

## بررسی تاثیر سیستم میکروپایل بر روی افزایش ظرفیت باربری پی های مستقر بر روی خاک - های سست اشباع

قره، سهیل<sup>۱</sup>، مهدی زاده، محسن<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشگاه پیام نور تهران

۲- کارشناس ارشد ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران

Ghareh\_soheil@pnu.ac.ir

**چکیده:** امروزه به منظور تثبیت و بهسازی زمین های سست و افزایش ظرفیت باربری آنها روش های بسیار گسترده و متنوعی به کار می رود. یکی از مناسب ترین روش ها استفاده از سیستم میکروپایل هاست که کاربرد آن به دلایلی نظیر افزایش سرعت عملیات اجرایی، صرفه جویی در زمان، کاهش هزینه های اجرا، مصالح کمتر، امکان تجهیز و حمل سریعتر وسایل برای اجرای میکروپایل و کنترل نشست ها، در حال افزایش است. میکروپایل ها عناصر سازه ای هستند که معمولاً جهت تقویت و کاهش مقادیر نشست فونداسیون سازه ها و افزایش ظرفیت باربری خاک ها بکار برده می شوند. فونداسیون های مستقر بر روی خاک های سست اشباع به تنهایی قادر به انتقال بارهای سازه ای به خاک نمی باشند لذا استفاده از میکروپایل ها به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک الزامی به نظر می رسد. در این مقاله به بررسی تاثیر سیستم میکروپایل بر روی افزایش ظرفیت باربری فونداسیون رادیه یک ساختمان ۱۰ طبقه مستقر بر روی خاک سست اشباع بررسی گردیده است. لذا در ابتدا برای تعیین نیروهای وارده از طرف ساختمان ۱۰ طبقه به فونداسیون، فایل سازه ای در نرم افزار ETABS تحلیل و طراحی گردید و سپس در نرم افزار SAFE به منظور طراحی فونداسیون مورد بررسی قرار گرفت، که بررسی ها حاکی از عدم کفایت فونداسیون رادیه برای تحمل نیروهای وارده می باشد، لذا به منظور جبران ضعف ظرفیت باربری فونداسیون سازه مذکور و با توجه به بالابودن تراز آب زیرزمینی، سیستم میکروپایل برای افزایش ظرفیت باربری فونداسیون در نظر گرفته شد. اجزای سازه ای میکروپایل ها با استفاده از نتایج تحلیل و طراحی نرم افزار SAFE تعیین گردید. در نهایت نقش بسزای سیستم میکروپایل ها در افزایش ظرفیت باربری خاک های سست اشباع در پروژه مورد بررسی مشخص گردید.

**کلمات کلیدی:** میکروپایل، فونداسیون، خاک سست، ETABS، SAFE

## ۱- مقدمه

میکروپایل ها در اوایل دهه ۱۹۵۰ در ایتالیا به منظور تقویت پی ساختمان های تاریخی و آثار باستانی، که به مرور زمان و به خصوص در طول جنگ جهانی دوم دچار آسیب شده بودند، ابداع شدند. پیمانکار ایتالیایی به نام فوندیل اولین بار شمع های ریشه ای را معرفی نمود. این شمع های درجا ریز کوچک دارای قطر کمی بودند که غالباً با مسلح کننده فولادی سبک و تزریق دوغاب سیمان تقویت شده بودند.

بطور کلی در مواجهه با خاکهای مسئله دار نظیر خاکهای سست با قابلیت باربری کم، نشست پذیری زیاد، روانگرا، خاکهای دستی و ... دو راهکار پیش روی مهندسین ژئوتکنیک قرار دارد: راهکار اول استفاده از المانهای باربر در خاک و راهکار دوم بهسازی و اصلاح خواص فیزیکی- مکانیکی توده خاک. هر یک از راه حل های مذکور دارای روش ها و مشخصات مربوط به خود می باشند که طی سالیان متمادی توسعه فراوانی یافته اند. برخی از تکنیک های ابداعی نیز ماهیتی ترکیبی از دو دسته فوق داشته و مزایای هر دو دسته را تا حدودی به همراه دارند. از آن دسته می توان به استفاده از میکروپایل ها به همراه تزریق دوغاب سیمان اشاره نمود. شمع ها عموماً به دو گروه اصلی شمع های جابجایی و شمع های جانیشینی تقسیم می شوند. میکروپایل ها در واقع شمع های جانیشینی کوچکی (معمولاً با قطر کمتر از ۳۰۰ میلیمتر) هستند که غالباً با تقویت فولادی سبک و تزریق دوغاب سیمان همراه می باشند. میکروپایل ها می توانند با هر زاویه ای طراحی و اجرا شوند و برای مقاصد متفاوتی از جمله تحمل بارهای محوری و جانبی، جایگزینی شمع های معمولی یا به عنوان جزئی از سیستم ترکیبی خاک و شمع، بسته به هدف طراحی به کار برده می شوند. میکروپایل علاوه بر آنکه به عنوان یک المان باربر و مقاوم در برابر نشست عمل می کند، به دلیل تزریق دوغاب سیمان، سبب بهبود مشخصات مقاومتی خاک اطراف نیز می گردد. کاربردهای میکروپایل به طور کلی کاربرد میکروپایل ها در مهندسی ژئوتکنیک مشتمل بر دو بخش "استفاده در بستر پی سازه ها" و "اصلاح و بهسازی برجای خاک" می باشد. عمده استفاده از میکروپایل در بستر پی سازه ها بوده که حدود ۹۵ درصد از کاربردهای میکروپایل را شامل می شود. زمانیکه پیرادیه پهن تهی نیاز طراحی مورد نظر را از لحاظ باربر یونشست تامین نمی کند، با استفاده از میکروپایل ها در زیر پیرادیه می توان مقدار ظرفیت باربری را افزایش و نشست کلیونشست های تفاضلی را به مقدار زیاد یکا هشداد. مزایای میکروپایل - مزایای میکروپایل ها با عناصه استفاده از فناوری نانو تکنولوژی در تسلیح پیچیده گردیده است. از جمله این مزایا

میتوان به: مانع از ایجاد تاه، بهبود مشخصات ظرفیت باربری خاک و جلوگیری از نشست های غیر همگن، ایجاد کمترین دستخورد گیدر ساز و محیط خاک، ایجاد کمترین سروصدادر حین عملیات اجرا، توانایی اجرای مایلمیکروپایل و قابلیت تحمل بارها یا فقیو قائم اشار ه نمود که سبب گریز دید هاست تاد ر پروژه ها بعضی مساختمانی، به خصوص در خاک های سست مورد استقبالمهندسان قرار گیرد. ظرفیت باربری سازه های میکروپایل متکی بر ظرفیت باربری بالای المانها یفلز یا سته که اکثر بارها با عملیات تحمل میکنند. برابر ظرفیت باربری یا صطکا کیو جداری، صرف نظر می شود. مشابه میل مهارها، دوغاب، بار را از طریق صطکا کدر سطح جانینا حیه باند میکروپایل از بتن مسلح حیه خاک اطراف منتقل می کند. مقاوم تبدستآمد ه باند مخلوط خاک - دوغاب در جه اولمتأثر از نوع خاک، روش تزریق، کاربرد فتهو به خصوص فشار تزریق و دبیتریز می باشد. هدف از انجام این مقاله تاثیر

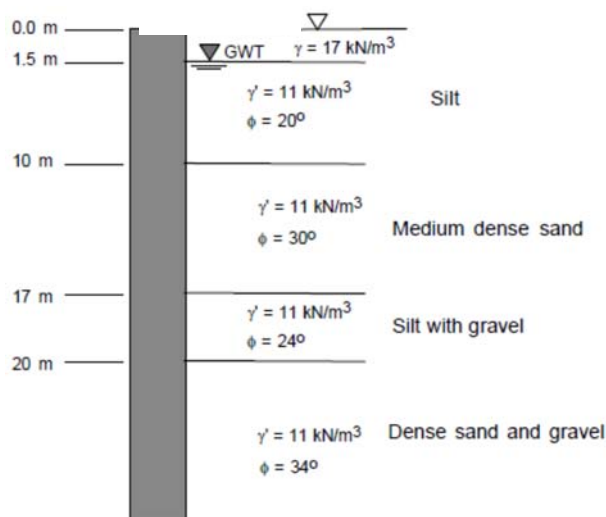
میکروپایل ها در افزایش ظرفیت باربری پی رادیه یک ساختمان بلند مرتبه ۱۰ طبقه موجود بر روی خاک سست اشباع، با استفاده از چیدمان مناسب و فنی میکروپایل ها می باشد.

## ۲- مشخصات ساز همورد نظر

ساز همورد نظر ساختمانی ۱۰ طبقه با اسکلت فلزی، شامل ۱۰ طبقه با کاربرد ریمسکونیو بدو نیز زیرزمینی باشد. پلان ساختمان مورد نظر به صورت مستطیل و با طول ۳۱ و عرض ۲۶ متر می باشد. محلا حد اثنین ساز همورد و بیستر خاک خیلی نرم ریزدانه سست اشباع با ظرفیت باربری کم و قابلیت نشست زیاد می باشد.

## ۳- مشخصات خاک محل

باتوجه به اطلاعات بدست آمده از دو گمانه حفاری شده به عمق ۲۵ متر و نتایج آزمایشات برش مستقیم و سه محوری، خاکبستر شامل لایه های از خاک خیلی نرم ریزدانه با تراکم کم شامل لایمی باشد و تا عمق ۲۰ متر یادامه دارد، همچنین میزان مقاومت خاک برای طراحی فونداسیون ۰/۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تعیین گردیده است. نتایج آزمایش های نفوذ استاندارد (SPT) تعداد ضربات ۵ تا ۲۰ ضربات را تا عمق ۲۰ متری نشان می دهند که نشان دهنده تراکم کم و ضعیف لایه های خاک می باشد. همچنین وجود سفره آب زیرزمینی در ۱/۵ متری سطح زمین نیز نقش مهمی در سستی خاک خواهد داشت. لازم به ذکر است که از عمق ۲۰ متر به بعد لایه های خاک درشت دانه و با تراکم نسبتاً خوبی می باشند. مشخصات لایه های خاک در شکل ۱ ارائه گردیده است.



شکل ۱- مشخصات خاک در لایه های مختلف

## ۴- مشخصات میکروپایل ها

باتوجه به پارامترهای خاک ریزدانه سست اشباع، به طراحی و تخمین ظرفیت باربری میکروپایل های با طول ۱۲ متر و قطر ۱۵۰ میلی متر پرداخته می شود. میکروپایل مورد نظر توسط غلافی به قطر خارجی ۷۶ میلی متر و قطر داخلی ۶۸ میلی متر از فولاد ST37 و همچنین میلگردی با قطر اسمی ۳۲ میلی متر از نوع میلگرد AIII مسلح گردیده است.

### ۵- طراحی میکروپایل ها

طراحی میکروپایلدارا ایدومر حلهمیباشد که شامل طراحی سازه ایو طراحی ژئوتکنیکی باشد. طراحی سازه ای خود به دو بخش، ظرفیت بار بر فشار یو ظرفیت بار بر یکششیتقسیم میشود.

#### ۵-۱- طراحی سازه های میکروپایل

باتوجه به روابط ارائه شده در آئین نامه FHWA، طراحی سازه های میکروپایل با استفاده از روابط زیر محاسبه میگردد:

$$P_{t-all} = 0.55(F_{y-bar} A_{bar} + F_{y-ca \sin g} A_{ca \sin g})$$

$$P_{c-all} = 0.4 f'_{c-grout} A_{grout} + 0.47(F_{Y-bar} A_{bar} + F_{y-ca \sin g} A_{ca \sin g})$$

که در آن تنش تسلیم غلاف casing،  $F_{y-casing}$ ، تنش تسلیم آرماتور  $F_{y-bar}$ ، ظرفیت بار بر یکششی  $P_{t-all}$ ، ظرفیت بار بر فشاری  $P_{c-all}$ ، سطح مقطع دوغاب  $A_{grout}$ ، سطح مقطع غلاف casing،  $A_{casing}$ ، سطح مقطع آرماتور  $A_{bar}$  و مقاومت فشاری دوغاب  $f'_{c-grout}$  میباشد.

$$F_{y-ca \sin g} = 240 \cdot kg/cm^2 \rightarrow A_{ca \sin g} = \pi \left( \frac{OD^2}{4} - \frac{ID^2}{4} \right) = \pi \left( \frac{7.6^2}{4} - \frac{6.8^2}{4} \right) = 9.04 cm^2$$

$$F_{y-bar} = 420 \cdot kg/cm^2 \rightarrow A_{bar} = 8.04 cm^2$$

$$f'_{c-grout} = 40 \cdot kg/cm^2 \rightarrow A_{grout} = \pi \left( \frac{6.8^2}{4} - \frac{3.2^2}{4} \right) = 28.26 cm^2$$

$$P_{c-all} = 0.4(40 \cdot 28.26) + 0.47(420 \cdot 8.04 + 240 \cdot 9.04) = 3.06 ton$$

$$P_{t-all} = 0.55(420 \cdot 8.04 + 240 \cdot 9.04) = 3.05 ton$$

#### ۵-۲- طراحی ژئوتکنیکی میکروپایل

باتوجه به اینکه خاک محل ریزدانه سست اشباع می باشد و همچنین با توجه به اینکه نوع میکروپایل مورد استفاده از نوع D می باشد لذا برای تعیین مقاومت اسمی مجموعه خاک- دوغاب بر طبق جدول که مطابق با آئین نامه FHWA می باشد از ضریب  $\alpha$  برابر ۱۲۵ کیلو پاسکال در طراحی ژئوتکنیکی میکروپایل استفاده می گردد. طراحی ژئوتکنیکی میکروپایل با استفاده از روابط FHWA به صورت زیر قابل محاسبه می باشد.

$$F_{G-allowable} = \frac{\alpha_{bond} * \pi * D_b * bondlength}{F.S.}$$

$$F_{G-allowable} = \frac{125 * 0.15 * 12 * 125}{2.5} = 28.3 ton$$

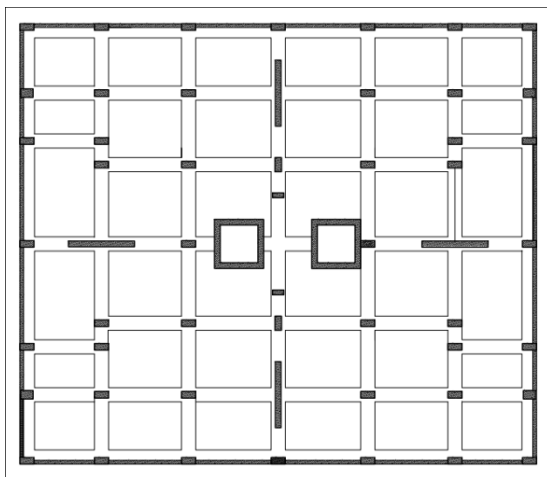
در این رابطه  $bond\ length$  طول میکروپایل،  $D_b$  قطر معادل میکروپایل،  $\alpha_{bond}$  مقاومت اسمی مجموعه خاک- دوغاب و  $F.S.$  ضریب اطمینان می باشد که برابر ۲/۵ در نظر گرفته می شود. با توجه به مقادیر بدست آمده برای ظرفیت باربری میکروپایل ها در دو حالت سازه ای و ژئوتکنیکی از مقدار ۲۸/۳ تن به عنوان حداکثر میزان ظرفیت باربری میکروپایل استفاده می شود.

جدول ۱- مقادیر مقاومت اسمی مجموعه خاک-دوغاب (کیلوپاسکال)

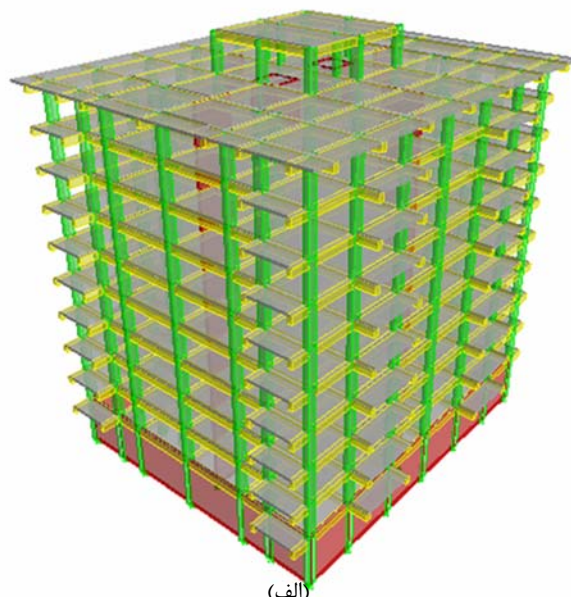
محدوده مقاومت اسمی مجموعه خاک-دوغاب (کیلوپاسکال)				نوع سنگ/خاک
نوع D	نوع C	نوع B	نوع A	
۹۵-۱۹۰	۹۵-۱۹۰	۷۰-۱۹۰	۵۰-۱۲۰	سیلت و رس (مقداری ماسه) (سفت، متراکم تا خیلی متراکم)
۹۵-۲۴۰	۹۵-۱۹۰	۷۰-۱۹۰	۷۰-۱۴۵	ماسه (مقداری سیلت) (نرم، سست، متراکم متوسط)
۱۴۵-۳۸۵	۱۴۵-۳۶۰	۱۲۰-۳۶۰	۹۵-۲۱۵	ماسه (مقداری سیلت و شن) (نرم تیز گوشه، متوسط-خیلی متراکم)
۱۴۵-۳۸۵	۱۴۵-۳۶۰	۱۲۰-۳۶۰	۹۵-۲۶۵	شن (مقداری ماسه) (متوسط-خیلی متراکم)

### ۶- مدل سازی عددی

به منظور طراحی فونداسیون سازه بلند مرتبه و تعیین نیروهای وارد بر پی در ابتدا نیاز به طراحی سازه می باشد. لذا بدین منظور سازه فلزی ۱۰ طبقه مورد نظر در نرم افزار اجزا محدود ETABS مدل سازی عددی گردید (شکل ۲-الف) و پس از تحلیل مدل و تعیین نیروهای وارد بر فونداسیون فایل خروجی به نرم افزار اجزا محدود SAFE تهیه گردید. در گام اول به منظور بررسی کفایت لازم فونداسیون رادیه سطحی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲-ب) و پس از کنترل تنش های زیر فونداسیون با میزان فشار قابل تحمل خاک این نتیجه گرفته شد که فونداسیون رادیه به تنهایی جوابگو نیروهای وارده نخواهد بود لذا استفاده از میکروپایل ها به منظور افزایش ظرفیت باربری پی به کمک تسلیح خاک در دستور کار قرار گرفت.



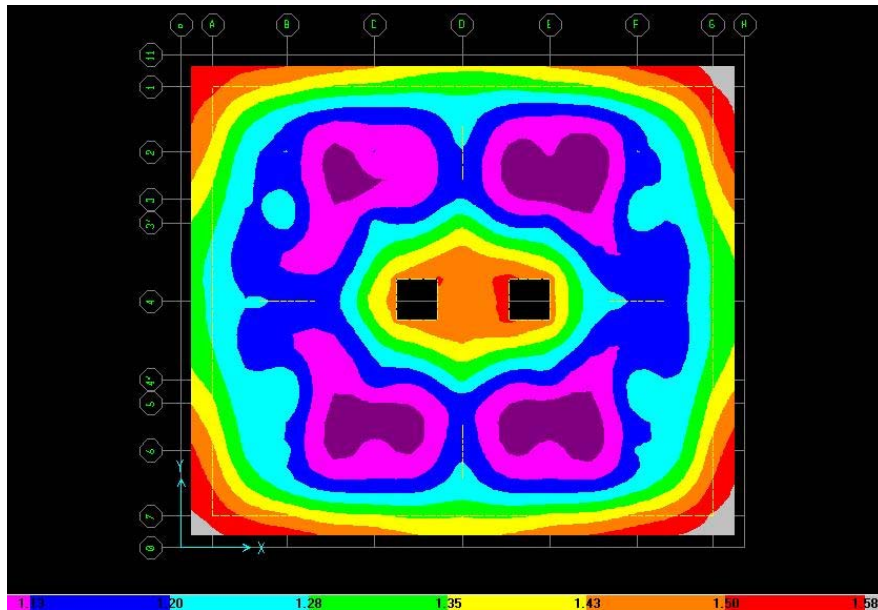
(ب)



(الف)

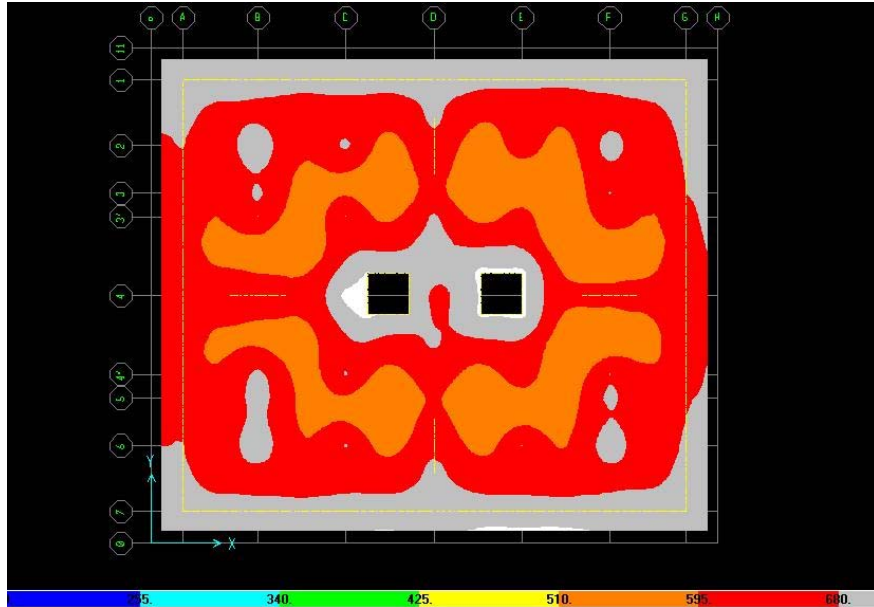
شکل ۲- الف) مدل سازی سازه انجام گرفته در نرم افزار ETABS  
 ب) پلان فونداسیون رادیه به همراه جانمایی ستونها و دیوارهای برشی

روند طراحی میکروپایل‌ها همانند روند طراحی با استفاده از شمع‌های سازه‌ای می باشد. جهت مدل‌سازی میکروپایل‌ها در نرم افزار SAFE از المان فنر متمرکز استفاده می شود بدین‌منظور میبایست در ابتدا سختی معادل میکروپایل تعیین گردد، که این سختی معادل با استفاده از آزمایش‌های بارگذاری (منحنی های بار-نشست) بزرگ مقیاس بر روی میکروپایل‌ها و همچنین با توجه به آزمایش های صورت گرفته بر روی میکروپایل‌ها در پروژه های مشابه بدست خواهد آمد. در اینجا با توجه به مطالب گفته شده و نتایج بدست آمده، سختی معادل برابر ۴ تن بر میلی‌متر برای میکروپایل‌ها در نظر گرفته می شود.

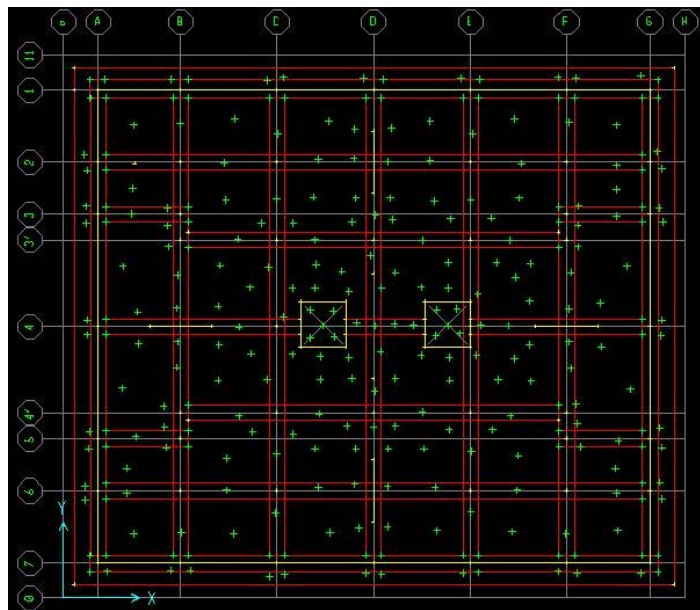


شکل ۳- تعیین نقاط بحرانی به کمک کانتورهای تنش خاک زیر فونداسیون بدون حضور میکروپایل‌ها

پس از مدل‌سازی میکروپایل‌ها، ابتدا فونداسیون رادیه ای به ضخامت ۰/۵ متر و بر روی آن نوارهایی با ضخامت ۰/۵ متر در هر دو امتداد ستونها مدل شد به طوریکه ضخامت فونداسیون رادیه در امتداد ستونها یک متر و در باقی سطوح برابر نیم متر گردید. پس از مدل‌سازی فونداسیون رادیه و قبل از جاگذاری میکروپایل‌ها مدل مورد تحلیل قرار گرفت. پس از تحلیل مدل نقاط بحرانی فونداسیون به لحاظ کنترل نشست و تحمل نیروهای وارده مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۳). سپس با توجه به معلوم شدن نقاط بحرانی و نیاز به تقویت بیشتر در آن نواحی چیدمان و آرایش میکروپایل‌ها آغاز گردید و این روند در چند مرحله مورد سعی و خطا قرار گرفت و مقدار نشست، نیروهای داخلی میکروپایل‌ها و توزیع تنش خاک با مقایسه با مقادیر مجاز مورد بررسی و کنترل واقع گردید و در انتها طراحی بهینه سیستم میکروپایل‌ها به صورت شکل ۴ بدست آمد. همان‌طوریکه در شکل ۵ نشان داده شده است از ۲۷۰ عدد میکروپایل ۱۲ متری برای تقویت خاک و افزایش ظرفیت باربری فونداسیون استفاده شده است، تمرکز بیشتر میکروپایل‌ها در محل ستون‌ها و همچنین در زیر دیوارهای برشی و حائل در محل‌هایی که نیروها متمرکز می شوند، می باشد.



شکل ۴- کاهش کانتورهای تنش خاک زیر فونداسیون در حضور میکروپایل ها



شکل ۵- نحوه چیدمان میکروپایل ها در زیر فونداسیون

## ۷- نتیجه گیری و بحث

در این مقاله سیستم میکروپایل به منظور بهسازی خاک و افزایش ظرفیت باربری فونداسیون یک پروژه ساختمانی ۱۰ طبقه مستقر بر روی خاک سست اشباع انتخاب گردید، در همین راستا و به منظور محاسبه مشخصات میکروپایل ها و آرایش آن ها از نرم افزارهای اجزای محدود ETABS و SAFE استفاده شد. با توجه به تراز بالای آب زیرزمینی استفاده از سیستم میکروپایل نسبت به شمع های بتنی سازه ای با فواصل زیاد، باعث یکپارچگی بهتر خاک زیر فونداسیون، همسان شدن مقادیر نشست و افزایش سرعت اجرا می شود.

همانگونه که نتایج نشان می‌دهد در خاک‌های ریزدانه سست اشباع به دلیل وزن زیاد سازه، توزیع میکروپایل‌ها در زیر سطح فونداسیون متراکم می‌شود و فواصل بین میکروپایل‌ها در محل ستون‌ها و دیوارهای برشی و حائل کاهش می‌یابد. استفاده از سیستم میکروپایل در پروژه حاضر باعث کاهش تنش‌های وارده به خاک به میزان ۶۰٪ می‌شود که این امر موجب افزایش ظرفیت باربری فونداسیون می‌گردد، همچنین میزان نشست فونداسیون را به میزان ۷۰٪ کاهش می‌دهد. استفاده از نرم افزارهای اجزای محدود ETABS و SAFE در محدوده پروژه مورد بررسی و پروژه‌های مشابه برای طراحی و چیدمان فنی میکروپایل‌ها مناسب می‌باشند.

#### ۸- مراجع

- 1- Wong, J. C. (2004), "Seismic behavior of micropiles", M.S. Thesis. Washington State University, Pullman, WA.
- 2- Federal Highway Administration (2005) "Seismic Behavior of Micropiles", Report No. FHWA-WA-RD 1-604, United States Department of Transportation.
- 3-CSI SAFE program. User's Manual. Ver 8. Copyright 2002, B.V.
- 4-G.L.SivakumarBabu, B. R.Srinivasa Murthy, D.S.N.Murthy, M.S.Nataraj (2009), "Bearing capacity improvement using micropiles a case study", Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore.