

مقایسه فنی و اقتصادی شمعهای متداول و ریز شمعها (میکروپایل ها) در سازه های ساحلی با استفاده از مطالعات موردی

سارنگ صیرفیان^۱، مجتبی دارابی^{۲*}

۱- استادیار دانشگاه زنجان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

*civil_darabi@yahoo.com

چکیده

در دهه اخیر اجرای ریزشمعها (micropiles) در پروژه های بزرگ ساختمانی به دلیل مزایای منحصر به فرد این روش در مقایسه با شمع های بتنی متداول، افزایش گسترده ای یافته است. در این تحقیق سعی بر آن است تا با مدلسازی و تحلیل تعداد زیادی از ساختمانهای مستقر بر بسترهای ماسه ساحلی و با استفاده از نرم افزار متداول SAFE و نیز با بهره گیری از آیین نامه ریزشمع اداره بزرگراه های آمریکا (FHWA)، مقایسه ای بین شمعهای بتنی درجاریز متداول و ریزشمعها صورت گرفته و عوامل موثر بر انتخاب بهترین گزینه مورد بررسی قرار گیرد و جایگاه واقعی این روش در مقایسه با شمعهای بتنی درجاریز متداول سنجیده شود تا بستری فراهم گردد تا با توجه به مشخصات خاک بستر و نیز بارهای وارده از طرف سازه، امکان انتخاب بهترین گزینه از بین این دو روش مسیر گردد.

کلمات کلیدی: ریزشمع، شمع بتنی درجاریز، خاکهای ماسه ای، پی شمعی، پی ریزشمعی

۱. مقدمه

شمعها اعضایی از جنس فولاد، بتن، بتن مسلح و چوب می باشند که در صورت مناسب نبودن ظرفیت باربری زمین برای استفاده از پی های سطحی، از آنها برای ساخت پی های عمیق یا پی های شمعی (Pile Foundation) استفاده می گردد. علیرغم مخارج بالا، در عمل موارد متعددی وجود دارد که برای ایمنی ساختمان در برابر نشست و عوامل دیگر، از پی های شمعی استفاده می گردد. این سیستم مرکب به سیستم پی تقویت شده با شمع یا به طور خلاصه شالوده شمع- رادیه خوانده می شود. شالوده های شمع- رادیه از لحاظ اقتصادی گزینه ای مقرون به صرفه می باشند، زیرا زمانی که رادیه به تنهایی نیاز طراحی مورد نظر را از لحاظ باربری و نشست تامین نمی کند، با استفاده از چندین شمع در زیر رادیه مقدار ظرفیت باربری افزایش و نشست کلی و نشست های تفاضلی به مقدار زیادی کاهش می یابد. شمعها به دو دسته شمع های جابجا شونده (Displacement piles) و شمع های جایگزین شونده (Replacement piles) تقسیم می شوند. شمع های جابجا شونده،

شمع‌هایی هستند که بوسیله کوبش یا ارتعاش در زمین مستقر می‌شوند، و شمع‌های جایگزین شونده در مکان‌های از قبل حفاری شده، بصورت پیش ساخته یا درجا قرار می‌گیرند. [۲۰]

یک ریزشمع یک شمع جایگزین شونده با حفاری و تزریق دوغاب سیمان می‌باشد که معمولاً مسلح بوده و دارای قطر کوچک (معمولاً کمتر از 300mm) است. مراحل اجرای ریزشمع شامل حفاری یک گمانه، فرو بردن و جاسازی مسلح کننده‌ها (غلاف و آرماتور) و تزریق دوغاب سیمان می‌باشد. ریزشمع‌ها می‌توانند تحت بارهای محوری و یا جانبی قرار گیرند. همچنین می‌توانند جایگزین شمع‌های معمولی شده و یا به عنوان جزئی از یک توده مرکب شمع- خاک، بسته به شیوه طراحی، در نظر گرفته شوند. مزایای ریزشمع‌ها باعث استفاده روز افزون این تکنولوژی در تسلیح پی‌ها گردیده است. از جمله این مزایا می‌توان به زمان اجرای کوتاه، بهبود مشخصات و ظرفیت باربری خاک و جلوگیری از نشست‌های غیرهمگن، ایجاد کمترین دستخوردگی در سازه و محیط خاک، ایجاد کمترین سروصدا در حین عملیات اجرا، توانایی اجرای مایل ریزشمع و قابلیت تحمل بارهای افقی و قائم اشاره نمود که سبب گردیده است تا در پروژه‌های عظیم ساختمانی، به خصوص در خاکهای ماسه‌ای ساحلی مورد استقبال مهندسان قرار گیرد [3].

بیشتر بارهای اعمال شده بر شمع درجاریز بتنی، توسط بتن مسلح تحمل می‌شود بطوری که افزایش ظرفیت باربری، مستلزم افزایش سطح مقطع و سطح جانبی آن است. در مقابل، ظرفیت باربری سازه‌ای ریزشمع متکی بر ظرفیت باربری بالای المان‌های فلزی است که اکثر بارهای اعمالی را تحمل می‌کنند. با توجه به قطر کوچک ریزشمع، از باربری نوک ریزشمع در برابر ظرفیت باربری اصطکاکی و جداری آن، صرف نظر می‌شود. مشابه میل مهارها، دوغاب، بار را از طریق اصطکاک در سطح جانبی ناحیه باند ریزشمع از بتن مسلح به خاک اطراف منتقل می‌کند. مقاومت بدست آمده باند مخلوط خاک- دوغاب در درجه اول متأثر از نوع خاک، روش تزریق بکار رفته و به خصوص فشار تزریق و دبی تزریق می‌باشد [3].

هدف از انجام این تحقیق آن است که با توجه به پارامترهای مختلف خاک، با انجام تحلیل‌های متعدد بر روی سازه‌های بلند مرتبه ۱۰ الی ۳۰ طبقه مستقر بر روی خاکهای ماسه‌ای، بهترین شیوه چیدمان المانهای شمع و ریزشمع تعیین گردد، و در نهایت با انجام مقایسه‌ای فنی و اقتصادی، بهینه‌ترین گزینه اقتصادی انتخاب گردد، که در ادامه به تشریح روش کار می‌پردازیم.

۲. تعریف مشخصات سازه، خاک و ریزشمع مورد مطالعه

در این قسمت با فرض ثابت بودن پارامترهای دو نوع خاک ماسه‌ای با تراکم پایین و خاک ماسه‌ای متراکم، تاثیر تعداد طبقات و وزن سازه‌های بلند مرتبه ۱۰ الی ۳۰ طبقه را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱.۲. مشخصات سازه مورد مطالعه

سازه مورد نظر ساختمانی ۱۵ طبقه با اسکلت بتنی، شامل ۱۳ طبقه با کاربری تجاری- اداری و تفریحی، و ۲ طبقه زیرزمین با کاربری پارکینگ می‌باشد. پلان ساختمان مورد نظر به صورت مستطیل و با طول ۳۴ و عرض ۲۴ متر می‌باشد. محل احداث این سازه بر روی بستر ماسه ساحلی با ظرفیت باربری کم و قابلیت نشست زیاد می‌باشد.

۲.۲. مشخصات و پارامترهای خاک مورد مطالعه

با توجه به اطلاعات بدست آمده از گمانه‌های حفاری و برقراری ارتباط بین اطلاعات بدست آمده، خاک بستر شامل لایه‌ای از خاک ماسه‌ای با تراکم پایین شامل خاک ماسه‌ای ریزدانه همراه با لای به رنگ قهوه‌ای می‌باشد و تا عمق ۲۵ متری ادامه می‌یابد. نتایج آزمایشهای نفوذ استاندارد (SPT)، تعداد ضربات ۱۰ تا ۲۰ ضربه را نشان می‌دهند که نشان دهنده تراکم متوسط و پایین لایه ماسه‌ای مورد نظر می‌باشد. لازم به توضیح است که بدلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در منطقه، بایستی خاک بصورت اشباع در نظر گرفته شود. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این لایه بطور متوسط، در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه خاک ماسه‌ای با تراکم پایین

| زاویه اصطکاک ϕ | چسبندگی C (Kg/cm ²) | وزن مخصوص خشک γ_d (Ton/m ³) | وزن مخصوص مرطوب γ (Ton/m ³) | ضریب پواسون ν | ضریب الاستیسیته E_s (Kg/cm ²) | عدد نفوذ استاندارد N_{SPT} |
|---------------------|---------------------------------|--|--|-------------------|---|------------------------------|
| ۳۰ | ۰.۰۲ | ۱.۵ | ۱.۸ | ۰.۳۳ | ۱۷۵ | ۱۵ |

جدول شماره ۲ حاوی اطلاعات و مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک ماسه‌ای متراکم شامل خاک ماسه‌ای ریزدانه همراه با لای و رس به رنگ قهوه‌ای می‌باشد. نتایج آزمایشهای نفوذ استاندارد (SPT) در این خاک، تعداد ضربات ۳۰ تا ۵۰ ضربه و در اعماق مختلف تا بیش از ۵۰ ضربه را نیز نشان می‌دهند که نشان دهنده تراکم بالای لایه ماسه‌ای مورد نظر می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه خاک ماسه‌ای متراکم

| زاویه اصطکاک ϕ | چسبندگی C (Kg/cm ²) | وزن مخصوص خشک γ_d (Ton/m ³) | وزن مخصوص مرطوب γ (Ton/m ³) | ضریب پواسون ν | ضریب الاستیسیته E_s (Kg/cm ²) | عدد نفوذ استاندارد N_{SPT} |
|---------------------|---------------------------------|--|--|-------------------|---|------------------------------|
| ۳۳ | ۰ | ۱.۸ | ۲ | ۰.۳ | ۴۰۰ | ۴۰ |

۳.۲. مشخصات ریزشمع مورد استفاده

با توجه به پارامترهای خاک ماسه‌ای با تراکم پایین، به طراحی و تخمین ظرفیت باربری ریزشمع‌هایی با طول ۱۲ متر و قطر ۲۰۰ میلیمتر، و در مورد خاک ماسه‌ای متراکم، به طراحی و تخمین ظرفیت باربری ریزشمع‌هایی با طول ۸ متر و قطر ۲۰۰ میلیمتر می‌پردازیم. ریزشمع مورد نظر توسط غلافی به قطر خارجی ۷۶ میلیمتر و قطر داخلی ۶۸ میلیمتر از فولاد ST37 و همچنین میلگردی با قطر اسمی ۳۲ میلیمتر از نوع میلگرد AIII مسلح گردیده است.

۳. طراحی ریزشمع باربر

طراحی ریزشمع دارای دو مرحله می‌باشد که عبارتند از طراحی ژئوتکنیکی و طراحی سازه‌ای. طراحی سازه‌ای خود به دو زیر بخش، تخمین ظرفیت باربری فشاری و تخمین ظرفیت باربری کششی تقسیم می‌گردد. همانگونه که پیشتر اشاره گردید، ریزشمع‌ها از نوع شمع‌های جایگزین شونده هستند، اما در این طرح پژوهشی و با توجه به نوع خاک مورد مطالعه (خاک ماسه‌ای سست با تراکم پایین)، از ریزشمع‌های جابجاشونده که توسط کوبش در محل مستقر می‌گردند، استفاده شده است [3].

۱.۳. طراحی سازه‌های ریزشمع

با توجه به روابط ارائه شده در آئین‌نامه اداره بزرگراه‌های ایالات متحده آمریکا، طراحی سازه‌های ریزشمع با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{t-all} = 0.55(F_{y-bar} A_{bar} + F_{Y-ca \sin g} A_{ca \sin g}) \quad (1)$$

$$P_{c-all} = 0.4 f'_{c-grout} A_{grout} + 0.47(F_{y-bar} A_{bar} + F_{Y-ca \sin g} A_{ca \sin g}) \quad (2)$$

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

$$F_{y-casing} = 2400 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow A_{ca \sin g} = \pi \left(\frac{OD^2}{4} - \frac{ID^2}{4} \right) = \pi \left(\frac{7.6^2}{4} - \frac{6.8^2}{4} \right) = 9.04 \text{ cm}^2$$

$$F_{Y-bar} = 4200 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow A_{bar} = 8.04 \text{ cm}^2$$

$$f'_{c-grout} = 530 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow A_{grout} = \pi \left(\frac{6.8^2}{4} - \frac{3.2^2}{4} \right) = 28.26 \text{ cm}^2$$

$$P_{c-all} = 0.4(530 \times 28.26) + 0.47(4200 \times 8.04 + 2400 \times 9.04) = 3206 \text{ ton}$$

$$P_{t-all} = 0.55(4200 \times 8.04 + 2400 \times 9.04) = 30.5 \text{ ton}$$

۲.۳. طراحی ژئوتکنیکی ریزشمع

بر طبق مطالعات و آزمایشات صورت گرفته در ساختگاه پروژه، خاک محل احداث سازه از نوع خاک ماسه‌ای ریزدانه همراه با لای به رنگ قهوه‌ای می‌باشد که با استفاده از جدول ۳ و با توجه به نوع ریزشمع مصرفی (نوع D) و خاک محل پروژه، مقدار مقاومت اسمی مجموعه خاک-دوغاب (α bond nominal strength) مطابق با آئین‌نامه ریزشمع اداره بزرگراه‌های آمریکا (FHWA) تعیین می‌گردد.

جدول ۳- خلاصه ای از مقادیر " α " (مقاومت اسمی مجموعه خاک-دوغاب) برای طراحی اولیه ریزشمع

| محدوده مقاومت اسمی مجموعه خاک-دوغاب (کیلوپاسکال) | | | | تشریح 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) |

با توجه به روابط ارائه شده در آئین‌نامه FHWA، طراحی ژئوتکنیکی ریزشمع با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$F_{G \text{ allowable}} = \frac{\alpha_{\text{bond nominal strength}}}{F.S.} \times \pi \times \text{DIA}_{\text{bond}} \times \text{bond length} \quad (3)$$

$$F_{G \text{ allowable}} = \frac{\pi \times 0.2 \times 12 \times 95}{2.5} = 28.6 \text{ ton}$$

که در آن $\alpha_{\text{bond nominal strength}}$ مقاومت اسمی مجموعه خاک-دوگاب، DIA_{bond} قطر معادل ریزشمع، bond length طول ریزشمع و $F.S.$ ضریب اطمینانی برابر ۲.۵ می باشد. خلاصه مقادیر به دست آمده :

$P_{c\text{-design}}=32.06 \text{ ton}$: Axial compressive bearing capacity for micropile types

$P_{t\text{-design}}=30.5 \text{ ton}$: Axial tensile bearing capacity for micropile types

$P_{G\text{-design}}=28.6 \text{ ton}$: Geotechnical bearing capacity for micropile types

بنابراین با توجه به مقادیر به دست آمده از روابط بالا و در جهت اطمینان، ظرفیت باربری ریزشمع‌های مورد استفاده را برابر مقدار حداقل زیر در نظر می‌گیریم.

$$P_{\text{total-allowable}}=28.6 \text{ ton}$$

۴. تشریح روش مدل سازی، تحلیل و طراحی پی‌های شمعی و ریزشمعی

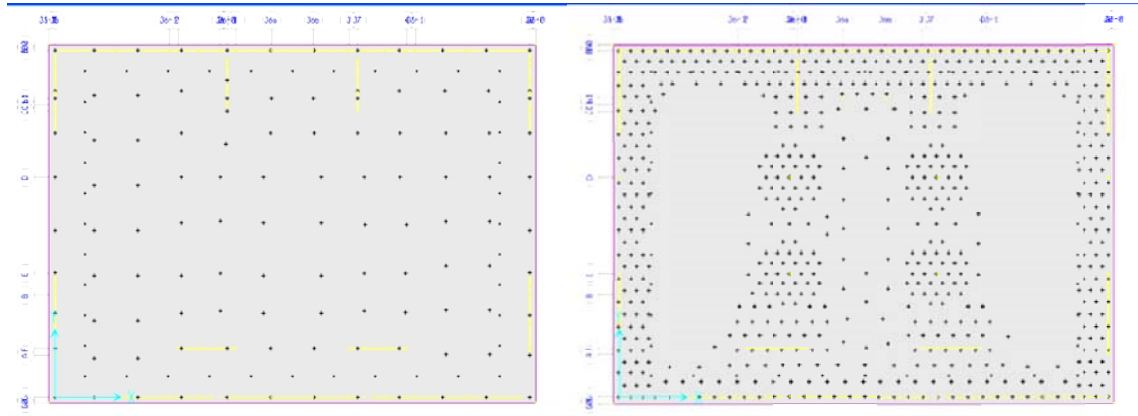
طراحی منطقی سیستم شمع - رادیه دارای دو مرحله است :

مرحله اول : طراحی اولیه جهت برآورد کفایت استفاده از سیستم ترکیبی شمع- رادیه و تعیین تعداد کافی شمع در زیر پی. مرحله دوم : مرحله طراحی جزء به جزء جهت تعیین تعداد شمع‌ها، محل قرارگیری آنها و آرایش آنها در زیر رادیه و همچنین کنترل توزیع تنش خاک و نشست زیر پی و برآورد نیروی داخلی، شامل ممانهای خمشی و نیروی برشی در رادیه و شمع‌ها [۴].

شایان ذکر است که روند طراحی پی ریز شمعی، مشابه روند ذکر شده در مورد سیستم ترکیبی شمع - رادیه می‌باشد. در این تحقیق قصد داریم تا با استفاده از نرم افزار متداول تحلیل و طراحی پی، SAFE، پی‌های شمعی و پی‌های ریزشمعی را تحلیل و طراحی نماییم.

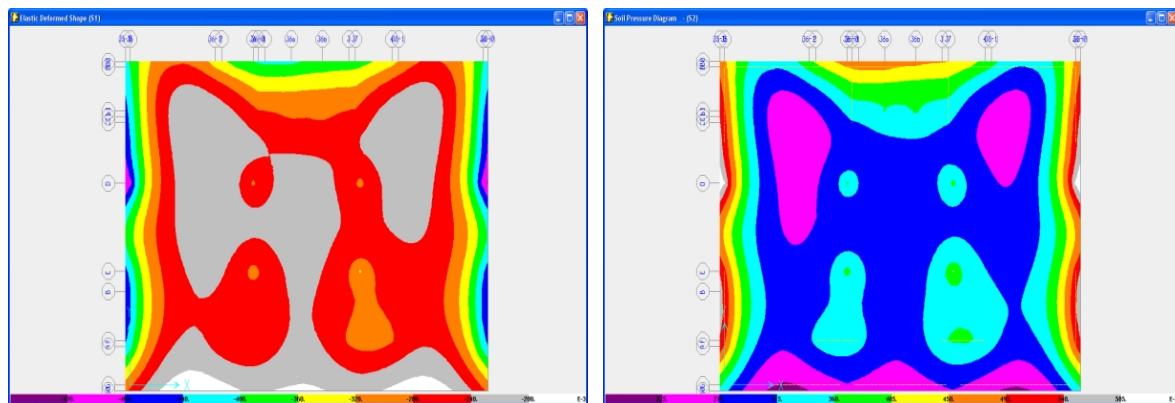
در ابتدا مطابق با روشهای معمول، مدل سازی پی گسترده در نرم افزار SAFE صورت گرفته و تحلیل‌ها و کنترل‌های مقدماتی بر روی آن صورت پذیرفت. از مهمترین مواردی که بدان توجه شد، کنترل تنش خاک زیر پی و همچنین کنترل میزان نشست الاستیک پی تحت اثر بارهای بهره‌بردار بود. همانطور که اشاره شد، خاک مورد نظر دارای ظرفیت باربری کمی بوده و در نتیجه الزاماً می‌بایستی از پی شمعی و یا پی ریزشمعی استفاده می‌شد. جهت مدل‌سازی شمع و یا ریزشمع در زیر پی، از المان فنر متمرکز در محل استقرار شمع و ریزشمع استفاده گردید. برای این منظور می‌بایست سختی معادل شمع و ریزشمع تعیین می‌شد، که این سختی‌های معادل، به استفاده از آزمایش‌های بارگذاری بزرگ مقیاس بر روی شمع و ریزشمع به دست آمد. با استفاده از نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی ریزشمع‌ها در خاکهای مشابه، سختی معادل ریزشمع برابر 100 ton/cm در نظر گرفته شد. در ادامه روند تحلیل و طراحی، با توجه به تعیین مناطق بحرانی از لحاظ میزان نشست و تنش

خاک، المانهای فشرده‌تر به صورت گسترده در زیر سطح پی توزیع گردید و تحلیل‌های جدیدی با توجه به وجود المانهای شمع یا ریزشمع در زیر سطح پی صورت پذیرفت. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد، با توجه به ابعاد شمع‌ها و ریزشمع‌ها، ظرفیت باربری شمع‌ها به مراتب بیشتر از ظرفیت باربری ریزشمع‌ها بوده و این موضوع باعث گردید تا از تعداد بیشتری ریزشمع در زیر پی استفاده گردد. این موضوع تا حد زیادی باعث کاهش نشست نسبی نقاط مختلف پی و همچنین کاهش تنش زیر پی و در نتیجه کاهش ضخامت پی در حالت استفاده از ریزشمع گردید.

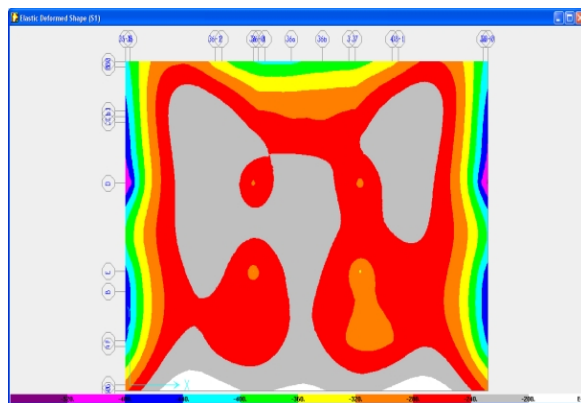


شکل ۱- نحوه آرایش و چیدمان ریزشمع‌ها و شمع‌ها در زیر پی گسترده

روند تحلیل و کنترل‌های مربوط به تنش خاک و نشست الاستیک پی و همچنین تغییر آرایش چیدمان شمع‌ها و ریزشمع‌ها تا زمانی ادامه یافت که نشست پی و تنش زیر پی تحت بارهای بهره‌برداری، به حد مجاز و قابل قبول رسید. با توجه به ظرفیت باربری مجاز ریزشمع‌ها (28 ton) و همچنین سختی معادل در نظر گرفته شده برای آن ($K=100\text{ton/cm}$)، میزان نشست مجاز پی ریزشمعی کمتر از 2.8mm می‌باشد. شکل ۲ تغییرات تنش زیر پی و شکل ۳ تغییرات نشست الاستیک پی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- کانتور تغییرات تنش خاک زیر پی ریزشمعی



شکل ۳- کانتور تغییرات نشست الاستیک پی ریزشمعی

۵. مقایسه فنی و اقتصادی

پس از اتمام عملیات تحلیل و کنترل‌های مربوطه، طراحی پی شمعی و پی ریزشمعی صورت پذیرفت. از جمله عوامل مهم در طراحی پی شمعی و پی ریزشمعی، کنترل برش پانچ بود. بایستی ضخامت پی چنان در نظر گرفته می‌شد که پی، تحت اثر بارهای وارده از طرف سازه دچار برش پانچ نگردد. در انتها پس از اتمام عملیات طراحی بر روی ۷ سازه با تعداد طبقات

مختلف، و در دو حالت پی شمعی و پی زیرشمعی، با در نظر گرفتن عوامل موثر در اجرای پی‌ها، به برآورد هزینه‌ها مطابق با فهرست بهای ابنیه سال ۱۳۸۸ پرداخته، و نهایتاً مقایسه‌ای فنی و اقتصادی بین پی‌های شمعی و پی‌های ریزشمعی صورت گرفت. جدول ۴ و ۵ به ترتیب هزینه‌های مربوط به اجرای یک متر از طول ریزشمع و شمع را ارائه می‌دهند. جدول ۶ و ۷ به ترتیب ارائه دهنده مقایسه اقتصادی پی شمعی و پی ریزشمعی در سازه‌های بلند با تعداد طبقات و وزنهای مختلف در خاک ماسه‌ای سست با تراکم پایین و خاک ماسه‌ای متراکم می‌باشد.

جدول ۴- فهرست آحاد بهای عملیات اجرای یک متر ریزشمع

| ردیف | شرح عملیات | واحد | بهای واحد (ریال) | مقدار | بهای کل (ریال) |
|---|--|----------|------------------|-------|----------------|
| ۱ | تهیه و حمل لوله های ریزشمع مشبک به قطر خارجی ۷۶ میلیمتر و قطر داخلی ۶۸ میلیمتر و استقرار آنها در داخل گمانه بوسیله عملیات کوبش با احتساب هزینه تجهیز کارگاه | متر طول | ۲۳۵۰۰۰ | ۱ | ۲۳۵۰۰۰ |
| ۲ | اضافه بها نسبت به ردیف ۱ در صورت استفاده از عملیات حفاری | متر طول | ۹۴۰۰۰ | ۱ | ۹۴۰۰۰ |
| ۳ | تهیه و حمل آرماتور با قطر ۳۲ م م و استقرار آنها در داخل غلاف ریزشمع | کیلو گرم | ۱۰۰۰۰ | ۶.۳۱ | ۶۳۱۰۰ |
| ۴ | تهیه و حمل فلنج با ابعاد ۱*۲۵*۲۵ و نصب آنها بر روی ریزشمع | کیلو گرم | ۱۰۰۰۰ | ۹.۸۱ | ۹۸۱۰۰ |
| ۵ | تهیه و حمل سیمان پرتلند تیپ ۱ جهت اجرای عملیات تزریق | پاکت | ۳۵۰۰۰ | ۳ | ۱۰۵۰۰۰ |
| ۶ | عملیات تزریق لوله های مشبک ریزشمع با استفاده از مجموعه کامل تزریق مشتمل بر میکسر اولیه، میکسر ثانویه و پمپ تزریق و نیز بهره گیری از پکر درون چاهی با احتساب هزینه تجهیز کارگاه | متر طول | ۲۷۵۰۰۰ | ۱ | ۲۷۵۰۰۰ |
| بهای عملیات اجرای یک متر ریزشمع در خاک ماسه‌ای متراکم با استفاده از عملیات حفاری و کوبش | | | | | ۸۷۰۲۰۰ |
| بهای عملیات اجرای یک متر ریزشمع در خاک ماسه‌ای با تراکم پایین با استفاده از عملیات کوبش | | | | | ۷۷۶۲۰۰ |

جدول ۵- فهرست آحاد بهای عملیات اجرای یک متر شمع به قطر ۱متر

| ردیف | شرح عملیات | واحد | بهای واحد (ریال) | مقدار | بهای کل (ریال) |
|---|--|----------|------------------|-------|----------------|
| ۱ | حفاری ماشینی شمع | متر طول | ۱۲۰۰۰۰۰ | ۱ | ۱۲۰۰۰۰۰ |
| ۲ | تهیه و حمل آرماتور طولی با قطر ۲۵ م م و استقرار آنها در داخل شمع | کیلو گرم | ۱۰۰۰۰ | ۹۶.۲۸ | ۹۶۲۸۰۰ |
| ۳ | تهیه و حمل آرماتور دورپیچ با قطر ۱۰ م م و گام ۱۵ سانتیمتر و استقرار آنها در داخل شمع | کیلو گرم | ۱۰۰۰۰ | ۱۲.۸۵ | ۱۲۸۵۰۰ |
| ۴ | هزینه هر متر مکعب بتن به همراه بتن ریزی در شمع | متر مکعب | ۶۰۰۰۰۰ | ۰.۷۸۵ | ۴۷۱۰۰۰ |
| بهای عملیات اجرای یک متر شمع در خاک ماسه‌ای متراکم و با تراکم پایین | | | | | ۲۷۶۲۳۰۰ |

جدول ۶- مقایسه اقتصادی پی شمعی و پی ریزشمعی در سازه‌های با تعداد طبقات مختلف در خاک ماسه‌ای با تراکم پایین

| ردیف | تعداد طبقات | مساحت سطح پی (مترمربع) | تعداد شمع به طول ۳۰ متر و قطر ۱ متر | تعداد ریزشمع به طول ۱۲ متر و قطر ۰.۲ متر | هزینه اجرای پی شمعی (ریال) | هزینه اجرای پی ریزشمعی (ریال) | گزینه برتر اقتصادی |
|------|-------------|------------------------|-------------------------------------|--|----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| ۱ | ۱۰ | ۶۶۴.۲۵ | ۴۲ | ۳۴۳ | ۳۴۸۰۴۹۸۰۰۰ | ۳۱۹۴۸۳۹۲۰۰ | ریزشمع |
| ۲ | ۱۳ | ۸۶۹.۲۱ | ۱۱۰ | ۶۵۸ | ۹۱۱۵۵۹۰۰۰۰ | ۶۱۲۸۸۷۵۲۰۰ | ریزشمع |
| ۳ | ۱۴ | ۸۹۹.۸۳ | ۱۱۴ | ۷۲۰ | ۹۴۴۷۰۶۶۰۰۰ | ۶۷۰۶۳۶۸۰۰۰ | ریزشمع |
| ۴ | ۱۵ | ۸۰۳.۰۴ | ۱۰۸ | ۶۲۷ | ۸۹۴۹۸۵۲۰۰۰ | ۵۸۴۰۱۲۸۸۰۰ | ریزشمع |
| ۵ | ۱۷ | ۸۸۹.۵۶ | ۱۹۵ | تنش و نشست جوابگو نیست | ۱۶۱۵۹۴۵۵۰۰۰ | ۰ | شمع |
| ۶ | ۲۰ | ۹۴۹.۷۵ | ۲۱۵ | تنش و نشست جوابگو نیست | ۱۷۸۱۶۸۳۵۰۰۰ | ۰ | شمع |
| ۷ | ۳۰ | ۱۵۹۲.۲۷ | ۲۸۵ | تنش و نشست جوابگو نیست | ۲۳۶۱۷۶۶۵۰۰۰ | ۰ | شمع |

جدول ۷- مقایسه اقتصادی پی شمعی و پی ریزشمعی در سازه‌های با تعداد طبقات مختلف در خاک ماسه‌ای متراکم

| ردیف | تعداد طبقات | مساحت سطح پی (مترمربع) | تعداد شمع به طول ۳۰ متر و قطر ۱ متر | تعداد ریزشمع به طول ۱۲ متر و قطر ۰.۲ متر | هزینه اجرای پی شمعی (ریال) | هزینه اجرای پی ریزشمعی (ریال) | گزینه برتر اقتصادی |
|------|-------------|------------------------|-------------------------------------|--|----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| ۱ | ۱۰ | ۶۶۴.۲۵ | ۳۵ | ۳۲۲ | ۲۴۱۷۰۱۲۵۰۰ | ۲۲۴۱۶۳۵۲۰۰ | ریزشمع |
| ۲ | ۱۳ | ۸۶۹.۲۱ | ۶۶ | ۶۳۸ | ۴۵۵۷۷۹۵۰۰۰ | ۴۴۴۱۵۰۰۸۰۰ | ریزشمع |
| ۳ | ۱۴ | ۸۹۹.۸۳ | ۷۶ | ۷۱۷ | ۵۲۴۸۳۷۰۰۰۰ | ۴۹۹۱۴۶۷۲۰۰ | ریزشمع |
| ۴ | ۱۵ | ۸۰۳.۰۴ | ۸۵ | ۶۲۷ | ۵۸۶۹۸۸۷۵۰۰ | ۴۳۶۴۹۲۳۲۰۰ | ریزشمع |
| ۵ | ۱۷ | ۸۸۹.۵۶ | ۱۷۲ | تنش و نشست جوابگو نیست | ۱۱۸۷۷۸۹۰۰۰۰ | ۰ | شمع |
| ۶ | ۲۰ | ۹۴۹.۷۵ | ۱۸۰ | تنش و نشست جوابگو نیست | ۱۲۴۳۰۳۵۰۰۰۰ | ۰ | شمع |
| ۷ | ۳۰ | ۱۵۹۲.۲۷ | ۲۲۴ | تنش و نشست جوابگو نیست | ۱۵۴۶۸۸۸۰۰۰۰ | ۰ | شمع |

۶. نتیجه گیری

- با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل‌های صورت گرفته در خاکهای ماسه‌ای، می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که:
- ۱- در پی‌های ریزشمعی به دلیل عملیات کوبش غلاف و همچنین تزریق دوغاب سیمان تحت فشار، پارامترهای خاک بهبود فراوانی یافته و بستر ماسه‌ای ضعیف به بستری مناسب و قابل اطمینان جهت تحمل بارهای وارده و نشستهای پیش آمده تبدیل خواهد شد.
 - ۲- با در نظر گرفتن عواملی همچون هزینه مصالح و نیروی انسانی و قرار دادن آن در کنار ایمنی، سرعت بالای عملیات اجرایی، به صورت فعالیت همزمان چند گروه کاری در چند جبهه از پروژه، و کم هزینه بودن ماشین آلات مورد نیاز، استفاده از پی‌های ریزشمعی در سازه‌های با تعداد طبقات کمتر از ۱۵ طبقه اقتصادی و توجیه پذیر می‌باشد.
 - ۳- در سازه‌های بلند مرتبه، با تعداد طبقات بیشتر از ۱۵ طبقه در خاکهای ماسه‌ای، به دلیل وزن زیاد سازه، توزیع ریزشمع‌ها در زیر سطح پی متراکمتر شده و فواصل بین ریزشمع‌ها کاهش می‌یابد و ریزشمع‌های منفرد بصورت گروه ریزشمع عمل می‌کنند که این روند باعث کاهش ظرفیت باربری ریزشمع‌ها شده و پی ریزشمعی مقرون به صرفه نمی‌باشد.

۴- در سازه‌های با تعداد طبقات و وزن کمتر، می‌توان از ریزشمع تحکیمی (ریزشمع بدون آرماتورگذاری) جهت بالا بردن ظرفیت باربری و کاهش نشست استفاده نمود و بدین وسیله پروژه مورد نظر را در مقایسه با پی شمعی اقتصادی تر و توجیه پذیرتر نمود.

۵- مقایسه صورت گرفته نشان می‌دهد که اختلاف هزینه پی شمعی و پی ریزشمعی در خاکهای ماسه‌ای با تراکم پایین به مراتب بیشتر از اختلاف هزینه پی شمعی و پی ریزشمعی در خاکهای ماسه‌ای متراکم می‌باشد.

مراجع

- ۱- براجا.ام.داس، "اصول مهندسی ژئوتکنیک"، شاپور طاحونی، موسسه انتشارات پارس آئین، جلد دوم.
- ۲- بولز، جوزف، "تحلیل و طراحی پی"، (۱۳۷۹) اردشیر اطمیابی، تهران، نشر جویبار، جلد ۱ و ۲.
- 3- FHWA, (2000) " micropile design and construction guidelines", US Department of Transportation, Federal Highway Administration, NO. - SA - 97 - 070, June,
- ۴- علی قاسمیان لنگرودی، جواد لاجوردی جونی، (۱۳۸۷) "بررسی اثرات ناشی از تغییرات ابعادی و سازه‌ای شمع و پی سطحی در ظرفیت باربری و نشست سیستم شمع-رادیه"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت.