



## بررسی رفتار لرزه‌ای میکروشمع‌ها همراه با در نظر گرفتن اثر زاویه تمایل میکروشمع‌ها

مصطفی بهمنی<sup>۱</sup>، حمید هاشم‌الحسینی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

bahmani\_m@cv.iut.ac.ir

### خلاصه

سیستم‌های میکروشمع، مزیت‌های بسیاری از جمله انعطاف‌پذیری بالا، شکل‌پذیری قابل‌ملاحظه، و ظرفیت قابل‌توجه در مقابله با نیروهای کششی، برای ساخت در نواحی زلزله‌خیز دارند. در این تحقیق، هدف، بررسی زاویه تمایل میکروشمع‌ها بر روی رفتار دینامیکی و کارایی میکروشمع‌ها، در مقابل بارگذاری زلزله می‌باشد. تحلیل‌ها با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود سه‌بعدی غیرخطی، انجام گرفته است. محیط خاک به صورت الاستوپلاستیک، با مدل پلاستیسته دراگر-پراگر / Cap و میرایی رایله، در نظر گرفته شده است و در تحلیل دینامیکی، از روش صریح<sup>۳</sup> استفاده شده است. مطالعات انجام شده، نشان می‌دهد که، تمایل میکروشمع‌ها، کارایی میکروشمع‌ها را در مقابل بارگذاری زلزله بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی: میکروشمع، گروه، اجزاء محدود، خاک، سه بعدی، رفتار لرزه‌ای

### مقدمه

یک میکروشمع یک شمع جایگزینی<sup>۴</sup> کوبیدنی یا تزریقی<sup>۵</sup> با قطر کم (به طور معمول کمتر از ۳۰۰mm)، و معمولاً مسلح است. یک میکروشمع با کندن گمانه، قرار دادن میلگردها، و تزریق همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ساخته می‌شود. میکروشمع‌ها می‌توانند در مقابل بارهای محوری و جانبی، مقاومت کنند و می‌توانند به جای شمع‌های متداول، و یا به عنوان یکی از اعضای سیستم خاک-شمع، بسته به فلسفه طراحی، مورد استفاده قرار گیرند. میکروشمع‌ها با استفاده از روش‌هایی نصب می‌گردند که کمترین مزاحمت را برای سازه‌های مجاور، خاک و محیط اطراف داشته باشند. آنها می‌توانند در محیط‌هایی با دسترسی محدود، و در انواع شرایط خاک نصب گردند. همچنین میکروشمع‌ها می‌توانند تحت زوایای مختلف، با استفاده از همان تجهیزات مورد استفاده برای نصب میکروشمع‌های قائم، نصب شوند. از آنجا که سختی و مقاومت میکروشمع‌های قائم در مقابل بارهای جانبی کم است، استفاده از میکروشمع‌های مایل، برای مقابله با نیروهای اینرسیال و به منظور تأمین پایداری سیستم‌های پی تحت بارگذاری زلزله یک گزینه مؤثر و مناسب است. در سالهای اخیر، با پیشرفت تجهیزات حفاری و کوبش، کاربرد تکنیک‌های میکروشمع در مقاوم‌سازی سازه‌های زیربنایی و همچنین مقاوم‌سازی لرزه‌ای، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است [۱]. پیشرفت تجهیزات حفاری و ایجاد نوآوری‌هایی در این زمینه، امکان استفاده از میکروشمع‌ها را در سایت‌های با شرایط زمین‌شناسی دشوار، و در نواحی با امکان دسترسی محدود، فراهم ساخته است. آنالیز زلزله‌های گذشته و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های میز لرزه و آزمایش‌های سانتریفیوژ و همچنین تحلیل‌های اجزاء محدود، کارایی و اهمیت کاربرد میکروشمع‌ها را، بعنوان یک راه‌حل موثر، مطمئن، و کاربردی، روشن می‌سازد.

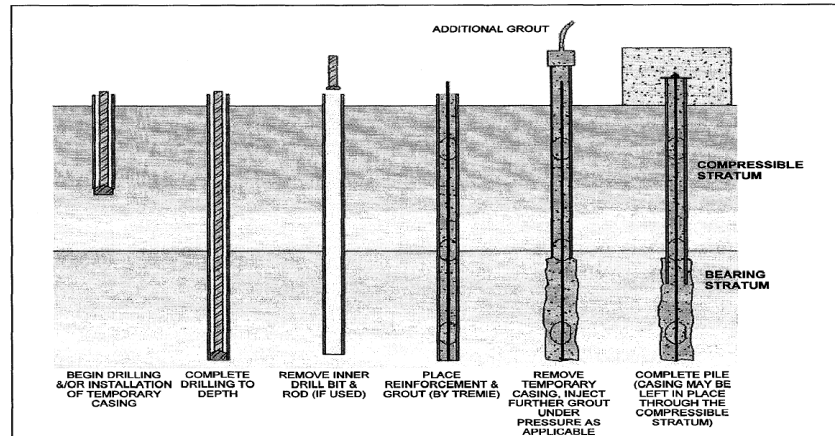
<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد

<sup>۲</sup> استادیار

<sup>۳</sup> Explicit

<sup>۴</sup> Replacement

<sup>۵</sup> Grouted

شکل ۱ - مراحل ساخت یک میکروشمع با لوله‌گذاری<sup>۱</sup>

همراه با گسترش استفاده از میکروشمع‌ها، در طرح‌های مقاوم‌سازی، نظیر مقاوم‌سازی پایه پلها و بناهای تاریخی، و همچنین استفاده وسیع در پایداری شبیه‌ها در سالهای اخیر، به طور موازی تحقیقاتی نیز روی عملکرد میکروشمع‌ها تحت بارهای لرزه‌ای، انجام گرفته است. این تحقیقات به نوعی ادامه تحقیقات انجام‌گرفته در زمینه شمع‌های تحت بار اثر لرزه‌ای، خصوصاً شمع‌های اصطکاکی و انعطاف‌پذیر، است، که در این مجال فقط به اشاره مختصری از تحقیقات انجام‌گرفته روی میکروشمع‌ها، تحت اثر بار لرزه‌ای، پرداخته می‌شود.

کیشیشیتا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۰) یک سری تحلیل‌های پاسخ خطی و غیرخطی، بر روی میکروشمع‌های تحت اثر بار لرزه‌ای، با استفاده از آزمایش میز لرزه، انجام دادند و با شمع‌های در جاساز و پیش‌ساخته مقایسه انجام دادند. تحلیل‌ها برای مدل پی‌های شمعی در موارد شمع‌های پیش‌ساخته (مورد ۱)، شمع‌های در جا ساز (مورد ۲)، میکروشمع‌های با ظرفیت بالا (مورد ۳) و میکروشمع‌های با ظرفیت بالا که در آنها از شمع‌های مایل استفاده شده بود (مورد ۴)، انجام شده بودند. همچنین در تحلیل‌ها از دو رکورد زلزله السنترو (۱۹۴۰) و کوبه (۱۹۹۵) استفاده شد. در این مطالعه جایجاییهای میکروشمع‌ها و شمع‌های اشاره شده، مقایسه شده‌اند و مطالعه‌ای بر روی بررسی نیروهای داخلی، انجام نگرفته است [۲].

یامنه<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۰) در انجمن میکروشمع ژاپن (JAMP)، آزمایش‌هایی با بار عمودی و جانبی بر روی میکروشمع‌ها انجام دادند. مطالعه بر روی رفتار قائم میکروشمع‌ها متمرکز شده بود. اگرچه آنها آزمایش‌های بار جانبی روی هفت میکروشمع تکی به منظور مطالعه ظرفیت خمشی انجام دادند. پنج تا از میکروشمع‌ها، میکروشمع‌های مرکب بودند، که از لوله‌های فولادی، گروت و میلگردهای رزوه شده، تشکیل شده بودند. از دو میکروشمع دیگر یکی دقیقاً شبیه پنج میکروشمع دیگر بود فقط در آن از اتصال Coupling در لوله‌های فولادی استفاده شده بود. میکروشمع دیگر فقط شامل یک لوله فولادی بدون میلگرد بود. این تحقیق بر روی اثر Coupling‌ها بر روی رفتار قائم متمرکز شده است و اثرات جانبی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند [۳].

یانگ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۰) یک سری آزمایش‌های میز لرزه به منظور مطالعه رفتار یک میکروشمع تکی تحت بارگذاری لرزه‌ای انجام دادند. یک مدل میکروشمع توخالی که درون یک تراز از تهشته ماسه خشک نصب شده بود، و در یک محفظه تخت که با پیچ‌هایی به میز لرزه متصل شده بود، قرار داده شده بود. در این تحقیق تنها رفتار یک میکروشمع تکی مورد بررسی قرار گرفته، و بار لرزه‌ای نیز به صورت شتاب‌نگاشت اعمال نشده و ارتعاشات سینوسی در جهت افقی به مدل اعمال شده است [۴].

استا<sup>۵</sup> و شاهرور (۲۰۰۱) یک تحلیل سه‌بعدی، بر روی رفتار میکروشمع‌های استفاده‌شده جهت تسلیح خاک اشیاع انجام دادند. تحلیل با استفاده از فرمول‌بندی II-P (جابجایی برای فاز جامد و فشار منفذی برای فاز مایع)، انجام گرفت و رفتار خاک بوسیله یک رابطه جامع الاستوپلاستیک دوره‌ای توصیف شد، که در چارچوب مفهوم رویه مرزی گسترش یافته بود. بارگذاری زلزله به صورت یک شتاب‌نگاشت انجام نشده است، و یک شتاب هارمونیکی با دامنه و فرکانس برابر با فرکانس اصلی خاک، به کف مدل اعمال شده است. در این تحلیل رفتار یک میکروشمع و یک گروه میکروشمع مورد بررسی قرار گرفته است [۵].

شاهرور<sup>۶</sup> و یوران<sup>۷</sup> (۲۰۰۴)، یک سری آزمایش‌های سانتریفیوژ بر روی یک میکروشمع تکی، یک گروه میکروشمع، و یک شبکه میکروشمع انجام دادند. ترکیب‌های مختلفی از قرارگیری، زاویه تمایل، تعداد میکروشمع‌ها، و ترازهای بارگذاری لحاظ شده بودند، و برنامه‌های تفاضل محدود LPILE و

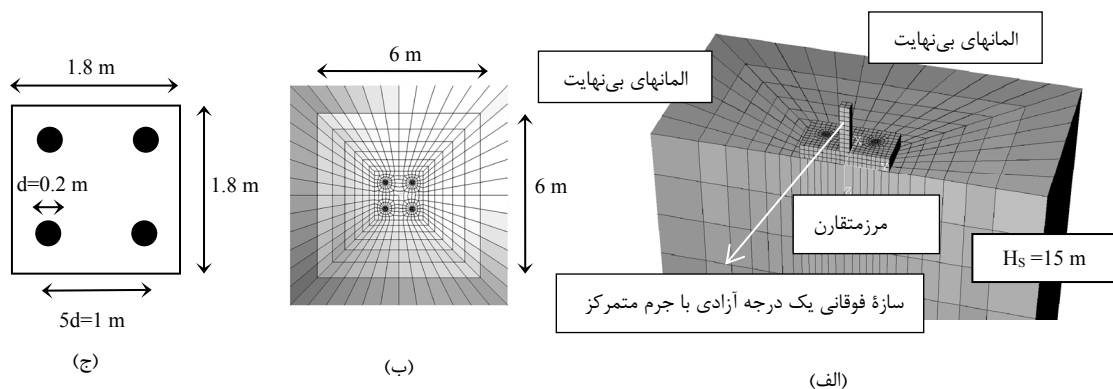
<sup>1</sup> Casing  
<sup>2</sup> Kishishita  
<sup>3</sup> Yamne  
<sup>4</sup> Yang  
<sup>5</sup> Ousta  
<sup>6</sup> Shahrour  
<sup>7</sup> Juran

GROUP، به منظور شبیه سازی آزمایش های سانتزیفیوژ ارائه شده، مورد استفاده قرار گرفتند. این آزمایشها به منظور مطالعه رفتار میکروشمع-خاک-سازه و همچنین به منظور بررسی پاسخ سیستم های میکروشمع تحت اثر بارگذاری زلزله مورد بررسی قرار گرفتند. در واقع این تحقیقات ادامه مطالعات انجام گرفته توسط همین محققان (یوران، بنسلیمانه<sup>۱</sup> و هانا<sup>۲</sup>) در اداره بزرگراه های آمریکا (FHWA) و دانشگاه پلی تکنیک نیویورک است [۷۶] (۲۰۰۱).

سادک<sup>۳</sup> و شاهرور (۲۰۰۴) با انجام یک تحلیل سه بعدی اثر تمایل میکروشمع ها تحت اثر بار لرزه ای را مورد بررسی قرار دادند، مطالعه با استفاده از یک مدل اجزاء محدود سه بعدی کامل PECPLAS انجام گرفت. در این تحقیق، خاک به صورت الاستیک، همراه با میرایی رایله، فرض شده و رفتار پلاستیک و سخت شدگی خاک مد نظر قرار نگرفته اند. سازه فوقانی به صورت یک سیستم یک درجه آزادی متشکل از یک جرم متمرکز و یک ستون، مدل شده است، و مطالعه برای میکروشمع های مایل و عمودی انجام گرفته است، همچنین در تحلیل ها اثرات اندرکنش های سینماتیکی و اینرسیال لحاظ شده است. این محققین همچنین در ادامه مطالعات خود (۲۰۰۶) اثر نوع اتصال بین میکروشمع و کلاک را بر روی کارایی میکروشمع ها مورد مطالعه قرار دادند [۹۸].

### مدل اجزاء محدود

به منظور بررسی رفتار سیستم خاک-شمع-سازه از یک مدل سه بعدی کامل، استفاده شده است. به منظور اجتناب از زمان طولانی اجرای برنامه و مشکلات دیگر، از مفهوم تقارن استفاده شده، و تنها نصف مدل اصلی مورد نظر ساخته شده است. گروه میکروشمع مرجع مورد بررسی، یک گروه میکروشمع ۲×۲ می باشد و در مطالعه پارامتریک از چندین زاویه تمایل مختلف، استفاده شده است. مدل مرجع مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. طول میکروشمع های مورد استفاده ۱۰ متر و ارتفاع محیط خاکی ۱۵ متر می باشند. همچنین ارتفاع سازه فوقانی ۱ متر و جرم وزن متمرکز ۲۰ تن می باشد.



شکل ۲ - مدل مرجع، مورد استفاده در تحلیل های اجزاء محدود (الف) مدل سه بعدی (ب) پلان مدل (ج) کلاک گروه میکروشمع

فرض شده است که کف مدل، متناظر با سنگ بستر است، و بنابراین در این قسمت نودها، با شرایط مرزی ثابت در نظر گرفته شده اند. در مرزهای متقارن از شرایط مرزی متقارن استفاده شده است. هویت یک مسأله ژئوتکنیکی اندرکنش را شرایط مرزی، مدل سطح تماس، مدل رفتاری خاک و شرایط تنش اولیه تعیین می کنند، بنابراین به منظور دستیابی به نتایج صحیح باید موارد اشاره شده را، به درستی برای برنامه اجزاء محدود تعریف کرد. در ادامه معرفی و نحوه تعیین این موارد اشاره شده، آمده است.

### شرایط مرزی

در مدل سازی یک مسأله دینامیکی شرایط مرزی فوق العاده مهم است، و به طور کلی با یک مسأله استاتیکی متفاوت است. در تحلیل های استاتیکی شرایط مرزی ثابت می تواند اعمال شود. چنین مرزهایی را نمی توان در تحلیل های دینامیکی، مورد استفاده قرار داد، زیرا انرژی امواج ایجاد شده در اثر تحلیل دینامیکی به محیط برگشت داده شده و شرایط تنش موجود را دستخوش تغییر می کنند. یک مدل بزرگتر می تواند تا حدودی این مشکل را رفع کند چرا که بیشتر انرژی منعکس شده توسط مرزهای ثابت توسط میرایی مادی، جذب می شود. منتها به دلیل محدودیت های ناشی از کمبود وقت و نیاز به رایانه هایی با پردازشگرهای قوی، نمی توان به راحتی و بدون محدودیت ابعاد مدل را افزایش داد. استفاده از مدل های متقارن و پاد متقارن (با توجه به

<sup>1</sup> Benslimane

<sup>2</sup> Hanna

<sup>3</sup> Sadek





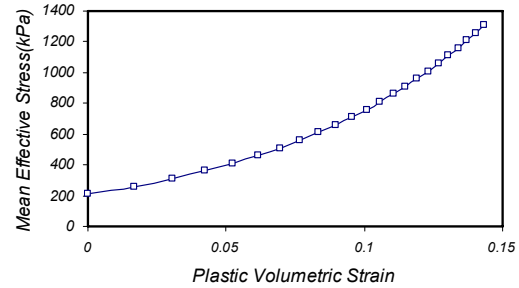
سطح زوال دراگر - پراگر توسط رابطه ذیل داده می شود :

$$F_s = t - P \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

که در آن،  $\beta$  زاویه اصطکاک خاک و  $d$  چسبندگی در صفحه  $p-t$  می باشد، همانطور که در شکل نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای مورد استفاده برای خاک، و شمع و سازه فوقانی، در جدول ۱ آمده است. به منظور محاسبه پارامترهای مدل Cap، حداقل نیاز به انجام سه آزمایش سه محوری به منظور محاسبه  $C$  و  $\phi$  و در نتیجه  $d$  و  $\beta$ ، و یک آزمایش تحکیم همسان همراه با سیکل های بارگذاری- باربرداری، به منظور محاسبه پارامترهای مورد نیاز ( $\lambda$  و  $K$ )، به منظور محاسبه منحنی سخت شدگی داریم.

جدول ۱- پارامترهای مدل Cap

General		Plasticity	
$V_s$ (m/s)	184	$d$	0
$E$ (MPa)	182	$\beta$ (deg)	0.45
$\nu$	0.4	$R$	1.2
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1923	Initial Yield	0
$e_0$	0.889	$K$	1
		$\lambda$	0.174
		$\kappa$	0.026
		$\alpha$	0.05



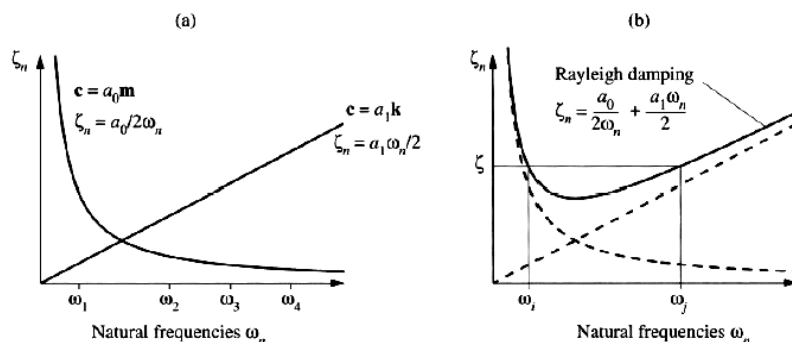
شکل ۴- منحنی سخت شدگی مدل اصلاح شده Cap

### میرایی خاک

میرایی در نظر گرفته شده برای مدل، میرایی رایله است که معمولاً در مسائل حوزه زمان از آن استفاده می شود. ابتدا در تحلیل سازه ها و محیط های الاستیک، برای میرا کردن مودهای ارتعاشی سیستم، مورد استفاده قرار می گرفت، که در واقع یک رابطه خطی از جرم و سختی می باشد، که به صورت دو ضریب  $\alpha$  (ضریب ثابت متناسب با جرم) و  $\beta$  (ضریب ثابت متناسب با سختی) به برنامه معرفی می شود. در یک سیستم با هر تعداد درجه آزادی، ضرایب میرایی  $\alpha$  و  $\beta$  در هر فرکانس زاویه ای از سیستم بر اساس فرمول ویلسون<sup>۱</sup> و بث<sup>۲</sup> به شرح زیر، قابل محاسبه است.

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -\frac{1}{\omega_j} & \frac{1}{\omega_i} \end{bmatrix} \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (2)$$

در شکل ۵، ضرایب میرایی را به صورت مجزا و به صورت ترکیبی بر اساس فرکانس زاویه ای طبیعی رسم شده است که میرایی وابسته به جرم در فرکانس های پایین مقدار قابل ملاحظه ای داشته و میرایی وابسته به سختی در فرکانس های بالا نقش اساسی ایفا می کند.



شکل ۵- تغییرات ضرایب میرایی با فرکانس طبیعی سیستم (a): ضریب میرایی جرم و سختی (b): میرایی رایلی

بر اساس معادله فوق و شکل ۵ داریم:

<sup>1</sup> Wilson

<sup>2</sup> Bathe



$$\xi_{\min} = (\alpha\beta)^{1/2}, \quad \omega_{\min} = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{1/2} \quad (3)$$

قابل ذکر است که در نقطه‌ای مربوط به حداقل فرکانس طبیعی ( $\omega_{\min}$ ) حداقل ضریب میرایی ( $\xi_{\min}$ ) رخ داده که سهم میرایی وابسته به جرم و سختی برابری است. لذا برای مستقل بودن میرایی از فرکانس، فرکانس به صورت  $\omega_{\min}$  در محاسبات میرایی به کار گرفته می‌شود. ضرایب میرایی با توجه به معادله ۳-۱۷ به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\alpha = \xi_{\min} \omega_{\min}, \quad \beta = \frac{\xi_{\min}}{\omega_{\min}} \quad (4)$$

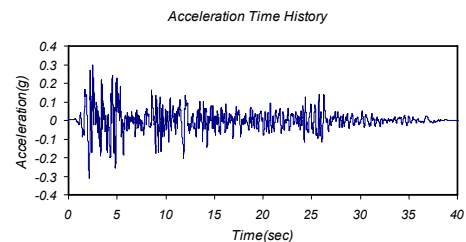
در این مطالعه مقدار  $\xi_{\min} = 5\%$  و  $\omega_{\min}$  برابر با فرکانس اصلی لایه خاک،  $3.2 \text{ Hz}$ ، در نظر گرفته شده اند و در نتیجه مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب برابر با  $0.16$  و  $0.16$  بدست آمده‌اند.

### بار دینامیکی

برای بارگذاری زلزله از شتاب‌نگاشت زلزله سنترو ۱۹۴۰ (مولفه N-S)، استفاده شده است. پارامترها و مشخصات زلزله مزبور در جدول ذیل آورده شده‌اند.

جدول ۲- مشخصات زلزله اعمال شده به مدل

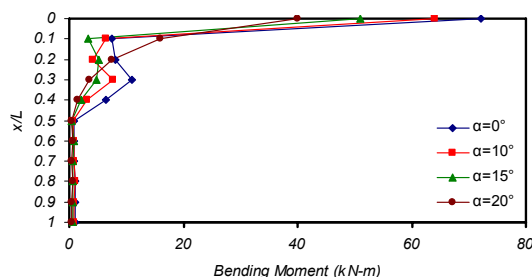
PGA (g)	Mag	Epicentral Distance (Km)	PGV/PGA (sec)	Significant Duration (Trifunac and Brady) (sec)	Predominant Frequency
0.313	7	12.99 (km)	0.097	24.1	2.174



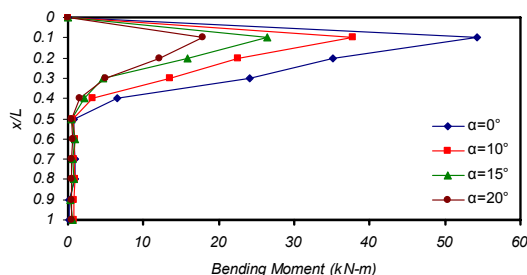
شکل ۶- شتاب‌نگاشت زلزله اعمال شده به مدل

### نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود

شکل ۷ پوش لنگر خمشی بدست آمده از تحلیل اجزاء محدود گروه میکروشع مورد نظر با میکروشع‌های قائم و مایل، با زوایای تمایل  $10^\circ$ ،  $15^\circ$  و  $20^\circ$ ، در حالتی که اتصال بین میکروشع و کلاهک صلب است، را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، با افزایش زاویه تمایل میکروشع‌ها لنگر خمشی سر میکروشع به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این تفاوت تا نصف طول میکروشع قابل ملاحظه و مشهود است، و از این فاصله به بعد به طور کلی لنگر خمشی کاهش می‌یابد. که این کاهش در مورد بیشترین میزان تمایل میکروشع،  $44\%$  و در محل اتصال میکروشع به کلاهک، می‌باشد. این مساله ناشی از سختی جانبی بیشتر در گروه میکروشع‌های مایل نسبت به میکروشع‌های قائم است، که کاهش شتاب جانبی در سازه فوقانی را در بردارد، و در نتیجه نیروی اینرسی کمتری به میکروشع‌ها انتقال یافته و در نتیجه تولید لنگر خمشی کوچکتری ناشی از نیروهای اینرسی می‌کند. شکل ۸ پوش لنگر خمشی را در حالتی که اتصال بین کلاهک و میکروشع، مفصلی است، نشان می‌دهد، همانطور که ملاحظه می‌شود مجدداً کاهش ماکزیمم لنگر خمشی در طول میکروشع، ناشی از تمایل میکروشع‌ها، قابل ملاحظه است. همچنین با مقایسه دو حالت اتصال مفصلی و صلب میکروشع‌ها به کلاهک ملاحظه می‌شود که در حالت اتصال مفصلی لنگر خمشی حدود  $25\%$  نسبت به حالت اتصال صلب، برای میکروشع‌های قائم، کاهش نشان می‌دهد. این نتایج لزوم استفاده از میکروشع‌های مایل را در محل‌هایی که بارها دینامیکی می‌باشند، و یا احتمال وقوع بارهای لرزه‌ای بالاست، را روشن می‌سازد.

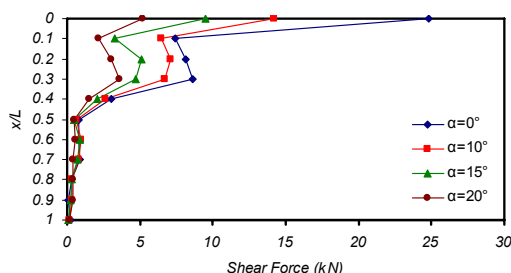


شکل ۷- پوش لنگر خمشی میکروشع‌ها با زوایای تمایل متفاوت، در حالت اتصال صلب با کلاهک



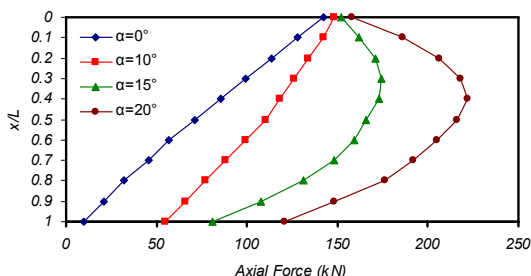
شکل ۸- پوش لنگر خمشی میکروشمع‌ها با زوایای تمایل متفاوت، در حالت اتصال مفصلی با کلاهک

در شکل ۹ پوش نیروی برشی میکروشمع‌ها، در حالتی که اتصال میکروشمع و کلاهک صلب است، نشان داده شده است. کاهش نیروی برشی نیز در میکروشمع‌های مایل نسبت به میکروشمع‌های قائم، چشمگیر است. این کاهش در مورد میکروشمع‌های با زاویه تمایل  $20^\circ$ ، قابل ملاحظه است و در حدود  $1/80$  کاهش نشان می‌دهد. این کاهش نیز به بسیج<sup>۱</sup> بهتر سختی جانبی در میکروشمع‌ها، و در نتیجه کاهش نیروی‌های اینرسیال انتقال یافته از سازه فوقانی، و در نتیجه کاهش نیروی برشی در میکروشمع‌های مایل، نسبت داده می‌شود. این کاهش تا نصف طول میکروشمع‌ها، قابل ملاحظه است، و در قسمت پایینی میکروشمع‌ها نیروی برشی اندکی وجود دارد، چون در این قسمت‌ها انعطاف پذیری بالایی وجود دارد، و میکروشمع‌ها حرکت خاک را دنبال می‌کنند. همچنین نیروی برشی در زیر کلاهک میکروشمع‌ها قابل ملاحظه است، و بلافاصله کاهش می‌یابد، این مقدار بالای نیروی برشی در نقطه اتصال میکروشمع به کلاهک، و همچنین مقدار بالای لنگر در این نقطه در حالت اتصال صلب میکروشمع به کلاهک، نشان می‌دهند که تنش انتقال یافته از طریق خمش به میکروشمع، به میزان قابل توجهی بزرگتر از تنش ناشی از نیروی محوری است، که می‌تواند باعث زوال خمشی میکروشمع در این نقطه شود.



شکل ۹- پوش نیروی برشی در میکروشمع‌های با زوایای تمایل مختلف در حالت اتصال صلب با کلاهک

شکل ۱۰ پوش نیروی محوری توسعه یافته در میکروشمع‌ها، ناشی از بارگذاری زلزله را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل قابل ملاحظه است، با افزایش زاویه تمایل نیروی محوری در میکروشمع‌ها نیز افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه تمایل میکروشمع‌ها مولفه نیروی ناشی از حرکت خاک روی میکروشمع‌ها، افزایش یافته و در نتیجه نیروی محوری میکروشمع‌های مایل به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در میکروشمع‌های قائم، نیروی محوری در امتداد میکروشمع، به طور منظمی کاهش می‌یابد و با افزایش زاویه تمایل، این روند تغییر می‌کند به طوری که در میکروشمع با زاویه تمایل  $20^\circ$ ، روند تغییر نیروی محوری با میکروشمع قائم متفاوت است، و ابتدا افزایش یافته و به ماکزیمم رسیده، و در ادامه کاهش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که در زوایای تمایل بیشتر نیروی محوری توسعه یافته در میکروشمع‌ها، افزایش یافته، و احتمال وقوع کماتش میکروشمع‌ها را افزایش می‌دهد، بنابراین افزایش زاویه تمایل تا یک مقدار حداکثر، (معمولاً  $25^\circ$  تا  $30^\circ$ ) موثر است.



شکل ۱۰- پوش نیروی برشی در میکروشمع‌های با زوایای تمایل مختلف در حالت اتصال صلب با کلاهک

<sup>1</sup> Mobilization



## نتیجه گیری

سیستم‌های میکروشمع مزیت‌های قابل توجهی، از جمله انعطاف‌پذیری، شکل‌پذیری، و ظرفیت قابل توجه در مقابله با بارهای کششی، دارند. این مزیت‌ها، لزوم استفاده از میکروشمع‌ها را در نواحی زلزله‌خیز، آشکار می‌سازد. در این مقاله، یک تحلیل اجزاء محدود سه‌بعدی بر روی یک گروه میکروشمع  $2 \times 2$ ، تحت اثر بار لرزه‌ای، انجام گرفت. اثر تمایل میکروشمع‌ها بر نیروهای داخلی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل کاهش قابل توجه در لنگر خمشی و نیروهای برشی را، در میکروشمع‌های مایل نسبت به میکروشمع‌های قائم، نشان می‌دهند. تمایل میکروشمع‌ها، اجازه می‌دهد که سختی محوری میکروشمع‌ها، بهتر بسیج شده، و در نتیجه سختی جانبی افزایش یابد. افزایش سختی جانبی، منجر به کاهش شتاب‌سازه فوقانی و کاهش نیروی اینرسی و در نتیجه کاهش لنگر خمشی و نیروی برشی در میکروشمع‌های مایل، نسبت به میکروشمع‌های قائم خواهد شد. همچنین افزایش زاویه تمایل در میکروشمع‌ها، افزایش نیروی محوری را در میکروشمع‌ها در پی دارد، که این افزایش ناشی از حرکت جانبی خاک است، که مولفه نیروی محوری میکروشمع‌ها را، افزایش می‌دهد. با توجه به اهمیت خمش در زوال میکروشمع‌ها تحت اثر بارهای دینامیکی، نتایج این مقاله کارآیی میکروشمع‌های مایل را تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای نشان می‌دهد. میکروشمع‌ها معمولاً در گروه‌هایی با تعداد بالا، و همچنین شبکه‌های میکروشمع‌های درهم<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرند، بنابراین تحلیل‌های اجزاء محدود بیشتری، به منظور مدل کردن تعداد بیشتری از میکروشمع‌ها، و همچنین بررسی پارامترهای دیگری نظیر فاصله بین میکروشمع‌ها، لایه بندی و شرایط زهکشی خاک، روش اجرای میکروشمع، شدت تحریک و دیگر پارامترها، ضروری است.

## مراجع

1. Bruce, D.A., Juran, I. (1997). "Drilled and Grouted Micropiles; State of Practice Review." FHWA-RD-96-017. FHWA, U.S. Department of Transportation.
2. Kishishita, T., Saito, E., and Miura, F. (2000). "Dynamic-response characteristics of structures with micropile foundation system." *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
3. Yamane, T., Nakata, Y., and Otani, Y. (2000). "Efficiency of micropile for seismic retrofit of foundation system." *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
4. Yang, J., Mcmanus, K., and Berrill, J. (2000). "Kinematic soil-micropile interaction." *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
5. Ousta, R. and Shahrour, I. (2001). "Three-dimensional analysis of the seismic behavior of micropiles used in the reinforcement of saturated soil." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25, 183-196.
6. Shahrour, I. Juran, I. (2004). "Seismic behaviour of micropile systems." *Ground Improvement*, v 8, 3, 109-120
7. Juran I, Benslimane A, Hanna S. (2001). "Engineering analysis of dynamic behavior of micropile systems." *Transportation Research Record* No.1772. Soil Mech;91-106
8. Sadek, M. and Shahrour, I. (2004). "Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 473-485.
9. Sadek, M. and Shahrour, I. (2006). "Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropiles." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 461-468.
10. ABAQUS. (2005). *Hibbitt, karlsson and Sorensen., Inc., Version 6.5.*
11. Lysmer, J., and Kuhlemeyer, R.L. (1969). "Finite dynamic model for infinite media." *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 95, No. EM 4, 859-877.
12. Maheshwari, B.K., Truman, K.Z., Nagggar, M.H.El., and Gould, P.L. (2005). "Three-Dimensional Nonlinear Seismic Analysis of Single Piles Using Finite Element Model: Effects of Plasticity of Soil." *International Journal of Geomechanics*, ASCE, Vol. 5, No. 1, 35-44.

<sup>1</sup> Reticulated