



## ارزیابی رفتار لرزه ای میکروپایلهای مایل با نرم افزار PLAXIS

سید مهدی رادقی مهرجوا<sup>۱</sup>

۱- مدرس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (آموزشکده فنی لوشان)، m.radeghi@tvu.ac.ir

### چکیده

مقاله حاضر، تحلیلی از رفتار میکروپایل های مایل را تحت بارگذاری لرزه ای ارائه می دهد. تحلیلها با استفاده از مدل سازی اجزاء محدود دینامیکی انجام شده است. جسم خاک الاستیک با میرایی رایلی فرض شده است و میکروپایل ها به صورت تیرهای الاستیک مدل سازی شده اند. سازه روی میکروپایل ها به صورت سیستم یک درجه آزادی متشکل از یک جرم متمرکز و یک ستون تعریف شده است. بخش نخست این مقاله، شامل مرور ادبیات فنی درباره رفتار میکروپایل های مایل است. بخش دوم، مدل عددی به کار رفته در این مقاله را به طور خلاصه شرح می دهد. بخش سوم به تحلیل مربوط به تأثیر مایل بودن میکروپایل ها بر رفتار لرزه ای میکروپایل های مدفون در خاک همگن دارای سختی یکسان اختصاص یافته و بخش آخر، همین تحلیل را برای خاک دارای سختی افزایشی با عمق انجام خواهد داد. نتایج این مقاله، اطلاعات با ارزشی در خصوص تأثیر زاویه میل میکروپایل ها بر بزرگنمایی دینامیکی و نیز تأثیر زاویه میل بر نیروهای داخلی ایجاد شده به سبب وقوع زلزله در میکروپایل ها را ارائه می دهد.

**کلمات کلیدی:** میکروپایل مایل، رفتار لرزه ای، بهسازی خاک، اجزاء محدود

### ۱. مقدمه

استفاده از میکروپایل ها در بهسازی لرزه ای و در ساخت و سازها در نواحی زلزله خیز، نیازمند آگاهی از پاسخ لرزه ای گروه میکروپایل های مایل است. در حقیقت، از آن جا که مقاومت میکروپایل های قائم در برابر بار افقی به طور کلی کم است، استفاده از میکروپایل های مایل به عنوان یک راهکار جایگزین، برای مقابله با نیروهای اینرسی و برای اطمینان از پایداری سیستم شالوده تحت بارگذاری زلزله مطرح می شود. اما استفاده از میکروپایل ها در مناطق زلزله خیز تحت الشعاع محدودیت هایی قرار گرفته که برای طراحی شمع ها وجود دارد؛ زیرا بر اساس تحقیقات متعدد، عملکرد لرزه ای شمع های مایل نامناسب دانسته شده است؛ شمع های مایل ممکن است نیروی زیادی بر سر شمع وارد کنند؛ و یا در صورتی که مایل بودن شمع ها متقارن نباشد، ممکن است در اثر یکسان نبودن سختی گروه شمع ها در جهات مختلف، سازه را تحت زلزله دچار چرخش کنند.

مطابق آیین نامه فرانسوی [1] AFPS، استفاده از شمع های مایل در نواحی زلزله خیز ممنوع است، ولی تسلیح خاک می تواند شامل المانهای مایل باشد. آیین نامه لرزه ای [2] Eurocode EC8 بیان می کند که شمع های مایل نباید برای انتقال بارهای جانبی به خاک مورد استفاده قرار گیرند، ولی اگر به هر جهت این گونه شمع ها مورد استفاده قرار گرفته باشند، باید برای انتقال مطمئن بار محوری و خمشی طراحی شوند. از سوی دیگر، آن گونه که Gazetas and Mylonakis [3] گزارش داده اند، در سالهای اخیر مشاهدات مختلفی ثبت شده است که نشان می دهد، متمایل بودن شمعها می تواند در برخی موارد، عملکرد مناسبی را برای سازه ای که روی آنها قرار دارد و نیز برای خود شمع ها به ارمغان بیاورد. یکی از



## دومین کنفرانس بین المللی ژئوتکنیک و مهندسی لرزه ای

۱۶ تا ۱۸ شهریور ماه ۹۴ ایران، تبریز

مشاهداتی که این گفته را تایید می کند، در طی زلزله Kobe ژاپن انجام شده است؛ به این ترتیب که یکی از محدود دیوارهای باراندازی که سالم مانده بودند، دیوار مرکبی بود که بر شمع های مایل تکیه داشت. این در حالی است که دیوار مشابهی که در نزدیکی این دیوار قرار داشت و بر روی شمع های قائم استقرار یافته بود، کاملاً تخریب شده بود. علاوه بر این، آزمایش های سانتریفیوژ و تحلیل های شبه استاتیکی انجام شده توسط [4] Juran et al. نشان می دهد که متمایل بودن شمع سبب می شود که اولاً تغییر مکان سر شمع و لنگر خمشی اتصال شمع به سر شمع کاهش یابد و ثانیاً نیروی محوری بسیج شده در شمع افزایش یابد.

مرجع [5] نیز مدل عددی سه بعدی را با نتایج آزمایش میز ویریه انجام شده در دانشگاه Saitama [6] مقایسه نموده است. شمع در این آزمایش سازه ای با فرکانس طبیعی  $f_{st} = \sqrt{Hz}$  را حمایت می کرده است. در این حالت مشاهده شده است که روش اجزاء محدود به نحو مطلوبی آزمایش را باز تولید کرده است. سپس مدلسازی های دیگری جهت بررسی میکروپایل های مایل انجام شده و نشان داده شده است که تغییر مکان سرشمع و لنگر خمشی اتصال شمع به سرشمع با افزایش زاویه میل میکروپایل ها کاهش یافته و نیروی محوری آن افزایش می یابد.

مقاله حاضر بر این است که تأثیر مایل بودن میکروپایل ها را بر پاسخشان به بارگذاری لرزه ای بررسی نماید. تحلیل ها با استفاده از برنامه [7,8] PLAXIS که توانایی تحلیل اجزاء محدود دو بعدی دینامیکی کامل و سه بعدی شبه استاتیکی را داراست، انجام شده است. نتایجی که در این تحلیل بدست آمده اند، اطلاعات جالبی را درباره تأثیر مورب بودن میکروپایل ها بر پاسخ لرزه ای سیستم خاک- میکروپایل- سازه بدست می دهد.

### ۲. مدل عددی

شبیه سازی های عددی این مقاله، با استفاده از برنامه اجزاء محدود [7,8] PLAXIS انجام شده اند. شیوه دو بعدی برای تحلیل اندرکنش میکروپایل- خاک- سازه به کار رفته است. سازه روی شمع ها به صورت یک سیستم یک درجه آزادی شامل یک جرم متمرکز و یک ستون مدل شده است، در حالی که المان های تیر برای مدل کردن میکروپایل ها به کار رفته اند. رفتار خاک و مصالح سازه الاستیک با میرایی رایلی فرض شده اند. شایان ذکر است که در میرایی رایلی، ماتریس میرایی [C] از ماتریس جرم و ماتریس سختی بدست می آید:

$$[C] = a_M [M] + a_K [K] \quad (1)$$

که در آن  $a_M$  و  $a_K$  به میرایی مصالح بستگی دارند. برای مود  $i$  ام، ضریب میرایی  $\xi_i$  با رابطه زیر به فرکانس طبیعی  $\omega_i$  مربوط می شود:

$$\xi_i = \frac{a_M}{2\omega_i} + \frac{a_K \omega_i}{2\omega_i} \quad (2)$$

بارگذاری لرزه ای، به صورت جابجایی هارمونیک (همانگ) در پای توده خاک اعمال می شود. مرزهای جانبی در فاصله زیادی از میکروپایل ها تعریف شده اند تا اثر مرزها همان طور که در مرجع [9] آمده است، به حداقل کاهش یابد. شرایط مرزی «مرز جاذب موج<sup>۱</sup>» در طرفین توده خاک تعیین شده اند تا بازتاب امواج در این مرزها به حداقل کاهش یابد. تحلیل در دامنه زمان با استفاده از انتگرال گیری زمانی مستتر (implicit) نیومارک انجام می شود.

### ۳. حالت خاک با سختی همگن

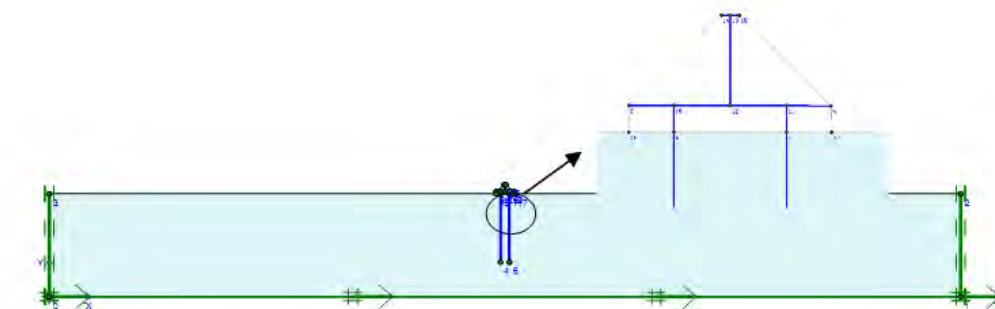
تحلیل ها ابتدا بر روی گروهی از دو ردیف میکروپایل در یک لایه خاک همگن که در زیر آن بستر سنگی صلب وجود دارد، انجام می شود (شکل ۱). ضخامت لایه خاک ۱۵ متر است. یک رابطه رفتاری الاستیک با میرایی رایلی برای سیستم خاک-

<sup>۱</sup> Absorbent boundary



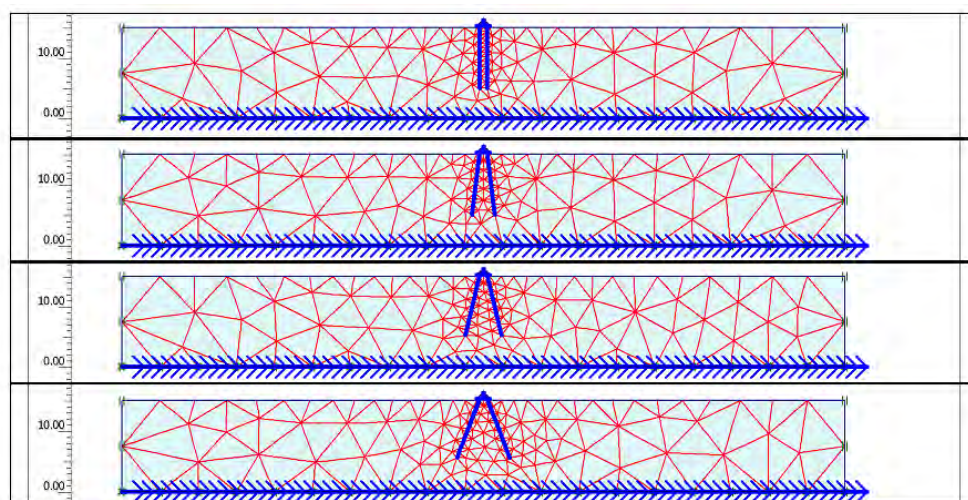
میکروپایل - سازه فرض شده است. تحلیل ها با فرض مقادیر ذیل برای مصالح خاکی انجام شده است: مدول الاستیسیته خاک  $E_s = 8MPa$ ، نسبت پواسون  $\nu_s = 0.45$ ، ضریب میرایی  $\xi_s = 5\%$ . فرکانس بنیادی لایه خاک برابر است با:  $f_1 = 0.67Hz$  ( $\nu_s / H_s$ ) که در آن  $\nu_s$  سرعت موج برشی و  $H_s$  ضخامت لایه است).

شایان ذکر است که مقادیر  $a_M$  و  $a_K$  را می توان با داشتن ضریب میرایی برای دو مقدار فرکانس مختلف از رابطه (۱) به صورت سیستم دو معادله - دو مجهول بدست آورد. ولی در این حالت با فرض یکسان بودن تأثیر سختی و جرم در میرایی، مقادیر  $a_M$  و  $a_K$  مساوی قرار داده شده و لذا برای  $\xi_s = 5\%$  در فرکانس بارگذاری بکار رفته،  $a_M$  و  $a_K$  هر دو برابر با  $0.225$  در نظر گرفته می شوند.



شکل ۱. مسأله مطرح شده

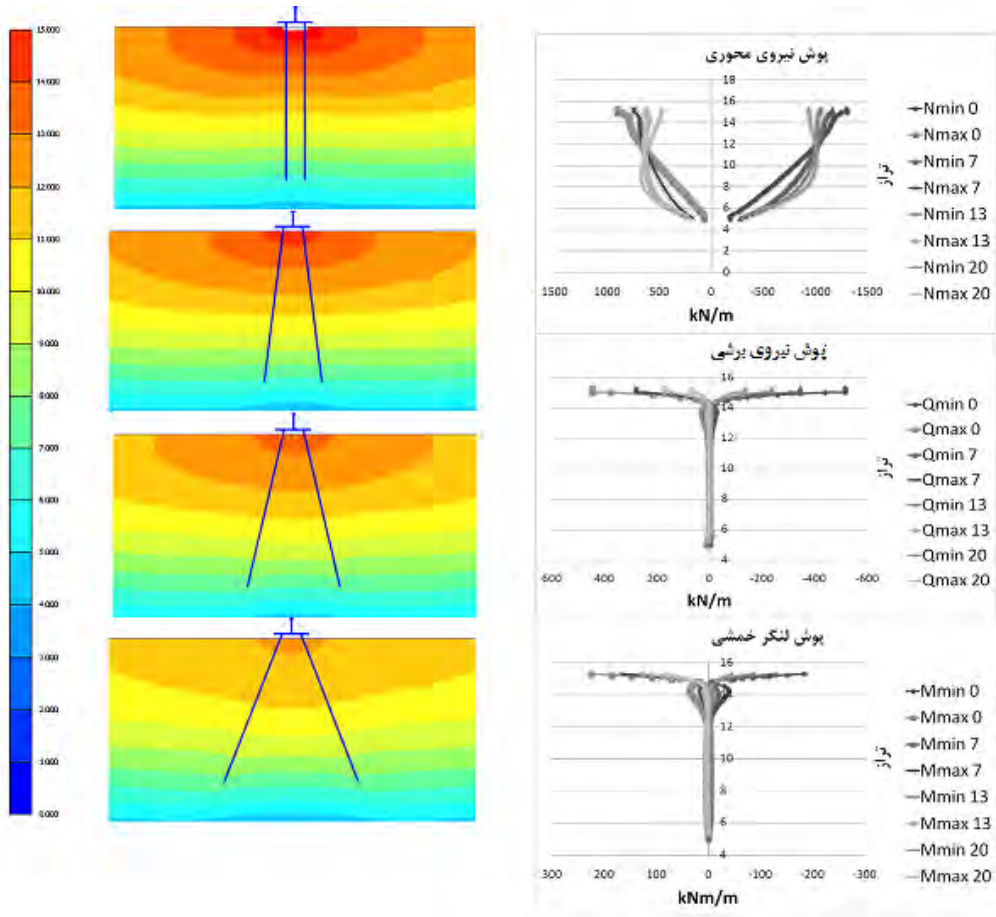
نسبت چیدمان میکروپایل ها برابر است با  $S / D_p = 5$  که بیانگر قطر میکروپایل و معادل  $0.25$  متر است. طول میکروپایل برابر با  $L_p = 10m$  است و سختی محوری و خمشی آن به ترتیب برابر با  $E_p A_p = 1100MN$  و  $E_p I_p = 0.85MNm^2$  می باشد. سازه روی میکروپایل ها به صورت یک سیستم یک درجه آزادی شامل یک جرم متمرکز  $m_{st} = 4ton$  و یک ستون با ارتفاع  $H_s = 1m$  است. فرکانس بنیادی حالت گیردار آن برابر با  $F_{st} = 1/36Hz$  است. میکروپایل ها به یک سر شمع متصلند که بالاتر از سطح زمین قرار می گیرد. شبکه اجزاء محدود مورد استفاده در شبیه سازی های عددی برای میکروپایل های مایل در شکل ۲ نشان داده شده است. این شبکه شامل ۲۶۱ عدد المان ۱۵ گرهی است و ۹ عدد المان تیر جهت مدلسازی میکروپایل ها، سر شمع و سازه در آن وجود دارد. مرزهای جانبی در فاصله  $R_1 = 60m$  ( $24 \cdot D_p$ ) از محور مرکزی گروه میکروپایل قرار داده شده اند تا هر گونه اثر مرزها به طوری که در مرجع [9] بیان شده است، به حداقل کاهش یابد.



شکل ۲. شبکه مورد استفاده در تحلیل سیستم خاک - میکروپایل - سازه (حدود ۲۶۰ عدد المان ۱۵ گرهی) با زاویه میل میکروپایل ها به ترتیب از بالا به پایین برابر با ۰، ۷، ۱۳ و ۲۰ درجه



بارگذاری لرزه ای به پایین توده خاک به صورت جابجایی هارمونیک (همانگ) وارد می شود. دامنه این بارگذاری برابر با  $x_g = 0/110\text{vcm}$  است، در حالی که فرکانس آن  $(f_{load})$  برابر با فرکانس بنیادی لایه خاک در نظر گرفته شده است  $(f_1 = 0/67\text{Hz})$ . به این ترتیب، شتاب روی سنگ بستر دارای دامنه  $0/2g$  خواهد بود.



(الف)

(ب)

شکل ۳. حالت خاک با سختی همگن الف) کانتورهای شتاب افقی  $(m/s^2)$ ، ب) نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی در میکروپایل

شکل ۳، نمایانگر کانتورهای شتاب افقی در توده خاک در حالتی که زاویه فاز شتاب در سر شمع  $90^\circ$  درجه است (شتاب ماکزیمم است)، می باشد. همچنین پوش نیروهای درونی ایجاد شده در میکروپایل در اثر بارگذاری لرزه ای نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. نسبت شتاب های ایجاد شده در سر شمع و در سازه روی میکروپایل ها در جدول ۱ بیان شده است:



جدول ۱. نسبت شتاب ماکزیمم در سر شمع و در سازه به شتاب روی سنگ بستر (بزرگنمایی شتاب) در حالت سختی همگن خاک

نسبت ماکزیمم شتاب سازه روی میکروپایل به شتاب تحریک روی سنگ بستر	نسبت ماکزیمم شتاب سر شمع به شتاب تحریک روی سنگ بستر	زاویه میل میکروپایل ها (درجه)
۱۱/۹۸	۸/۵۹	۰
۱۰/۴۰	۷/۶۶	۷
۹/۲۱	۶/۹۵	۱۳
۸/۰۳	۶/۰۶	۲۰

با بررسی نمودارهای (الف) شکل ۳، می توان مشاهده نمود که با افزایش زاویه میل میکروپایل ها، شتاب افقی ایجاد شده در توده خاک زیر سازه تعدیل یافته و مقدار ماکزیمم آن کاهش می یابد. همچنین، نیروی محوری فشاری و کششی در صورتی که میکروپایل ها قائم باشند، به صورت تقریباً خطی در عمق کاهش می یابند. اما در صورتی که میکروپایل ها مایل باشند، نیروی محوری ماکزیمم فشاری و کششی به صورت متوازن تری در طول میکروپایل تقسیم می شوند. در واقع، نیروی محوری ماکزیمم (چه در حالت کششی و چه در حالت فشاری) در  $\frac{2}{3}$  طول بالایی میکروپایل تقریباً ثابت بوده و در  $\frac{1}{3}$  پایینی آن به صورت تقریباً خطی کاهش می یابد.

نیروی برشی ماکزیمم همواره در سر میکروپایل ها پدید می آید. این نیرو با افزایش زاویه میل میکروپایل ها به شدت کاهش می یابد، به طوری که با افزایش زاویه میل به ۲۰ درجه، مقدار آن به حدود ۰/۲۵ مقدار آن در حالت قائم بودن میکروپایل ها کاهش می یابد. علاوه بر این مقدار ماکزیمم که در سر میکروپایل دیده می شود، یک نقطه اوج نیز در عمق ۱/۵ متری پدید می آید. بزرگی این اوج در صورتی که میکروپایل ها قائم باشند، خیلی کمتر از مقدار برش در سر میکروپایل است، ولی با افزایش زاویه میل میکروپایل، این اوج به مقدار برش در سر میکروپایل نزدیک می شود. لنگر خمشی نیز روندی مشابه نیروی برشی از خود نشان می دهد، ولی نقطه اوج دوم آن با افزایش زاویه میل میکروپایل ها تقریباً ناپدید می شود.

با توجه به جدول ۱، با بررسی مقادیر بزرگنمایی های ایجاد شده در سر شمع و سازه مشخص می شود که بزرگنمایی در سازه همواره بین ۳۰ تا ۴۰ درصد بیش از بزرگنمایی در سر شمع است. این امر به وضوح ضرورت در نظر گرفتن بزرگنمایی دینامیکی در سازه ها را در هر گونه محاسبات شبه استاتیکی نشان می دهد.

#### ۴. حالت خاک با سختی افزایشی در عمق

از آنجا که غالباً سختی خاک در عمق افزایش می یابد، این بخش تحلیل اجزاء محدود میکروپایل های مایل در خاکی که دارای سختی افزایشی در عمق است را مورد بررسی قرار می دهد. فرض می شود مدول یانگ خاک با عمق افزایش می یابد. مقدار مدول یانگ از سطح تا عمق یک متری برابر با  $1500 \text{ KPa}$  در نظر گرفته شده و از آن به بعد در هر متر  $350 \text{ KPa}$  افزایش می یابد. در این حالت، فرکانس طبیعی لایه خاک با اعمال یک پالس به بستر سنگی و مشاهده نوسان آزاد سطح لایه بررسی شده و فرکانس طبیعی معادل  $f_1 = 0.52 \text{ Hz}$  بدست آمده است. لذا همین فرکانس به عنوان فرکانس تحریک بستر انتخاب می شود. علاوه بر این، دامنه جابجایی هارمونیک (هماهنگ) برابر با  $0.1838$  متر انتخاب می شود که سبب خواهد شد دامنه شتاب سنگ بستر معادل با  $0.2g$  گردد.

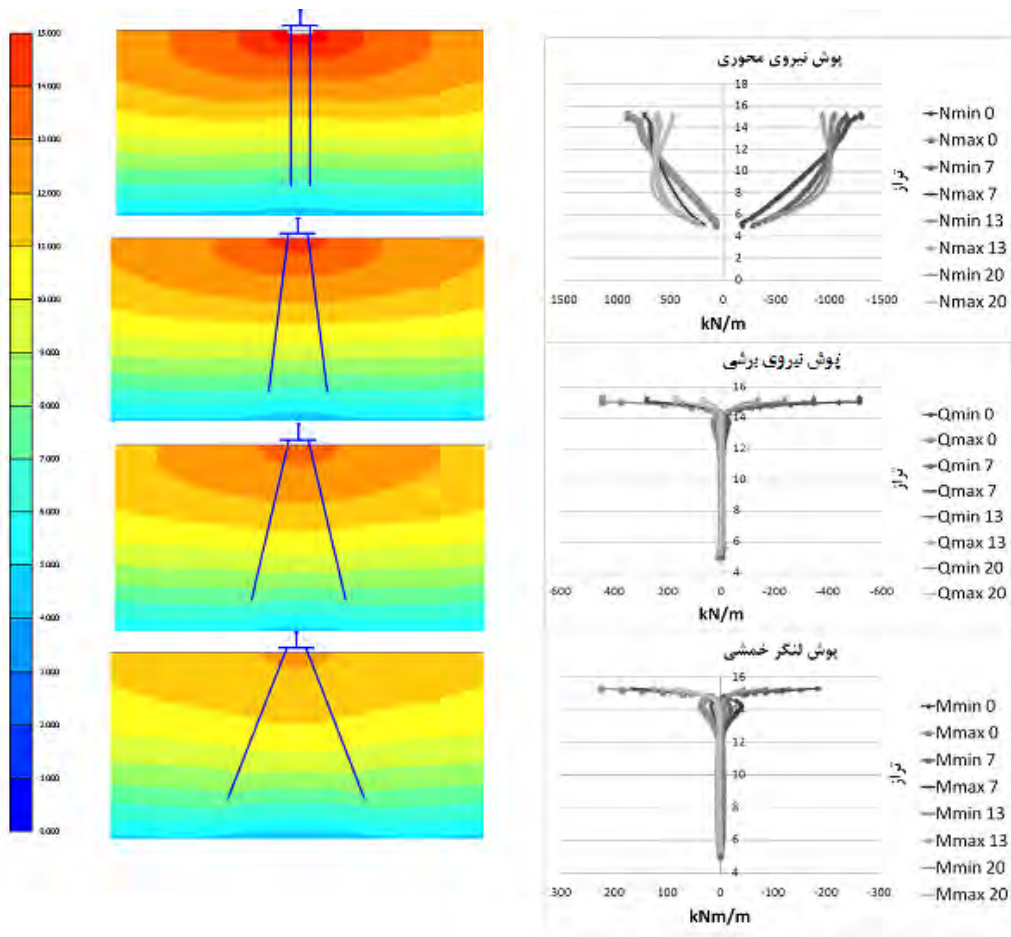
شکل ۴، نمایانگر کانتورهای شتاب افقی در توده خاک در حالتی که زاویه فاز شتاب در سر شمع ۹۰ درجه است (شتاب ماکزیمم است)، می باشد. همچنین پوش نیروهای درونی ایجاد شده در میکروپایل در اثر بارگذاری لرزه ای نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. نسبت شتاب های ایجاد شده در سر شمع و در سازه روی میکروپایل ها در جدول ۲ بیان شده است:





جدول ۲. نسبت شتاب ماکزیمم در سر شمع و در سازه به شتاب روی سنگ بستر (بزرگنمایی شتاب) در حالت سختی افزایشی در عمق

نسبت ماکزیمم شتاب سازه روی میکروپایل به شتاب تحریک روی سنگ بستر	نسبت ماکزیمم شتاب سر شمع به شتاب تحریک روی سنگ بستر	زاویه میل میکروپایل ها (درجه)
۲۰/۳	۱۶/۲۱	۰
۱۸/۸۱	۱۶/۱۱	۷
۱۴/۲۷	۱۲/۶۴	۱۳
۱۲/۲۸	۱۱/۲۶	۲۰



(الف)

(ب)

شکل ۴. حالت خاک با سختی افزایشی در عمق الف) کانتورهای شتاب افقی ( $m/s^2$ )، ب) نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی در میکروپایل

با بررسی نمودارهای (الف) شکل ۴، می توان مشاهده نمود که با افزایش زاویه میل میکروپایل ها، ابتدا تا زاویه میل حدود ۷ درجه، شتاب افقی ایجاد شده در توده خاک زیر سازه شدت می یابد، ولی از زاویه میل حدود ۷ درجه تا ۲۰ درجه،



شتاب افقی ایجاد شده در توده خاک زیر سازه تعدیل یافته و مقدار ماکزیمم آن کاهش می یابد. همچنین، نیروی محوری فشاری و کششی در صورتی که میکروپایل ها قائم باشند، به صورت تقریباً خطی در عمق کاهش می یابند، ولی خطی بودن آن ها نسبت به حالت سختی همگن خاک کمتر است. در صورتی که میکروپایل ها مایل باشند، نیروی محوری ماکزیمم فشاری و کششی به صورت متوازن تری در طول میکروپایل تقسیم می شوند. در واقع، نیروی محوری ماکزیمم (چه در حالت کششی و چه در حالت فشاری) با افزایش زاویه میل میکروپایل ها، از سر میکروپایل ها به وسط آن ها منتقل می شود.

در این حالت نیز، نیروی برشی ماکزیمم همواره در سر میکروپایل ها پدید می آید. این نیرو با افزایش زاویه میل میکروپایل ها به شدت کاهش می یابد، به طوری که با افزایش زاویه میل میکروپایل ها به ۲۰ درجه، مقدار آن به حدود ۰/۱۰ مقدار آن در حالت قائم بودن میکروپایل ها کاهش می یابد. علاوه بر این مقدار ماکزیمم که در سر میکروپایل دیده می شود، یک نقطه اوج نیز در عمق ۰/۵ تا ۳ متری پدید می آید که جهت آن مخالف جهت برش در سر میکروپایل است و بزرگی این اوج نیز با افزایش زاویه میل میکروپایل ها کاهش می یابد. لنگر خمشی نیز روندی مشابه نیروی برشی از خود نشان می دهد ولی نقطه اوج دوم آن نزدیکتر به سطح می باشد.

جدول ۲ نیز همانند جدول ۱ بیانگر این واقعیت است که بزرگنمایی در سازه همواره بین ۳۰ تا ۴۰ درصد بیش از بزرگنمایی در سر شمع است. این امر به وضوح ضرورت در نظر گرفتن بزرگنمایی دینامیکی در سازه ها را در هر گونه محاسبات شبه استاتیکی نشان می دهد.

## ۵. نتیجه گیری

این مقاله با استفاده از مدلسازی اجزاء محدود، تأثیر متمایل بودن میکروپایل ها را بر پاسخ لرزه ای آن ها بررسی می کند. بررسی ها در دو حالت انجام شد، که شامل میکروپایل های درون خاک با سختی یکسان و نیز میکروپایل های درون خاک با سختی افزایشی در عمق می گردد.

شبیه سازی های عددی که در این مقاله ارائه شده اند، نشان می دهند که متمایل بودن میکروپایل ها، عملکرد آن ها را تحت بار لرزه ای بهبود می بخشد. همچنین متمایل بودن میکروپایل ها سبب می شود سختی محوری آن ها به نحو مناسبتری بسیج شده و در نتیجه آن، نیروی برشی و لنگر خمشی در حین زلزله کاهش یابد. این بهبود عملکرد در خاک دارای سختی ثابت در عمق به طور منظم تری قابل مشاهده است، ولی اگر سختی افزایشی خاک در عمق را در نظر بگیریم، باید میزان زاویه میل با دقت بیشتری تعیین شود. اما در هر دو حالت، میکروپایل های مایل سبب می شوند شتاب ماکزیمم ایجاد شده در سازه نیز به میزان قابل ملاحظه ای کاهش یابد.

## مراجع

1. AFPS. Association française de Génie Parasismique. Recommandations AFPS 90. Presses des Ponts et Chaussées; 1990
2. Eurocode EC8. Structures in seismic regions. Part 5. Foundations, retaining structures, and geotechnical aspects; 1994
3. Gazetas G. Mylonakis George seismic soil-structure interaction: new evidence and emerging issues. Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Geo-Institute ASCE Conference, Seattle; 3-6 August, 1998
4. Juran I, Benslimane A, Hanna S. Engineering analysis of dynamic behavior of micropile systems. Transportation Research Record No. 1772. Soil Mech 2001;91-106.



5. Sadek, M. D., (2004), “*Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles,*” Soil Dynamics and Earthquake Engineering vol. 24.
6. Makris N, Tazoh T, Yun X, Fill AC. Prediction of the measured response of a scaled soil-pilesuperstructure system. Soil Dyn Earthquake Engng 1997;16:113–24.
7. Plaxis BV. Plaxis 2D Ver. 8.5 Manuals, [www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl)
8. Plaxis BV. Plaxis 3D foundation Ver. 1.1 Manuals, [www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl)
9. Shahrou I, Sadek M, Ousta R. Seismic behavior of micropiles used as foundation support elements: threedimensional finite element analysis. Transportation Research Record No. 1772. Soil Mech 2001;2001: 84–91