



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

## ارزیابی عددی ظرفیت باربری شمع های باریک شونده ساده و پله ای تحت مدول الاستیسیته های متفاوت خاک ماسه ای

سجاد آریافر<sup>۱</sup>، مهدی مخبری<sup>۲</sup>، تورج سبزواری<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ایران

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، گروه مهندسی عمران، استهبان، ایران

۳- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، گروه مهندسی عمران، استهبان، ایران

Ariafar@ymail.com

### چکیده

استفاده از شمع در پی بسیاری از سازه ها مانند: برجها، پل ها و غیره بسیار متداول است. هدف از تحقیق حاضر، مقایسه عددی تغییرات ظرفیت باربری قائم و جانبی شمع های استوانه ای مرسوم با مقطع یکنواخت از طریق اعمال باریک شدگی (به دو صورت ساده و پله ای) میباشد. شمع های باریک شونده شمع هایی هستند که با افزایش عمق، سطح مقطع آنها کاهش یافته و در نهایت نوک شمع سطح کوچکتری نسبت به سر شمع پیدا میکنند. برای ارزیابی عددی مسئله از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس (ABAQUS) به صورت سه بعدی بهره گرفته شده است. تحلیل های عددی پیرامون تغییرات ظرفیت باربری جانبی و قائم شمع های استوانه ای انتها بسته بتنی باریک شونده ساده و پله ای نسبت به شمع های استوانه ای با مقطع یکنواخت در حجم ثابت با سه مدول الاستیسیته ۱۰، ۳۰ و ۶۰ مگا پاسکال انجام شده است. نتایج نشان داد که اعمال باریک شدگی (در هر دو حالت پله ای و ساده) برای شمع در هر سه مدول الاستیسیته، منجر به افزایش هر دوی ظرفیت باربری جانبی و قائم نسبت به حالت شمع با مقطع یکنواخت در حجم و طول ثابت میگردد و با افزایش مدول الاستیسیته در ظرفیت باربری قائم تا ۱۱٪ و در ظرفیت باربری جانبی تا ۱۵٪ افزایش ظرفیت باربری نسبت به شمع حالت یکنواخت خواهیم داشت.

**کلمات کلیدی:** شمع، ظرفیت باربری قائم و افقی، شمع های باریک شونده، ABAQUS، مدول الاستیسیته

### ۱- مقدمه

امروزه با افزایش جمعیت و گسترش مناطق شهری و صنعتی، روی آوردن بیشتر به ساخت و سازه های عظیم و مرتفع شامل: برجها، پلها، استادیوم های ورزشی، سکوها های دریایی و غیره اجتناب ناپذیر است. همین امر باعث شده که استفاده از پی های سطحی بخصوص در مناطقی که لایه های سطحی خاک از توان باربری کافی برخوردار نبوده، انتخاب مناسبی نباشد. در این موارد به جای استفاده از پی های سطحی، از پی های عمیق (شمعها) برای تحمل بارهای بزرگ قائم و جانبی بهره گرفته می شود. شمعها با نفوذ تا لایه های پایین تر خاک و یا سنگ بستر و با انتقال بار سازه به لایه های در عمق پایین تر زمین که از استحکام و توان باربری بیشتری برخوردارند، امکان احداث سازه های بزرگتر را در سطح زمین فراهم می کنند. حال آنکه امروزه با افزایش امکانات ساخت و اجرای شالوده های عمیق با تغییر مشخصات هندسی مقطع بصورت باریک شونده، میتوان به ظرفیت باربری بالاتری در مهندسی ژئوتکنیک دست یافت.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

شمع‌ها از لحاظ شکل و هندسه به دو نوع کلی قابل تقسیم‌بندی هستند: (الف) شمع با مقطع یکنواخت (ب) شمع با مقطع متغیر (باریک شونده). انسان‌ها در گذشته برای سال‌های متمادی برای ساخت بناهای خود از شمع‌های چوبی که ذاتاً باریک شونده اند بهره می‌گرفتند، لذا شمع‌های باریک شونده را می‌توان از ابتدایی‌ترین شمع‌های ساخت بشر دانست. در حالت کلی، شمع‌های باریک شونده به دو دسته‌ی شمع‌های باریک شونده ساده و پله‌ای قابل تفکیک هستند. در شمع‌های باریک شونده ساده با افزایش تدریجی طول شمع و تحت زاویه باریک‌شدگی، سطح مقطع کاهش یافته و در نهایت نوک شمع، سطح مقطع کوچکتری نسبت به سرشمع پیدا می‌کند. زاویه باریک‌شدگی ( $\alpha$ ) که با درجه بیان می‌شود عبارت است از زاویه‌ای که جداره خارجی شمع با محور طولی آن می‌سازد. در شمع‌های باریک شونده پله‌ای شمع‌ها به شکل چند قطعه با مقطع (یا قطر) متفاوت می‌باشند که هر قطعه داری مقطع و قطر ثابتی است و مقطع این قطعات در راستای طول شمع از سر شمع تا نوک شمع کاهش می‌یابد. در طراحی پی‌ها، اکثر مهندسان طراح پی‌های سطحی را به دلیل سهولت اجرا و اقتصادی بودن به عنوان گزینه اول انتخاب می‌کنند، اما در بسیاری از موارد با شرایطی روبرو هستیم که استفاده از پی‌های عمیق (شمع‌ها) بجای پی‌های سطحی اولویت پیدا می‌کند، از جمله: نیاز به حفاری تا عمق زیاد برای قرارگیری پی سطحی بر روی بستر با مقاومت کافی، امکان وقوع نشست نامتقارن پی ناشی از تغییر جنس خاک و یا نامتقارن بودن بارهای وارده، وارد آمدن نیروی جانبی زیاد به پی، مسئله دار بودن خاک زیر پی (مانند خاک‌های فروریزشی و تورمی)، وجود خطر آب شستگی خاک زیر پی (مانند پی پل‌ها)، خاک نزدیک به سطح زمین ظرفیت باربری کافی برای تحمل بارهای وارد از سازه را نداشته و یا در صورت بارگذاری نشست سازه غیر مجاز شود. بنابراین، کاربرد بسیار وسیع شمع‌ها غیرقابل انکار است، بطوریکه استفاده فراوان و روز افزون از این نوع پی‌ها برای احداث سازه‌های مختلف گواه بر همین امر است. از طرفی اکثر مطالعاتی که تاکنون روی شمع‌ها صورت گرفته مربوط به شمع‌های با مقطع یکنواخت بوده است، درحالی‌که برای شمع‌های باریک شونده که مزایای قابل تاملی در خصوص ظرفیت باربری و هزینه ساخت نسبت به شمع‌های استوانه‌ای با مقطع یکنواخت مرسوم دارا هستند مطالعات اندکی صورت گرفته که بیشتر آنها هم مربوط به حالت ساده می‌شود که حتی مطالعات بسیار اندک‌تری در خصوص شمع‌های باریک شونده پله‌ای صورت گرفته است. به دلیل دشواری نصب و کمبود معیار طراحی معقول برای تخمین ظرفیت باربری سبب شده استفاده از شمع‌های باریک شونده بطور وسیع به عنوان یک گزینه طراحی در نظر گرفته نشود. از این رو، انجام مطالعات و تحقیقات بیشتر در خصوص این شمع‌ها می‌تواند به بهبود ظرفیت باربری شمع‌ها و در نتیجه استفاده روز افزون آن منجر گردد.

از جمله مطالعاتی که تاکنون در مورد شمع‌های باریک شونده صورت گرفته است، میتوان به مطالعات ریبینیکوف (۱۹۹۰) [۱] اشاره نمود که با انجام آزمایش‌های صحرایی به بررسی ظرفیت باربری چند نوع شمع شامل شمع‌های استوانه‌ای با مقطع یکنواخت و باریک شونده تحت بار قائم فشاری و همچنین اندرکنش شمع‌ها با خاک در سه لایه رس ماسه‌دار، رس و ماسه پرداخت و به این نتیجه رسید که افزایش ظرفیت باربری شمع‌های باریک شونده بین ۲۰ تا ۳۰٪ بیشتر از شمع‌ها با مقطع یکنواخت است. سکر و همکاران (۲۰۰۴) [۲] با بررسی مکانیزم شمع‌های باریک شونده مرکب بتنی پلیمری تقویت شده با فیبر (FRP) در فشار و ارزیابی اثر مصالح شمع بر عملکرد شمع، به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری قائم برای شمع‌های باریک شونده تا ۲۰٪ بیشتر از ظرفیت باربری شمع‌های یکنواخت میباشد. خان و همکاران (۲۰۰۸) [۳] با بررسی ظرفیت باربری شمع‌های باریک شونده و مقطع یکنواخت در خاک‌های چسبیده لایه‌ای با استفاده از نرم افزار Plaxis 2D به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری شمع‌های باریک شونده با زاویه باریک‌شدگی بین ۰/۹۵ و ۱/۹۱ درجه به اندازه ۲۸ تا ۵۰ درصد بیشتر از شمع‌های با مقطع یکنواخت است. ژان و همکاران (۲۰۱۲) [۴] با بررسی دو سری شمع استوانه‌ای مشتمل بر شمع باریک شونده با مقطع نوک ثابت و شمع باریک شونده با مقطع نوک متغیر با استفاده از نرم افزار Abaqus به منظور ارزیابی تاثیر زاویه باریک‌شدگی بر روی ظرفیت باربری محوری شمع‌های باریک شونده، به این نتیجه رسیدند که با افزایش



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

زاویه باریک شدگی، اصطکاک جداره شمع ها به سرعت افزایش یافته و همچنین زاویه بهینه باریک شدگی در خاک های همگن را بین ۰/۵ تا ۱ درجه ارزیابی کردند. پیک و همکاران (۲۰۱۳) [۵] با انجام یک سری آزمایش های بارگذاری شمع بصورت یک شمع استوانه ای با مقطع ثابت و دو شمع باریک شونده با زوایای باریک شدگی مختلف در خاک ماسه رس دار و در محفظه ای کالیبره شده و با هدف ارزیابی ظرفیت باربری شمع های باریک شونده در وضعیت متفاوت خاک، به این نتیجه رسیدند که هنگامی که تراکم نسبی خاک و زاویه باریک شدگی شمع ها افزایش می یابند، سبب افزایش تنش های متوسط شده و مقاومت نهایی پایه شمع های باریک شونده تمایل به افزایش دارند و همچنین، تراکم نسبی و زاویه باریک شدگی شمع ها سبب افزایش تنش های افقی و قائم شده و مقاومت نهایی جداره شمع های باریک شونده را افزایش می دهند. شاه و دیو (۲۰۱۳) [۶] با ارزیابی پاسخ محوری شمع باریک شونده در خاک ماسه ای با زوایای باریک شدگی متفاوت با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود Plaxis 3D به این نتیجه رسیدند که با افزایش زاویه باریک شدگی تا ۲ درجه میزان ظرفیت باربری تا ۲۰٪ افزایش میابد. هاتف و شفقت (۲۰۱۵) [۷] در مقاله خود به بهینه سازی ظرفیت باربری شمع های باریک شونده با سه سری شمع با مقطع یکنواخت و باریک شونده حجم یکسان از طریق روش المان محدود نرم افزار Plaxis 3D پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در خاک ماسه ای متراکم، زاویه بهینه باریک شدگی ۱.۲ درجه میباشد. همچنین مطالعات بهینه سازی آنها نشان داد که با افزایش زاویه اصطکاک و زاویه اتساع، ظرفیت باربری شمع های باریک شونده در ماسه در مقایسه با شمع با مقطع یکنواخت با حجم یکسان، افزایش حداکثر به میزان ۱۱٪ نتیجه می شود. مردانی و همکاران (۱۳۹۴) [۸] با استفاده از نرم افزار ABAQUS به بررسی اثرات تغییرات ضخامت لایه های خاک بر مقادیر ظرفیت باربری و نشست شمع های باریک شونده استوانه ای با زوایای ۰ و ۰/۵ و ۱ درجه در خاک های دو لایه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در شمع های باریک شونده با زاویه نیم درجه با کاهش ضخامت لایه رس بالایی، مقادیر ظرفیت باربری افزایش و مقادیر نشست کاهش می یابد و همچنین در حالتی که شمع کاملاً در خاک ماسه ای قرار دارد، شمع با زاویه باریک شدگی ۱ درجه، دارای ظرفیت باربری و نشست مشابه با مابقی شمع ها میباشد. در مقاله حاضر مقایسه و بهینه سازی ظرفیت باربری قائم و جانبی شمع های استوانه ای تکی مرسوم و متداول با مقطع یکنواخت از طریق تکنیک اعمال باریک شدگی به دو صورت: (۱) باریک شدگی ساده (۲) باریک شدگی پله ای به صورت یک و سه پله ای تحت مدول الاستیسیته های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال هدف مطالعات عددی بوده است.

## ۲- مدل سازی عددی

در مقاله حاضر، برای ارزیابی عددی ظرفیت باربری و همچنین صحت سنجی، از نرم افزار ABAQUS به صورت سه بعدی بهره گرفته شده است. برای مدل سازی عددی در این مقاله، رفتار الاستیک خطی برای شمع استوانه ای - بتنی در نظر گرفته شده است و مشخصات شمع برای صحت سنجی نیز در جدول (۱) آورده شده است و همچنین با توجه به اینکه فرمولی مشخص برای اندازه گیری ظرفیت باربری شمع های باریک شونده وجود ندارد، از معادلات موجود برای شمع های با مقطع یکنواخت استفاده شده است. ضمناً برای اینکه نتیج از صحت قابل قبولی برخوردار باشند، تمامی شمع های مدل شده با حجم و طول ثابت (۱۰ متر) مدل سازی شده است.

جدول (۱). مشخصات شمع مدل سازی شده

نوع شمع	قطر (D)	طول (L)	ضریب پواسون (ν)	مدول الاستیسیته (E)	دانسیته (ρ)
بتنی	۰/۸ m	۱۰ m	۰/۱۷	۳۲/۵ GPa	۲۴۰۰ kg/m <sup>3</sup>



مدل ساختاری الاستیک خطی (قانون هوک) متداولترین مدل استفاده شده در جهان مهندسی برای تخمین رابطه تنش- کرنش مصالح است. در گذشته عموماً از مدل ساختاری الاستیک خطی در توسعه روش‌های طراحی شمع استفاده شده است. در اکثر مصالح با تغییر شکل‌های کوچک معمولاً رفتار خطی الاستیک در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند با رابطه‌ای خطی بین تنش و کرنش توصیف گردد. این قانون مطابق رابطه (۱) بصورت رابطه‌ای بین نیرو ( $F$ ) و تغییر مکان ( $x$ ) با مقدار ثابت  $k$  (به عنوان ثابت فنر) نشان داده می‌شود. قانون هوک می‌تواند تنش ( $\sigma$ ) و کرنش ( $\varepsilon$ ) را نیز مطابق رابطه (۲) از طریق ثابت مدول یانگ ( $E$ ) مرتبط کند.

$$F = -k.x \quad (1)$$

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (2)$$

برای مدل رفتاری خاک، از مدل اسلاتو پلاستیک موهر-کلمب استفاده شده و مشخصات خاک نیز در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲). مشخصات خاک ماسه‌ای

نوع خاک	چسبندگی (C)	زاویه اصطکاک داخلی ( $\varphi$ )	زاویه اتساع ( $\psi$ )	ضریب پواسون ( $\nu$ )	مدول الاستیسیته (E)	دانسیته ( $\rho$ )
ماسه‌ای	۰ kPa	$35^\circ$	$2/5^\circ$	۰/۳	۴۰ MPa	$2000 \text{ kg/m}^3$

در مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک کامل رفتار مصالح در ابتدا بطور کامل الاستیک بوده و پس از رسیدن به تسلیم کاملاً پلاستیک می‌شود. به عبارتی، معیار تسلیم در آنها همان معیار گسیختگی است. از جمله این مدل‌ها، می‌توان به معیار گسیختگی موهر-کولمب (Mohr-Coulomb Failure Criterion [MC]) اشاره نمود. این مدل رفتاری، یک رابطه ساده خطی بین تنش برشی و تنش عمود بر سطح بر روی یک صفحه می‌باشد که مطابق رابطه (۳) توضیح داده می‌شود:

$$\tau_f = c + \sigma' . \tan \varphi \quad (3)$$

که در آن  $\tau_f$  تنش برشی،  $\sigma'$  تنش عمود بر سطح گسیختگی (نرمال)،  $c$  چسبندگی و  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک است. هر دوی  $\tau_f$  و  $\sigma'$  دارای دیمانسیون نیرو بر سطح یعنی از جنس تنش هستند. برای صحت سنجی ظرفیت باربری شمع، از روش مایهوف برای ظرفیت باربری نوک شمع ( $Q_p$ ) استفاده شده است که به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود:

$$Q_p = A_p . q' . N_q \quad (4)$$

که در این رابطه  $A_p$  سطح مقطع نوک شمع،  $q'$  تنش موثر قائم در تراز نوک شمع و  $N_q$  ضریب ظرفیت باربری است. در گام دوم، ظرفیت باربری اصطکاکی جداره شمع ( $Q_s$ ) برای خاک‌های ماسه‌ای توسط رابطه (۵) بدست آمده است:



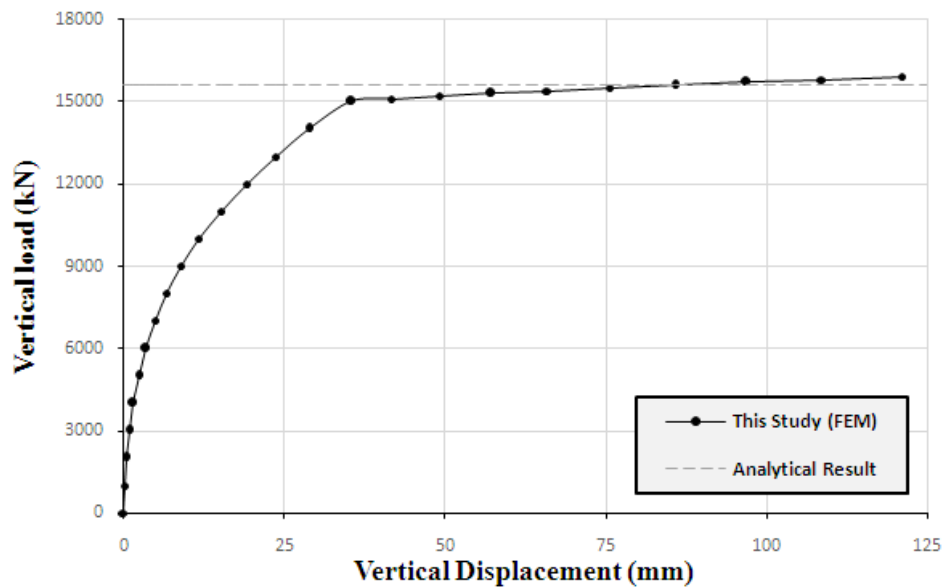
# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

$$Q_s = \sum_{i=1}^{i=n} p.l.f = \sum_{i=1}^{i=n} p.l.(k\sigma'_v \cdot \tan \delta) \quad (5)$$

که در این رابطه  $p$  محیط مقطع شمع،  $l$  طول شمع در تماس با هر لایه خاک،  $f$  مقاومت اصطکاکی واحد سطح در عمق مورد نظر،  $k$  ضریب فشار جانبی خاک،  $\sigma'_v$  تنش قائم موثر در عمق مورد نظر،  $\delta$  زاویه اصطکاک بین شمع و خاک می باشد. با بدست آوردن ظرفیت باربری نوک و جداره شمع طبق فرمول (۶) ظرفیت باربری نهایی شمع را بدست می آوریم:

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s \quad (6)$$

در پایان، ظرفیت باربری نهایی شمع عدد ۱۵۶۰۵ کیلو نیوتن بدست آمد و بعد از مقایسه با خروجی نرم افزار با مقدار ۱۵۰۸۰ کیلونیوتن، اختلاف نتایج حدود ۴ درصد می باشد که تقریب قابل قبولی را نشان میدهد و در شکل (۱) نتایج مقایسه مقادیر بدست آمده از روش مایر هوف و نرم افزار ABAQUS 3D را مشاهده میکنید.



شکل (۱). مقایسه نمودار بار-نشست شمع در خاک همگن حاصل از مدلسازی عددی نرم افزار ABAQUS 3D و نتیجه تحلیلی

در ادامه، برای مدل سازی عددی به منظور مقایسه ظرفیت باربری عمودی و جانبی شمع های استوانه ای یکنواخت و باریک شونده به صورت پله ای ( تک و سه پله ای ) و ساده با حجم یکسان تحت تاثیر مدول الاستیسیته های ۱۰،۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال، اقدام به طراحی شمع ها به طول ۱۰ متر و مقطع ثابت (  $D = 0.45$  ) با بیشترین زاویه ممکن باریک شدگی شده است که مشخصات مربوط به شمع های مدل سازی شده در جدول (۳) آورده شده است.

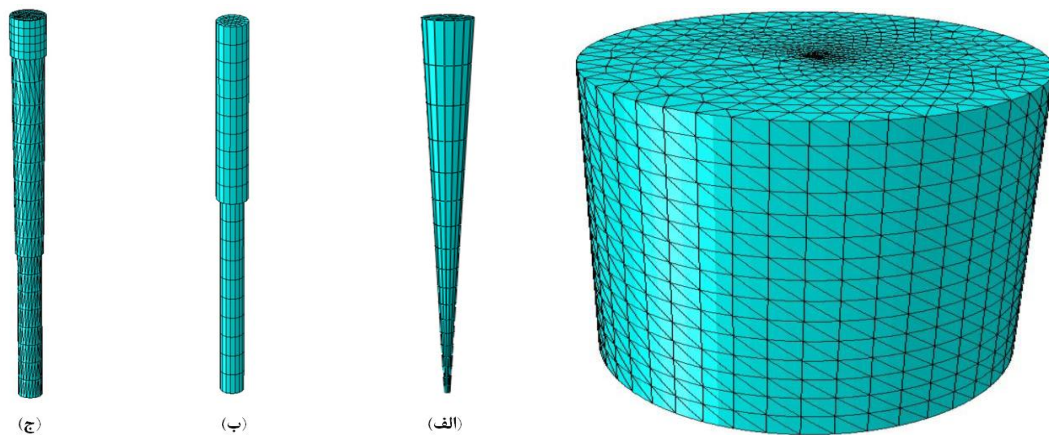
جدول (۳) - مشخصات مربوط به شمع های مدل شده به طول ۱۰ متر و با حجم یکسان



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

شمع یکنواخت (S)	شمع باریک شده ساده (T)			شمع باریک شده یک پله ای (ST1)		شمع باریک شده سه پله ای (ST3)		حجم (m <sup>3</sup> )
	D (m)	D <sub>1</sub> (m)	D <sub>2</sub> (m)	α(°)	L (m)	D (m)	L (m)	
۰/۴۵	۰/۸	۰/۱	۲	۰ - ۴/۵	۰/۵۵	۰ - ۲/۲	۰/۶	۱/۵۹ m <sup>3</sup>
						۲/۲ - ۴/۳	۰/۵	
				۴/۵ - ۱۰	۰/۳۵	۴/۳ - ۷/۲	۰/۴	
						۷/۲ - ۱۰	۰/۳	

برای مش بندی شمع و خاک، از المان های تنش سه بعدی (3D Stress) منظم (Structured) شش ضلعی (Hexagonal) هشت گره ای مرتبه اول هندسی استفاده شده است (3CD8R). همچنین برای تماس شمع-خاک از روش تماس سطح به سطح (Surface-to-Surface) و تکنیک مستر-اسلیو (Master-slave) استفاده شده که سطح جدار شمع در تماس با خاک به عنوان (Master) و سطح خاک در تماس با شمع (Slave) تعریف شده و همچنین با تعریف رفتار مماسی از مدل گسیختگی کلمب استفاده شده است. ضریب اصطکاک شمع با خاک که از نوع ماسه ای با تراکم متوسط بوده و شمع نیز از نوع بتنی میباشد، برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شده است (Technical Manual.TM.3-34.22.(2013)). در شکل (۲) شمع های مدل شده و همچنین مش بندی شمع و خاک توسط نرم افزار نشان داده شده است.



شکل (۲) - هندسه و مش بندی مدل عددی انواع شمع ها و خاک و شمع  
 (الف) شمع باریک شده ساده (ب) شمع با باریک شدگی یک پله ای  
 (ج) شمع با باریک شدگی سه پله ای

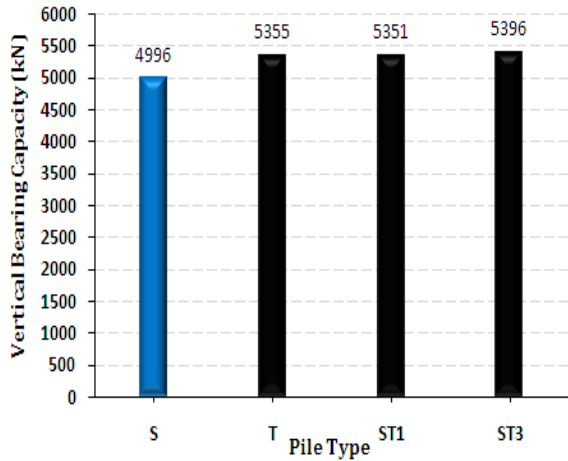
### ۳. بررسی نتایج بدست آمده

#### ۱.۳. ظرفیت باربری قائم

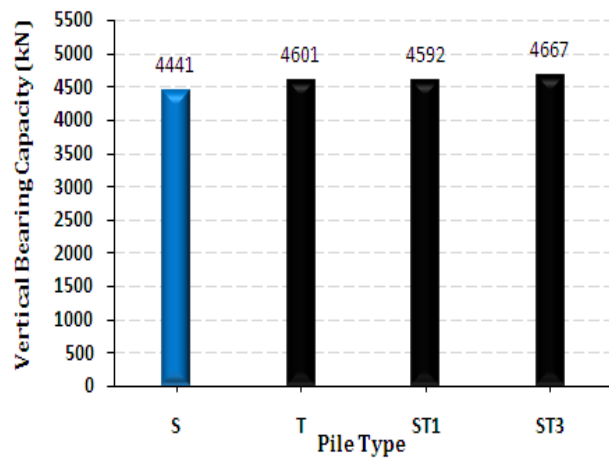
مطابق شکل (۳)، با توجه به تغییرات مدول الاستیسیته خاک، به مقایسه ظرفیت باربری قائم انواع شمع های باریک شونده با شمع های یکنواخت پرداخته شده است که مقادیر ظرفیت های حاصل از مدل سازی این نوع شمع ها، در جدول (۳) نیز آورده شده است.



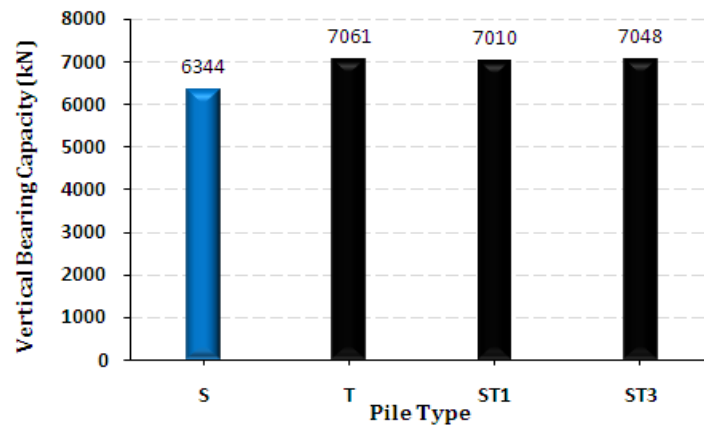
# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



(ب)



(الف)



(ج)

شکل (۳) - نمودار مقادیر ظرفیت های باربری قائم شمع های مدل سازی

(الف) - مدول الاستیسیته ۱۰ mpa (ب) - مدول الاستیسیته ۳۰ mpa (ج) - مدول الاستیسیته ۶۰ mpa

برای مقایسه بهتر ظرفیت های باربری قائم انواع شمع های مدل سازی شده، مقادیر این ظرفیت ها در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴) - ظرفیت باربری قائم انواع شمع های مدل شده (kN)

مدول الاستیسیته	شمع یکنواخت (S)	شمع باریک شده ساده (T)	شمع باریک شده تک پله ای (ST1)	شمع باریک شده سه پله ای (ST3)
۱۰ mpa	۴۴۴۱	۴۶۰۱	۴۵۹۲	۴۶۶۷
۳۰ mpa	۴۹۹۶	۵۳۵۵	۵۳۵۵	۵۳۹۶
۶۰ mpa	۶۳۴۴	۷۰۶۱	۷۰۱۰	۷۰۴۸





# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

همانطور که از نتایج ظرفیت باربری قائم انواع شمع ها مشاهده میشود، در تمامی مقادیر مدول الاستیسیته، ظرفیت باربری شمع های باریک شونده بیشتر از مقادیر ظرفیت باربری شمع های یکنواخت میباشد و همچنین می توان نتیجه گرفت که افزایش مدول الاستیسیته خاک دانه ای سبب افزایش اختلاف ظرفیت باربری قائم شمع استوانه ای باریک شونده نسبت به شمع با مقطع یکنواخت می گردد.

در مدول الاستیسیته ۱۰ و ۲۰ مگاپاسکال، مقدار ظرفیت باربری شمع باریک شونده سه پله ای از تمامی شمع ها بیشتر می باشد اما در مدول الاستیسیته ۶۰ مگاپاسکال، شمع باریک شونده ساده ظرفیت باربری بیشتری نسبت به دو شمع باریک شونده دیگر از خود نشان میدهد که البته این افزایش قابل توجه نمی باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده از شمع های باریک شونده در هر سه نوع باریک شوندگی، به منظور دستیابی به ظرفیت باربری قائم بیشتر و همچنین با توجه به اینکه حجم و طول تمام شمع های مدل سازی شده یکسان می باشد، از نظر اقتصادی نیز استفاده از این نوع شمع ها توصیه میگردد. در جدول (۵) مقادیر درصد افزایش ظرفیت باربری قائم شمع های باریک شونده نسبت به شمع های یکنواخت در مدول الاستیسیته های مقاوت آورده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده میشود، در مدول الاستیسیته ۱۰ مگا پاسکال افزایش ظرفیت باربری به حدود ۵٪ و در مدول الاستیسیته ۳۰ مگاپاسکال به ۸٪ و در آخر در مدول الاستیسیته ۶۰ مگاپاسکال به حدود ۱۱/۵٪ میرسد. با افزایش مدول الاستیسیته، میزان افزایش ظرفیت باربری قائم شمع های باریک شونده نسبت به شمع های یکنواخت بیشتر میشود که نتیجه میشود که استفاده از شمع های باریک شونده در مدول الاستیسیته های بالاتر، تاثیر بیشتری بر روی افزایش ظرفیت باربری قائم دارد.

جدول (۵) - درصد افزایش ظرفیت باربری قائم شمع های باریک شونده نسبت به شمع با مقطع یکنواخت

مدول الاستیسیته	شمع باریک شده ساده (T)	شمع باریک شده تک پله ای (ST1)	شمع باریک شده سه پله ای (ST3)
۱۰ mpa	۳/۶	۳/۴	۵/۱
۳۰ mpa	۷/۲	۷/۱	۸
۶۰ mpa	۱۱/۳	۱۰/۵	۱۱/۱

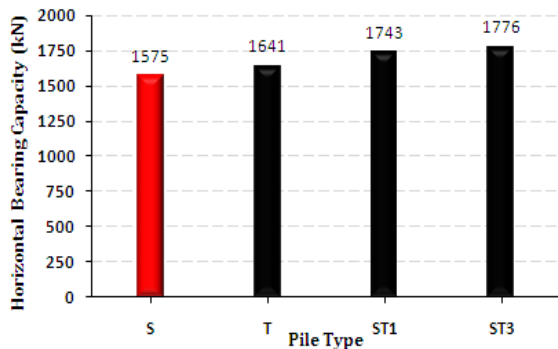
## ۲.۳. ظرفیت باربری جانبی

مطابق شکل (۴)، با توجه به تغییرات مدول الاستیسیته خاک، به مقایسه ظرفیت باربری جانبی انواع شمع های باریک شونده با شمع های یکنواخت حاصل از مدل سازی عددی پرداخته شده است که مقادیر این ظرفیت ها، در جدول (۶) نیز برای مقایسه بهتر آورده شده است.

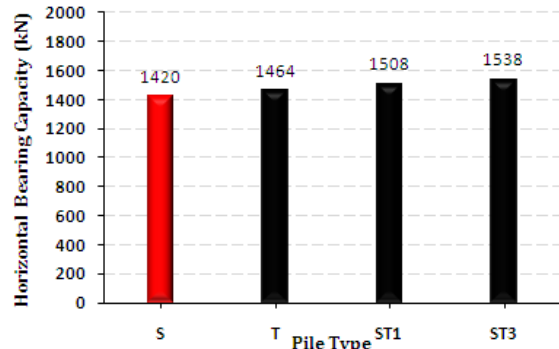




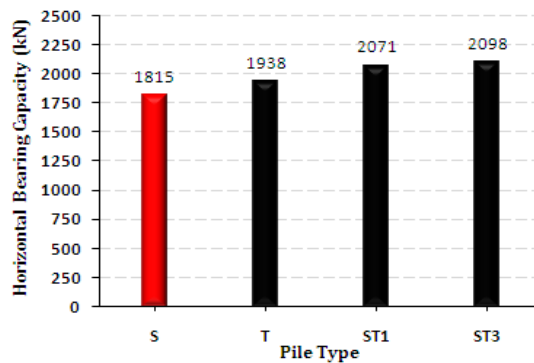
# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



(ب)



(الف)



(ج)

شکل (۳) - نمودار مقادیر ظرفیت های باربری جانبی شمع های مدل سازی

(الف) - مدول الاستیسیته ۱۰ mpa (ب) - مدول الاستیسیته ۳۰ mpa (ج) - مدول الاستیسیته ۶۰ mpa

جدول (۶) - ظرفیت باربری جانبی انواع شمع های مدل شده (kN)

مدول الاستیسیته	شمع یکنواخت (S)	شمع باریک شده ساده (T)	شمع باریک شده تک پله ای (ST1)	شمع باریک شده سه پله ای (ST3)
۱۰ mpa	۱۴۲۰	۱۴۶۴	۱۵۰۸	۱۵۳۸
۳۰ mpa	۱۵۷۵	۱۶۴۱	۱۷۴۳	۱۷۷۶
۶۰ mpa	۱۸۱۵	۱۹۳۸	۲۰۷۱	۲۰۹۸

از نتایج ظرفیت باربری جانبی انواع شمع ها مشاهده میشود که همانند ظرفیت باربری قائم، در اینجا نیز ظرفیت باربری جانبی شمع های باریک شونده در تمامی مقادیر مدول الاستیسیته، بیشتر از مقادیر ظرفیت باربری شمع های یکنواخت میباشد. این در حالی است که میزان اختلاف ظرفیت باربری در مدول الاستیسیته ۱۰ مگاپاسکال نهایتاً ۱۱۰ کیلو نیوتن میباشد اما در مدول الاستیسیته بالاتر یعنی ۶۰ مگاپاسکال، این مقدار به ۲۸۰ کیلونیوتن می رسد.

در هر سه مدول الاستیسیته ۱۰، ۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال، مقدار ظرفیت باربری شمع باریک شونده سه پله ای از تمامی شمع ها بیشتر می باشد و سپس به ترتیب، شمع های باریک شونده تک پله ای و ساده دارای بیشترین ظرفیت باربری هستند. با توجه



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

به نتایج بدست آمده، استفاده از شمع های باریک شونده در هر سه نوع باریک شوندگی، به منظور دستیابی به ظرفیت باربری جانبی بیشتر و همچنین با توجه به اینکه حجم شمع ها یکسان می باشد، از نظر اقتصادی نیز استفاده از این نوع شمع ها توصیه می گردد. در جدول (۷) مقادیر درصد افزایش ظرفیت باربری قائم شمع های باریک شونده نسبت به شمع های یکنواخت در مدول الاستیسیته های متفاوت آورده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده میشود، در مدول الاستیسیته ۱۰ مگا پاسکال حداکثر افزایش مربوط به شمع باریک شونده سه پله ای با حدود ۸/۳٪، در مدول الاستیسیته ۳۰ مگا پاسکال مجدد شمع سه پله ای بیشترین افزایش ظرفیت باربری تا ۱۲/۸٪ و در آخر در مدول الاستیسیته ۶۰ مگا پاسکال هم شمع سه پله ای با ۱۵/۶٪ بیشتری افزایش ظرفیت باربری را داشته است. میزان افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع های باریک شونده پله ای تقریباً دو برابر ظرفیت باربری جانبی شمع های باریک شونده ساده میباشد.

جدول (۷) - درصد افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع های باریک شونده نسبت به شمع یکنواخت

مدول الاستیسیته	شمع باریک شده ساده (T)	شمع باریک شده تک پله ای (ST1)	شمع باریک شده سه پله ای (ST3)
۱۰ mpa	۳/۱	۶/۲	۸/۳
۳۰ mpa	۴/۲	۱۰/۷	۱۲/۸
۶۰ mpa	۶/۸	۱۴/۱	۱۵/۶

## ۹- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS به صورت سه بعدی به مدلسازی عددی و تحلیل ظرفیت باربری قائم و جانبی شمع های تکی باریک شونده ساده و پله ای در سه مدول الاستیسیته مختلف خاک ماسه ای پرداخته شده که نتایج مهم حاصل شده در این تحقیق بدین ترتیب میباشد:

- ارزیابی عددی ظرفیت باربری قائم شمعهای استوانه ای انتها بسته ی باریک شونده ساده و پله ای نسبت به حالت مرسوم با مقطع یکنواخت در حجم و طول ثابت (۱۰ متر) و در سه نوع مدول الاستیسیته متفاوت نشان داد که اعمال باریک شدگی به هر دو صورت ساده و پله ای موجب افزایش ظرفیت باربری شمع میگردد. بنابراین، استفاده از این تکنیک بطور گسترده تر در کارهای عملی توصیه میگردد.
- بر اساس مطالعه پارامتری مدول الاستیسیته خاک ماسه ای، استفاده از شمع های باریک شونده در خاک های دانه ای با مدول الاستیسیته های مختلف، سبب بهبود نتایج ظرفیت باربری قائم (تا ۱۱ درصد) و باربری افقی (تا ۱۶ درصد) نسبت به حالت شمع با مقطع یکنواخت میگردد که این افزایش در مدول الاستیسیته بالاتر، بیشترین خواهد بود.
- بیشترین افزایش ظرفیت باربری قائم به ترتیب متعلق به شمع باریک شده ساده (۱۱/۳٪) و سپس باریک شده سه پله ای (۱۱/۱٪) میباشد.
- بیشترین افزایش ظرفیت باربری جانبی در هر سه مدول الاستیسیته متعلق به شمع با باریک شدگی سه پله ای میباشد.
- استفاده از شمع های باریک شده پله ای برای دست یابی به ظرفیت باربری بیشتر جانبی نسبت به شمع باریک شده ساده توصیه میگردد.
- مقادیر درصد افزایش ظرفیت باربری جانبی نسبت به شمع های یکنواخت، در شمع های باریک شده پله ای بیش از ۲ برابر درصد افزایش باربری شمع های ساده میباشد.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



۷. با توجه به اینکه در مدلسازی انجام شده، حجم و طول تمامی شمع ها یکسان در نظر گرفته شده است، با توجه به اینکه شمع های باریک شونده ظرفیت بربری بیشتری از خود نشان میدهند، استفاده از این نوع شمع ها چه از لحاظ مهندسی و چه از لحاظ اقتصادی توصیه میگردد.

## مراجع

۱. مردانی، ز.، علی‌الهی، ح. و قلی‌زاده، آ. (۱۳۹۴). " بررسی اثر تغییر ضخامت لایه‌های خاک بر روی ظرفیت باربری و نشست شمع‌های استوانه‌ای و باریک شونده (به روش عددی) "، کنفرانس ملی روش‌های عددی در مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد.
2. Hataf, N., and Shafaghat, A. (2015). "Optimizing the bearing capacity of tapered piles in realistic scale using 3D Finite Element Method", *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(6), 1465-1473.
3. Khan, M. K., El Naggar, M. H., and Elkasabgy, M. (2008). "Compression testing and analysis of drilled concrete tapered piles in cohesive-frictional soil", *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(3), 377-392.
4. Rybnikov, A. M. (1990). "Experimental investigations of bearing capacity of bored-cast-in-place tapered piles", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 27(2), 48-52.
5. Meyerhof, G. G. (1976). "Bearing capacity and settlement of pile foundations," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, 102(GT3), 197-228.
6. Paik, K., Lee, J., and Kim, D. (2013). "Calculation of the axial bearing capacity of tapered bored piles", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 166(5), 502-514.
7. Sakr, M., El Naggar, M. H., and Nehdi, M. (2004). "Load transfer of fibre-reinforced polymer (FRP) composite tapered piles in dense sand", *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(1), 70-88.
8. Shah, A. M., and Dave, S. P. (2013). "Axial response of tapered bored piles in sand using PLAXIS 3D", *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 2(3), 26-27.
9. Technical Manual TM 3-34.22(FM 3-34.343)/MCRP 3-17.1B Military Non-standard Fixed Bridging (2013).
10. Zhan, Y.-G., Wang, H., and Liu, F.-C. (2012). "Numerical study on load capacity behavior of tapered pile foundations", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 1969-1980