

# تحلیل رفتار شمع - ستون‌ها تحت بار جانبی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه

فرزانه حامدی (استادیار)

محمود حسنلو<sup>\*</sup> (استادیار)

محسن حسنلو<sup>\*</sup> (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی فنی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۵)  
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۷۸-۷۱، (پادداشت فنی)

در این نوشتار، عوامل مؤثر در رفتار بار - جابه‌جایی شمع - ستون مانند: مقاومت خاک، نسبت‌های طول آزاد به طول مدفون، و قطر شمع - ستون مورد بررسی قرار گرفته است. پاسخ بار - جابه‌جایی مدل شمع - ستون واقع در خاک، با پاسخ یک ستون با انتهای گیردار بدون حضور خاک مقایسه شده است، تا طول مؤثر ستون معادل (طول ستون به اضافه‌ی مقداری از طول شمع به نام عمق گیرداری) تعیین شود. تحلیل‌ها نشان داده‌اند هر چقدر نسبت طول آزاد به طول مدفون افزایش یابد، شمع - ستون رفتار صلب‌تری از خود نشان می‌دهد. افزایش عمق مدفون و قطر شمع - ستون و مقاومت خاک منجر به افزایش ظرفیت باربری شمع - ستون می‌شود، با این حال در هر شرایط عمقی وجود دارد که بعد از آن، افزایش طول مدفون تأثیری در مقدار باربری ندارد. در خاک ماسه‌ی متراکم با افزایش طول آزاد شمع - ستون، عمق گیرداری کاهش می‌یابد، ولی در خاک ماسه‌ی سست روند خاصی ملاحظه نشده است.

hamed@eng.ikiu.ac.ir  
hassanlou@eng.ikiu.ac.ir  
moh.hassanlou@yahoo.com

واژگان کلیدی: شمع - ستون، بارگذاری جانبی، مدل عددی، عمق گیرداری.

## ۱. مقدمه

از شمع‌ها به طور متداول برای انتقال بارهای قائم به زمین استفاده می‌شود. اما در موارد زیر، بار جانبی نسبت به بار قائم، اهمیت بیشتری دارد و ممکن است بار جانبی بسیار بیشتر از بارهای قائم باشد:

الف) بار ناشی از باد وارد به توربین‌های بادی غول‌پیکر؛

ب) بار جانبی ناشی از فشار جانبی خاک بر دیوار حائل؛

ج) بار ناشی از حرکت و ترمز اتومبیل بر روی پل‌ها؛

د) بار جانبی ناشی از برخورد کشتی با سازه‌های پهلوگیری اسکله‌ها.

در چنین مواردی شمع‌ها یا به عبارتی شمع - ستون‌ها را باید تحت بارهای جانبی تحلیل کرد و اندرکنش شمع و خاک را در نظر گرفت.

در اسکله‌های کشتی‌ها و همچنین در پایه‌ی توربین‌های بادی درون دریا به ترتیب برای تحمل نیروی جانبی ناشی از برخورد کشتی و تحمل بار باد و موج معمولاً از شمع‌های بزرگ و قطوری موسوم به شمع - ستون استفاده می‌شود. در طراحی این متوایل‌ها، تغییر مکان سرشمع و لنگر خمشی در طول شمع - ستون بسیار مهم هستند و لازم است به دقت محاسبه شوند.

برای محاسبه‌ی تغییر مکان یا به عبارتی، تعیین رفتار جانبی این سازه‌ها، روش‌های معمول عبارت‌اند از:

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۳/۸/۲۶، پذیرش ۱۳۹۳/۹/۱۰.

۱. مدل‌سازی خاک با فنرهای خطی یا غیرخطی  $(p - y)$ ؛  
۲. روش گوه‌ی کرنش در خاک؛  
۳. مدل‌سازی خاک به صورت محیط پیوسته و سه‌بعدی (المان محدود).  
روش اول معمولاً سادگی بیشتری دارد و شمع را به صورت یک المان خمشی، که با فنرهای متعدد خاک احاطه شده است، مدل می‌کند. در روش اول نمی‌توان از منحنی‌های  $p - y$  برای محاسبه‌ی پارامترهایی همانند سختی خمشی شمع استفاده کرد و باید از روش‌های دوم و سوم استفاده شود. روش دوم نسبت به مدل اول پیچیده‌تر است و معمولاً در شمع‌های منعطف نسبت به صلب بهتر عمل می‌کند.<sup>[۱]</sup> در روش دوم، منحنی  $p - y$  با گوه‌ی غیرفعال  $3^1$  بعدی جلوی شمع ارائه می‌شود، که خاک را به صورت پیوسته و با لحاظ اندرکنش بین شمع و خاک بررسی می‌کند و نسبت به روش اول دقت بیشتری دارد. اما روش سوم که اساس کار نرم‌افزارهای عددی نیز است، خاک و شمع را به صورت سه بعدی مدل می‌کند. ایراد اصلی روش سوم آن است که به اطلاعات بیشتری در مورد خاک و شمع نیاز است و باید از طریق آزمایش‌های متعدد به دست آورده شوند. از ایرادهای دیگر روش سوم، نیاز به زمان بیشتر برای تحلیل است. از مزایای بسیار مهم روش مذکور، دقت بالای آن نسبت به دو روش اول و دوم است.

## ۲. نگاهی به روش‌های طراحی شمع - ستون‌ها

با توجه به اندرکنشی که میان خاک و شمع وجود دارد، تعیین مقاومت نهایی و جابه‌جایی جانبی شمع در اثر نیروی جانبی کار پیچیده‌ی است. در این ارتباط، روش‌های متفاوتی ارائه شده است که برخی از آنها به این شرح است.

### الف) روش منحنی $p - y$

روش منحنی  $p - y$ ، برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ ارائه شده و از سایر روش‌ها متداول‌تر است.<sup>[۲]</sup> در روش مذکور، شمع به‌عنوان یک عضو کشسان و خاک به‌صورت فنرهای خطی و یا غیرخطی (منحنی  $p - y$ ) مدل می‌شوند، این روش یک روش نیمه‌تجربی است و از نقاط ضعف آن می‌توان وابسته‌بودن روش به پارامترهای تجربی از جمله به مدول عکس‌العمل بستر را که فقط می‌تواند از نتایج آزمایش بارگذاری شمع حاصل شود، اشاره کرد. از جمله توانایی‌های روش منحنی  $p - y$ ، می‌توان به پیش‌بینی رفتار شمع‌های با قطر بزرگ اشاره کرد. منحنی‌های  $p - y$  ارتباط بین نیروهای جانبی وارده از طرف شمع به المان خاک ( $p$ ) را با تغییر مکان جانبی این المان ( $y$ ) بیان می‌کنند. تاکنون منحنی‌های ( $p - y$ ) مختلفی برای انواع خاک‌ها پیشنهاد شده است، که مهم‌ترین آن‌ها، منحنی‌های ارائه‌شده در پژوهشی در سال ۱۹۷۴،<sup>[۳]</sup> و منحنی ارائه‌شده دیگری در پژوهشی در سال ۱۹۸۳،<sup>[۴]</sup> برای خاک‌های ماسه‌یی بوده است. برخی پژوهشگران نیز در مطالعات خود نشان داده‌اند که نقص اصلی روش ذکرشده، نیاز به کالیبره‌کردن است.<sup>[۵]</sup> چون اساس کار این نوشتار روش سوم (روش مدل‌سازی خاک به روش المان محدود) است، از بیان این روابط صرف‌نظر می‌شود و برای مشاهده‌ی روابط به‌صورت دقیق می‌توان به کارهای انجام شده مراجعه کرد.<sup>[۵-۳]</sup>

### ب) روش گوهی کرنش (SWM)

به دلیل نقص‌هایی که روش‌های دیگر، مانند مدل منحنی‌های  $p - y$ ، دارند؛ روش  $p - y$  با گوهی غیرفعال سه‌بعدی در جلوی شمع ارائه شده است. در این روش خاک به‌صورت پیوسته و با لحاظ‌کردن اندرکنش بین شمع و خاک بررسی می‌شود و نسبت به روش الف دقیق‌تر است. این مدل ابتدا در پژوهشی در سال ۱۹۷۵ ارائه شده است، که در آن برای محاسبه‌ی مقاومت نهایی خاک از منحنی‌های  $p - y$  استفاده شده است.<sup>[۶]</sup> اما بعداً در پژوهش دیگری (۲۰۱۱) برای محاسبه‌ی مقاومت نهایی خاک در رس استفاده و با مدل‌های مقیاس کامل صحت‌سنجی شده است.<sup>[۷]</sup> سپس در مطالعه‌ی دیگری (۱۹۸۶) روش مذکور در خاک همگن توسعه داده شده و با عنوان مدل گوهی کرنش نام‌گذاری شده است،<sup>[۸]</sup> و در آن نتیجه‌ی تحلیل یک تیر یک‌بعدی بر روی پی کشسان غیرخطی (BNEF) به پاسخ اندرکنش شمع و خاک سه‌بعدی ارتباط داده شده است. روش مذکور بعدها در پژوهش دیگری (۱۹۹۸) برای خاک‌های لایه‌یی توسعه داده شده است.<sup>[۹]</sup> روش مدل گوهی کرنش نیز محدودیت‌ها و نقص‌هایی دارد.

### ج) مدل‌سازی خاک به روش المان محدود

در این روش اندرکنش سه‌بعدی شمع و خاک و با در نظر گرفتن رفتار کشسان و کشسان - خمیری خاک و شمع لحاظ می‌شود و از روش‌های الف و ب کارآمدتر است، و اغلب برای یافتن پاسخ بار جابه‌جایی شمع تحت بار جانبی استفاده می‌شود.<sup>[۱۰-۱۳]</sup> مزیت اصلی این روش برخلاف دو روش الف و ب، عدم نیاز به کالیبره‌کردن است،

اما از مشکلات اصلی آن نیاز به زمان زیاد تحلیل و همچنین نیاز به داشتن اطلاعات کامل و کافی از خاک و شمع مانند مدول کشسانی، ضریب پواسون، خصوصیات خمیری، و غیره است که موارد ذکرشده باید از طریق آزمایش‌ها به دست آیند. اساس کار در این نوشتار نیز، روش سوم است که شمع و خاک به‌صورت سه‌بعدی مدل شده است.

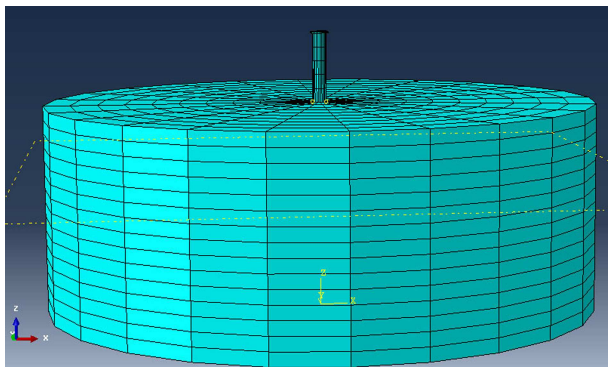
### ۳. مدل‌سازی

در این نوشتار از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS برای تحلیل مدل‌ها استفاده شده است. در مدل‌های ساخته‌شده، برای شمع از المان shell با مقطع لوله‌یی و برای خاک از المان solid استفاده شده است. برای خاک از مدل رفتاری موهر - کلمب به دلیل سادگی و پاسخ نسبتاً مناسبی که در خاک ماسه ارائه می‌دهد، استفاده شده است. مرزهای مدل نیز به اندازه‌ی کافی دور انتخاب شده‌اند، تا تأثیری در پاسخ سیستم نداشته باشند. شکل ۱، هندسه‌ی لایه‌ی خاک و شمع - ستون را به همراه مش‌بندی آن نشان می‌دهد.

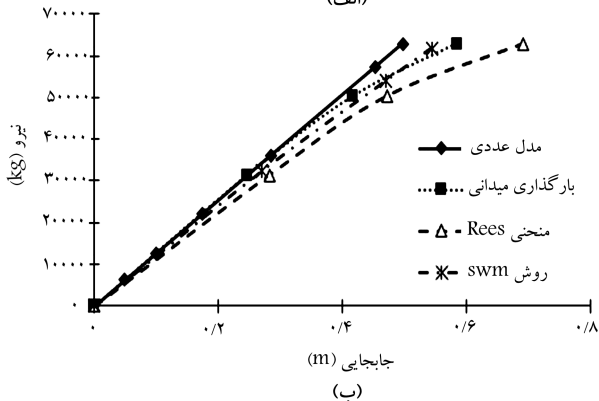
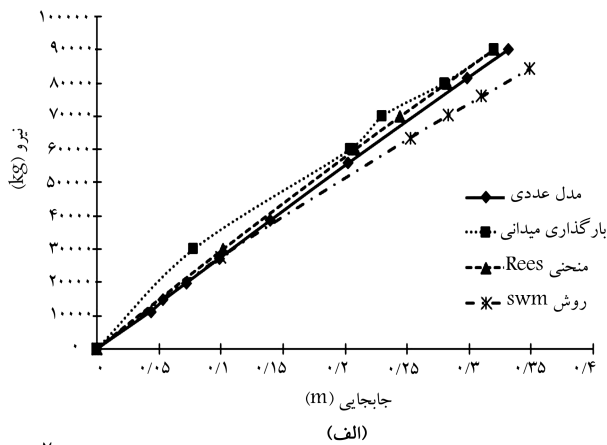
در فرایند مدل‌سازی، ابتدا المان‌های لایه‌ی خاکی ایجاد و تحلیل شده‌اند تا تنش‌های برجا تولید شوند. سپس جابه‌جایی‌ها صفر شده است، تا پاسخ سیستم فقط در برابر بارگذاری شمع - ستون بررسی شود. در ادامه، شمع - ستون ایجاد و به‌صورت افقی بارگذاری شده است. عمل بارگذاری به‌صورت مرحله‌یی و در چند گام در بالای ستون اعمال و جابه‌جایی حاصل، تعیین شده است. در تحلیل‌ها، پارامترهای دخیل در رفتار سیستم مانند: سختی خمشی شمع ( $EI/L$ )، طول آزاد ( $H$ ) و طول مدفون شمع - ستون ( $L$ )، و همچنین قطر آن مورد بررسی قرار گرفته است. اثر مقاومت خاک نیز در دو حالت خاک ماسه‌یی سست و متراکم در نظر گرفته شده است.

### ۴. صحت‌سنجی مدل

برای صحت‌سنجی مدل تحلیلی از نتایج بارگذاری میدانی دو عدد شمع - ستون، که در بندر پارس عسلویه تحت آزمایش قرار گرفته‌اند، استفاده شده است. مشخصات ژئوتکنیکی خاک محل براساس توصیف نمونه‌های دست‌خورده و کارهای آزمایشگاهی آنها به‌دست آمده است، که در جدول ۱ ارائه شده است.<sup>[۱۴]</sup> مشخصات شمع - ستون‌ها شامل ویژگی فولاد و ابعاد هندسی آن که در این پژوهش استفاده شده است، در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.<sup>[۱۵]</sup> شمع ۱ از اسکله‌ی ۵، به طول آزاد  $m$



شکل ۱. هندسه‌ی مدل ساخته‌شده.



شکل ۲. نمودار صحت‌سنجی مدل عددی و بارگذاری میدانی و منحنی  $p - y$ .

لایه‌بندی، آزمایش میدانی، و مدل‌سازی عددی است؛ با وجود این، مدل عددی از روش‌های دیگر بهتر عمل کرده است. این موضوع دقت قابل قبول مدل عددی را نشان می‌دهد، هر چند صحت‌سنجی در محدوده‌ی رفتارکشسان انجام شده و شمع به حالت خمیری نرسیده است.

روش‌های  $p - y$  نیز انطباق خوبی با آزمایش میدانی نشان داده‌اند، ولی یادآور می‌شود که این نمودارها پس از کالیبره‌کردن رسم شده‌اند، یعنی روش‌های مذکور خطای بیشتری دارند و باید با مدل‌های معتبر کالیبره شوند، اما مدل المان محدود بدون کالیبره‌کردن، خطای بسیار کمی دارد. شکل ۳ نیز به‌عنوان نمونه، تغییرشکل افقی یکی از مدل‌های عددی را نشان می‌دهد.

در تحلیل دیگری، یک ستون طره با مقطع لوله‌یی به طول ۱۹ m و قطر ۱

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی محل [۱۴]

توصیف لایه	ماسه‌ی کر بنانه	شن و ماسه‌ی کر بنانه	ماسه‌سنگ کر بنانه
عمق لایه (m)	۸ - ۰	۲۱ - ۸	۲۱ - ۳۰
طبقه‌بندی	SP	GP	-
میزان تراکم	متراکم	متراکم	خیلی ضعیف تا ضعیف
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	۱٫۷	۱٫۹۵	۱٫۸
$\gamma_t$ ( $t/m^3$ )	۲	۲٫۱	۲٫۱
$N_{spt}$	$> 50$	$> 50$	-
$\Phi'$ ( $^\circ$ )	۳۸	۴۰	-
PI (%)	NPI	NPI	-
$v$	۰٫۳۷	۰٫۲۵	۰٫۳
$E_s$ (MPa)	۶۰	۱۲۰	۱۵۰

جدول ۲. مشخصات فولاد شمع - ستون‌ها [۱۴]

فولاد	تنش تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	E (MPa)	$v$	$\gamma$ ( $kN/m^2$ )
St۵۲	۳۶۰	۵۲۰	$2.1 \times 10^5$	۰٫۳	۷۸٫۵
St۶۰	۴۲۰	۶۰۰	$2.1 \times 10^5$	۰٫۳	۷۸٫۵
St۷۰	۴۹۰	۷۰۰	$2.1 \times 10^5$	۰٫۳	۷۸٫۵

۲ و طول مدفون ۱۴ m و شمع ۴ از اسکله‌ی ۱۵ با طول آزاد ۳۱ m و طول مدفون ۱۷ m به‌صورت افقی در قسمت سر آزاد تحت بارگذاری افقی قرار گرفته است. شرایط انجام آزمایش توسط پژوهشگران ارائه شده است. [۱۵] این تذکر لازم است که شمع‌های موردنظر، با مقطع متغیر در طول آن هستند، که مطابق با توصیف آن توسط پژوهشگران مذکور در نظر گرفته شده است.

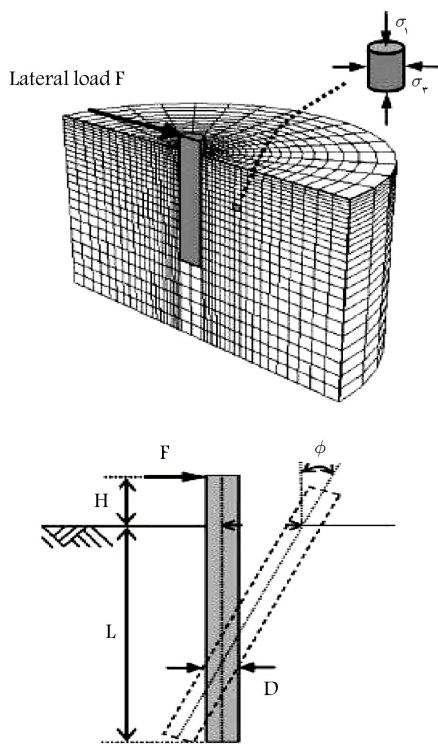
نتایج صحت‌سنجی به‌صورت رفتار شمع - ستون براساس نتایج مدل عددی و منحنی‌های  $p - y$  در کنار نتایج آزمایش‌های میدانی در شکل ۲ نشان داده شده است. به‌عنوان نمونه، شکل ۲ الف نشان می‌دهد که شمع ۱ تحت بار ۹۰ ton در آزمون میدانی ۳۲ cm و در مدل عددی ۳۳ cm جابه‌جا شده است. همچنین شکل ۲ ب نشان می‌دهد که شمع ۴، تحت بار ۶۲٫۸ ton در آزمون میدانی ۵۸ cm و در مدل عددی ۵۰ cm جابه‌جا شده است. در انتهای نمودار دوم، کمی اختلاف زیاد است. مسلماً این اختلاف ناشی از خطاهایی در تعیین مشخصات ژئوتکنیکی،

جدول ۳. مشخصات هندسی شمع - ستون‌های استفاده‌شده جهت صحت‌سنجی [۱۵]

شمع چهار (اسکله‌ی ۱۵)				شمع یک (اسکله‌ی ۱۵)			
مقطع	نوع فولاد	قطر بیرونی (m)	ضخامت (mm)	مقطع	نوع فولاد	قطر بیرونی (m)	ضخامت (mm)
۱	St۵۲	۱٫۹۰۵	۲۵٫۴	۱	St۵۲	۱٫۷۷۸	۲۵٫۴
۲	St۶۰	۱٫۹۰۵	۲۵٫۴	۲	St۶۰	۱٫۷۷۸	۲۵٫۴
۳	St۷۰	۱٫۹۰۵	۲۸٫۵۸	۳	St۷۰	۱٫۷۷۸	۲۸٫۵۸
۴	St۷۰	۱٫۹۰۵	۳۱٫۷۵	۴	St۷۰	۱٫۷۷۸	۳۱٫۷۵
۵	St۷۰	۱٫۹۰۵	۳۴٫۹۳	۵	St۷۰	۱٫۷۷۸	۳۴٫۹۳
۶	St۷۰	۱٫۹۰۵	۴۴٫۴۵	-	-	-	-
۷	St۷۰	۱٫۹۰۵	۴۱٫۲۸	-	-	-	-

جدول ۴. خصوصیات خاک مورد استفاده در تحلیل.

نوع خاک	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	C (kPa)	$\Phi$ (درجه)	$\nu$
ماسه‌ی سست	۱۷	۱۵	۱۰	۲۵	۰٫۳
ماسه‌ی نیمه‌متراکم	۱۹	۳۲	۱۰	۳۲	۰٫۳
ماسه‌ی متراکم	۲۱	۵۰	۱۰	۴۰	۰٫۳



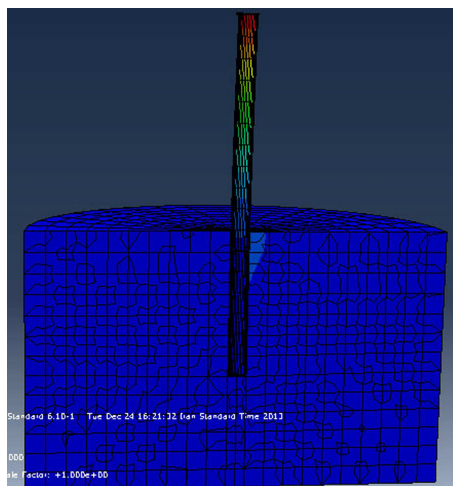
شکل ۵. شمای کلی از شمع - ستون‌های تحلیل شده.

(D) با قطرهای ۰٫۵ و ۲ متری ساخته شده‌اند. نتایج به صورت نمودارهای مناسب نرمالیزه شده‌اند. همان‌طور که قبلاً بیان شده است، از مزایای روش عددی نسبت به روش‌های دیگر (منحنی‌های  $p - \gamma$  و روش SWM) این است که می‌توان توزیع تنش در خاک یا شمع را که پارامتری بسیار مهم در طراحی شمع - ستون است، به دست آورد. در تمامی مدل‌های ساخته شده، ضخامت شمع - ستون‌ها ثابت و برابر ۲ cm لحاظ شده است. جدول ۴، خصوصیات خاک مورد استفاده در تحلیل‌های عددی را نشان می‌دهد. در این مرحله از یک نوع فولاد (st52) با این مشخصات  $E = 210 \text{ GPa}$  و  $\nu = 0.3$ ،  $\gamma = 785 \text{ N/m}^3$ ،  $F_y = 360 \text{ MN/m}^2$  استفاده شده است.

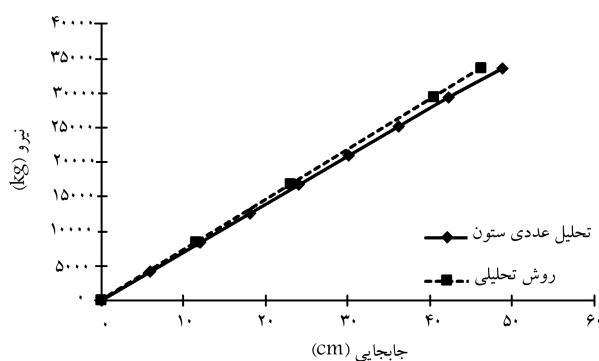
شکل ۵، شمای کلی از مدل شمع - ستون ساخته شده در نرم‌افزار را به همراه پارامترهای مورد استفاده در تحلیل‌ها را نشان می‌دهد.

## ۶. نتایج آزمایش

نتایج حاصل در این پژوهش فقط برای شمع - ستون‌های با انتهای آزاد است و شرایط مرزی دیگر، مثلاً انتهای گیردار، منجر به رفتار دیگری خواهد شد. به دلیل تشابه رفتاری در مدل‌های مختلف و راحتی تشریح موضوع، تعدادی از مدل‌ها انتخاب



شکل ۳. تغییر شکل جانبی شمع در مدل عددی.



شکل ۴. مقایسه‌ی رفتار بار- جابه‌جایی جانبی حاصل از دو روش عددی و تحلیلی.

با تکیه‌گاه گیردار تحت بار افقی به صورت عددی مدل‌سازی شده و نتیجه‌ی آن با روابط مستقیم تحلیل سازه (رابطه‌ی ۱) مقایسه شده است. شکل ۴، مقایسه‌ی رفتار بار و جابه‌جایی جانبی حاصل از دو روش را نشان می‌دهد. شکل مذکور نشان می‌دهد که مدل عددی دقت بسیار خوبی دارد. نکته‌ی قابل ذکر در مورد شکل ۴ این است که مقدار جابه‌جایی حاصل از مدل عددی به خاطر اثر توأم خمش و برش، بیشتر از روش تحلیل ریاضی استفاده شده است، که در آن فقط جابه‌جایی حاصل از خمش تعیین شده است.

$$\Delta = PL^3 / 3EI, \quad I = \pi r^4 t, \quad r = 0.5 \text{ m}, \quad t = 0.2 \text{ m},$$

$$E = 210 \text{ GPa}, \quad L = 19 \text{ m} \quad (1)$$

## ۵. آنالیزهای انجام شده

در این مرحله شمع - ستون‌هایی با قطر ۱ m با شرایط مختلف در خاک ماسه‌ی تحت بار استاتیکی جانبی مدل شده‌اند. برای این کار ابتدا شمع - ستون‌هایی با سه طول آزاد ۵، ۱۰ و ۱۵ متر و هر کدام در ۵ عمق مدفون مختلف ۵، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری در خاک ماسه‌ی سست مدل شده‌اند. یعنی در مجموع ۱۵ مدل در این شرایط ساخته و تحلیل شده‌اند. سپس همین ۱۵ مدل در خاک ماسه‌ی متراکم تکرار شده است. نتایج به صورت نمودارهای بار - جابه‌جایی انتهای آزاد شمع (بالای ستون) ثبت شده است. در ادامه، مدل‌های دیگری برای بررسی اثر قطر شمع - ستون

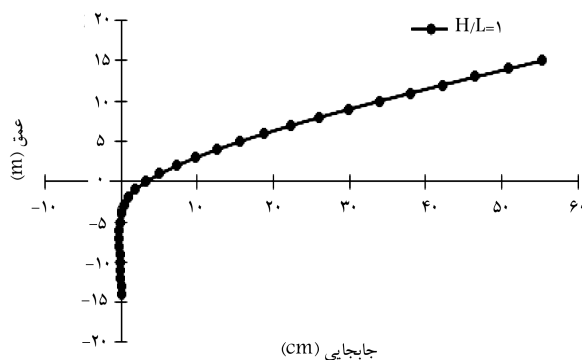
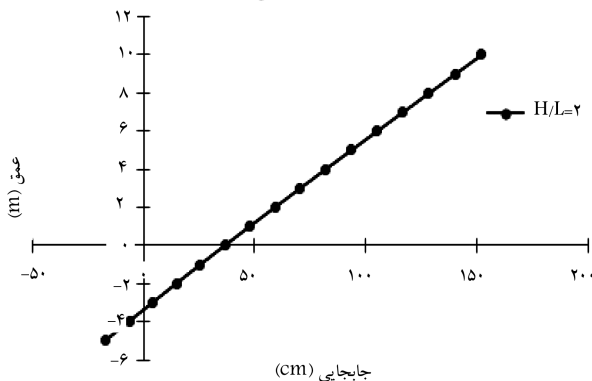
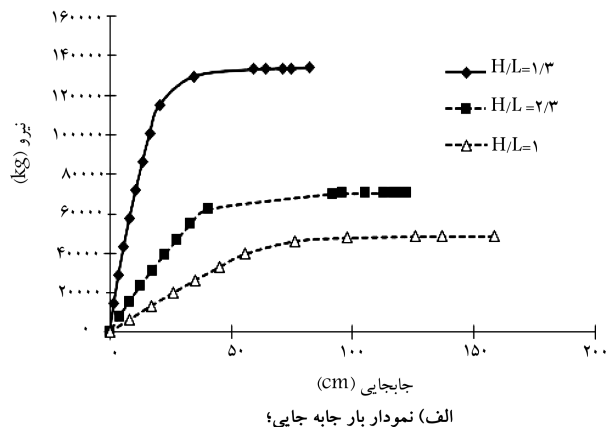
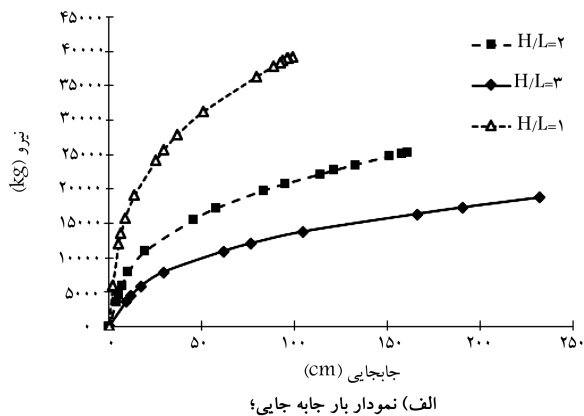
از تحلیل‌های انجام شده مشخص می‌شود که قطر و ضخامت (ممان اینرسی) شمع، طول‌های آزاد و مدفون و نوع خاک در رفتار شمع - ستون‌ها از نظر میزان صلبیت یا انعطاف‌پذیری مؤثر است؛ به نوعی که هر چقدر نسبت طول آزاد به طول مدفون و قطر شمع - ستون بیشتر شود، رفتار آن صلب‌تر می‌شود. همچنین هر چه خاک متراکم شود، مقاومت غیر فعال بیشتری از خود نشان می‌دهد و در نتیجه مانع از چرخش شمع می‌شود. خاک ضعیف به دلیل مقاومت غیر فعال کم، اجازه‌ی چرخش بیشتری به سازه می‌دهد.

در هر مدل عمقی را می‌توان پیدا کرد، که اگر طول مدفون شمع از آن کمتر باشد، شمع - ستون عمده‌تاً دچار چرخش می‌شود و رفتار صلب پیدا می‌کند، که آن را به عنوان عمق بحرانی معرفی می‌کنیم ( $y_{cr}$ ). نتیجه‌ی مهمی که از این نکته حاصل می‌شود، این است که هر چه عمق مدفون را بیشتر از عمق بحرانی در نظر بگیریم، ظرفیت باربری شمع - ستون ثابت خواهد ماند؛ به عبارتی، افزایش عمق مدفون تأثیر چندانی در باربری جانبی شمع - ستون ندارد و فقط از لحاظ اقتصادی هزینه‌بر خواهد بود، برای ملاحظه‌ی این نکته، به شکل ۸ که در ماسه‌ی متراکم و سُست، برای طول آزاد ۱ m با عمق‌های مدفون متفاوت رسم شده است، توجه شود.

مطابق شکل ۸، در هر دو نوع ماسه بعد از عمق بحرانی با افزایش عمق مدفون، نمودارها بر هم منطبق شده‌اند و این بدین معناست که بعد از عمق بحرانی ظرفیت باربری ثابت است. با افزایش قطر عمق بحرانی نیز بیشتر شده است. شکل ۹، رفتار شمع - ستون را برای شمع به قطر ۲ m در ماسه‌ی متراکم نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور، با افزایش قطر شمع از ۱ m به ۲ m، عمق بحرانی از ۷ m به بیش از ۱۰ m افزایش یافته است.

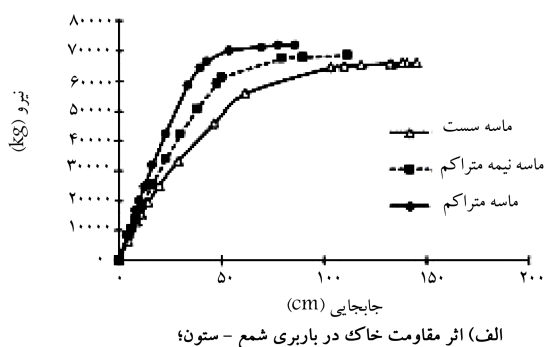
و بررسی شده‌اند. شکل ۶ الف، رفتار شمع - ستون با طول مدفون  $L = 15$  m و با طول‌های آزاد ۵، ۱۰ و ۱۵ متر در ماسه‌ی متراکم است، همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش طول آزاد شمع - ستون، ظرفیت باربری شمع - ستون کاهش یافته و سختی جانبی آن کم شده است. دیاگرام نیروهای داخلی شمع - ستون نشان می‌دهد که با افزایش طول آزاد، لنگر خمشی افزایش زیادی یافته و سازه‌ی شمع - ستون زودتر به جاری‌شدگی رسیده است، لذا رفتار نرم‌تری پیدا کرده و تحت نیروهای کمتری تسلیم شده و سازه‌ی شمع - ستون به گسیختگی رسیده است. به عبارت دیگر، افزایش طول آزاد شمع - ستون منجر به انعطاف‌پذیری آن می‌شود.

شکل ۶ ب، جابه‌جایی شمع با طول آزاد و مدفون ۱۵ m را در محدوده‌ی کشسان نشان می‌دهد. روند تغییرات جابه‌جایی در شکل ذکر شده حاکی از آن است که خود سازه‌ی شمع - ستون در حین بارگذاری تغییرشکل قابل توجهی داده و عمده‌ی جابه‌جایی‌ها در طول آزاد شمع - ستون اتفاق افتاده است. به عبارت دیگر، شمع - ستون انعطاف‌پذیر بوده و رفتار آن بیشتر تحت تأثیر سازه بوده است تا خاک. شکل ۷ الف، رفتار شمع - ستون با طول مدفون ۵ متر و طول آزاد ۵، ۱۰ و ۱۵ متر را در ماسه‌ی متراکم نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، رفتار بار - جابه‌جایی سیستم عمده‌تاً به صورت غیرخطی است. همچنین با افزایش طول آزاد ظرفیت باربری شمع - ستون کاهش می‌یابد. شکل ۷ ب، جابه‌جایی شمع - ستون با طول آزاد ۱۰ m و طول مدفون ۵ m را نشان می‌دهد، که در این حالت جابه‌جایی شمع - ستون بیشتر به صورت دورانی است. به عبارت دیگر، شمع - ستون به صورت صلب رفتار کرده است. لذا هر چه عمق مدفون کمتر و طول آزاد بیشتر باشد، رفتار غالب سیستم را خاک تعیین می‌کند.

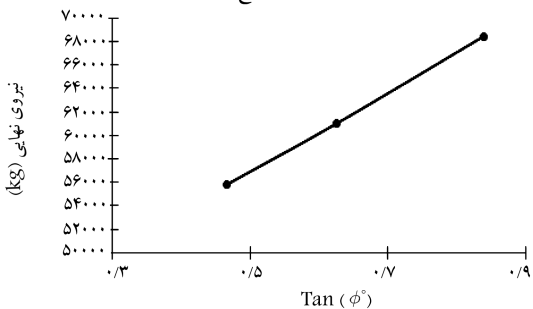


شکل ۷. رفتار شمع - ستون با طول مدفون ۵ متر در ماسه‌ی سُست.

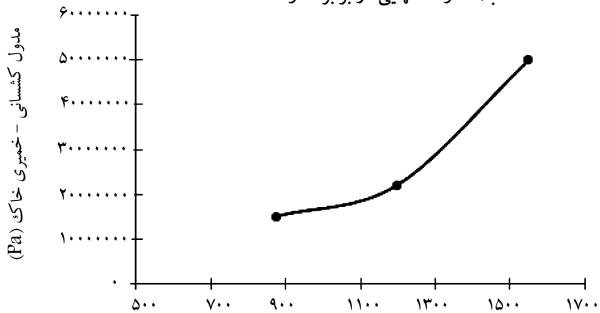
شکل ۶. رفتار شمع - ستون با طول مدفون ۱۵ متر در ماسه‌ی متراکم.



الف) اثر مقاومت خاک در باربری شمع - ستون؛



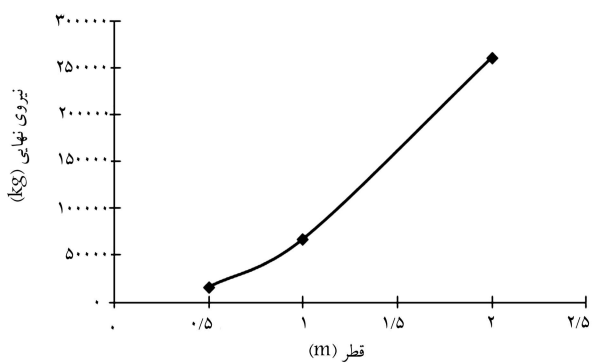
ب) مقاومت نهایی در برابر مقاومت خاک؛



ج) سختی خمشی شمع ستون (kg/cm)

د) سختی شمع - ستون در مقابل مدول خاک.

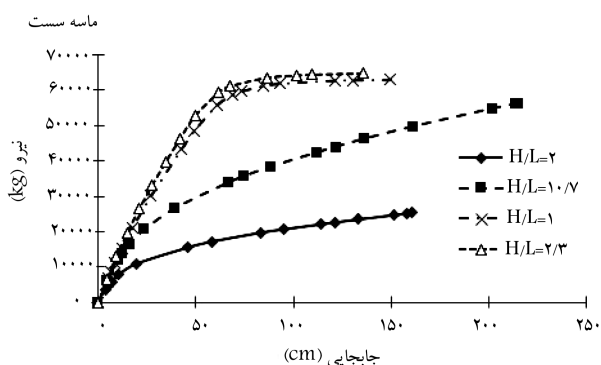
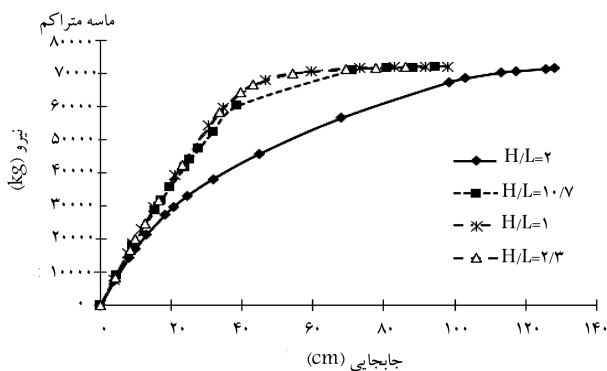
شکل ۱۰. اثر مشخصات خاک بر روی پاسخ شمع.



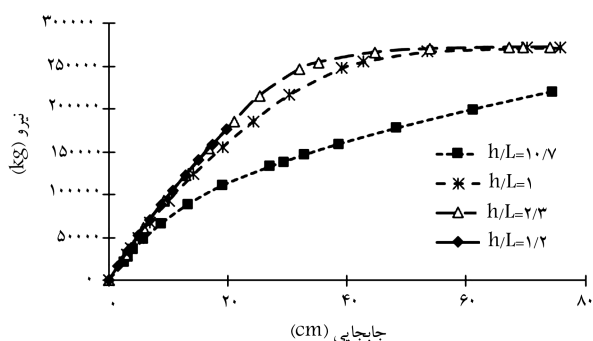
شکل ۱۱. اثر قطر شمع در مقاومت تسلیم شمع - ستون.

مذکور، سختی شمع - ستون واقع در داخل خاک با نرخ بیشتری نسبت به نمو مدول کشسانی خاک افزایش می‌یابد، به دلیل اینکه سختی سیستم متأثر از سختی سازه‌ی شمع - ستون (فولاد) نیز است.

شکل ۱۱، نیز اثر افزایش قطر شمع - ستون را در مقاومت تسلیم (انتهای حد خطی) نشان می‌دهد، که مطابق آن با افزایش قطر شمع - ستون، مقاومت تسلیم آن به صورت غیرخطی و با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد. برای مثال افزایش ۲ برابری



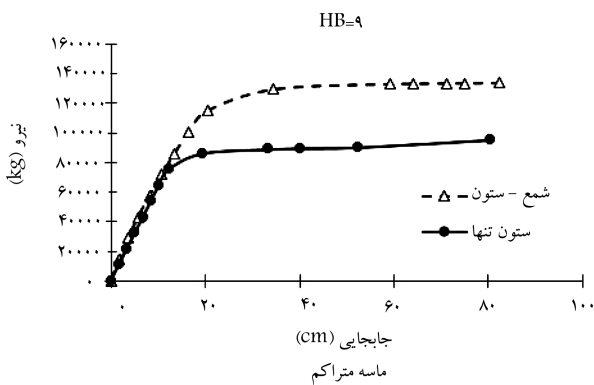
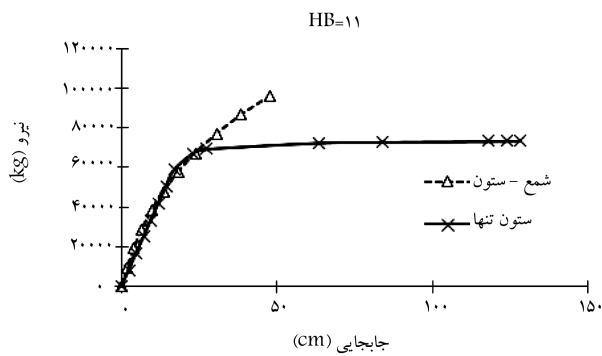
شکل ۸. ملاحظه‌ی مفهوم عمق بحرانی در دو ماسه‌ی متراکم و سست برای طول آزاد ۱۰ m.



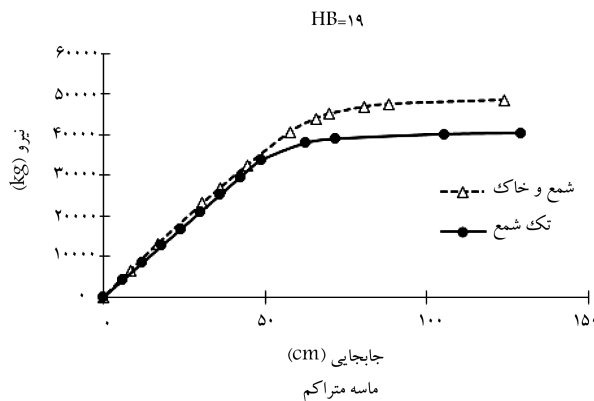
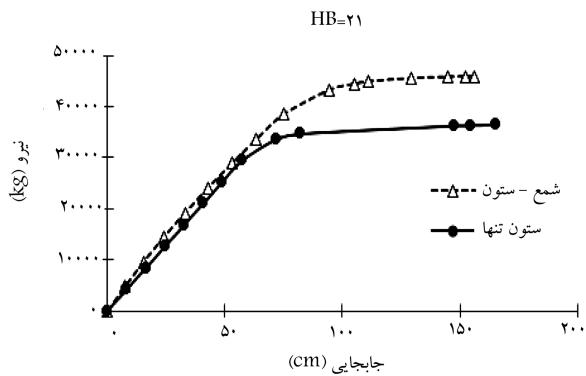
شکل ۹. منحنی بار - جابه‌جایی شمع - ستون با قطر ۲ متر در ماسه‌ی متراکم.

از عوامل مؤثر دیگر در ظرفیت باربری جانبی شمع - ستون، قطر آن است. با افزایش قطر ممان اینرسی و در نتیجه ظرفیت خمشی افزایش می‌یابد. مقاومت خاک نیز در نیروی غیر فعال و فعال اثر گذاشته و افزایش آن موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش جابه‌جایی شمع - ستون می‌شود. شکل ۱۰ الف، اثر مقاومت خاک را در رفتار بار - جابه‌جایی شمع - ستونی با طول آزاد و مدفون ۱۰ متر نشان می‌دهد. شکل مذکور مؤید این مطلب است که افزایش مقاومت خاک موجب افزایش باربری جانبی شمع - ستون و کاهش تغییرشکل انتهای آزاد شده شمع است.

شکل ۱۰ ب، ارتباط مقاومت نهایی شمع - ستون را با مقاومت خاک ( $\tan(\phi)$ ) نشان می‌دهد، که مطابق آن یک ارتباط خطی بین دو پارامتر مذکور حاکم است. به عبارت دیگر، در مدل حاضر مقاومت سیستم متأثر از گسیختگی خاک است. شکل ۱۰، نیز ارتباط بین شیب بخش خطی رفتار بار - جابه‌جایی شمع ستون (سختی سیستم) را در مقابل مدول کشسانی خاک نشان می‌دهد. با توجه به شکل



شکل ۱۲. مقایسه‌ی رفتار بار - جابه‌جایی شمع - ستون مدفون در خاک با ستون تنه‌ای پای گیردار برای طول آزاد ۵ m و طول مدفون ۱۵ m.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی رفتار بار - جابه‌جایی شمع - ستون مدفون در خاک با ستون تنه‌ای پای گیردار برای طول آزاد ۱۵ m و طول مدفون ۱۰ m.

در قطر شمع - ستون منجر به افزایش حدوداً ۴ برابری مقاومت شمع - ستون شده است. البته شکل مذکور برای شمع انعطاف‌پذیر رسم شده است، لذا در حالت شمع انعطاف‌پذیر، اثر قطر شمع - ستون بیشتر از خاک است، ولی مطالعات نشان داده است که در شمع - ستون صلب، اثر خاک در قطر برتری دارد.

## ۷. عمق گیرداری

معمولاً برای تعیین عمق گیرداری، این روش توصیه می‌شود که مقداری از طول شمع به طول ستون اضافه و انتهای آن به صورت یک تکیه‌گاه گیردار لحاظ شود. به این اضافه مقدار، عمق گیرداری اطلاق می‌شود. این مقدار به اندازه‌ی ۶ تا ۱۰ برابر قطر پیشنهاد شده است. [۱۶]

طی بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش مشخص شده است که طول ذکرشده بستگی به نوع خاک دارد و فقط در شمع‌های انعطاف‌پذیر کاربرد دارد. به عبارت دیگر، این روش در شمع صلب منجر به خطای بسیاری می‌شود. همچنین این روش فقط در ناحیه‌ی رفتار کشسان شمع - ستون قابل قبول است.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نمونه‌هایی از تطابق نمودار بار - جابه‌جایی ستون مفروض با تکیه‌گاه گیردار را در بهترین حالت تطابق با نمونه‌ی کامل شمع - ستون به همراه خاک نشان می‌دهند. که در آنها: H طول آزاد، L طول مدفون شمع - ستون و  $H_b$  عمق بهینه‌ی ستون پای گیردار است.

بررسی‌ها نشان داده است که عمق بهینه‌ی گیرداری تقریباً در محل جابه‌جایی صفر ( $y_0$ ) در طول شمع حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، طول مؤثر ستون با پای گیردار معادل برابر است با طول آزاد شمع - ستون به اضافه‌ی طولی از شمع که جابه‌جایی افقی آن صفر ( $y_0$ ) است (رابطه‌ی ۲):

$$H_b = H + y_0 \quad (2)$$

برای نمونه، جدول ۵ عمق نظیر جابه‌جایی صفر و طول مؤثر ستون با پای گیردار را برای شمع - ستون با قطر ۱ m و طول مدفون  $L = 10$  m و طول‌های آزاد ۵، ۱۰ و ۱۵ متر را در دو ماسه‌ی سست و متراکم نشان می‌دهد. مطابق جدول مذکور، با متراکم شدن خاک، عمق نظیر جابه‌جایی صفر نیز کمتر می‌شود. از طرفی دیگر، در خاک ماسه‌ی متراکم با افزایش طول آزاد این عمق کاهش می‌یابد، ولی در خاک ماسه‌ی سست روند خاصی مشاهده نمی‌شود. با نتایج به‌دست‌آمده ملاحظه می‌شود که فرض عمق ۶ الی ۱۰ برابر قطر به‌عنوان عمق گیرداری، در خاک سست می‌تواند تقریباً درست باشد، ولی در خاک متراکم کمتر از این مقدار خواهد بود.

جدول ۵. طول مؤثر ستون پای گیردار را برای شمع - ستون با طول مدفون  $L = 10$  m.

ماسه‌ی متراکم		ماسه‌ی سست			
طول آزاد	$y_0$	$H_b$	طول آزاد	$y_0$	$H_b$
(m)			(m)		
۵	۴٫۵	۹	۵	۶٫۵	۱۱
۱۰	۴٫۳	۱۴	۱۰	۶	۱۶
۱۵	۴	۱۹	۱۵	۶٫۲	۲۱

## ۸. نتیجه‌گیری

در این نوشتار رفتار بار - جابه‌جایی سازه‌ی شمع - ستون که اغلب به عنوان پایه‌ی اسکله‌ها، پل‌ها، تابلوها و توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تحت بار جانبی استاتیکی بررسی شده است. اهم نتایج حاصل از صحت‌سنجی، بررسی عوامل مؤثر در باربری جانبی و مقایسه‌ی رفتار سیستم سازه - خاک با رفتار یک ستون طریبی تحت بار جانبی به این صورت است:

۱. هر چند صحت‌سنجی در محدوده‌ی رفتار کشسان خاک و شمع - ستون انجام شده است، ولی نتایج مدل تطابق بسیار خوبی با آزمایش‌های میدانی و منحنی‌های  $p - y$  کالیبره‌شده نشان داده است. همچنین مدل عددی یک ستون تحت بار جانبی انطباق بسیار خوبی با روش تحلیلی از خود نشان داده است.

۲. نسبت طول آزاد به طول مدفون سازه‌ی شمع - ستون سبب دو نوع رفتار متفاوت می‌شود. بدین ترتیب که هر چقدر این نسبت افزایش یابد، رفتار صلب‌تر و هر چقدر کاهش یابد، رفتار انعطاف‌پذیرتر خواهد بود. ارتباط بار - جابه‌جایی شمع - ستون در حالت صلب بیشتر تابع خاک و از همان ابتدا غیرخطی بوده است.

ولی در شمع انعطاف‌پذیر، تابع سازه است و ابتدا یک بخش خطی و سپس غیرخطی خواهد داشت. تحت شرایط یکسان، هر چقدر قطر شمع افزایش یابد، میزان صلبیت شمع - ستون نیز افزایش می‌یابد. همچنین هر چقدر مقاومت خاک افزایش یابد، صلبیت سازه کاهش می‌یابد. ولی عامل نسبت طول آزاد به مدفون، تأثیرگذاری بیشتری دارد.

۳. با افزایش طول مدفون، مقاومت خاک و قطر شمع - ستون، ظرفیت باربری شمع - ستون نیز افزایش می‌یابد. ولی در هر شرایط عمق مدفونی به نام عمق بحرانی وجود دارد، که بعد از آن افزایش طول مدفون تأثیری در ظرفیت باربری افقی ندارد. این عمق بستگی به پارامترهای طول آزاد و قطر شمع - ستون و مقاومت خاک دارد.

۴. برای اینکه بتوان به جای سیستم خاک و شمع - ستون، یک ستون پای‌گیردار با طول معادل جایگزین کرد و اندرکنش خاک و سازه را انجام نداد، باید بخشی از طول مدفون با نام عمق گیرداری به طول آزاد اضافه شود. این عمق بستگی به طول آزاد و قطر شمع - ستون و مقاومت خاک دارد. بدین ترتیب که در خاک ماسه‌بی متراکم، هر چقدر طول آزاد افزایش یابد، عمق گیرداری نیز افزایش می‌یابد، ولی در خاک ماسه‌بی سست روند خاصی ملاحظه نشده است.

## پانویس

1. passive

## منابع (References)

- Randolph, M.F. "The response of flexible piles to lateral loading", *Geotechnique*, **31**(2), pp. 247-259 (1981).
- Matlock, H. and Reese, L.C. "Generalized solutions for laterally loaded piles", *J. Soil Mech. Found. Div.*, **86**(5), pp. 63-91 (1960).
- Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. "Analysis of laterally loaded piles in sand", *6th Annual Offshore Technology Conf.* (1974).
- O'Neill, M. and Murchison, J., *An Evaluation of p - y Relationship in Sands*, Report GTDF02-83, Department of Civil Eng., University of Huston (May 1983).
- Lesny, K., Paikowsky, S.G. and Gurbuz, A. "Scale effects in lateral load response of large diameter monopoles", *Conference Geo-Denver 2007: New Peaks in Geotechnics*, Colorado (2007).
- Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. "Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay", *In: Proceedings of 7th Offshore Technology Conference*, Richardson, TX, Paper No. 2312, pp. 671-690 (1975).
- Kim, Y., Jeong, S. and Lee, S. "Wedge failure analysis of soil resistance on laterally loaded piles in clay", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **137**(7), pp. 678-694 (2011).
- Norris, G. "Theoretically based BEF laterally loaded pile analysis", *In: Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, Paris, France, pp. 361-386 (1986).
- Ashour, M., Norris, G. and Pilling, P. "Lateral loading of a pile in layered soil using the strain wedge model", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **124**(4), pp. 303-315 (1998).
- Brown, D.A. and Shie, C.F. "Some numerical experiments with a three dimensional finite element model of a laterally loaded pile", *Comput. Geotech.*, **12**(2), pp. 149-162 (1991).
- Fan, C.C. and Long, J.H. "Assessment of existing methods for predicting soil response of laterally loaded piles in sand", *Comput. Geotech.*, **32**(4), pp. 274-289 (2005).
- Chik, Z.H., Abbas, J.M. and Taha, M.R. "Shafiqu QSM. lateral behavior of single pile in cohesionless soil subjected to both vertical and horizontal loads", *Eur. J. Sci. Res.*, **29**, pp. 194-205 (2009).
- Kim, Y. and Jeong, S. "Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction", *Comput. Geotech.*, **38**(2) pp. 248-257 (2011).
- Seifi, H. and Fakher, A. "lateral behaviour of monopoles in pars port", *9th Marine Industry Conf.* (1988).
- Hokmabadi, A.S., Fakher, A. and Fatahi, B. "Full scale lateral behaviour of monopiles in granular marine soils", *Marine Structures*, **29**(1), pp. 198-210 (2012).
- Asgarian, B. and Lesani, M. "Pile-soil-structure interaction in pushover analysis of jacket offshore platforms using fiber elements", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(1), pp. 209-218 (2009).