



مرکز بررسی‌ها و مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



# کاربرد فن آوری گریز از مرکز در مهندسی دریا و سواحل

محمد کاظم جعفری

استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک

موسسه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

آرش رزم‌خواه

دانشجوی دکتری مهندسی عمران و همکار پژوهشی

موسسه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

## چکیده:

در دو دهه اخیر، کاربرد فن آوری گریز از مرکز در عرصه‌های مختلف علوم و مهندسی با شتاب فزاینده‌ای توسعه یافته است. اساساً هدف از انجام آزمایشات بر روی مدل‌های فیزیکی در عرصه مهندسی، پیش‌بینی رفتار نمونه واقعی (Prototype)، تحقیق در مورد اعتبار یک تئوری و یا یک روش تحلیل، ارزیابی خصوصیات مهندسی مصالح، یافتن ساز و کارهای جدید مهندسی و همچنین مقاصد آموزشی است. در مهندسی ژئوتکنیک، تنش‌های ناشی از نیروهای حجمی خاک (Body Forces) معمولاً بخش قابل ملاحظه‌ای از تنش‌های کل را تشکیل می‌دهند و علاوه بر آن خصوصیات مکانیکی خاک نیز بشدت وابسته به تنش هستند. بنابراین انجام آزمایشات بر روی مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس که در معرض حوزه شتاب ثقل عادی زمین (g-1) قرار دارند به درستی قادر نخواهند بود که رفتار نمونه واقعی را مدلسازی کنند و مقدار تنش‌های ناشی از وزن (یا در واقع نیروهای حجمی)، در چنین مدلی بسیار کمتر از نمونه واقعی تولید خواهند گردید. انجام آزمایش با فن آوری گریز از مرکز این امکان را فراهم می‌آورد تا با یک مدل فیزیکی مقیاس شده، همان تنش‌های موجود در نمونه واقعی بطور کامل مدلسازی شوند و رفتار نمونه واقعی با توجه به نتایج حاصله از آزمایش گریز از مرکز و استفاده از قوانین مقیاس، بدرستی پیش‌بینی و تعیین گردد. طبیعت بسیاری از مسایل ژئوتکنیکی در نواحی ساحلی و فراساحلی و نیز بیچیدگی بارگذاریها و اندرکنش‌های سازه‌ای، اهمیت کاربرد روشهای تجربی و مدلسازی فیزیکی، علی‌الخصوص آزمایشات گریز از مرکز، را آشکار می‌سازد. در این مقاله ضمن مروری مختصر بر اصول پایه و اساسی انجام آزمایشات گریز از مرکز و روابط مقیاس مورد نیاز، مهمترین یافته‌های منتشر شده در زمینه‌های مختلف ژئوتکنیک دریایی که با استفاده از این فن آوری مورد بررسی قرار گرفته‌اند ارائه می‌گردند. در خاتمه به فعالیتهای انجام گرفته در موسسه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله در زمینه استقرار آزمایشگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی مورد اشاره قرار می‌گیرد.

## ۱- مقدمه

امروزه آزمایشات گریز از مرکز بعنوان یک ابزار کلیدی در دسترس مهندسان ژئوتکنیک هستند چرا که با استفاده از این فن آوری، مسائل طراحی با استفاده از مصالح اصلی و در شرایط تنش واقعی مدلسازی می‌شوند. مدلسازی فیزیکی نقش عمده‌ای را در مهندسی ژئوتکنیک ایفا می‌نماید. در این مدلسازی، یک پدیده که امکان وقوع و وجود آن در نمونه با ابعاد واقعی وجود داشته باشد شبیه سازی می‌گردد. غالباً مدل با یک مقیاس هندسی کاهش یافته نسبت به ابعاد واقعی ساخته می‌شود و این موضوع بعنوان یک اصل اساسی در مدلسازی گریز از مرکز نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر دو پدیده (پدیده مدل شده و پدیده رخ داده در نمونه با ابعاد واقعی) بایستی مشابه یکدیگر باشند و این تشابه نیازمند آن است که توسط روابط مقیاس مناسب به یکدیگر ارتباط داده شوند.

در یک آزمایش گریز از مرکز، مدل‌های خاک قرار داده شده در انتهای یک بازوی دستگاه گریز از مرکز می‌توانند شتاب داده شوند بگونه‌ای که در معرض یک حوزه شتاب اینرسی شعاعی قرار گیرند و به این ترتیب در داخل نمونه، وضعیتی مشابه با شرایط واقعی بوجود آید. خاک قرار گرفته در داخل محفظه مدل (Model Container)، دارای یک سطح آزاد بدون تنش در قسمت فوقانی خود بوده و مقدار تنش در درون توده خاک نسبت به عمق افزایش می‌یابد که نرخ آن به دانسیته خاک و بزرگی حوزه شتاب بستگی دارد. اگر خاک مورد استفاده در مدل، همان خاک مربوط به نمونه در ابعاد واقعی بوده و رویه دقیقی برای آماده سازی نمونه اتخاذ شده باشد، برای مدل گریز از مرکز قرار گرفته در معرض یک حوزه شتاب اینرسی  $N$  برابر ثقل زمین، تنش قائم در عمق  $h_m$  با آنچه که در نمونه با ابعاد واقعی متناظر در عمق  $h_p$  وجود دارد ( $h_p = Nh_m$ ) یکسان خواهد بود. این موضوع در واقع قانون مقیاس اصلی برای مدلسازی گریز از مرکز است که به موجب آن تشابه و همانندی تنش در نقاط متشابه بایستی توسط شتاب دادن یک مدل با مقیاس هندسی کاهش یافته  $N$  به مقدار  $N$  برابر ثقل زمین حاصل گردد. قوانین مقیاس و خطاهای مقیاس، دو موضوع کلیدی در مدلسازی گریز از مرکز محسوب می‌گردند. قوانین مقیاس را می‌توان با استفاده از تحلیل ابعادی و یا از روی معادلات دیفرانسیل حاکم بر پدیده استخراج نمود. غالباً مدلسازی گریز از مرکز به سبب ایجاد خطاهای مقیاس اساسی و عمده ناشی از حوزه شتاب غیر یکنواخت و نیز پیچیدگی شبیه سازی و ایجاد دقیق و مناسب جزئیات نمونه در ابعاد واقعی در یک مدل کوچک مقیاس، مورد انتقاد قرار می‌گیرند.

### ۱-۱- قوانین مقیاس

همانطور که در بخش قبل تشریح گردید قانون مقیاس اصلی با توجه به وجود نیاز به تامین تشابه تنش بین مدل و نمونه در ابعاد واقعی متناظر استخراج می‌شود. اگر شتابی  $N$  برابر ثقل زمین ( $g$ ) به مصالحی با دانسیته  $\rho$  اعمال شود، تنش قائم  $\sigma_v$  در عمق  $h_m$  در مدل (زیر نویس  $m$  نشان‌دهنده مدل است) از این رابطه بدست می‌آید:

$$\sigma_{v_m} = \rho N g h_m \quad (1)$$

در نمونه با ابعاد واقعی (که توسط زیرنویس  $p$  نمایش داده می‌شود) تنش قائم از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\sigma_{v_p} = \rho g h_p \quad (2)$$

بنابراین برای آنکه  $\sigma_{v_m} = \sigma_{v_p}$  برقرار باشد رابطه  $h_m = h_p N$  حاصل می‌شود و ضریب مقیاس (نمونه با ابعاد واقعی: مدل) برای ابعاد خطی برابر  $1:N$  بدست می‌آید. از آنجائیکه مدل، در واقع همان نمونه با ابعاد واقعی مقیاس شده است بنابراین جابجائیها هم ضریب مقیاس برابر  $1:N$  خواهند داشت. همچنین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کرنش دارای ضریب مقیاس  $1:1$  بوده و در نتیجه آن بخش از منحنی تنش-کرنش ایجاد شده در مدل دقیقاً با نمونه در ابعاد واقعی یکسان خواهد بود. با استفاده از دو روش ذکر شده (تحلیل ابعادی و معادلات دیفرانسیل حاکم بر پدیده) می‌توان روابط مقیاس مربوط به مدل‌های گریز از مرکز ژئوتکنیکی را استخراج نمود که این روابط بطور خلاصه در جدول ۱ ذکر گردیده‌اند.

همانگونه که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود برخی روابط مقیاس برای زمان با هم در تناقض هستند. بعنوان مثال در شبیه سازی روانگرایی ماسه تحت بارهای دینامیکی در دستگاه گریز از مرکز، بین مقیاس حرکت دینامیکی ( $1/N$ ) و آنچه که به نفوذ آب منفذی مربوط است ( $1/N^2$ ) تناقض وجود دارد. در چنین مواردی آب منفذی توسط یک مایع ویسکوز، همچون روغن یا مخلوط آب-گلیسرین که دارای ضریب نفوذپذیری مایع ( $1/N$ ) و یا در واقع ویسکوزیته  $N$  برابر آب است، جایگزین می‌شود. یک راه حل دیگر برای فائق آمدن بر این مشکل، کاهش اندازه ذرات است که به کاهش نفوذپذیری می‌انجامد.

حوزه شتاب ثقل زمین برای محدوده عملی از اعماق خاک که در مهندسی عمران با آن مواجه هستیم بطور یکنواخت عمل می‌نماید. هنگامیکه از یک دستگاه گریز از مرکز برای تولید و ایجاد حوزه شتاب بالای مورد نیاز برای مدلسازی فیزیکی استفاده

شود تغییرات مختصر و جزئی در شتاب در درون مدل بوجود می آید. این موضوع از آنجا ناشی می شود که حوزه شتاب اینرسی توسط  $\omega^2$  مشخص می گردد که در این رابطه  $\omega$  سرعت زاویه ای دورانی دستگاه گریز از مرکز و  $z$  شعاع دوران هر جزء در مدل خاک است. اگر در انتخاب شعاعی که در آن ضریب مقیاس  $N$  تعیین می گردد دقت لازمه مبذول شود بر این مشکل نیز می توان فائق آمد و از اهمیت و مقدار آن کاست.

جدول (۱): روابط مقیاس

مدل	نمونه در ابعاد واقعی	کمیت
1	N	طول
1	N <sup>2</sup>	سطح
1	N <sup>3</sup>	حجم
1	1	سرعت
N	1	شتاب
1	N <sup>3</sup>	جرم
1	N <sup>2</sup>	نیرو
1	N <sup>3</sup>	انرژی
1	1	تنش
1	1	کرنش
1	1	دانشیه جرمی
1	1	دانشیه انرژی
1	N	زمان (پدیده های دینامیکی)
1	N <sup>2</sup>	زمان (پدیده های انتشار)
1	1	زمان (خزش)
N	1	فرکانس

توزیع تنش قائم در مدل و در نمونه با ابعاد واقعی متناظر در شکل ۱ نشان داده شده است و این توزیع بطور مستقیم در شکل ۲، که در آن توزیع تنش قائم بر حسب عمق متناظر ترسیم گردیده، با یکدیگر مقایسه شده است (بایستی توجه داشت که تغییرات غیرخطی تنش در مدل در این شکل بطور اغراق آمیز نشان داده شده است). تنش قائم در نمونه با ابعاد واقعی در عمق  $h_p = Nh_m$  از این رابطه بدست می آید:

$$\sigma_{vp} = \rho gh_p = \rho gNh_m \quad (3)$$

ضریب مقیاس  $N$  رابایستی در یک شعاع گریز از مرکز موثر برای مدل ( $R_e$ ) محاسبه نمود بگونه ای که:

$$Ng = R_e \omega^2 \quad (4)$$

اگر شعاع در قسمت فوقانی نمونه را با  $R_1$  نمایش دهیم در آن صورت تنش قائم در عمق  $z$  در مدل را می توان از رابطه زیر تعیین نمود:

$$\sigma_{vm} = \int_0^z \rho \omega^2 (R_1 + z) dz = \rho \omega^2 z (R_1 + \frac{z}{2}) \quad (5)$$

اگر تنش قائم در مدل و در نمونه با ابعاد واقعی در عمق  $z=h_i$  (همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است) یکسان باشند آنگاه با توجه به معادلات (۳)، (۴) و (۵) می توان نشان داد که:

$$R_e = R_t + 0.5h_i \quad (6)$$

یک قاعده مرسوم و مناسب برای کمینه کردن خطا در توزیع تنش، مورد ملاحظه قرار دادن بزرگی نسبی مقادیر اضافه و کسر تنش است (Over and Under-stress). نسبت  $r_u$  که برابر حاصل تقسیم بیشینه کسر تنش (که در مدل در عمق  $0.5h_i$  وجود دارد) به تنش در نمونه با ابعاد واقعی در آن عمق است از این رابطه بدست می آید:

$$r_u = \frac{0.5h_i \rho g N - 0.5h_i \rho \omega^2 \left( R_t + \frac{0.5h_i}{2} \right)}{0.5h_i \rho g N} \quad (7)$$

از تلفیق معادلات (۴) و (۶)، معادله (۷) بصورت زیر خلاصه می شود:

$$r_u = \frac{h_i}{4R_e} \quad (8)$$

بطور مشابه، نسبت  $r_o$  که برابر حاصل تقسیم بیشینه اضافه تنش (که در مدل در کف آن وجود دارد) به تنش در نمونه با ابعاد واقعی در آن عمق است را می توان از این رابطه تعیین نمود:

$$r_o = \frac{h_m - h_i}{2R_e} \quad (9)$$

از مساوی قرار دادن نسبتهای  $r_u$  و  $r_o$  نتیجه می شود:

$$h_i = \frac{2}{3} h_m \quad (10)$$

و در نتیجه:

$$r_u = r_o = \frac{h_m}{6R_e} \quad (11)$$

همچنین با استفاده از معادله (۶) خواهیم داشت:

$$R_e = R_t + \frac{h_m}{3} \quad (12)$$

بنابراین با استفاده از این رویه می توان نتیجه گرفت که در دو - سوم ارتفاع مدل، تطابق کاملی در تنش بین مدل و نمونه با ابعاد واقعی وجود دارد و شعاع موثر گریز از مرکز بایستی برابر فاصله محور مرکزی دوران تا یک - سوم ارتفاع مدل در نظر گرفته شود. در حال حاضر برای بیشتر دستگاههای گریز از مرکز ژئوتکنیکی نسبت  $\frac{h_m}{R_e}$  کوچکتر از  $0.2$  بوده و بنابراین بیشینه خطا در پروفیل تنش ناچیز بوده و عموماً کمتر از  $3\%$  تنش نمونه با ابعاد واقعی است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که حتی برای دستگاههای گریز از مرکز با شعاع دوران نسبتاً کوچک (بعنوان مثال با شعاع موثر برابر  $1/5$  متر) خطای ناشی از توزیع غیرخطی تنش برای مدل‌های نسبتاً بزرگ (بعنوان مثال با ارتفاع برابر  $300$  میلیمتر) به اندازه کافی کوچک خواهد بود. شکل سه یک نمونه تیپ از دستگاههای گریز از مرکز ژئوتکنیکی و ملحقات آن را نشان می دهد.

## ۱-۲- اثرات مقیاس (Scale Effects)

در مطالعاتی که توسط مدلسازی فیزیکی انجام می پذیرد این امکان بندرت وجود دارد که تمامی جزئیات نمونه با ابعاد واقعی بطور کامل و دقیق مشابه سازی شوند و معمولاً تقریبهایی در نظر گرفته می شود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که مطالعات بر روی مدل‌های فیزیکی، جامع و کامل نیستند و نقاط ضعف و نواقص، که غالباً تحت عنوان اثرات مقیاس ذکر می گردند، بایستی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته و بزرگی و اهمیت آنها ارزیابی شود. تاثیر حوزه شتاب غیر یکنواخت ایجاد شده در مدل‌های گریز از مرکز یک نمونه از اثرات مقیاس است. از جمله سایر اثرات مقیاس در مدلسازی گریز از مرکز می توان به تاثیر اندازه ذرات و حوزه شتاب دورانی (Coriolis Effect) اشاره نمود که جهت جلوگیری از اطاله مطلب از ذکر جزئیات

بیشتر در ارتباط با آنها خودداری می‌شود.

یک روش خوب و مناسب برای کنترل و بررسی اثرات مقیاس، مدلسازی مدلها (Modelling of Models) است. این روش خصوصاً هنگامی مفید است که نمونه با ابعاد واقعی برای بازیابی و اصلاح نتایج حاصل از انجام آزمایشات بر روی مدل در اختیار نباشد. در این روش مدل‌های گریز از مرکز در مقیاسها و شتابهای مختلف تحت آزمایش قرار می‌گیرند، بگونه‌ای که همگی متناظر و مربوط به یک نمونه با ابعاد واقعی باشند. این مدل‌های متفاوت بایستی رفتار یکسان و مشابهی را پیش‌بینی نمایند و در نتیجه امکان اعمال یک کنترل داخلی مناسب و کارآمد در زمینه روند مدلسازی فراهم می‌آید.

### ۳-۱- موضوعات مطروحه در این مقاله

در این مقاله مهمترین یافته‌های منتشر شده در زمینه‌های مختلف مهندسی ژئوتکنیک دریایی که با استفاده از فن آوری گریز از مرکز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند بشرح زیر مورد بررسی قرار گرفته و تشریح خواهند شد:

- مکانیک بستر دریا: تحکیم لایه‌های خاک زیر دریا، جابجاشدگی و چین‌خوردگی (Faulting) و پایداری شیب، حفاری در بستر دریا و کاربرد آن به منظور دفن ضایعات مصرفی؛
- پی‌های مورد استفاده در آب عمیق: سازه‌های ثقلی دائمی، سازه‌های شمعی، سازه‌های موقت و خود بالارو (Jack up)؛
- سازه‌های حفاظت ساحلی؛
- دیوارهای دریایی و سایر سازه‌ها.

همچنین در بخش پایانی مقاله به فعالیتهای انجام گرفته در موسسه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله در زمینه استقرار آزمایشگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی اشاره خواهد گردید.

### ۲- مکانیک بستر دریا

تا به امروز رفتار بستر دریا، به تنهایی و مستقل از وجود و تاثیر سازه‌های مهندسی، موضوع تعداد معدودی از مطالعات بوده است ولی در عین حال در این زمینه تعدادی گزارش منتشر شده وجود دارد که می‌توان به آنها اشاره نمود.

در سال ۱۹۶۵ نخستین دستگاه گریز از مرکز (از میان پنج دستگاه موجود در حال حاضر) در دانشگاه شهر اوزاکا (OCU) توسط آقای Mikasa طراحی و ساخته شد. این دستگاه به منظور مطالعه تحکیم ناشی از وزن (Self - Weight Consolidation) رسهای نرم طراحی گردید. نتایج حاصل از مطالعات تجربی انجام شده که توسط آقای Mikasa و دانشجویش Takada گزارش گردید محاسبات نظری را تأیید نمود و چنان اعتماد و اطمینانی به تکنیک گریز از مرکز بوجود آمد که طی یک دوره بیست ساله، چهار دستگاه دیگر نیز در این دانشگاه طراحی و ساخته شد و تا به حال نیز مطالعات این دو محقق و همکارانشان ادامه داشته است. آقایان Davidson و Bloomquist در سال ۱۹۸۰ در دانشگاه فلوریدا، مطالعاتی را در زمینه ارزیابی خصوصیات رسوبگذاری (Sedimentation) و تحکیم ضایعات رس فسفات انجام دادند. مصالح مورد استفاده مربوط به یک کارخانه محلی بودند ولی تکنیک مورد استفاده قابل اعمال و کاربرد برای تحکیم ناشی از وزن رسوبات دور از ساحل بود. مقاله منتشر شده بعدی توسط Townsend در سال ۱۹۸۵ برخی از مسایل مربوط به این زمینه را مورد ارزیابی قرار داد. آقای Croce و همکاران در سال ۱۹۸۴، دستگاه گریز از مرکز دانشگاه کلرادو را برای ارزیابی تشریهای مختلف در زمینه تحکیم یک بعدی با کرنش محدود مورد استفاده قرار دادند. تمامی مطالعات فوق‌الذکر بر روی مدل‌های کاملاً کوچک انجام یافتند و مقادیر ثابتی از خاک مورد آزمایش قرار گرفتند. در حال حاضر و با توجه به پیشرفتهای حاصله در زمینه ساخت وسایل مورد نیاز جهت آماده سازی نمونه‌ها در دستگاههای گریز از مرکز، این امکان فراهم شده است که مصالح در طی

دوران دستگاه ته‌نشین شود و تحکیم بسترهایی که بطور پیوسته در معرض ته‌نشینی ذرات قرار دارند نیز مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند.

امروزه استفاده از رسوبات بستر دریا بعنوان محلی جهت دفن و انبار نمودن ضایعات سمی و هسته‌ای، امری مرسوم و متداول شده است. چنین مصالحی می‌توانند از سطح دریا و توسط انواع مختلف نافذها (Penetrators) به درون رسوبات عمیق اقیانوسها و مجاری تحت‌الارضی زیر صفحات تکنونیک تزیق و هدایت شوند. آقای Sutherland در سال ۱۹۸۳، انسداد و بسته شدن (Closure) مجاری حفر شده توسط نافذها در رسوبات کائولینیت نرم مدلسازی نمود که در این تحقیقات، نمونه‌ها در ابتدا در معرض تحکیم ناشی از وزن در دستگاه گریز از مرکز قرار گرفتند. مطالعات نظری توسط نامبرده نشان داد که مقیاس زمانی مشابهی بایستی برای استهلاک فشار منفذی و انتقال حرارت بکار گرفته شود ولی هیچگونه آزمایشی که در آن سیال و جریان حرارت با هم کوپله باشند انجام نگردید. آقایان Maddocks و Savvidou در سال ۱۹۸۴ بر این مشکل فائق آمدند. اینکار توسط یک قوطی استوانه‌ای داغ که به آهستگی از درون رسوبات رسی بیرون کشیده می‌شد انجام گردید و آنها انتقال حرارت و تغییرات فشار منفذی را در اطراف آن قوطی اندازه‌گیری و بررسی کردند.

هیچیک از مطالعات و بررسیهایی که به آنها اشاره شد سرعت بالای در نظر گرفته شده برای نفوذ کردن به درون بستر دریا (۵۰ m/s) را که معمولاً در عملیات دفن ضایعات مورد نیاز است، شبیه سازی نکردند. ولی آقای Corte در مقاله منتشر شده خود در سال ۱۹۸۵ به طور خلاصه به فعالیتهای انجام گرفته توسط فرانسویها در این زمینه اشاره کرد و آقای Zelikson نیز در سال ۱۹۸۶ جزئیات بیشتری را ارائه نمود.

امروزه با توجه به افزایش ظرفیت دستگاهها و پیشرفتهای حاصله در زمینه آماده سازی نمونه‌ها و ابزار بندی آنها، زمینه لازم جهت بررسی ساز و کارهایی که به زمین لغزشهای زیر دریا منتج می‌شوند فراهم گردیده است. از دیگر مطالعات انجام گرفته در زمینه مکانیک بستر دریا می‌توان به فعالیتهای انجام گرفته توسط آقایان Scott, Roth و Austin در سال ۱۹۸۱ اشاره نمود که انتشار و گسترش چینه‌ها را در خاکهای آبرفتی مدل کرده بودند. آقای Burrige در سال ۱۹۸۴ رفتار سازه‌ای یک پوشش تونل در معرض جابجایی چینه را در یک دستگاه گریز از مرکز مورد ارزیابی و بررسی قرار داد و این مطالعات را می‌توان با آنچه که توسط آقایان Cole و Lade در همان سال انجام گردید مورد مقایسه قرار داد. این بررسیها بعداً بعنوان مبنایی جهت ارزیابی رفتار خطوط لوله فواساحل با استفاده از دستگاه گریز از مرکز مورد استفاده قرار گرفتند. از جمله آخرین مطالعات منتشر شده در زمینه مکانیک بستر دریا می‌توان به تحقیقات آقای Sekiguchi و همکارانشان در سال ۱۹۹۴ در دانشگاه کیوتو اشاره داشت که ناپایداری بستر ماسه‌ای را تحت کنش امواج مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها در بررسیهای خود دریافتند که فشارهای منفذی تخمین زده شده از روی تئوری الاستوپلاستیک یک بعدی پیشنهادی خود با اندازه‌گیریهای بعمل آمده از آزمایشات گریز از مرکز در تطابق خوبی هستند و همچنین روش ساده‌ای را برای ارزیابی سریع و آسان تاثیر زهکشی جزئی بر توسعه و ایجاد فشار منفذی باقیمانده ناشی از موج ارائه دادند. این محققان در تحقیقات خود از دستگاه شبیه ساز امواج شبه ایستا (quasi-standing) ابداعی خود استفاده کرده و ضمناً بجای سیال منفذی واقعی (آب) روغن سیلیکون را بکار بردند و به این ترتیب فشارهای منفذی باقیمانده را بخوبی تولید کرده و امکان وقوع همزمان پدیده‌های تحکیم و افزایش فشارهای منفذی ناشی از بارگذاری دینامیکی امواج را به نحو مناسبی مدلسازی نمودند. این نتایج کاربرد وسیعی در ارزیابی پتانسیل روانگرایی رسوبات ماسه‌ای سست بستر دریا دارند.

### ۳- پی‌های مورد استفاده در آب عمیق

#### ۳-۱- سازه‌های ثقلی دائمی

کشف نفت و گاز در زیر آبهای دریای شمال در سالهای اولیه دهه هفتاد میلادی به پیشرفتهای وسیعی در طراحی تاسیسات

فرا ساحل دائمی برای استخراج و بهره‌برداری از منابع هیدروکربور منجر گردید که نوعی از سازه‌های ثقلی را در بر می‌گیرند که در محل مورد نظر توسط وزن خود و بدون نیاز به شمع کوبی - که قبلاً بطور معمول برای چنین سازه‌هایی در نظر گرفته می‌شد - مستقر می‌شوند. کاربرد سکوهایی از این نوع در نواحی که دارای بارگذاریهای محیطی شدید و آب و هوای تابستانی کوتاه مدت هستند مزایائی را به دنبال دارد.

نخستین مطالعات در مورد سازه‌های ثقلی دائمی با استفاده از فن آوری گریز از مرکز توسط آقای Rowe در سال ۱۹۷۵ آغاز گردید. وی برای تحقیقات خود دستگاه گریز از مرکز بزرگ اندازه دانشگاه منچستر (UMIST) را مورد استفاده قرار داد و این مطالعات تا شش سال بعد نیز ادامه یافت. این تحقیقات در زمینه سازه‌های ایده‌آلی که بر روی خاکی یکنواخت شامل رس و ماسه قرار گرفته بودند انجام گردید. محفظه‌های نگهدارنده خاک دارای ابعاد  $1/0m \times 1/0m$  در پلان و ارتفاع متغیر بودند. یافته‌های اولیه حاکی از آن بودند که ناحیه‌ای از خاک که رفتار را تحت اعمال بارگذاری متناوب جانبی کنترل می‌نماید در زیر میان لایه (interface) خاک - سازه واقع گردیده است و در این محدوده کرنشهای برشی بیشترین مقدار خود را دارا بوده و در نهایت به تمرکز فشارهای منفذی اضافی ایجاد شده ناشی از بارگذاری و از بین رفتن مقاومت منجر می‌شوند. پس از مشخص شدن این موضوع، ابعاد مدل‌های پی به حداکثر ۸۰۰mm افزایش یافت و در معرض شتابهای حداکثر کمی بیش از  $0.9g$  قرار گرفتند که بیانگر شبیه‌سازی سازه‌هایی با ابعاد حدوداً ۱۰۰ متر بودند. آزمایشات انجام شده دیگر در انگلستان بر روی مدل‌های گریز از مرکز (توسط آقای Craig در سال ۱۹۸۱) نشان دادند که محاسبات و روابط نظری مربوط به ساز و کار رفتار و تولید فشارهای منفذی و جابجائیهای متناوب و تجمعی که در اواخر دهه هفتاد میلادی مورد استفاده قرار می‌گرفتند چندان قابل اعتماد و کارآمد نیستند.

به موازات انگلیسیها، فرانسویها هم مطالعاتی را در طی سالهای ۸۰-۱۹۷۶ در انستیتوی نفت (Institut de petrole) با همکاری دانشگاه پلی تکنیک (Ecole Polytechnique) در زمینه همین نوع سازه‌ها انجام دادند که آقای Corte در مقاله منتشر شده خود در سال ۱۹۸۶ جزئیات آن را تشریح نمود. او در این مطالعات مدل‌هایی به قطر  $0.3$  متر را مورد استفاده قرار داد که تا  $0.9g$  شتاب داده شدند و انواع مختلف بسترهای خاکی را در بر می‌گرفتند. همانگونه که در مطالعات انجام شده در دانشگاه منچستر مشخص گردیده بود فرانسویها نیز دریافتند که در شبیه سازی مقیاس زمان مشکلات و پیچیدگیهایی وجود دارد. این مشکل از آنجا ناشی می‌شود که برای شبیه سازی صحیح فرایند زهکشی با استفاده از مصالح واقعی، فرکانسهای بارگذاری بسیار بالایی، که ایجاد و تولید آنها غیرممکن بود، مورد نیاز بودند. هر دو گروه در انگلستان و فرانسه همان فرکانسهای بارگذاری مربوط به نمونه در ابعاد واقعی را برای رسها مورد استفاده قرار دادند و این امر باعث شد که فرآیند واکنش واقعی مصالح بوقوع نپیوندد. فعالیتهای تحقیقاتی دیگری در آمریکا در این زمینه توسط آقایان Scott, Cunny, Hughes, Prevost و (۱۹۸۱) انجام شده است. آنها یک مدل به قطر  $100mm$  را در معرض بارگذاری استاتیکی تکراری (repeated)، مایل (inclined) و توام با خروج از مرکزیت (eccentric) در شتابی برابر  $0.9g$  قرار دادند تا اطلاعات مورد نیاز برای مقایسه با تحلیلهای عددی را بدست آوردند. این گروه در مدل خود از رس سیلتی با ضخامتی برابر  $125mm$  استفاده نمودند که در دستگاه گریز از مرکز تحت وزن خود تحکیم یافته بود. در این مطالعه، تاثیر برگشت و تغییر جهت تنشهای برشی در خاک زیر سطحی که از کنش موج بر سازه‌های دور از ساحل حاصل می‌شود، لحاظ نشده و برای ایجاد و شبیه سازی بارگذاری از یک جک بارگذاری با امتداد و جهت ثابت که فقط امکان اعمال بار فشاری قابل تکرار (تنها در یک جهت) را داشت، استفاده گردید. بدیهی است بارگذاری متناوب واقعی که در هر دو جهت و بصورت رفت و برگشت امکان وقوع دارد مسبب کاهش مقاومت خاک بشمار میرود. علیرغم اینکه بیشتر مطالعات و فعالیتها در میانه دهه هفتاد میلادی در زمینه سازه‌های واقع بر پی‌های سطحی متمرکز شده



بود آقایان Craig و Saudi - Al در دانشگاه منچستر در سال ۱۹۸۱ مدل‌هایی را در دستگاه گریز از مرکز مورد بررسی قرار دادند که لبه‌های (Skirts) آنها تا ۸٪ قطر سکو در داخل خاک فرو می‌رفت و این تکنیک در حال حاضر بعنوان راه حلی مطمئن برای آبهای عمیقی که از رس‌های نرم تشکیل شده باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۲-۳- سازه‌های شمعی

بدون شک بیشترین مطالعات انجام یافته در زمینه کاربرد فن‌آوری گریز از مرکز در مهندسی دریا، مربوط به سازه‌های شمعی است که گستره وسیعی از انواع و ابعاد را در بر می‌گیرد. از جمله مسایل مطرح در مورد شمعی‌های فراساحل می‌توان به طول بلند آنها به همراه بارگذاری جانبی و یا ترکیبی از بارگذاری محوری و جانبی اشاره نمود. از آنجائیکه تعداد اندکی از دستگاه‌های گریز از مرکز قادر به شبیه‌سازی شمعی‌هایی با طول بیش از ۲۵m هستند بنابراین بررسی و مطالعه واکنش شمعی‌ها در برابر بارگذاری جانبی معمولاً برای لایه‌های بالایی و سطوح فوقانی خاک بستر انجام پذیرفته و به آن ناحیه محدود می‌شود. نکته قابل ذکر دیگر آنست که شاید برخی مطالعاتی که ذیلاً تشریح خواهند گردید بطور مستقیم قابل استفاده و کاربرد در مهندسی دریا و فراساحل نباشند ولی بررسی آنها اهمیت و تاثیر فن‌آوری گریز از مرکز را روشنتر می‌سازد.

نخستین مطالعات در این زمینه توسط پروفیسور Scott در انستیتو تکنولوژی کالیفرنیا (Caltech) انجام گردید. وی روشها و تکنیکهای تجربی متعددی را برای اعمال بارهای محوری و جانبی (استاتیکی، متناوب و دینامیکی) به شمعی‌ها یا دسته شمعی‌های کوچک ابداع نمود. یکی از این پروژه‌ها، شبیه‌سازی بارهای محیطی جانبی وارد بر شمعی‌های لوله‌ای به قطر ۰/۶۱ متر و درازای ۱۶/۸ متر بود که نتایج آن در سال ۱۹۷۴ توسط آقایان Reese, Cox و Grubbs گزارش گردید. این مدلسازی در شتابی برابر ۴g و با استفاده از مدل شمع با سطح مقطع مستطیلی انجام گردید. آزمایشات بعدی که توسط انستیتو نفت آمریکا (API) حمایت مالی می‌گردید در شتابی برابر ۱۰۰g انجام شد و نتایج حاصل از اندازه‌گیری ممانهای خمشی در شمع برای تعیین منحنیهای (p-y) مربوط به شمعی‌هایی که تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرند مورد استفاده قرار گرفت. آزمایشهای متعاقب آن که در شتابی بالاتر از ۱۰۰g انجام گردید مربوط به شمعی‌هایی با قطر ۱/۲۷ متر و درازای ۵۳ متر بود که تحت بارگذاری محوری قرار می‌گرفتند.

یک ایراد و انتقاد اساسی وارد به بسیاری از آزمایشات انجام گرفته در Caltech آن بود که عموماً مدل‌های شمع توسط اعمال نیروهای فشاری در شتابی برابر ۱-g (دستگاه گریز از مرکز در حال سکون)، در بسترهای ماسه‌ای نصب و جایگذاری شده بودند. این موضوع به ایجاد توزیعهای تنش در اطراف مدل شمع در حال دوران و تحت بارگذاری گریز از مرکز منجر می‌شد که با نمونه در ابعاد واقعی تحت بارگذاری محیطی در تطابق نبوده و خطاهای ناشی از آن، علی‌الخصوص در حالت بارگذاری محوری، قابل توجه بودند. یکی از نخستین تلاشها جهت فائق آمدن بر این مشکل با استفاده از کارگذاری مدل شمع در حال دوران دستگاه، در Caltech در سال ۱۹۸۴ انجام شد و نتایج آن توسط آقای Allard تشریح گردید.

آقای Randolph در مقاله منتشره خود در سال ۱۹۷۹ برخی از مشکلات موجود در زمینه مدلسازی رفتار شمع را تشریح کرد لیکن وی مطالعات خود بر روی مدل گریز از مرکز مربوط به رفتار شمع کششی در رسها را با استفاده از نصب شمع بهنگام دوران دستگاه (in-flight Installation) انجام داد و نتایج مربوطه را طی مقاله‌ای در سال ۱۹۸۴ منتشر کرد. همکاران پروفیسور Randolph در کمبریج، مطالعات گسترده و متعددی را در سایر زمینه‌های مربوط به شمع کوبی طی سالیان متمادی انجام دادند و عموماً از نصب مدل شمع در شتاب ۱-g استفاده کردند و سپس با استفاده از تکنیکهای عددی، منحنیهای (p-y) مربوطه را توسط اندازه‌گیری توزیع ممانهای خمشی ناشی از اعمال بارهای جانبی در ماسه‌ها استنتاج و تعیین کرده و نتایج را با محاسبات اجزا محدود مقایسه نمودند که از آن جمله می‌توان به مطالعات آقایان Finn و همکارانشان در سال

در دانشگاه لیورپول نیز مطالعاتی توسط آقایان King و Kulkarni, Chandrasekran در سال ۱۹۸۴ انجام گردید. آنها رفتار و عملکرد شمعهای لوله‌ای منفرد به قطر  $1/23$  متر را که  $9/0$  متر در بستر ماسه‌ای فرو رفته و در معرض بارگذاری جانبی استاتیکی قرار داشتند شبیه سازی نمودند. همچنین نتایج مربوط به آزمایشات بعدی بر روی دسته‌های کوچکی از همان شمعها در سال ۱۹۸۵ توسط همان محققان انتشار یافت.

آقای Prevost مطالعاتی را در دانشگاه Princeton در شتاب  $100g$  انجام داد. در این آزمایشات شمعهای منفرد و یا دسته شمعها تا قطر  $0/56$  متر که  $22/2$  متر در بستر خود فرو رفته و در معرض تحریک دینامیکی ایجاد شده توسط یک لرزاننده الکترومغناطیسی (Electro-magnetic Shaker) قرار گرفته بودند، شبیه سازی شدند. در تمامی این آزمایشات نصب و کارگذاری شمع در شتاب  $1-g$  انجام گردید.

اولین فعالیتهای در زمینه نصب و کارگذاری مدل شمع در بستر ماسه‌ای در حین دوران دستگاه توسط آقایان Cook و Lewis در سال ۱۹۷۹ گزارش گردیده است. آنها برای انجام اینکار از یک چکش پنوماتیکی استفاده کردند که توسط رایانه کنترل می شد و با استفاده از آن مدل شمعی به طول  $12/7mm$  را  $245mm$  در داخل بستر خاکی و در شتابی برابر  $60g$  فرو کردند اما مطالعات آنها ادامه نیافت. کمی بعد یکی از دانشجویان دانشگاه منچستر (UMIST) بنام Cheng در سال ۱۹۸۲ یک سیستم مشابه بر روی همان ماشین را ابداع نمود که قابلیت اعمال بارهای جانبی به مدل شمع را متعاقب نصب آن به هنگام دوران دستگاه گریز از مرکز داشت. متأسفانه این پروژه نیز هنگامیکه توانایی مکانیکی دستگاه به اندازه قابل قبولی رسیده ولی نتایج معدودی از عملکرد دستگاه کسب گردیده بود، رها شد و متوقف ماند.

گروه پژوهشی دانشگاه منچستر در آزمایشگاههای مهندسی سیمون (Simon Engineering Laboratories) فعالیتهای خود در زمینه مدل‌های شمع را در سال ۱۹۷۸ آغاز کرد. این گروه تجهیزات خودکار هیدرولیکی (Servo hydraulic) مورد نیاز جهت اعمال بارگذاری و همچنین محفظه عمیق برای نگهداری مدل خاک را دارا بودند. با استفاده از این امکانات، شبیه سازی شمعهایی به قطر  $3/8$  متر و درازای  $55$  متر امکانپذیر بود. اهمیت چگونگی نصب و جایگذاری مدل شمع در تنشهای بالا در مقاله منتشره آقای Craig در سال ۱۹۸۳ بروشنی تشریح شد. وی در این ارتباط، ظرفیت باربری مدل شمع یکسانی را که در حال دوران دستگاه در درون بستر ماسه‌ای در شتابهای مختلف نصب و جایگذاری گردیده بود (پیش از آنکه آزمایش در شتاب بالاتری انجام شود) مورد مقایسه قرار داد و در صورت ایجاد تغییرات حجم زیاد در اثر نصب و جایگذاری مدل شمع، تغییراتی در حدود  $100\%$  نیز مشاهده کرد (شکل ۴). در این زمینه مشاهدات مشابهی هم در دانشگاه کلرادو در سال ۱۹۸۴ توسط آقای KO بعمل آمد. به منظور مقایسه نتایج و مشاهدات، آزمایشاتی نیز در دانشگاه منچستر بر روی رس اشباع انجام شد و نتایج حاکی از آن بودند که هیچگونه تغییراتی فراتر از مقدار متعارف و طبیعی مربوط به تکرار آزمایشات مشاهده نگردید. این موضوع با دانسته‌های موجود از فرایند برش در حجم ثابت مطابقت داشت که مجدداً در سال ۱۹۸۴ توسط آقای KO نیز مورد تایید قرار گرفت. آنچه که در مورد خاکهای رس اهمیت بیشتری داشت تاثیر تغییر نرخ و میزان نیروی پیوسته فشاری لازم برای نصب و جایگذاری است که این موضوع در سال ۱۹۸۳ توسط آقای Craig نیز مورد بررسی قرار گرفت و آزمایشات ایشان حاکی از آن بود که مقدار نیروهای لازم حتی تا دو برابر نیز قابل افزایش بودند. همچنین ظرفیت باربری حاصله مربوط به مدل‌های شمع که از اندازه‌گیری تحت بارگذاری تکفام (monotonic) حاصل شدند نیز خود را وابسته به مقدار نیروهای اعمالی برای نصب و جایگذاری نشان دادند. از سوی دیگر آزمایشات حاکی از آن بودند که تاثیر تغییر نرخ (rate effects) در نواحی اطراف نوک (سر) شمع و بدنه شمع، بواسطه تفاوت‌های موجود در رژیم کرنش در این دو ناحیه، متفاوت هستند. آقایان Mokrani و Craig در سال ۱۹۸۵ آزمایشاتی را بر روی یک رس با

پلاستیسیته متوسط انجام داده و تفاوت‌های فوق‌الذکر را بخوبی مشخص ساختند (شکل ۵).

هنگامی که از روش نصب و جایگذاری مدل شمع بهنگام دوران دستگاه در بستر ماسه‌ای استفاده شود، تغییرات بوجود آمده در فشار وارده انتهایی (End bearing pressure) در شتابهای مختلف را می‌توان بصورت تغییر  $N_q$  متناسب با مقدار تنش تفسیر نمود. در فشارهای وارده نسبتاً کم، مقادیر  $N_q$  با مقادیر زاویه اصطکاک پیک اندازه‌گیری شده در آزمایشات فشاری سه محوری در تطابق هستند ولی به محض آنکه فشارهای وارده به میزان (۵۰-۱۰) MPa افزایش یابند و خردشدگی ذرات (Particle Crushing) بوقوع پیوندد، مقادیر  $N_q$  حاصله، حتی برای بسترهای خاکی متراکم، با مقادیر زاویه اصطکاک کمتر در حجم ثابت در تطابق هستند و در این زمینه می‌توان به مطالعات انجام یافته توسط آقای Sabagh در سال ۱۹۸۳، آقای Craig در سال ۱۹۸۴ و آقای Leung در سال ۱۹۸۵ اشاره نمود. همچنین یافته‌ها حاکی از آن بودند که تحت شرایط زهکشی شده تاثیر بارگذاری متناوب بر ظرفیت باربری نهایی اندک و ناچیز است (شکل ۶).

تغییر شکل‌های جانبی، بیشتر وابسته به توزیع تنش در مجاورت سطوح فوقانی خاک بستر بوده و همچون تنشهای ایجاد شده در نوک شمع، به تکنیک نصب و جایگذاری حساس و وابسته نیستند. از سوی دیگر رژیم تنش در این محدوده به مقدار زیادی تحت تاثیر بارهای وارده، علی‌الخصوص هنگامیکه متناوب باشند، قرار دارد. شکل ۷ یک نمونه از کیفیت داده‌هایی را نشان می‌دهد که می‌توان از مدلسازی شمعی که بطور جانبی بارگذاری شده و نصب و جایگذاری شمع در حین دوران دستگاه انجام پذیرفته باشد، بدست آورد. این شکل مربوط به مطالعات آقای Kan در سال ۱۹۸۶ می‌باشد و یکسری از پروفیل‌های اندازه‌گیری شده ممان / عمق را نشان می‌دهد که از انجام آزمایشات بر روی مدل شمع نصب شده در بستر ماسه‌ای و تحت بارگذاری جانبی استاتیکی حاصل شده‌اند و با استفاده از این پروفیلها و بکارگیری روشهای عددی می‌توان برشها، فشارها، چرخشها و تغییر شکلها را یافت و در نتیجه شکل ۷ به ترسیم منحنیهای (p-y) شکل ۸ منتج می‌شود. همچنین شکل ۹ نتایج مربوط به بارگذاری دوره‌ای مدل شمع کارگذاری شده در بستر سی را که به استنتاج منحنیهای (p-y) منجر شده‌اند نشان می‌دهد.

از سال ۱۹۸۴ به بعد و بواسطه پیشرفتهای حاصله در زمینه ساخت دستگاههای گریز از مرکز و ملحقات مربوطه با ظرفیت ر قابلیت‌های بیشتر و نیز افزایش مقبولیت این فن‌آوری، کاربرد آن در زمینه‌های مختلف ژئوتکنیک دریایی نیز روند شتابنده‌ای یافت. آقای Sabagh در سال ۱۹۸۵ مطالعاتی را در دانشگاه منچستر در زمینه بارگذاری محوری متناوب شمعی نصب شده در بستر ماسه‌ای انجام داد و این تحقیقات در واقع نقطه آغازین یکسری از مطالعات گردید که به بررسی هر چه صحیحتر رفتار شمعه و دسته شمعه تحت بارگذاریهای پیچیده تر - شبیه به آنچه که واقعاً بر سازه‌های فراساحلی اعمال می‌شود - منجر شد. وی طی تحقیقات خود نتیجه‌گیری نمود که مقدار و بزرگی بار متناوب منجر به خرابی و انهدام، توسط مقدار و بزرگی بار استاتیکی اعمال شده، مقدار نمو بار (Load increment) و نیز تعداد کل سیکلها کنترل می‌شود. همچنین در مورد خرابی و انهدام ناشی از بارهای فشاری، ظرفیت باربری تحتانی و جداری و در مورد انهدام و خرابی ناشی از بارهای کششی، فقط ظرفیت باربری جداری مربوط به حالت استاتیکی در اثر اعمال بارگذاری متناوب تکراری کاهش می‌یابند.

از میان آخرین تحقیقات انجام یافته در زمینه رفتار شمعی نصب شده در ماسه تحت بارگذاری محوری و تأثیر نحوه کارگذاری و نصب آنها می‌توان به مطالعات آقای Fioravante و همکارانشان در سال ۱۹۹۴ در ISMES ایتالیا در زمینه تفاوت رفتاری بین شمعیهای پیش ساخته و کوبیده شده (Driven) و شمعیهای مدفون (Bored) اشاره داشت. یافته‌های ایشان و همکارانشان حاکی از آن بودند که تفاوت زیادی بین رفتار شمعیهای پیش ساخته و کوبیده شده و شمعیهای مدفون (درجا) وجود دارد. این موضوع ساز و کار انتقال بار پیش از انهدام و رفتار به هنگام انهدام را دربر می‌گیرد. همچنین در دانسیته‌های نسبی و شتابهای گریز از مرکز بهنگام نصب مشابه، مقدار مقاومت نهایی جداره شمع (Ultimate shaft resistance) برای شمعیهای مدفون (درجا) در حدود (۰/۴۵-۰/۱۹) برابر همین مقاومت برای شمعیهای پیش ساخته بوده

لیکن مقادیر مقاومت نهایی انتهای شمع (Ultimate base resistance) برای هر دو نوع شمع تقریباً یکسان هستند. آقای yet و همکارانشان نیز در سال ۱۹۹۴ در دانشگاه ملی سنگاپور (NUS) در زمینه تأثیر نصب شمع در مدل گریز از مرکز در شتابهای ثقل مختلف، تأثیر مقدار تنش، تأثیر دانسیته نسبی خاک، نصب منقطع و چند مرحله‌ای (lapsed installation) و کوبیدن مجدد (redrive) شمع مطالعاتی را انجام دادند. نتایج آزمایشات این محققان نیز مجدداً موید این نظریه بود که مقدار  $g$  تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد شمع داشته و نصب شمع بایستی بهنگام دوران و در شتاب ثقل ( $g$ ) انجام شود. همچنین مشاهدات نشان می‌دادند که ظرفیت باربری شمع پس از ایجاد یک وقفه زمانی و به سبب رها سازی تنش (Stress relaxation) در ماسه‌ها کاهش می‌یابد و مشکلات افزون یافته پس از هر بار کوبیدن مجدد شمع، حاکی از آن بودند که خاک اطراف شمع در اثر عملیات نصب قبلی متراکم (densify) گردیده است. این محققان همچنین نتیجه گرفتند که خزش تحت بارگذاری پایدار (Sustained) ناشی از خردشدگی ذرات خاک است.

در زمینه مدل‌سازی رفتار شمعهای نصب شده در ماسه تحت بارگذاری جانبی نیز از سال ۱۹۸۴ به بعد تحقیقات فراوانی انجام یافته است. آقای Nunez و همکارانشان در سال ۱۹۸۸ در دانشگاه کمبریج و با استفاده از دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی بزرگ اندازه آن، مطالعاتی را در مورد شبیه سازی شمعهای دور از ساحل نصب شده در ماسه آهکی و تحت بارگذاری جانبی انجام دادند. این آزمایشات شامل بارگذاریهای تکفام و متناوب جانبی بر روی شمعهای منفرد و دسته شمع مربوط به نمونه در ابعاد واقعی با قطر ۰/۳ تا ۲/۱ متر بود. این مطالعات به نتایج جالب توجهی منتج شد و بار دیگر اهمیت، سرعت، دقت، قابلیت اعتماد، کم هزینه بودن و توانایی فن آوری گریز از مرکز را در حل مسایل ویژه و خاص، روشن و مشخص ساخت. در این مطالعات همچنین از تکنیک مدل‌سازی مدلها برای تعیین قابلیت اعتماد در روابط مقیاس استفاده شد.

آقای Mc Vay و همکارانشان در سال ۱۹۹۴ در دانشگاه فلوریدا دستگاهی را برای نصب جداگانه هر یک از شمعهای متعلق به یک دسته شمع در حین دوران دستگاه گریز از مرکز ابداع کردند که امکان اعمال بارگذاری جانبی و اندازه‌گیری سهم ظرفیت باربری هر یک از ردیفهای شمع را فراهم می‌نمود. آنها طی تحقیقات خود رفتار دسته شمعهای نصب شده درون ماسه را که تحت بارگذاری جانبی قرار گرفته باشند مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات حاکی از آن بود که ظرفیت باربری دسته شمع بین ردیفهای پیشین (Lead)، میانی (Middle) و پسین (Trail) بطور مساوی تقسیم نمی‌شود و دانسیته نسبی ماسه و فاصله ردیفها از یکدیگر در این زمینه مؤثر هستند. همچنین تأثیر نصب دسته شمع در شتاب ثقل برابر  $g-1$  و در حین دوران دستگاه (با شتابی چندین برابر شتاب ثقل) نیز در این بررسیها مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایشات این محققان نشان داد که کوبیدن شمع در شتاب  $g-1$  ظرفیت باربری گروهی کوچکتری را نتیجه می‌دهد. این موضوع می‌تواند نتیجه سست شدگی ماسه (Sand loosening) ناشی از وجود دانسیته نسبی کمتر در شتاب نصب  $g-1$  باشد چرا که تنشهای ژئواستاتیکی بالا در طی فرآیند نصب وجود ندارد. از سوی دیگر نتایج حاکی از آن بودند که دانسیته خاک بر ظرفیت باربری دسته شمع و نیز سهم و مشارکت هر یک از ردیفهای شمع متعلق به یک دسته شمع تأثیر می‌گذارد. همچنین تأثیر فاصله‌گذاری بین شمعها بر ظرفیت باربری جانبی کل دسته شمع در این آزمایشات مورد بررسی قرار گرفت و یافته‌ها نشانگر آن بودند که در صورت افزایش فاصله شمعها از سه برابر قطر به پنج برابر آن، ظرفیت باربری دسته شمع نیز افزایش می‌یابد لیکن توزیع بار در میان ردیفهای متعلق به یک دسته شمع کمتر متاثر می‌شود و این موضوع با نظریه Shadowing آقای Brown در تطابق بود. از دیگر مطالعات انجام گرفته در زمینه بارگذاری جانبی شمعها می‌توان به تحقیقات آقای Kitazume و همکارانشان در انستیتوی تحقیقات سواحل و بنادر ژاپن (PHRI) در سال ۱۹۹۴ اشاره نمود. این محققان طی تحقیقاتی مقاومت جانبی یک شمع منفرد طولیل نصب شده درون رس نرم بطور عادی تحکیم یافته را با استفاده از دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی PHRI مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مطالعات، تأثیر صلبیت شمع بر روی روابط بار - تغییر مکان، توزیع ممان خمشی در امتداد شمع و واکنش

خاک بستر (Subgrade) را اندازه‌گیری نموده و منحنیهای (p-y) مربوطه را استخراج کردند. این محققان طی آزمایشات خود نشان دادند که بار افقی تقریباً بطور خطی با افزایش ریشه دوم صلبیت (EI) افزون می‌گردد. همچنین توزیع ممان خمشی، نسبت به سایر عوامل، تاثیر بیشتری از بارگذاری متناوب می‌پذیرد ولی این تاثیر هنگامیکه بار افقی در مرحله بار برداری معادل یا بزرگتر از بار حداکثری که قبلاً اعمال شده، باشد از بین می‌رود. از سوی دیگر روابط (p-y) حاصله نشان‌دهنده آن هستند که مقدار  $\log-p$  بطور خطی متناسب با افزایش  $\log-y$ ، افزایش یافته و گرا دیان روابط (p-y) در محدوده (۰/۲-۰/۵) قرار دارد.

اخیراً محققان آلمانی نیز تحقیقات وسیع و جامعی را در این زمینه آغاز نموده‌اند. از جمله آخرین تحقیقات انجام یافته توسط این محققان می‌توان به کار آقای Kotthaus و همکارانشان در سال ۱۹۹۴ در انستیتو مکانیک خاک و مهندسی پی دانشگاه Ruhr اشاره داشت. آنها با استفاده از دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی بوخوم (Bochum)، رفتار شمعیهای منفرد و یک ردیف شمع نصب شده درون ماسه را که در معرض بار جانبی استاتیکی و دینامیکی (با فرکانس و شدت بار متغیر) قرار می‌گرفتند مورد ارزیابی قرار داده و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده (از جمله تغییر مکان شمع در سطح بستر، بار وارده به هر یک از شمعیها و توزیع ممان خمشی در امتداد شمع)، اندرکش خاک - شمع و تاثیر محتوای فرکانسی و شدت بار را بررسی نمودند. همچنین با استفاده از توزیع بار اندازه‌گیری شده در میان یک ردیف شمع، اندرکش شمع - خاک - شمع را بررسی نموده و در نهایت نتایج تجربی حاصله را با نتایج حاصل از روشهای مختلف محاسباتی مقایسه کردند. این آزمایشات همچنین نشان دادند که بهنگام اعمال بارگذاری استاتیکی بر ردیفهای شمع انعطاف پذیر نصب شده درون ماسه، واکنش دسته شمع تابعی از میزان تغییر مکان و جابجائی است.

از جمله آخرین تحقیقات انجام یافته در زمینه بارگذاری جانبی شمعیها می‌توان به مطالعات آقای Adachi و همکارانشان در سال ۱۹۹۴ در دانشگاه کیوتو اشاره نمود که رفتار دسته شمعیهای نصب شده درون ماسه متراکم تحت بارگذاری جانبی را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این تحقیقات اندرکنش بین دسته شمعیها و مقاومت نهایی جانبی هر یک از شمعیهای منفرد در دو نوع متفاوت (شمعیهای منفرد از نوع فولادی پیش ساخته و شمعیهای منفرد از نوع بتنی در جا) را ارزیابی کردند. نتایج تجربی مشاهده شده در مورد دسته شمعیها حاکی از آن بودند که نرخ توزیع بار برای شمع جلویی (front) از شمع پشتی (rear) بیشتر است. در این آزمایشات فواصل مختلف بین شمعیهای متعلق به یک دسته شمع و نحوه قرارگیری آنها نسبت به یکدیگر نیز بررسی شدند. همچنین با استفاده از داده‌های مربوط به آزمایش گریز از مرکز بر روی یک شمع منفرد (در دو نوع مختلف) و اعمال بارگذاری جانبی، منحنیهای بار نهایی - تغییر مکان در سر شمع (Pile head)، توزیع ترک در شمعیهای بتنی در جا و الگوی تغییر شکل زمین بستر تعیین شدند. همچنین این محققان طی آزمایشات خود به این نتیجه رسیدند که با فرض قطر و سختی خمشی یکسان، ظرفیت باربری جانبی نهایی یک شمع فولادی بسیار بیشتر از یک شمع بتن مسلح است. فرانسویها نیز در زمینه سازه‌های شمعی و بررسی رفتار آنها با استفاده از فن‌آوری گریز از مرکز مطالعات زیادی انجام داده‌اند که به عنوان مثال می‌توان به تحقیقات آقای Mezazigh و همکارانشان در سال ۱۹۹۴ در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه پل و راه پاریس (LCPC) اشاره داشت. این محققان، تاثیر شیب بستر و دانسیته خاک را بر منحنیهای (p-y) مربوط به شمعیهای نصب شده درون ماسه مورد بررسی و ارزیابی قرار داده و به نتایج جالب توجهی دست یافتند.

### ۳-۳- پی سکویهای خودبالارو (Jack-up rigs)

سکویهای حفاری اکتشافی خودبالارو معمولاً دور از ساحل مورد استفاده قرار گرفته و به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. گروه اول آنهايي هستند که توسط پی‌های گسترده بسیار بزرگ متکی بر بستر (Ground mats) (معمولاً به همراه لبه‌های

(Skirts) فرو رفته در بستر با طول کم) نگاهداری شده و گروه دوم بر روی پی‌های منفرد یا پایه قوطی (Spud cans) قرار می‌گیرند که می‌توانند بطور مستقل کنترل شوند.

هنگامیکه لایه‌های بستر دریا بسیار سست و نرم بوده باشد از سکوه‌های متکی بر پی‌های گسترده در سطح وسیعی استفاده بعمل آمده است. اینگونه پی‌ها بگونه‌ای طراحی می‌شوند که فشار کاری (bearing pressure) بسیار کمی را متحمل گردند. در زمینه ظرفیت باربری این نوع از پی‌ها که بر روی بستر رسی عادی تحکیم یافته (بهمراه افزایش مقاومت متناسب با افزایش عمق) قرار گرفته باشند مطالعات متعددی انجام یافته است. از جمله این مطالعات می‌توان به تحقیقات آقایان Pane, Ko, Schiffman, Leung در سال ۱۹۸۴ و نیز تحقیقات آقایان Wong و Kusakabe, Nakase در سال ۱۹۸۴ اشاره نمود که مدل پی‌های نواری بترتیب به عرض ۸۰ و ۵۰ میلیمتر را تحت شتابهای گریز از مرکز  $g(40-80)$  و  $50g$  و همراه تنشهای عمودی استاتیکی اعمال شده تا  $100kPa$  و  $25kPa$  مورد آزمایش قرار دادند. همچنین می‌توان به مطالعات Rodrigues de Miranda در سال ۱۹۸۵ اشاره نمود که رفتار مدل‌های با مقطع صفحه‌ای و پهنای ۱۵۶ میلیمتر را که بر روی خاک رس عادی تحکیم یافته قرار گرفته بودند در شتابی برابر  $100g$  بررسی کرد. مدل‌های فوق الذکر دارای لبه‌های (Skirts) پیرامونی با اعماق متغیر بودند که ابعاد واقعی تا ۱۰ متر را شبیه سازی می‌نمودند. این تحقیقات اثرات سودمند انتقال اجباری ناحیه انهدام و خرابی ناشی از بار استاتیکی قائم را به لایه‌های عمیقتر خاک زیر سطحی نشان دادند.

آقایان Herdy در سال ۱۹۸۰، James و Tanaka در سال ۱۹۸۴ و Craig و Higham در سال ۱۹۸۵ تحقیقاتی را در زمینه مدلسازی پی‌های منفرد سازه‌های فراساحل انجام دادند. هر یک از تحقیقات فوق الذکر در حد مطالعات اولیه بوده و از لحاظ حدود کار، توسط ظرفیت دستگاهها و تجهیزات موجود محدود می‌گردیدند. محدودیتهای موجود منجر گردید که پی‌هایی حداکثر تا قطر برابر  $3/0$  متر (در مقایسه با ۱۲-۱۰ متر که معمولاً در سازه‌های فراساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرد) شبیه سازی شده و تنشهای اعمال شده به مدلها بیشتر از مقدار واقعی باشند. آقایان Herdy, Craig و Higham خرابی و انهدام ناشی از سوراخ شدگی (Punch Failure) مربوط به بارگذاری قائم استاتیکی یک پی سطحی واقع بر روی یک لایه سخت را که بر روی یک لایه نرم قرار گرفته بود مورد ملاحظه و بررسی قرار دادند و نتایج حاصله از آزمایشات گریز از مرکز را با روشهای طراحی کاملاً تجربی مبتنی بر تجارب آزمایشگاهی مقایسه نمودند (شکل ۱۰). این مطالعات توسط آقایان James و Tanaka با استفاده از بارگذارهای متناوب و جانبی تکمیل گردید و آنها بارگذاری سطحی یک پی منفرد متکی بر بستر ماسه‌ای با کمی نفوذ زیر سطحی را مدلسازی کردند. همچنین آقای Hattori و همکارانشان در سال ۱۹۸۶ رفتار پی‌های پایه قوطی در ماسه را با استفاده از مدل‌های  $g-1$  برای یک سکوی چهار پایه مورد بررسی قرار دادند.

آقایان Sauteron و Perol در سال ۱۹۸۶ نتایج مربوط به یک آزمایش گریز از مرکز در فرانسه را گزارش نمودند که طی آن آزمایشاتی بر روی یک پی پایه قوطی منفرد با قطر ۱۲۰ میلیمتر انجام گردیده بود. هدف از انجام این آزمایشات، تخمین و برآورد میرایی هیستریک در خاک زیر سطحی برای حالات بدون نفوذ و نفوذ به میزان ۳ متر در بستر بود. آزمایشات در گستره وسیعی از فرکانسهای ورودی و بارهای وارده انجام شدند و نتایج حاصله حاکی از آن بودند که میزان میرایی، با افزایش بارهای وارده یا میزان نفوذ به درون بستر افزون می‌گشت.

نخستین مطالعات در زمینه پی سازه‌های کششی در آبهای عمیق توسط آقای Brown در سال ۱۹۸۲ انجام گردید که البته تحقیقاتی بسیار جامع و کلی در مورد کاربرد فن آوری گریز از مرکز در مهندسی پی سازه‌های فراساحلی بود و این نوع پی هم بطور ضمنی در آن بررسی شده بود. اما آقای Nunez و همکارانشان در سال ۱۹۸۸، با استفاده از دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی بزرگ اندازه دانشگاه کمبریج مطالعاتی را در زمینه بارگذاری کششی شمعه‌ای در بستر ماسه‌ای انجام دادند. آنها آزمایشات خود را بر مبنای بارهای کششی تکفام و متناوب تنظیم نموده. و سیستمهای جداگانه‌ای برای نصب و سپس بارگذاری

مدل شمع در دستگاه گریز از مرکز ابداع کردند. نتایج تحقیقات این گروه، ابزار مناسبی را جهت ارزیابی و اصلاح معیارهای طراحی موجود برای طراحی شمعها در بستر ماسه‌های بدست داد و در نتیجه گامهای بلندی جهت توسعه هر چه بیشتر سازه‌های پایه کششی (TLP) برداشته شد. در این آزمایشات از دو نوع پوشش مختلف برای ارزیابی اثر اصطکاک جداره استفاده بعمل آمد. نوع اول مدل‌های شمع با مخلوطی از اپوکسی و ماسه ریزدانه پوشانده شدند که نمایانگر یک جداره کاملاً زبر و خشن بود و نوع دوم مدل‌های شمع، دارای پوشش کاملاً صیقلی و صاف (blank piles) بودند. نتایج آزمایشات حاکی از آن بودند که ظرفیت باربری شمعهای صیقلی معمولاً کمتر از شمعهای زبر است و با وجودیکه کاهش و از بین رفتن مقاومت در آنها کمتر مشاهده می‌شود لیکن انهدام افزایشی متناوب (Cyclic incremental failure) نیز بچشم می‌خورد. از جمله سایر مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعات آقای Tirant و همکارانشان در سال ۱۹۸۸ در انستیتو نفت فرانسه (IFP) تحت عنوان شبیه سازی گریز از مرکز رفتار یک پی سطحی واقع بر روی ماسه آهکی برای سازه‌های فرا ساحل اشاره نمود. تراکم پذیری شدید ماسه‌های آهکی و نیز فاکتورهای ناشناخته فراوان در رفتار آنها علی‌الخصوص تحت تأثیر بارهای متناوب، دلیل اصلی انجام این مطالعات عنوان شده بود. آنها در تحقیقات خود از دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی آزمایشگاه مرکزی دانشگاه پل و راه پاریس (LCPC) استفاده کردند و به نتایج جالب توجهی دست یافتند و نتایج حاصله را برای کالیبره کردن یک مدل عددی پیش بینی رفتار شمعهای متکی بر ماسه‌های آهکی مورد استفاده قرار دادند. آنان از آزمایشات خود نتیجه گرفتند که مقدار نشست آبی نمونه ماسه‌های آهکی، بطور خطی متناسب با تنش اعمال شده ناشی از وزن پی افزایش می‌یابد. همچنین نشستهای جزئی ایجاد شده، نمایانگر خزش مصالح تراکم پذیر (ماسه آهکی) هستند و نشستهای ناشی از طوفان متوالی (Successive Storms) به سرعت کاهش می‌یابند. از سوی دیگر تغییر مکان قائم متناوب یک پی بطور خطی متناسب با بار اعمال شده افزایش می‌یابد.

همچنین آقای Lassoudiere و همکارانشان در سال ۱۹۸۸ در انستیتوی نفت فرانسه (IFP) مطالعاتی را در زمینه اندرکنش دینامیکی خاک - سازه برای یک سکوی خود بالا رو در معرض امواج دریا با استفاده از دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی (CESTA) انجام دادند و آنها نیز نتایج حاصله را به منظور مقایسه و کالیبره کردن شبیه سازیهای عددی مربوط به رفتار متناوب پی‌های سطحی و اندرکنش خاک - سازه مورد استفاده قرار دادند. در این مطالعات یک سکوی خودبالارو سه پایه به ارتفاع ۵۰ متر که دارای سه پی منفرد از نوع پایه قوطی (Spud Can) به قطر ۱۲ متر و فاصله ۶۰ متر از یکدیگر بود، مدلسازی گردید. آنها طی این آزمایشات نتیجه گرفتند که مادامیکه مدل سازه‌ای به اندازه مورد نیاز ساده در نظر گرفته شود این امکان وجود دارد که از دستگاه گریز از مرکز برای تهیه داده‌های مورد نیاز برای کالیبره کردن مدل‌های عددی رفتار پی یک سازه فراساحل در معرض بارگذاری با فرکانس کم (بارگذاری دریا - موج) در نزدیکی مرز تشدید استفاده بعمل آید. همچنین نتایج حاکی از آن بودند که موضوع پدیده تشدید سازه‌ای می‌تواند سبب غیرخطی شدن واکنش پی شود که سختی و نشست برگشت ناپذیر را شامل می‌شود.

اخیراً محققان چینی، تحقیقاتی را در زمینه نوع جدیدی از سکوه‌های دور از ساحل استخراج گاز با عنوان سکوی دور از ساحل پایه - تیری (beam-pillar offshore platform) انجام داده‌اند. این مطالعات توسط آقای Bao و همکارانشان در انستیتو تحقیقات علمی رودخانه یانگ تسه چین (Yangtze River Scientific Research Institute) در سال ۱۹۹۴ انجام یافته و اندرکنش پی این نوع جدید سازه‌های دور از ساحل و خاک مورد بررسی قرار گرفته است. این نوع از سکوه‌های دور از ساحل دارای مزایایی از جمله اجرای کوتاه مدت، هزینه پائین و جابجایی و انتقال آسان هستند لیکن ساز و کار عملکردی آنها چندان واضح و روشن نیست و در نتیجه مشکلاتی در طراحی و همچنین تحلیل آنها توسط روش اجزای محدود وجود دارد. مطالعات فوق الذکر با هدف استنتاج و فهم ساز و کار سکوه‌های انجام یافت و طی آزمایشات، فشار خاک در کف پایه‌ها و

تیرهای سکو و اصطکاک کناره‌های پایه‌ها اندازه‌گیری شد و در واقع نخستین آزمایشات گریز از مرکز در زمینه مدلسازی سکوه‌های دوز از ساحل در کشور چین بود. نتایج این آزمایشات حاکی از آن بودند که پارامترهای اندازه‌گیری شده همچون فشار برگشتی (back pressure) و اصطکاک اندازه‌گیری شده توسط ترانس‌دیوسرها (Transducers) و کرنش سنجها قابل اعتماد هستند. همچنین نتایج حاصله سهم بار هر یک از اجزاء سازه را به روشنی مشخص ساخته و نشان دادند که فشار تحتانی پایه‌ها برابر ۶۰ درصد، فشار تحتانی تیرها برابر ۲۰ درصد و اصطکاک کناره‌های پایه‌ها ۲۰ درصد بار وارده به سکو را شامل می‌شوند. از سوی دیگر آزمایشات گریز از مرکز موید این نظریه بودند که سکوه‌های پایه تیری از پایداری خوبی برخوردار بود و دارای ظرفیت باربری بالا و نشست کم هستند.

#### ۴- سازه‌های حفاظت ساحلی

تاکنون در این زمینه پروژه‌های متعددی در اروپا با استفاده از فن‌آوری گریز از مرکز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. نخستین پروژه افزایش ارتفاع خاکریزهای حفاظتی واقع در پایین دست سیلگیر رودخانه Thames در انگلستان نام داشت و دومین پروژه مربوط به مطالعات سیلگیر حفاظتی خور Oosterschelde در هلند بود. هر دو این پروژه‌ها در پی وقوع سیل سهمگین سال ۱۹۵۳ در بخش جنوبی دریای شمال و خسارات عظیم وارده تعریف شده بودند. در مطالعات انگلیسی‌ها که توسط پروفیسور Schofield و دانشجویانش در سال ۱۹۷۳ در دانشگاه منچستر آغاز گردید و سپس تا سال ۱۹۸۳ در دانشگاه کمبریج ادامه یافت اندر کنشهای احتمالی بین ناپایداری شیب و برکنش هیدرواستاتیکی مورد بررسی قرار گرفت و مقالات متعددی در این زمینه منتشر گردید. اما هلندیها در مطالعات مربوط به سیلگیر حفاظتی Oosterschelde مدلسازی فیزیکی را از مراحل اولیه مطالعات در نظر گرفته بودند و این مطالعات شاید یکی از بهترین نمونه‌های کاربرد تکنیک گریز از مرکز در یکی از پروژه‌های خاص و بزرگ مهندسی عمران باشد. طراحیهای اولیه برای سیلگیر چند دریچه‌ای، مستلزم استفاده از صندوقه‌های قرار گرفته بر سطح زمین - صندوقه‌های سطحی (Surface Founded Caissons) - بود و به همین منظور آزمایشات گریز از مرکز و نیز مدل‌های ۱-G برای تخمین و برآورد عملکرد یک سازه آزمایشی با ابعادی برابر یک - سوم نمونه در ابعاد واقعی مورد استفاده قرار گرفتند. برآوردهای حاصل از آزمایشات گریز از مرکز با مشاهدات صحرایی موجود در تطابق نبودند چراکه در ساخت مدل از خاک زیر سطحی با چگالی نسبی یکنواخت در حدود ۵۰٪ استفاده شده بود. ارزیابی مجدد داده‌های حاصل از بررسیها و آزمایشات صحرایی، نشانگر وجود مناطقی با مصالح سست‌تر در خاک زیر سطحی بود که این مناطق بعداً در مدل ساخته شده مورد اصلاح و بازبینی قرار گرفتند و در نتیجه شرایط مدلسازی فیزیکی با آنچه که واقعاً در طبیعت وجود داشت تطابق بیشتری یافت و نتایج حاصل توسط آقایان Rowe و Craig در سال ۱۹۷۶ منتشر گردید. کاربرد مدل‌های گریز از مرکز به‌مراه بسیاری داده‌های دیگر باعث گردید که در طراحی نهایی، صندوقه‌های سطحی به صندوقه‌های عمقی (Deep Founded Caissons) تغییر یابند.

آقایان Terashi، Kitazume و Tanaka در سال ۱۹۸۴ تحقیقاتی را در زمینه سایر اشکال سازه‌های حفاظت ساحلی انجام دادند. آنها در مطالعات خود رفتار موج شکن‌های مرکب صندوقه‌ای - توده سنگی را مورد بررسی قرار دادند که به منظور استهلاک انرژی ایجاد شده در امتداد سواحل شمالی ژاپن در نظر گرفته شده بودند. مطالعات اولیه آنها به پایداری استاتیکی محدود می‌گردید ولی بعداً به بارگذاریهای دینامیکی هم تسری یافت. همچنین آقایان Schofield و Venter در سال ۱۹۸۴ تعدادی آزمایشات گریز از مرکز مربوط به شبیه سازی رفتار لرزه‌ای یک دایک دریایی ایده‌آل را انجام داده و نتیجه گرفتند که اثرات مخرب و زیان‌آور بارگذاری دینامیکی منجر به افزایش فشارهای منفذی می‌تواند افزایش پتانسیل روانگرایی را نتیجه دهد.



از جمله آخرین تحقیقات انجام یافته در این زمینه می‌توان به مطالعات آقای Allersma و همکارانشان در سال ۱۹۹۴ در دلفت ژئوتکنیک اشاره نمود. آنها با استفاده از دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی کوچک اندازه خود، خرابی دایکهای حفاظتی را که از درون تراوی آب (Water infiltration) ناشی از کنش امواج حاصل شده باشد، شبیه سازی نموده‌اند و طی تحقیقات خود نتیجه‌گیری کردند که زمان وقوع انهدام و خرابی یک دایک ماسه‌ای در حین سرریزی موج به میزان اشباع شدگی و زاویه شیب بدنه ماسه‌ای بستگی دارد و انهدام و خرابی دایکهای ماسه‌ای در حین درون تراوی آب در تاج دایک از ناپایداری موضعی ناشی از تراوش آغاز می‌گردد و این موضوع، با برخی فرضیات نظری مبنی بر انهدام توام با یک ساز و کار دایره لغزش در تناقض است. از دیگر نتایج مهم این تحقیقات می‌توان به این مورد اشاره داشت که چسبندگی نقش بسیار مهمی را در ساز و کار انهدام ایفا می‌نماید. همچنین در زمینه کاربردهای فرعی فن آوری گریز از مرکز نیز می‌توان به تحقیقات آقای Muraleetharan و همکارانشان در سال ۱۹۹۴ در آمریکا اشاره داشت که با استفاده از آزمایشات گریز از مرکز دینامیکی، دقت و اعتبار برنامه کامپیوتری DYSAC 2 (که یک برنامه کامپیوتری اجزا محدود دینامیکی دو بعدی غیرخطی کاملاً کوبله است) را برای تحلیل دایکهای حفاظتی مورد بررسی قرار داده‌اند. این مطالعات با استفاده از دستگاههای گریز از مرکز ژئوتکنیکی دانشگاه دیویس کالیفرنیا (UCD) و انستیتو تکنولوژی کالیفرنیا (Caltech) انجام یافته است. نتایج آزمایشات حاکی از آن بودند که این برنامه کامپیوتری برای طراحی دایکهای حفاظتی سنگی - خاکی و تحلیل رفتار آنها به هنگام وقوع زلزله بسیار مناسب و کارآمد هستند.

## ۵- دیوارهای دریایی و سایر کاربردها

دیوارهای دریایی (Quay Walls) نیز از جمله سازه‌هایی هستند که با استفاده از فن آوری گریز از مرکز مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. آقای Takada و همکارانشان در سال ۱۹۸۸ در دانشگاه اوزاکا مطالعاتی را در زمینه پایداری دیوارهای دریایی از نوع سپر فلزی کوبیده شده درون زمینهای رسی که توسط شمعهای ماسه‌ای متراکم بهبود یافته و تقویت شده باشند انجام دادند. تا قبل از انجام این آزمایشات رفتار مکانیکی زمینهای بهبود و اصلاح یافته توسط روش SCP Sand Compaction Pile بخوبی مشخص نبود و طراحی‌ها عمدتاً براساس قضاوت مهندسی انجام می‌گردید. یکی از اهداف این مطالعات، بررسی اثر موقعیت شمعهای ماسه‌ای متراکم (SCP) بر پایداری دیوار دریایی بود. از جمله سایر اهداف نیز می‌توان به ارزیابی قابلیت اعتماد و اعتبار روش دایره لغزش در تحلیل پایداری اینگونه زمینهای اصلاح شده اشاره داشت. نتایج حاصل از انجام این آزمایشات، راهکارهای عملی فراوانی را جهت طراحی مناسب اینگونه روشهای اصلاح زمینهای سست بدست داد. در این آزمایشات رفتار لایه‌های رسی نرم بستر دریا که با استفاده از نصب شمعهای ماسه‌ای متراکم در نواحی فعال و غیرفعال و یا هر دو ناحیه، بهبود یافته و اصلاح شده باشند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشات حاکی از آن بودند که مدل سپری فلزی انعطاف پذیر مربوط به زمینهای رسی با شمعهای ماسه‌ای نصب شده در ناحیه غیرفعال، به آهستگی و بواسطه دواير لغزش بسیار بزرگ دچار خرابی و انهدام می‌شود حال آنکه زمینهایی که شمعهای ماسه‌ای در آنها در ناحیه غیرفعال نصب نشده است سرعت و در اثر دواير لغزش کوچکتری که از انتهای پائینی سپری فلزی عبور می‌کنند منهدم می‌گردند. از سوی دیگر نصب شمعهای ماسه‌ای در ناحیه فعال، ممان خمشی ایجاد شده در سپری فلزی و در نتیجه فشار محرک خاک را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج حاکی از آن بودند که سپری فلزی انعطاف پذیر برای بسیج مقاومت خاک بطور موثرتری عمل می‌نماید. مطالعات پارامتریک در زمینه تحلیل پایداری نیز موید این نظریه بودند که در تمامی حالات، تخمین و برآورد مقاومت برشی خاکریز ماسه‌ای پشتی بحرانیترین پارامتر بوده و زاویه اصطکاک ماسه ریخته شده درون شمعهای ماسه‌ای و نرخ تمرکز تنش، تاثیر مشخص بر پایداری سپری فلزی دارای شمع ماسه‌ای متراکم در ناحیه فعال خود دارند.

آقایان **Zhu** و **Yi** در سال ۱۹۸۸ در انستیتو تحقیقات هیدرولیک **Nanjing** چین با استفاده از مدلسازی گریز از مرکز به بررسی ساز و کار و چگونگی انهدام بخشهایی از دیوار دریایی **Wuwan** پرداختند و اشتباهات فاحش طراحی این دیوار دریایی را که منجر به خرابی آن گردیده بود نمایان ساختند. نتایج آزمایشات و تحلیلها حاکی از آن بودند که مقدار مقاومت برشی و در نتیجه ضرایب اطمینان در نظر گرفته شده در طراحی بسیار کمتر از مقدار واقعی خود هستند. این دیوار دریایی متشکل از یک سازه ثقلی بتنی به ارتفاع ۸/۷ متر بود که بر روی یک پی ریپ راپ به ضخامت ۲/۵ متر قرار گرفته بود و در طی عملیات لایروبی بخشهایی از آن بطول ۴۸ متر دچار نشست، لغزش و کج شدگی (**Tilting**) گردیده بود. این مطالعات نیز یکی از نمونه‌های خوب کاربرد این فن‌آوری در حل مسائل و مشکلات ویژه و خاصی است.

آقای **Zeng** و همکارانشان در سال ۱۹۹۳ در دانشگاه کمبریج آزمایشات گریز از مرکزی را در زمینه پایداری لرزه‌ای دیوارهای دریایی از نوع سپری فلزی مهار شده انجام دادند و براساس نتایج حاصل از این آزمایشات و تحلیل‌های نظری نشان دادند که تقویت ارتعاش ناشی از کاهش سختی خاکریز پشتی می‌تواند مسبب آغاز انهدام و خرابی یک دیوار دریایی گردد. همچنین همین محققان در سال ۱۹۹۴ مطالعاتی را در مورد واکنش لرزه‌ای دیوارهای دریایی از نوع وزنی انجام دادند و با توجه به نتایج حاصله از آزمایشات گریز از مرکز نتیجه‌گیری نمودند که برای یک دیوار وزنی با خاکریز پشتی خشک، روش بلوک لغزان نیومارک می‌تواند به منظور تخمین و برآورد جابجایی جانبی مورد استفاده قرار گیرد و پس از وقوع لغزش، ارتعاش دیوار از لرزش پایه دیوار منفک گردیده و جدا می‌شود. لیکن برای یک دیوار با خاکریز پشتی اشباع، تولید و ایجاد فشار آب منفذی اضافی ناشی از بارگذاری متناوب، سختی خاک را کاهش داده و بار وارده به دیوار را افزایش می‌دهد و ممکن است به خرابی و انهدام سازه منتج شود. این آزمایشات بر روی مدل مربوط به یک دیوار دریایی وزنی به ارتفاع ۸/۰ متر و عرض ۴/۰ متر انجام گردید. از جمله آخرین تحقیقات انجام شده در زمینه دیوارهای دریایی از نوع سپری فلزی مهار شده می‌توان به مطالعات آقایان **Ting** و **Whitman** در انستیتو تکنولوژی (MIT) در سال ۱۹۹۴ اشاره نمود. این محققان مطالعات جامعی را در زمینه رفتار لرزه‌ای این نوع از دیوارهای دریایی با خاکریز پشتی اشباع انجام دادند و اندرکنش بین خاکریز پشتی و دیوار دریایی، رفتار ماسه بهنگام بارگذاری برشی متناوب و نیز مدلسازی کج شدگی دیوار را با استفاده از دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی انستیتو پلی تکنیک **Rensselaer (RPI)** مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. آنها بر اساس نتایج حاصله نتیجه‌گیری نمودند هنگامیکه خاک تنش موثر خود را بهنگام وقوع زلزله بطور موقت از دست می‌دهد هنوز می‌تواند شتابهای زمین را منتقل نماید و این حالت بعنوان شبه روانگرایی (**Quasi-liquefaction**) تعریف می‌گردد. همچنین نتایج آزمایشات نشان دادند که معادله مونونوبه - اوکابه - وسترگارد بطور موثری می‌تواند در تخمین و برآورد نیروی دینامیکی کل ناشی از وزن خاک بر یک دیوار حائل برای ماسه‌های اشباع بهنگام وقوع زلزله مورد استفاده قرار گیرد. از سوی دیگر یک مدل بلوک لغزان جرم متمرکز نیز برای تخمین و برآورد کج شدگی ناشی از لغزش توسط محققان فوق‌الذکر پیشنهاد گردید که تطابق خوبی با نتایج حاصله از انجام آزمایشات گریز از مرکز داشت.

از دیگر کاربردهای فن‌آوری گریز از مرکز در مهندسی دریا و سواحل می‌توان به مطالعات مربوط به جزایر مصنوعی، شبیه سازی برخورد کشتیها به سکوها و اسکله‌ها، مدلسازی تاریخچه زمانی بارهای ناشی از یخ خطوط لوله کارگذاری شده در بستر دریا و شبیه سازی فرآیند لنگر اندازی کشتی‌ها اشاره نمود که بدلیل محدود بودن و جلوگیری از تطویل مطلب از ذکر جزئیات بیشتر در مورد آنها خودداری می‌شود.

## ۶- فعالیتهای انجام گرفته در موسسه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

موسسه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) در راستای اهداف و برنامه‌های پژوهشی خود، طرح ایجاد و

استقرار آزمایشگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی را در قالب یکی از برنامه‌های میان مدت تجهیز آزمایشگاه دینامیک خاک خود در دست اقدام دارد. مطالعات اولیه مربوط به تعیین مشخصات فنی مورد نیاز دستگاه و نیز شناسایی سازندگان معتبر و ایجاد ارتباط با آنها از سال گذشته آغاز گردیده است.

براساس مطالعات انجام گرفته و با توجه به نیازهای اولیه، دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی IIEES به همراه شبیه ساز زلزله آن دارای مشخصاتی بشرح زیر خواهد بود. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب جانمایی مکانیکی (شامل پلان و مقطع) این دستگاه گریز از مرکز را بهمراه شبیه ساز زلزله مربوطه نشان می‌دهند.

### سیستم اصلی

دامنه تغییرات g

در شعاع اسمی

در بخش تحتانی نمونه

- (۱۰-۲۰۰)g
- (۱۱-۲۳۰)g
- ۲/۷۰m
- ۳/۰m
- (۳۸-۲۶۰)RPM
- ± ۱g
- ۵۵۰kg
- ۱۲۰۰kg

شعاع اسمی

شعاع در بخش تحتانی نمونه

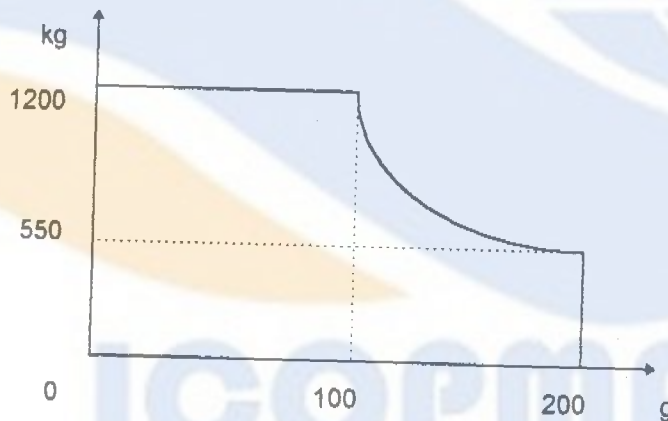
دامنه تغییرات سرعت

دقت شتاب

حداکثر وزن نمونه در ۲۰۰g

حداکثر وزن نمونه در ۱۰۰g

### نمودار عملکرد بار - شتاب دستگاه



- ۱۰۰۰mm
- ۸۰۰mm
- ۸۰۰mm
- ۵۰۰۰N
- ۱۲۰۰۰۰g×kg
- ۰/۳gRMS

ابعاد نمونه: عمق

عرض

ارتفاع

عدم توازن قابل تحمل

نیروی g

ارتعاش (حداکثر در انتهای نمونه)

۲۰۰ KVA  
 ۳۸۰ V  
 ۵۰ ± ۰/۵ Hz  
 ۳

توان نصب شده  
 ولتاژ خط به خط  
 فرکانس  
 تعداد فازها

۱/۰ m  
 ۰/۵ m  
 ۰/۶ m  
 ۴۰۰ kg  
 (۱۰-۵۰) g  
 ۱۰۰۰۰۰ N  
 $۲/۵ m \times ۱۰^{-۳}$   
 ۰/۲ m/s  
 ۲۵۰ m/s/s  
 (۲۵-۲۰۰) Hz  
 ۱ s

شبیه ساز زلزله  
 ابعاد نمونه: طول  
 عرض  
 ارتفاع  
 وزن نمونه در حال دوران  
 دامنه تغییرات شتاب گریز از مرکز  
 نیروی لرزاننده (حداکثر)  
 جابجایی پیک  
 سرعت پیک  
 شتاب پیک  
 فرکانس  
 تداوم زلزله

نمودار عملکرد فرکانس / شتاب دستگاه شبیه ساز زلزله



### ۷- نتیجه گیری:

همانگونه که در بخشهای پیشین اشاره شده است امروزه کاربرد فن آوری گریز از مرکز بخوبی جایگاه خود را در تمامی زمینه های مهندسی ژئوتکنیک از جمله ژئوتکنیکی دریایی یافته است و با توجه به گستره موضوعات تحقیقاتی تحت پوشش با این فن آوری ضروری است که هر چه سریعتر توان تحقیقاتی داخل کشور نیز به این فن آوری تجهیز گردد. با توجه به مشخصات فنی دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی مورد نظر موسسه که محدوده های شتاب ثقل مورد استفاده در مطالعات ژئوتکنیک دریایی را بطور کامل تحت پوشش قرار می دهد، می توان امید داشت که در صورت راه اندازی این آزمایشگاه و تجهیز آن به ملحقات جانبی مورد نیاز (از جمله تجهیزات مربوط به نصب مدل شمع در حال دوران دستگاه و یا دستگاه شبیه ساز امواج دریا) بستری مناسب برای انجام تحقیقات بنیادین و کاربردی در زمینه مهندسی ژئوتکنیک دریایی هماهنگ با دانش فنی روز فراهم آید.

## ا-مراجع

- 1- Adachi T., Kimura M., Kobayashi H., Morimoto A.. 1994. Behavior of laterally loaded pile groups in dense sand. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.
- 2- Allersma H.G.B., Ligtenberg I.A.G., Koehorst B.A.N.. 1994. Simulation of failure of dikes by wave infiltration. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.
- 3- Bao C.G., Li M., Shan R.G., Wang H.H. .1994. Interaction between foundation of beam-pillar offshore platform and soil. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.
- 4- Craig W.H.. 1988. Centrifuge models in marine and coastal engineering. Centrifuge in Soil Mechanics. Craig , James & Schofield (eds). Balkema.
- 5- Fioravante V., Jamiolkowski M., Pedroni S.. 1994. Modelling the behavior of piles in sand subjected to axial load. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.
- 6- Kitazume M., Miyajima S.. 1994. Lateral resistance of a long pile in soft clay. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.
- 7- Kotthaus M., Grundhoff T., Jessberger H.L.. 1994. Single piles and pile rows subjected to static and dynamic lateral load. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.
- 8- Lassoudiere F., Perol C.. 1988. Centrifuge study of soil-structure dynamic interaction for a jack-up platform submitted to sea-wave loading. Centrifuge 88. Paris. Balkema.
- 9- Mc Vay M., Bloomquist D., Vanderlinde D., Clausen J.. 1994. Studies on laterally loaded pile groups in sand. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.
- 10- Mezazigh S.M., Garnier J., Favraud C.F.. 1994. Effect of slope and soil density on p-y reaction curves for piles in sand. Centrifuge 94. Singapore.

Balkema.

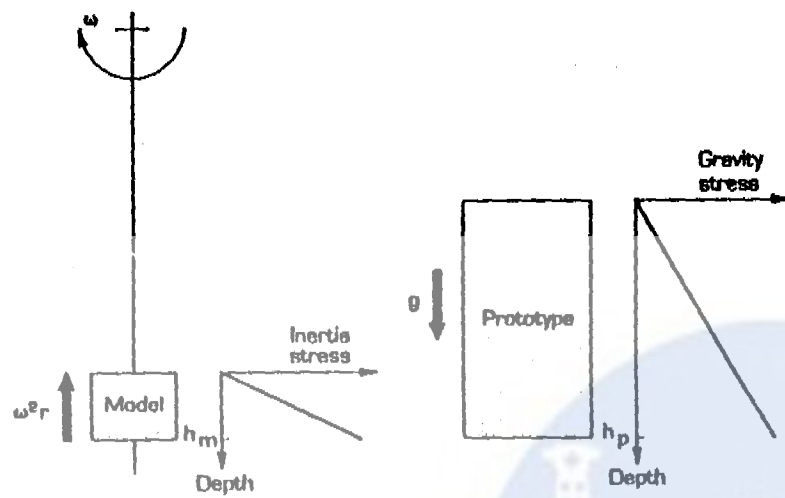
- 11- Muraleetharan K.K., Arulmoli K., Jagannath S.V., Wittkop R.C., Foxworthy J.E.. 1994. Validation of a computer code for the analysis of dike retaining structures. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.
- 12- Nunez I.L., Hoadley P.J., Randolph M.F., Hullet J.M. 1988.. Driving and tension loadings of piles in sand on a centrifuge. Centrifuge 88. Paris. Balkema.
- 13- Nunez I.L., Phillips R., Randolph M.F., Wesselink B.D.. 1988. Modelling laterally loaded piles in calcareous Sand. Centrifuge 88. Paris. Balkema.
- 14- Sabagh S.K.. 1984. Cyclic axial load tests on piles in sand. Proc. of International Conference "Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design". Manchester. Balkema.
- 15- Sekiguchi H., Kia k., Okomoto O.. 1994. Wave-induced instability of sand beds. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.
- 16- Takada N., Ohshima A., Mikasa M., Kawamoto K. 1988.. Centrifuge model tests on anchored sheetpile quay wall on clay ground improved by sand compaction piles. Centrifuge 88. Paris. Balkema.
- 17- Taylor R.N. (ed.). 1995. Geotechnical Centrifuge Technology. Chapman & Hall.
- 18- Ting N., Whitman R.V.. 1994. Modelling of tilting retaining wall with saturated backfill. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.
- 19- Tirant P.L., Fay J.B., Nauroy J.F., Meimon Y., Lassoudiere F.. 1988. Centrifuge simulation of the behavior of a shallow foundation for offshore structure on Calcareous sand. Centrifuge 88. Paris. Balkema.
- 20- Yet N.S., Leung C.F., Lee F.H.. 1994. Behavior of axially loaded piles in sand.

Centrifuge 94. Singapore. Balkema.

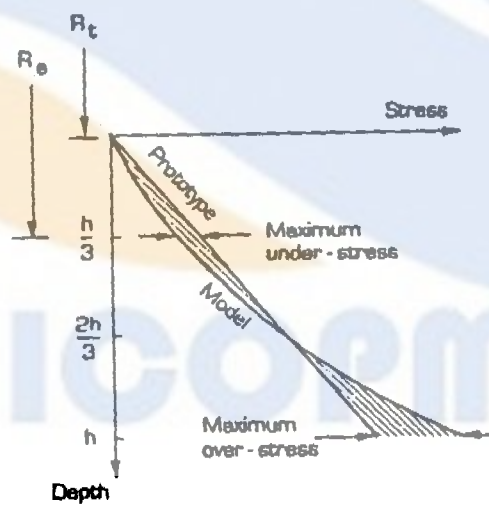
21- Zeng X.. 1994. Seismic response of gravity type quay wall. Centrifuge 94. Singapore. Balkema.

22- Zhu W., Yi J.. 1988. Application of centrifuge modelling to study a failed quay wall. Centrifuge 88. Paris. Balkema.



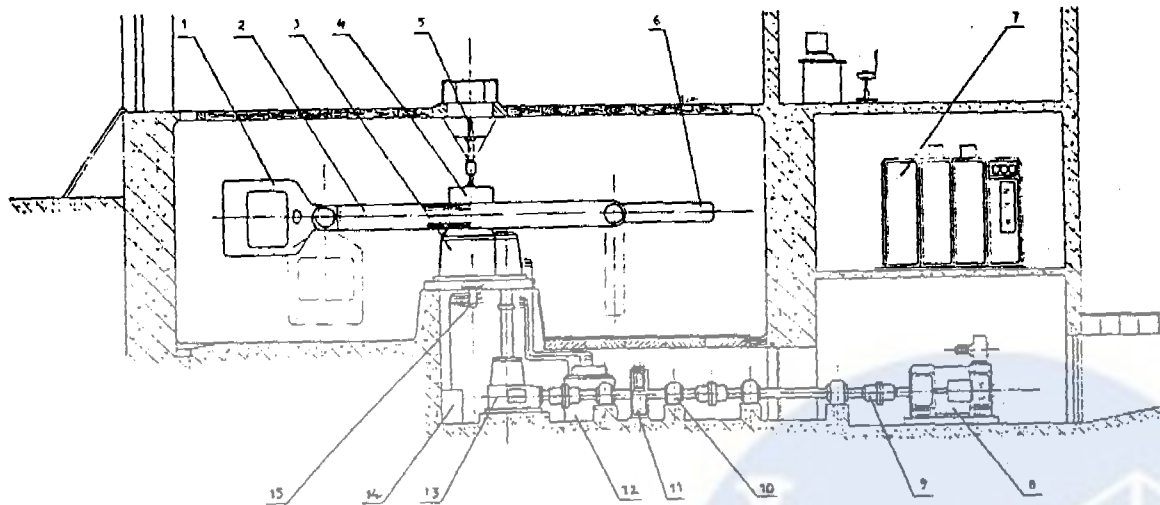


شکل ۱- تنشهای اینرسی در یک مدل گریز از مرکز ناشی از دوران دستگاه حول یک محور ثابت در مقایسه با تنشهای ثقلی در نمونه با ابعاد واقعی متناظر

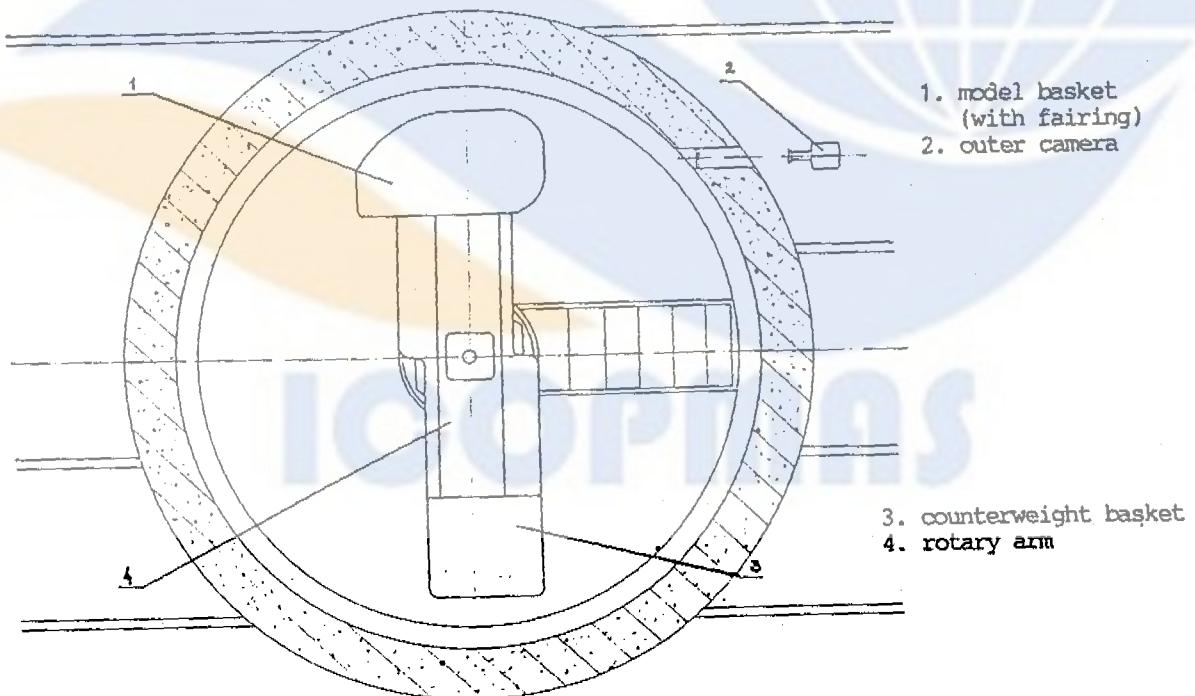


شکل ۲- مقایسه تغییرات تنش با عمق در یک مدل گریز از مرکز و نمونه با ابعاد واقعی متناظر آن

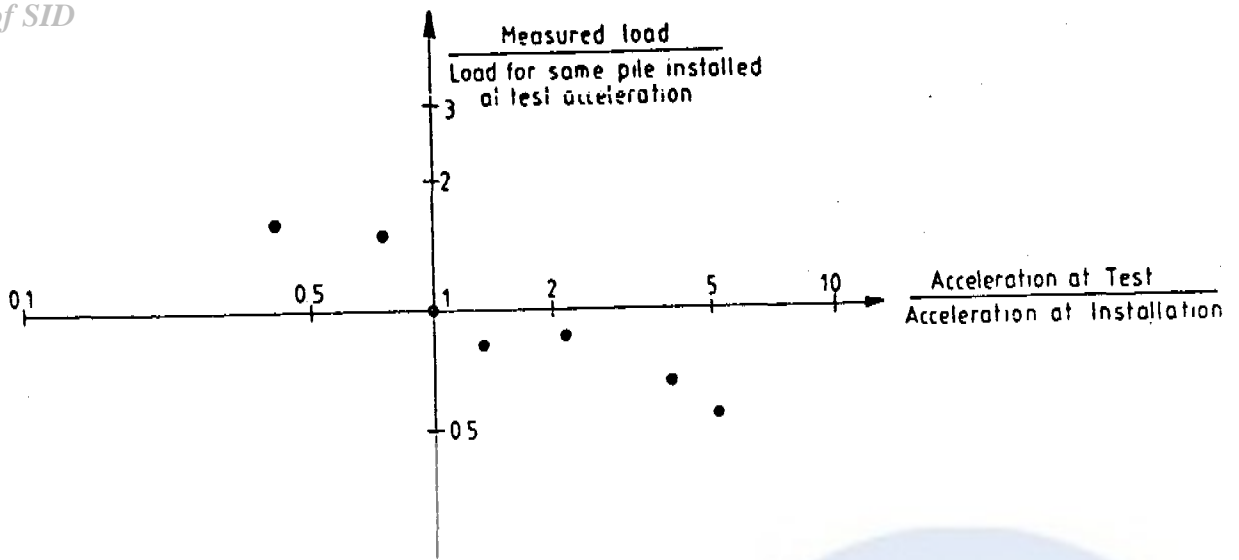




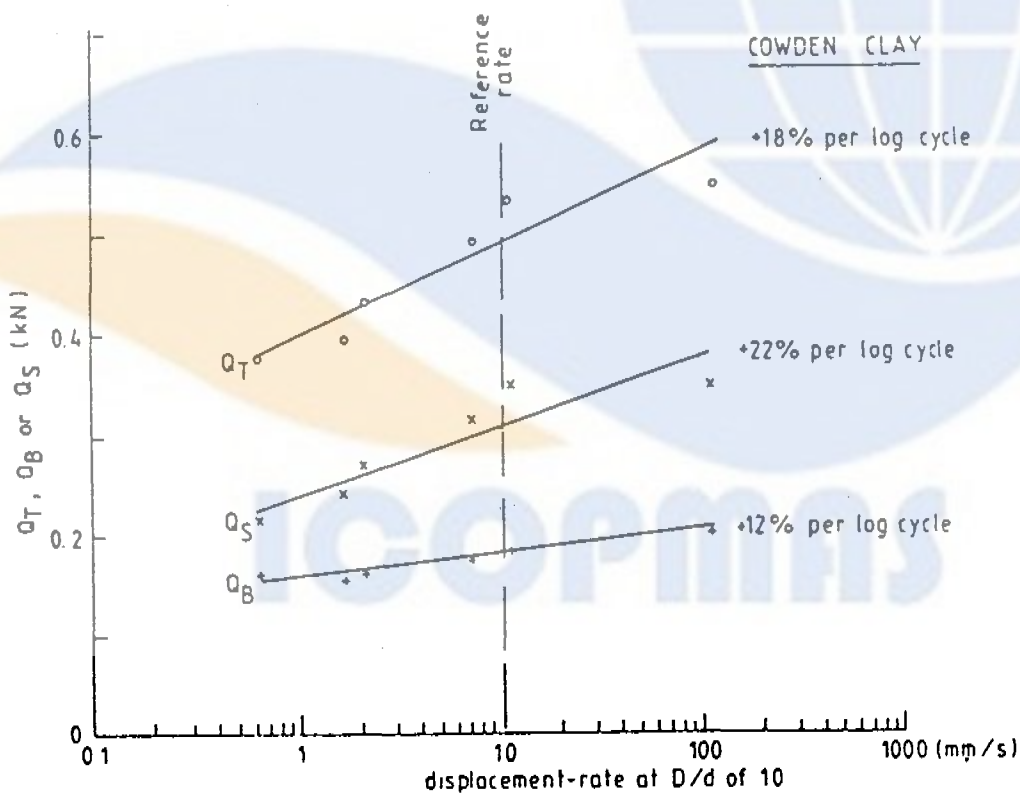
- |                                      |                         |                     |                         |
|--------------------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| 1. model basket<br>(fairing removed) | 4. electronics housing  | 8. DC motor         | 12. lubricating system  |
| 2. rotary arm                        | 5. slipping stacks      | 9. coupling         | 13. decelerator         |
| 3. turning platform                  | 6. counterweight basket | 10. bearing         | 14. pressure oil system |
|                                      | 7. SCR supply           | 11. elec-hyd. brake | 15. rotary joints       |



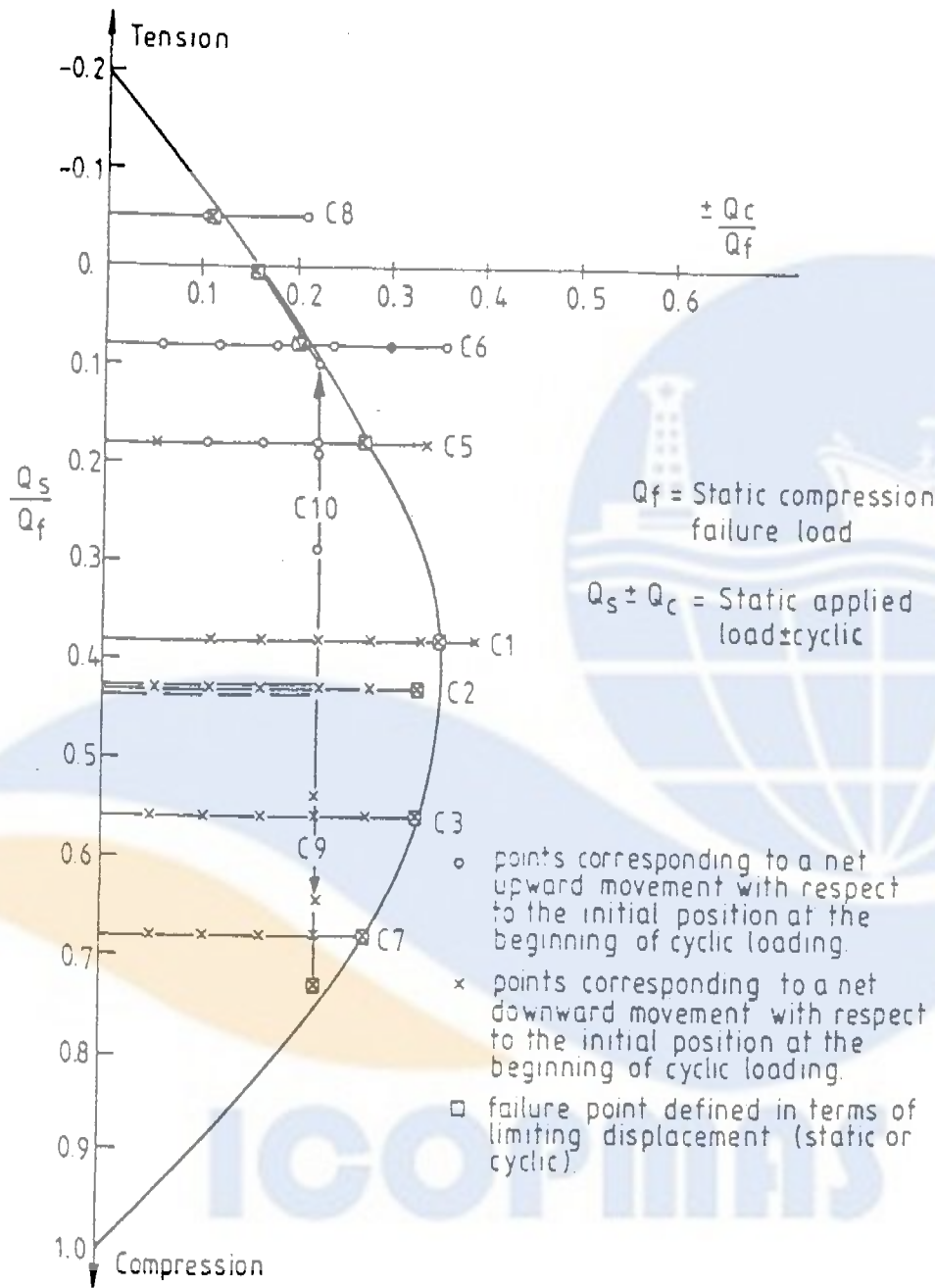
شکل ۳- یک نمونه تیپ از یک دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی و اجزاء و مولفه‌های آن



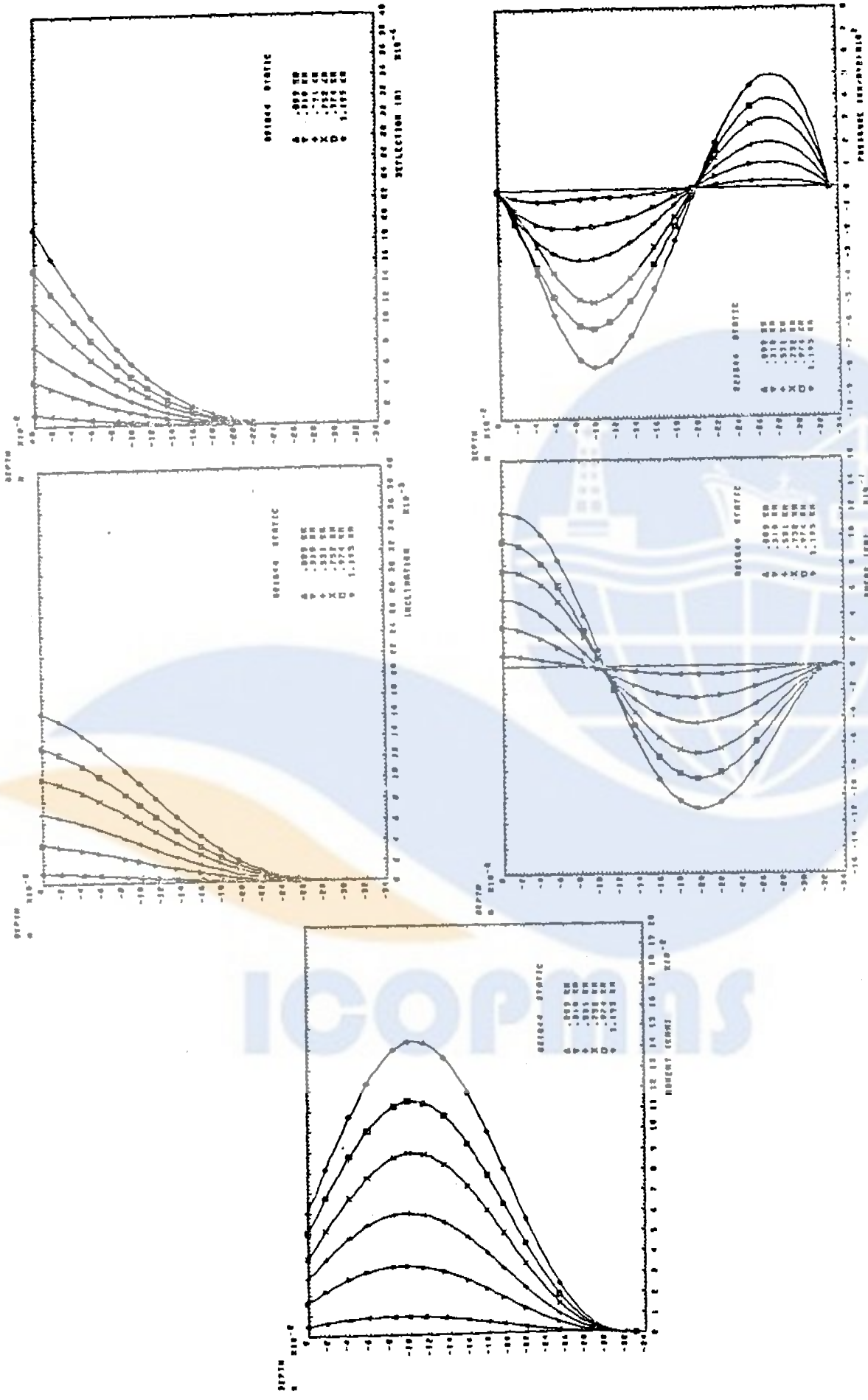
شکل ۴- تاثیر شتاب دورانی دستگاه به هنگام نصب مدل بر ظرفیت باربری اندازه گیری شده شمع



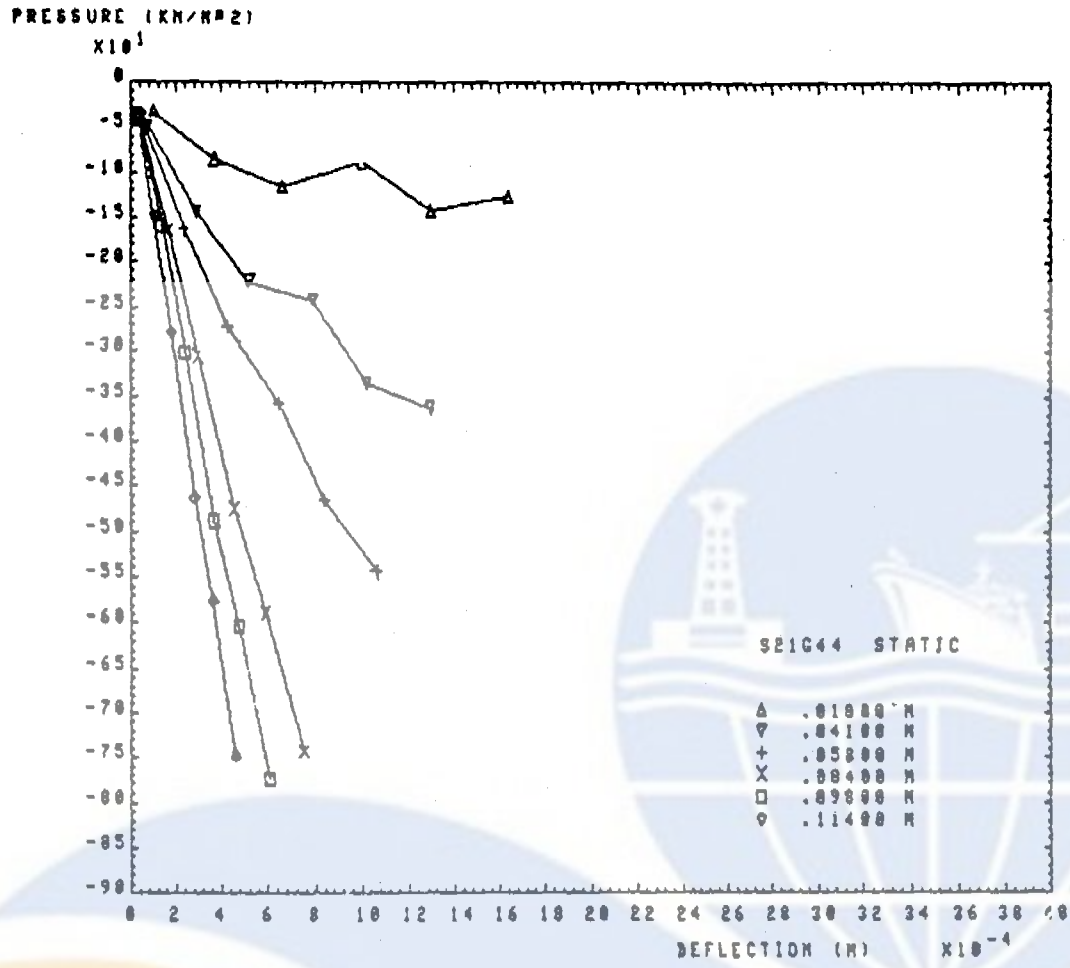
شکل ۵- تاثیر نرخ و میزان تغییر مکان بر بارهای کل، پایه و جداره برای مدل‌های شمع



شکل ۶- مسیره‌های تنش و پوش گسیختگی برای آزمایشات انجام گرفته بر روی مدل‌های شمع نصب شده در ماسه

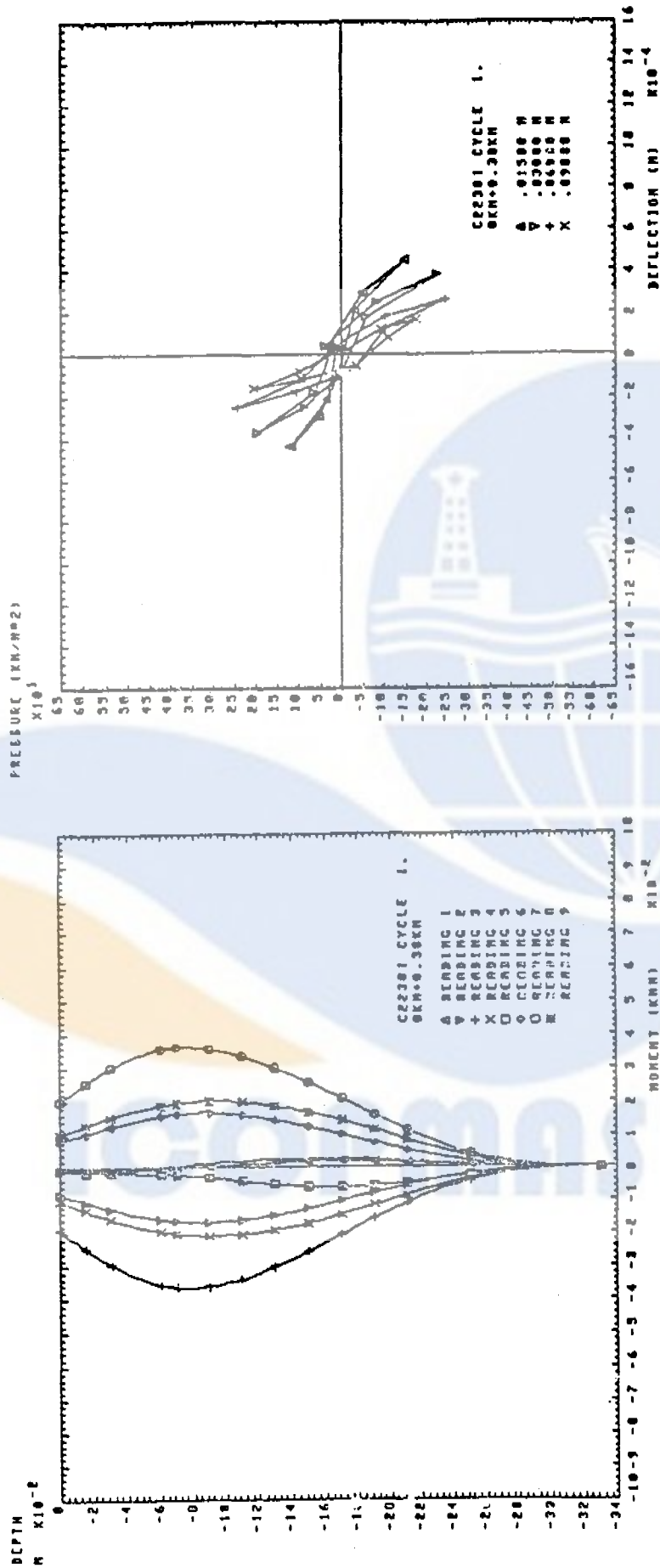


شکل ۷- مقادیر ممان / عمق اندازه گیری شده برای مدل شمع ۲۵mm نصب شده در شتاب ۴g که در معرض بار جانبی استاتیکی قرار گرفته است

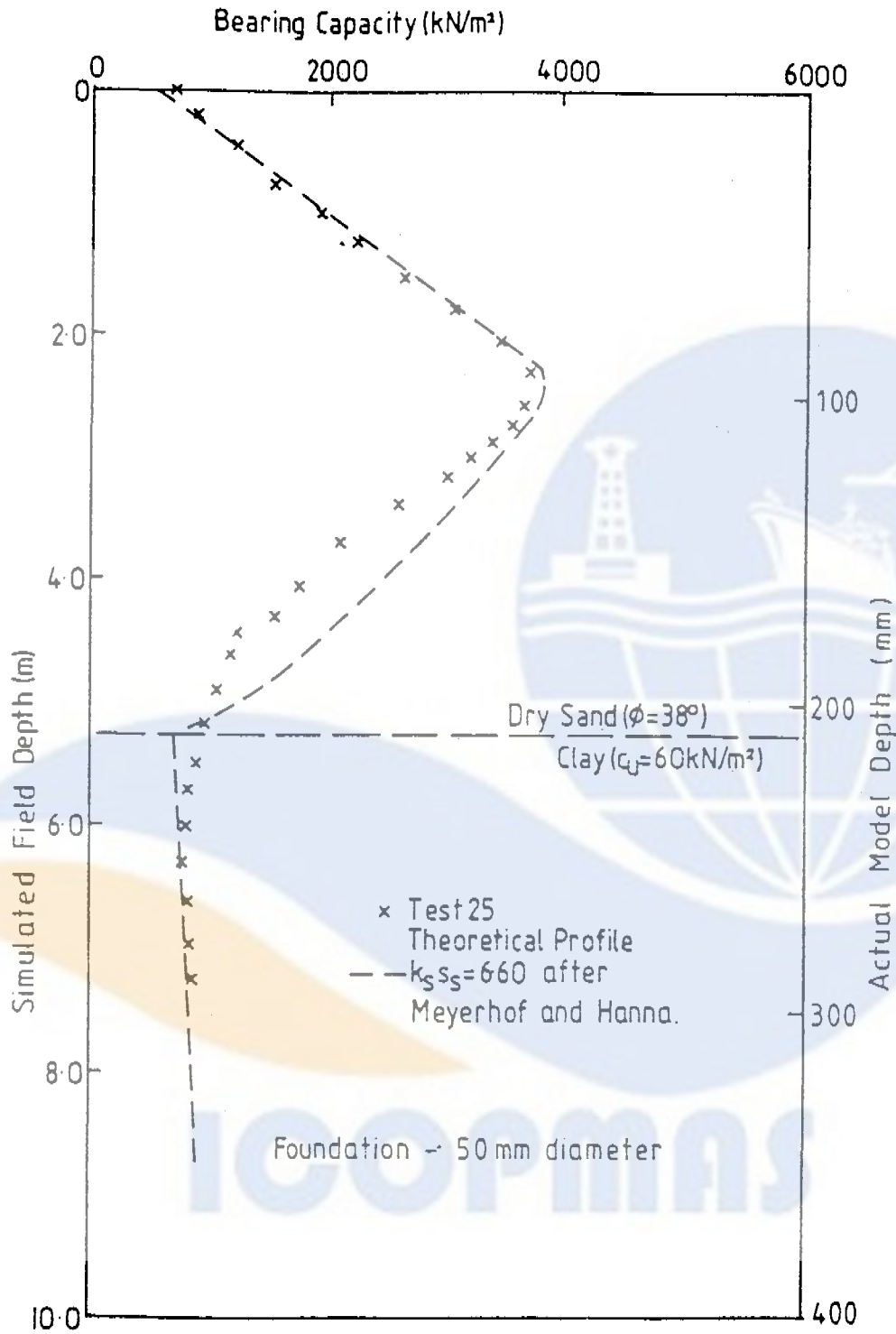


شکل ۸- منحنی های فشار / انحراف (deflection) حاصل از شکل ۷

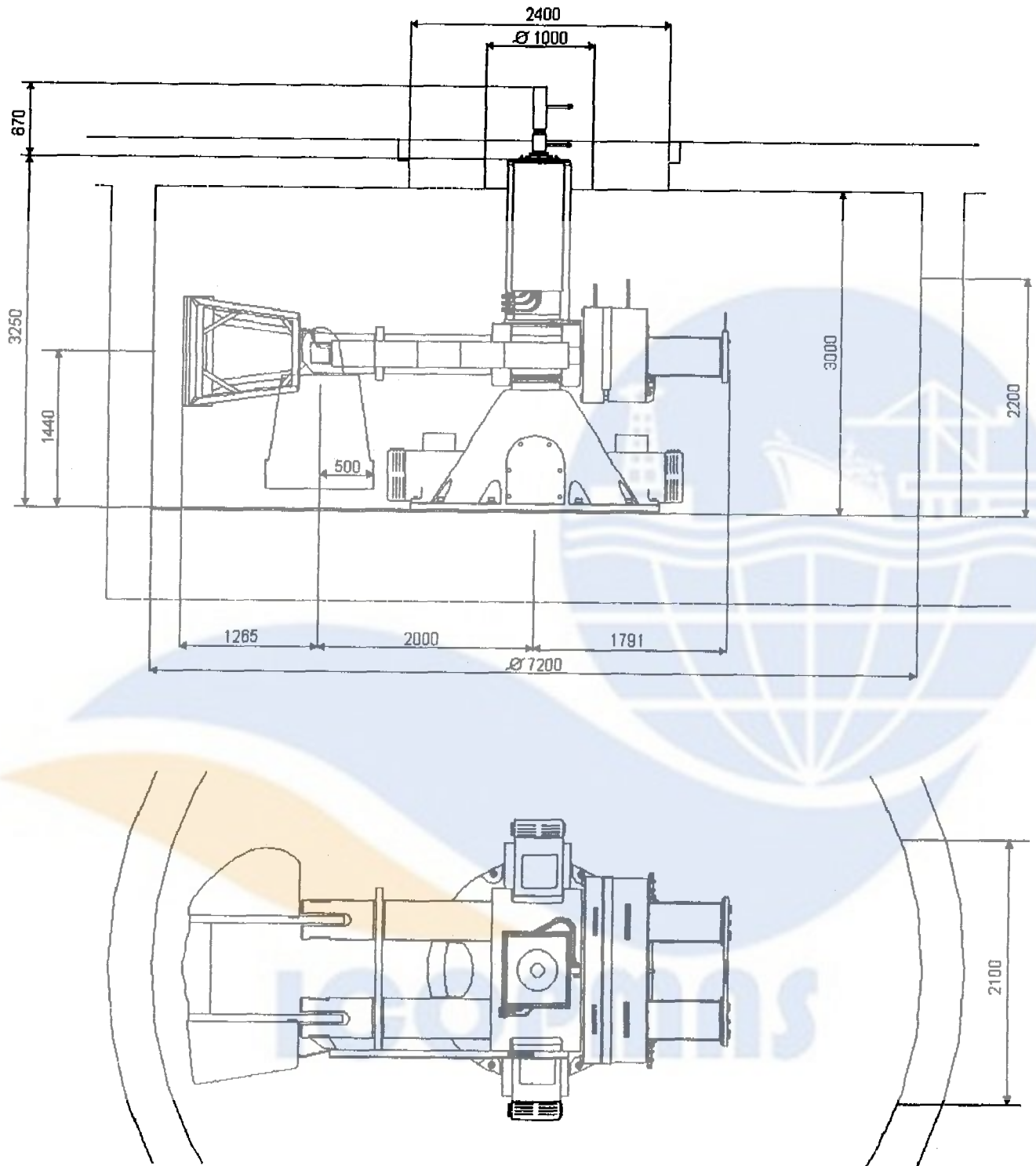
ICOPMAS



شکل ۹- منحنیهای ممان / عمق و فشار / انحراف حاصله مربوط به آزمایش بارگذاری متناوب بر روی مدل شمع در رس یکنواخت

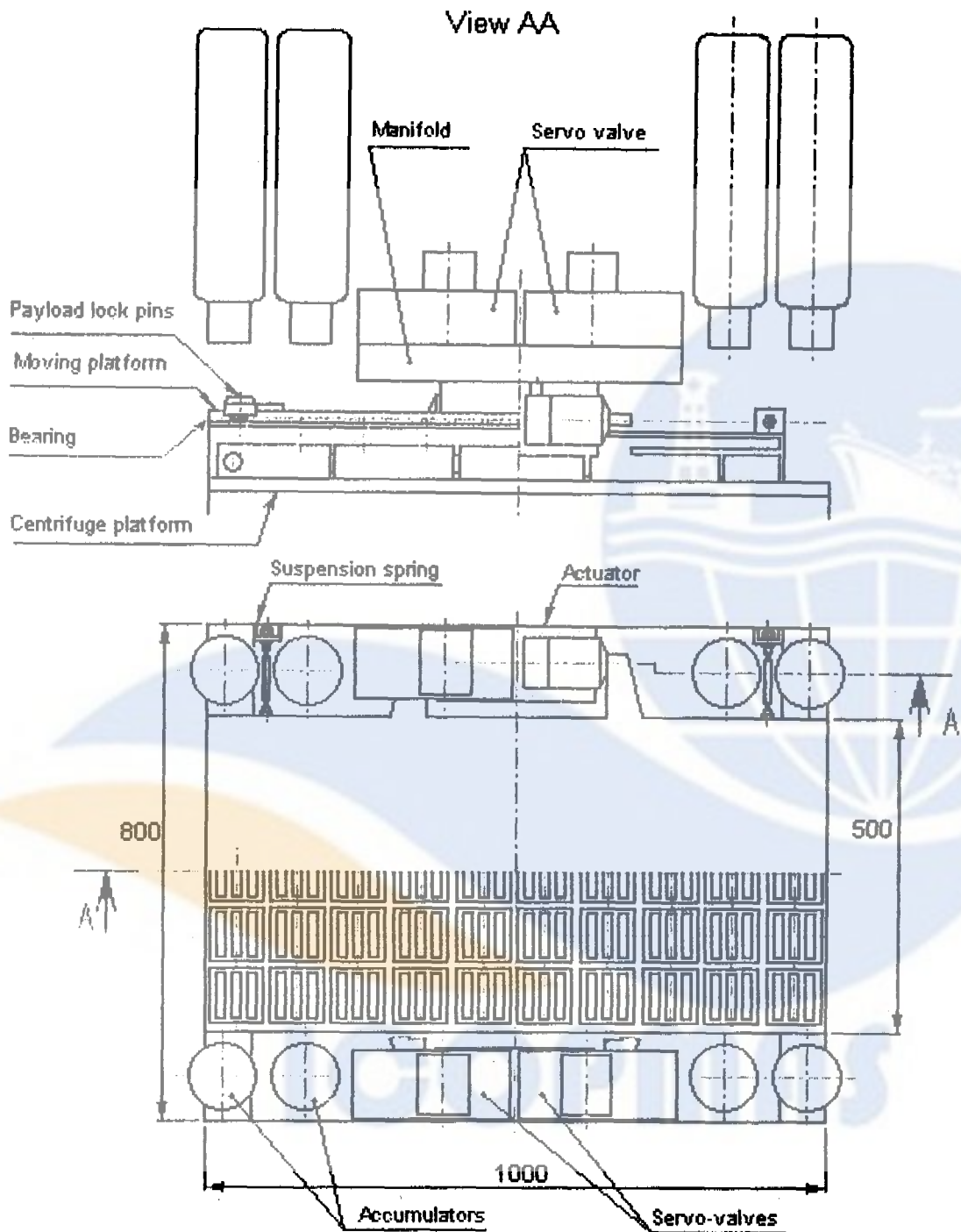


شکل ۱۰- ظرفیت باربری یک پی سطحی در معرض انهدام ناشی از سوراخ شدگی، مدل شده در دستگاه گریز از مرکز در شتاب ۲۵g



شکل ۱۱- جانمایی مکانیکی شامل پلان و مقطع دستگاه گریز از مرکز ژئوتکنیکی پیشنهادی برای IIIES





Dimensions in mm

شکل ۱۲- جانمایی مکانیکی شامل پلان و مقطع دستگاه شبیه ساز زلزله پیشنهادی برای IIEES

## Implication of Eccentricity Technology in Maritime and Coastal Engineering

M. K. Jafari – Assistant Professor in Geo-technique Engineering Research Center – Seismology and Seism Engineering International Institution

A. Razmkhah – Ph.D. Candidate of Civil Engineering and Research Partner – Seismology and Seism Engineering International Institution

### Abstract

In the last two decades, the implication of the eccentricity technology has increasingly spread throughout different fields of science and engineering. In general, the purpose of performing experiments on physical models in the field of engineering is predicting the behavior of the prototype, investigating the validity of a theory or to use it as a method of analyzing and evaluating the features of material engineering, finding new engineering mechanisms and also to use it for instructional purposes. In the field of geo-technique engineering, usually, the shocks caused by the soils body forces contains a significant part of all shocks and also the mechanical features of the soil highly depends on these shocks. The nature of many geo-technique cases in shore and off-shore areas, and the complication of loadings and the structural interactions indicate the importance of experimental methods and physical modeling, especially the eccentricity experiments. In this article, while briefly surveying the basic principles of performing the eccentricity experiments and the equations of the necessary scales, the most significant published findings in different fields of maritime geo-technique investigated by using this technology are proposed. Finally, the activities conducted in the field of establishing an eccentricity laboratory at the Seismology and Seism Engineering International Institution are pointed out.

**Keywords:** geo-technique engineering; eccentricity technology; maritime structures