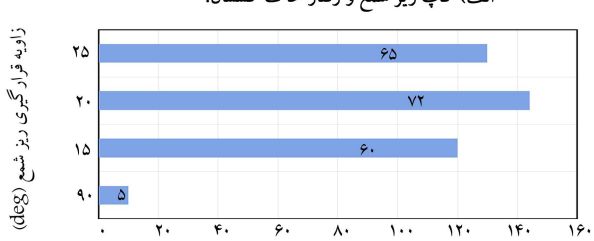
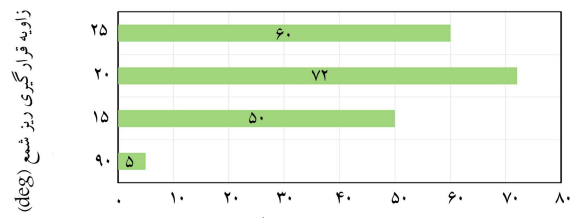
در شکل ۷، مقادیر تنش دریافتی خاک تک‌لایه با اعمال شتاب ال - سنتر در سر شمع و نوک ریزشمع نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ (الف و ب) مشاهده می‌شود، در خاک تک‌لایه با فرض رفتار کشسان و خمیری، بیشینه‌ی تنش خاک معادل ۷۲ کیلوپاسکال است که در سر شمع ریزشمع با زاویه‌ی ۲۰ درجه حاصل شده است. همچنین با توجه به شکل ۷ (ج و د)، توزیع تنش کمینه در نوک ریزشمع در حالت کشسان برابر ۵۵ کیلوپاسکال در زاویه‌ی ۲۰ درجه و در حالت خمیری برابر ۵ کیلوپاسکال است که در زاویه‌ی ۱۵ درجه به دست آمده است. زاویه‌ی انتخابی با شتاب ال - سنتر در این حالت زاویه‌ی ۲۰ درجه است که باعث دریافت تنش بیشینه در سر شمع و کمینه‌ی آن در خاک می‌شود.

##### ۴.۱.۳. مقادیر توزیع تنش در خاک لایه‌دار

با توجه به شکل ۸ (الف و ب) مشخص است که تغییرات تنش در خاک در ناحیه‌ی



شکل ۸. تغییرات تنش در خاک لایه دار.



شکل ۷. تغییرات تنش در خاک تک لایه با اعمال شتاب ال - سترو.

جدول ۶. مقایسه‌ی تغییرات تنش خاک در محدوده‌ی سر شمع ریز شمع و نوک آن.

نوع خاک	زاویه‌ی تنش ریز شمع (درجه)	
	بیشینه در سر شمع	کمینه در عمق
همگن	۲۵°	۱۵°
	۲۰°	۱۵°
لایه دار	۱۵°	۱۵°
	۱۵°	۱۵°

## ۲.۴. جابه‌جایی نسبی خاک و میزان بالازدگی

اینکه با افزایش تعداد ریز شمع‌ها مقادیر مربوط به جابه‌جایی نسبی کاهش می‌یابد، امری مسلم است؛ اما اینکه زاویه‌های قرارگیری ریز شمع‌ها در خاک نیز تا چه حد در این مورد تأثیرگذار هست، موضوعی است که در ادامه بررسی شده است.

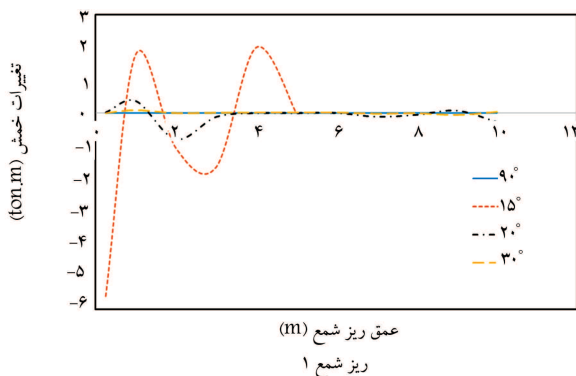
### ۱.۲.۴. جابه‌جایی نسبی و میزان بالازدگی در خاک تک لایه

جدول ۷، مقادیر بالازدگی نسبی در طول ریز شمع در مورد خاک تک لایه را نشان

می‌دهد. با توجه به جدول مذکور می‌توان دریافت که زاویه‌های ۲۰ و ۲۵ درجه در حالت اعمال شتاب واقعی زلزله‌ی ال - سترو و رفتار واقعی خاک با فرض خمیری به دلیل عدم بالازدگی نسبت به ریز شمع قائم و ریز شمع با زاویه‌ی ۱۵ درجه با میزان بالازدگی ۱ میلی‌متر مناسب تر هستند، پس نسبت به آن دو زاویه ترجیح داده می‌شوند. البته باید اشاره کرد که مقادیر جابه‌جایی در زاویه‌های مختلف، تفاوت چندانی از نظر مقادیر با هم ندارند؛ با وجود این، عدم بالازدگی نسبت به مقدار کمی بالازدگی برای تحلیل لرزه‌یی ترجیح داده می‌شود. در مورد میزان جابه‌جایی نسبی در طول ریز شمع‌های گروه ۲ تایی که در جدول ۸ نشان داده شده است، باید گفت کمترین میزان جابه‌جایی نسبی در شرایط لرزه‌یی واقعی برای زاویه‌ی ۲۵ درجه با مقدار ۰/۱۲ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. در شرایط اعمال شتاب هارمونیک نیز برای زاویه‌ی ۲۰ درجه، کمترین مقدار جابه‌جایی نسبی به میزان ۰/۰۰۹ میلی‌متر رخ می‌دهد.

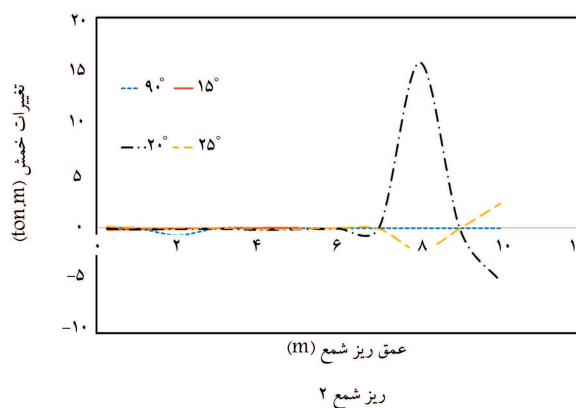
### ۲.۲.۴. جابه‌جایی نسبی و میزان بالازدگی در خاک لایه دار

با توجه به جدول ۹، در خاک لایه دار برای گروه ریز شمع ۲ تایی در زاویه‌های ۲۰ و ۳۰



جدول ۷. مقادیر بالازدگی نسبی در طول ریزشمع (متر) - خاک تک‌لایه.

زاویه (درجه)	شتاب هارمونیک		شتاب ال - سنترو	
	(کشسان)	(خمیری)	(کشسان)	(خمیری)
۹۰°	$5 \times 10^{-2}$	۰	$2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
۱۵°	$1 \times 10^{-2}$	۰	$2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
۲۰°	$1 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	۰
۲۵°	$3 \times 10^{-2}$	۰	$2 \times 10^{-3}$	۰



جدول ۸. مقادیر جابه‌جایی نسبی در طول ریزشمع (متر) - خاک تک‌لایه.

زاویه (درجه)	شتاب هارمونیک		شتاب ال - سنترو	
	(کشسان)	(خمیری)	(کشسان)	(خمیری)
۹۰°	$5 \times 10^{-2}$	$15 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$
۱۵°	$7 \times 10^{-2}$	$48 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-4}$	$11 \times 10^{-4}$
۲۰°	$7 \times 10^{-5}$	$9 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
۲۵°	$14 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-5}$	$15 \times 10^{-2}$	$12 \times 10^{-5}$

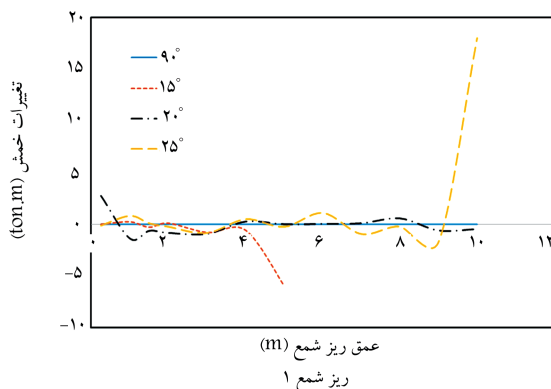
جدول ۹. مقادیر بالازدگی در طول ریزشمع - خاک لایه‌دار.

زاویه (درجه)	شتاب هارمونیک		شتاب ال - سنترو	
	(خمیری) $0.2g$	(خمیری) $0.32g$	(خمیری) $0.2g$	(خمیری) $0.32g$
۹۰°	$1 \times 10^{-3}$	۰	$1 \times 10^{-3}$	۰
۱۵°	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	۰
۲۰°	$1 \times 10^{-3}$	۰	$1 \times 10^{-3}$	۰
۲۵°	$1 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-3}$	۰
۳۰°	$1 \times 10^{-3}$	۰	$1 \times 10^{-3}$	۰

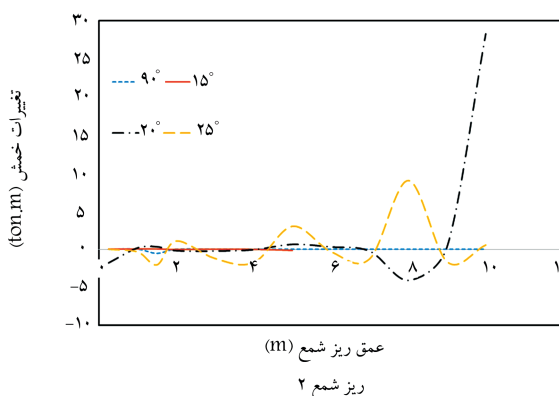
شکل ۹. مقایسه‌ی تغییرات خمش در عمق ریزشمع‌های گروه دوتایی با اعمال شتاب هارمونیک در خاک تک‌لایه.

جدول ۱۰. مقادیر جابه‌جایی نسبی در طول ریزشمع - خاک لایه‌دار.

زاویه (درجه)	شتاب هارمونیک		شتاب ال - سنترو	
	(خمیری) $0.2g$	(خمیری) $0.32g$	(خمیری) $0.2g$	(خمیری) $0.32g$
۹۰°	$2.5 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$
۱۵°	$2 \times 10^{-2}$	$12 \times 10^{-5}$	$12 \times 10^{-5}$	$12 \times 10^{-5}$
۲۰°	$3.5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$
۲۵°	$16 \times 10^{-3}$	$16 \times 10^{-3}$	$16 \times 10^{-3}$	$16 \times 10^{-3}$
۳۰°	$1 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$



درجه در شرایط لرزه‌ی واقعی و رفتار خمیری خاک، هیچ‌گونه بالازدگی رخ نمی‌دهد. همچنین مطابق جدول ۱۰، در خاک لایه‌دار کمیته‌ی میزان جابه‌جایی نسبی در طول ریزشمع در زاویه‌ی ۱۵ درجه معادل  $0.12$  میلی‌متر در شرایط لرزه‌ی واقعی رخ می‌دهد و برای شتاب هارمونیک در زاویه‌ی ۲۰ با مقدار کمیته‌ی  $0.35$  میلی‌متر است. با توجه به نتایجی که دریافت شده است، تأثیر زاویه‌ی ریزشمع در کاهش مقادیر جابه‌جایی نسبی و بالازدگی خاک به وضوح مشخص است. همان‌طور که مشخص است، زاویه‌ی ۲۰ درجه در تمام موارد و هر دو مورد خاک‌های تک‌لایه و لایه‌دار تأثیر بسیاری دارد.



۳.۴. تغییرات خمش در عمق ریزشمع‌های گروه

شکل ۱۰. مقایسه‌ی تغییرات خمش در عمق ریزشمع‌های گروه دوتایی با اعمال شتاب ال - سنترو در خاک تک‌لایه و لایه‌دار مشخص شده است.

در شکل‌های ۹ الی ۱۲، تغییرات خمش در عمق ریزشمع برای هر دو حالت اعمال شتاب هارمونیک و ال - سنترو در خاک‌های تک‌لایه و لایه‌دار مشخص شده است.

با توجه به شکل ۹، می‌توان دریافت که تغییرات خمش مذکور در عمق ریزشمع با شتاب هارمونیک در زاویه‌های ۱۵ و ۲۰ درجه در خاک تک‌لایه، بیشترین مقدار را دارد. همچنین با توجه به مطالعات انجام شده در سال ۲۰۰۱ بر روی ریزشمع منفرد در خاک تک‌لایه<sup>[۱۱]</sup> و نیز مطالعات دیگری در سال ۲۰۱۰ بر روی سرشمع دوتایی از گروه ریزشمع در خاک دولایه<sup>[۱۲]</sup> برابر است.

#### ۱.۳.۴. تغییرات خمش در خاک تک‌لایه

از روی شکل ۹ که تغییرات خمش در عمق ریزشمع‌های گروه ۲ تایی تحت شتاب هارمونیک را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که لنگر خمشی برای زاویه‌ی ۲۵ درجه کمترین مقدار را دارد. همچنین برای زاویه‌های ۱۵ و ۲۰ درجه، بیشترین تغییرات خمش در ریزشمع ۱ در نزدیکی سرشمع و برای ریزشمع ۲ در انتهای عمق ریزشمع مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ که تغییرات خمش در عمق ریزشمع‌های گروه ۲ تایی تحت شتاب ال - سنترو را نشان می‌دهد، بین زاویه‌های ۲۰ و ۲۵ درجه، تغییرات زیادی وجود دارد. ریزشمع ۱ در زاویه‌ی ۱۵ درجه در انتها، بیشینه‌ی خمش و ریزشمع ۲ در زاویه‌ی ۲۰ درجه، بیشینه‌ی خمش را در انتها دارند.

#### ۲.۳.۴. تغییرات خمش در خاک لایه‌دار

تغییرات خمش در خاک لایه‌دار نسبت به خاک تک‌لایه برای ریزشمع بسیار بیشتر است. با توجه به شکل ۱۱ مشخص است که بیشینه‌ی تغییرات خمش در ریزشمع ۱ در زاویه‌ی ۱۵ درجه در انتهای آن بوده و در ریزشمع ۲، در زاویه‌ی ۲۰ درجه در انتها رخ داده است. همچنین زاویه‌ی ۲۵ درجه نسبت به دیگر زاویه‌ها با توجه به کمترین تغییرات خمشی در شتاب هارمونیک بهتر است. با توجه به شکل ۱۲، نیز زاویه‌ی ۳۰ درجه برای شتاب لرزه‌ی ال - سنترو در هر دو ریزشمع ۱ و ۲ با توجه به کمترین تغییرات خمشی در عمق، تغییرات خمش مناسبی دارد.

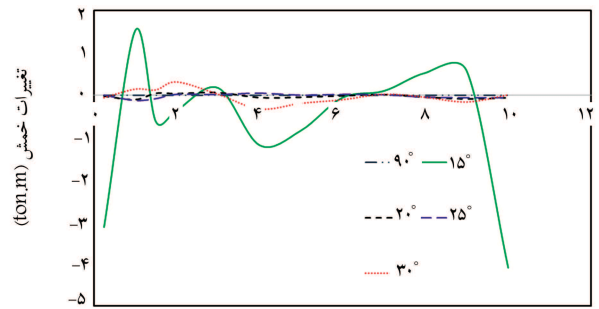
همچنین مقادیر لنگر خمشی بیشینه‌ی تحت بار هارمونیک سینوسی با شتاب  $0.7g$  بیشتر از حالت زلزله‌ی واقعی است. ذکر این نکته با مطالعه‌ی انجام شده‌ی در سال ۲۰۱۲<sup>[۱۳]</sup> که مدل‌سازی ۳D گروه شمع با اعمال شتاب هارمونیک و زلزله‌ی واقعی کوکائلی<sup>۲</sup> (۱۹۹۹) با بسامد  $0.79Hz$  انجام داده‌اند، مشخص می‌شود که شتاب به وجود آمده در کلاهک و روسازه در زلزله‌ی واقعی بسیار کمتر بوده است. مقادیر خمش بیشینه‌ی نوشتار حاضر هم مشابه با مطالعات اخیر است.<sup>[۱۲]</sup> با توجه به نتایج به دست آمده، تغییرات خمش در خاک لایه‌دار با توجه به زاویه‌های بررسی شده در زاویه‌ی ۳۰ درجه برای ریزشمع تحت شتاب هارمونیک و شتاب زلزله‌ی ال - سنترو، پاسخ‌گوی مناسبی خواهد بود.

#### ۴.۴. تغییرات نیروی محوری

در بررسی مورد ذکر شده ضمن بررسی زاویه‌های ریزشمع، طول آن نیز مورد توجه است و همان‌طور که در جدول‌ها، خصوصیات آن‌ها مطرح شده بود، ریزشمع با طول‌های ۵ و ۱۰ متری نیز مدل شده است.

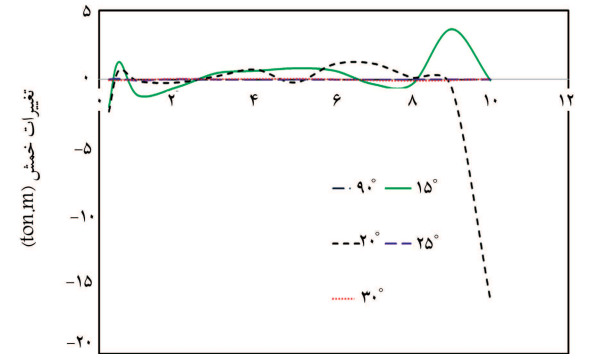
#### ۱.۴.۴. نیروی محوری در ریزشمع‌های خاک تک‌لایه

به طور کلی باید گفت که مقدار نیروی دریافتی ریزشمع‌ها تحت تأثیر شتاب اعمالی و نیز مقدار بار وارده از روسازه در کل طول ریزشمع بخش می‌شود. اما همواره مقدار بیشینه در محدوده‌ی سرشمع ریزشمع و نیز نوک ریزشمع که در تماس با خاک است، اتفاق می‌افتد و همواره نیروی بیشینه در سرشمع به تدریج تا عمق ۲ متری کاسته می‌شود و در میانه‌ی عمق مسیر ثابتی را طی می‌کند. در جدول ۱۱، مقادیر نیروی محوری ریزشمع در سرشمع و نوک آن مشخص شده است. در مورد خاک تک‌لایه با وجود عدم تغییرات در عمق خاک باید گفت افزایش زاویه‌ی ریزشمع تا



عمق ریزشمع (m)

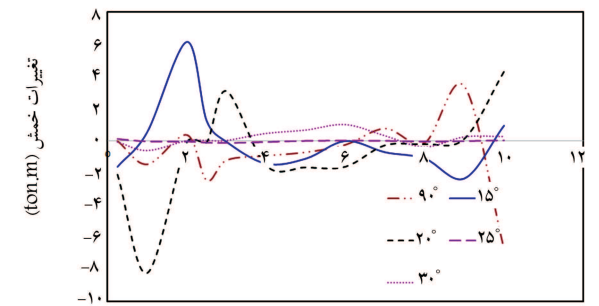
ریزشمع ۱



عمق ریزشمع (m)

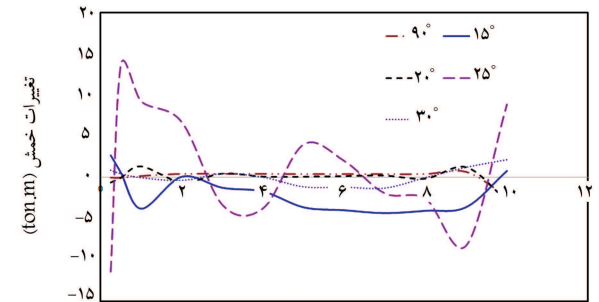
ریزشمع ۲

شکل ۱۱. مقایسه‌ی تغییرات خمش در عمق ریزشمع‌های گروه دوتایی با اعمال شتاب هارمونیک در خاک لایه‌بندی.



عمق ریزشمع (m)

ریزشمع ۱



عمق ریزشمع (m)

ریزشمع ۲

شکل ۱۲. مقایسه‌ی تغییرات خمش در عمق ریزشمع‌های گروه دوتایی با اعمال شتاب ال - سنترو در خاک لایه‌بندی.

جدول ۱۱. مقادیر نیروی محوری در ریزشمع‌ها در خاک تک‌لایه (KN).

شتاب هارمونیک				
زاویه‌ی ریزشمع	ریزشمع ۱		ریزشمع ۲	
	سر شمع	عمق	سر شمع	عمق
۹۰°	۶۳٫۴	۲۰۵	۳۰٫۷	۹۹٫۱
۱۵°	۱۷۹	۲۱۹	۱۰۱	۴۱٫۸
۲۰°	۵۹٫۴	۲۴	۱۷٫۴	۴۵
۲۵°	۶۲	۸٫۱۹	۴٫۳۵	۱۰۶
شتاب ال - سنترو				
زاویه‌ی ریزشمع	ریزشمع ۱		ریزشمع ۲	
	سر شمع	عمق	سر شمع	عمق
۹۰°	۶۰٫۵	۱۵۶	۲۸٫۳	۳۸
۱۵°	۴۱٫۷	۱۱۷	۳۴۷	۲۳٫۸
۲۰°	۲۲۱	۱۰۴	۱۳٫۳	۲۴٫۷
۲۵°	۷۲٫۸	۷۲۶	۲۵۹	۴۱٫۱

جدول ۱۲. مقادیر نیروی محوری در ریزشمع‌های خاک لایه‌دار (شتاب هارمونیک) (KN).

شتاب هارمونیک				
زاویه‌ی ریزشمع	ریزشمع ۱		ریزشمع ۲	
	سر شمع	عمق	سر شمع	عمق
۹۰°	۳۶٫۲	۱۵۴	۳۸۵	۲۴۲
۱۵° (۵ متر)	۸٫۵۹	۵۱٫۶	۲۸۴	۱۴۳
۱۵° (۱۰ متر)	۱۵٫۹	۱۱۶	۷۶٫۴	۱۴٫۶
۲۰°	۱۱٫۳	۳۱٫۴	۱۱۷	۱۰۲
۲۵°	۱۸٫۴	۶۹	۷۳٫۵	۸٫۳
۳۰° (۵ متر)	۳۷٫۲	۱۱٫۳	۱۹٫۳	۱۱۷
۳۰° (۱۰ متر)	۴۵	۷٫۴۴	۱۳٫۴	۴۳٫۹

۱۵ درجه، مؤثر و باعث کاهش نیروی محوری می‌شود و بعد از آن حتی افزایش زاویه تدریجاً باعث افزایش نیروی محوری می‌شود.

#### ۲.۴.۴. نیروی محوری در ریزشمع‌های خاک با لایه‌بندی

در جدول‌های ۱۲ و ۱۳، مقادیر نیروی محوری در خاک لایه‌دار برای هر دو شتاب اعمالی هارمونیک و لرزه‌ی ارائه شده است. مشخص است که نیروی محوری نیز مانند پارامترهای دیگر بین ریزشمع‌های گروه، توزیع می‌شود. طوری که مقدار بیشتر در ریزشمع ۱ باعث مقدار کمتر در ریزشمع ۲ می‌شود. در شتاب هارمونیک، افزایش زاویه تا ۲۵ درجه باعث کاهش مقدار نیروی محوری و پس از آن در زاویه ۳۰ درجه، مقدار نیروی محوری از حالت قائم بیشتر شده است. در شتاب لرزه‌ی واقعی، افزایش زاویه‌های ریزشمع از ۹۰ به ۳۰ درجه به نوعی باعث کاهش نیروی محوری در سر شمع ریزشمع می‌شود. از طرفی با مقایسه‌ی طول ریزشمع در زاویه‌های

جدول ۱۳. مقادیر نیروی محوری در ریزشمع‌های خاک لایه‌دار (شتاب لرزه‌ی) (KN).

شتاب ال - سنترو				
زاویه‌ی ریزشمع	ریزشمع ۱		ریزشمع ۲	
	سر شمع	عمق	سر شمع	عمق
۹۰°	۸۵٫۷	۲۳٫۶	۱۵۰	۷۵
۱۵° (۵ متر)	۱۵۵	۲۱۷	۳۰۵	۱۰۲۰
۱۵° (۱۰ متر)	۱۱۴	۷۸۲	۲۹۷	۵۴۸
۲۰°	۱۱۱	۳۲۸	۱۰۶	۴۱۴
۲۵°	۵۶٫۸	۳۳۶	۷۸۰	۲۸۴
۳۰° (۵ متر)	۵٫۵۹	۱۴۰	۲۰۴	۵۲٫۸
۳۰° (۱۰ متر)	۱٫۳۴	۳۱۱	۱۲۵	۶۴٫۲۱

۱۵ و ۳۰ درجه نیز مشخص می‌شود که طول بیشتر، باعث کاهش نیروی دریافتی سر شمع می‌شود. البته ریزشمع ۵ متری، چون در مرز دولایه‌ی خاک قرار می‌گیرد و از مرز دو لایه‌ی خاک عبور می‌کند، در نوک ریزشمع، نیروی محوری بیشتری دارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، با استفاده از یک مورد تحلیل دینامیکی انجام شده بر روی ریزشمع منفرد که تحت شتاب هارمونیک قرار گرفته بود، با مدل‌سازی توسط نرم‌افزار ABAQUS صحت‌سنجی انجام شد و نتایج مدل مذکور اختلافی در حدود ۴٪ با مدل وینکلر و مدل انجام شده داشته است. پس از آن با مدل‌سازی گروه ریزشمع دوتایی در خاک تک‌لایه و لایه‌دار و بررسی آن‌ها، نتایجی که از تحلیل پارامتریک حاصل شد، ارزیابی و نتایج آن به صورت توزیع تنش در خاک، مقادیر جابه‌جایی نسبی در عمق ریزشمع، لنگر خمشی و نیروی محوری ریزشمع‌ها با ذکر جدول‌ها و نمودارهایی مطرح شد. و نتایج به دست آمده به طور خلاصه، بدین شرح است:

۱. توزیع تنش به علت میرایی خاک در محدوده‌ی سر شمع ریزشمع و در لایه‌های بالایی خاک بیشینه بوده است و در ادامه، عمق ریزشمع به علت کاهش اثر نیروی ثقلی، تنش‌ها در خاک اطراف ریزشمع‌ها کاهش یافته است.
۲. با توجه به نمودارهای حاصل از توزیع تنش و نیز جدول ۶ که به مقایسه‌ی تنش خاک تک‌لایه و لایه‌دار پرداخته است، مشخص می‌شود که در خاک تک‌لایه، زاویه‌ی مناسب برای ریزشمع‌ها در جهت توزیع مناسب تنش زاویه‌ی ۲۰ درجه و در خاک لایه‌دار، زاویه‌ی مذکور برابر ۱۵ درجه است.
۳. با توجه به جدول‌های ۷ الی ۱۰، با مقایسه‌ی مقادیر جابه‌جایی نسبی و مقادیر بالازدگی در خاک تک‌لایه و لایه‌دار زاویه‌ی ۲۰ درجه برای قرارگیری ریزشمع‌ها در خاک زاویه‌ی مناسبی است.
۴. همواره توزیع خمشی بین ریزشمع‌های ۱ و ۲ به صورت مناسب انجام می‌شود. وقتی ریزشمع ۱ در سر شمع بیشینه می‌شود، ریزشمع ۲ در گروه در انتهای خود بیشینه‌ی مقدار را خواهد داشت.



محوری در سر شمع می‌شود و زاویه‌ی بزرگ‌تر تأثیر معکوس در مقادیر نیروی محوری دارد.

۸. در خاک لایه‌دار افزایش زاویه تا ۳۰ درجه باعث کاهش نیروی محوری می‌شود. البته باید توجه کرد در یک زاویه‌ی برابر، ریزشمع با طول بزرگ‌تر برای دریافت نیروی محوری بهتر است و همواره ارجح است که طول ریزشمع تا حدی باشد که ریزشمع از مرز جدایی لایه‌های خاک عبور کند.

۵. با توجه شکل ۱۰، در شتاب لرزه‌یی واقعی زاویه‌ی ۹۰ درجه برای ریزشمع در خاک تک‌لایه، تغییرات خمشی مناسبی دارد.

۶. با توجه به شکل ۱۲، در خاک لایه‌دار در زاویه‌ی بزرگ‌تری معادل ۳۰ درجه، تغییرات مناسبی خواهد داشت.

۷. در خاک تک‌لایه افزایش زاویه‌ی ریزشمع تا ۱۵ درجه باعث کاهش نیروی

## پانوشته‌ها

1. cap
2. Kocalli

## منابع (References)

1. Kishishita, T., Saito, E. and Miura, F. "Dynamic-response characteristics of structures with micro-pile foundation system", 12WCEE (2000).
2. Olyaei, M. and Khakpour, K. "The impact of a hard cap pile group behavior under seismic loading", *Civil Engineering Sharif*, **2**(30), pp. 45-68 (2014).
3. Sadek, M. and Isam, S. "Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micro-piles", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(6), pp. 473-485 (2004).
4. Dezi, F., Carbonari, S. and Morici, M. "A numerical model for dynamic analysis of inclined pile groups", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **45**(1), pp. 45-68 (2016).
5. Kalkan, E. "Nonlinear modeling of micro-pile foundation systems", University of California Davis (2004).
6. Shahrour, I. and Juran, I. "Seismic behaviors of micro-pile systems", *Ground Improvement*, **8**(3), pp. 109-120 (2004).
7. Lee, T.H., Chul, I.J. and Kim, C.Y. "A Method for reinforcing the ground adjacent to the footing using micro-piles", *Marine Georesources & Geotechnology*, **34**(4), pp. 341-355 (2014).
8. Zhaoyu, W. and Guoxiong, M. "Numerical analysis of seismic performance of embankment supported by micro-piles", *Marine Georesources and Geotechnology*, **30**(1), pp. 52-62 (2012).
9. Alsaleh, H. and Shahrour, I. "Influence of plasticity on the seismic soil-micro-piles-structure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(3), pp. 574-578 (2009).
10. Nusier, O.K., Alawneh, A.S. and Abdullatit, B.M. "Small-scale micro-piles to control heave on expansive clays", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement*, **162**(1), pp. 27-35 (2009).
11. Shahrour, I., Sadek, M. and Ousta, R. "Seismic behavior of micro-piles used as foundation support elements", *Transportation Research Record*, **1772**, pp. 84-90 (2001).
12. Wang, M. and Han, J. "Numerical modelling for ground improvement of batter micro-piles on liquefiable soils", *Ground Improvement and Geosynthetics* (2010).
13. Chehade, F.H., Sadek, M. and Bachir, D. "Non linear global numerical modeling of pile group under seismic loading", 15 WCEE, LISBOA (2012).