

## اثر الزامات سازه ای ناشی از نصب عرشه های سنگین به روش شناوری در رفتار لرزه‌ای سکوهای ثابت دریایی – مطالعه موردی

یوسف جوادی سینا

کارشناس سازه، شرکت نفت و گاز پارس، تهران، ایران

y.javadisina@gmail.com

اکبر واثقی

عضو هیأت علمی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

vasseghi@iitees.ac.ir

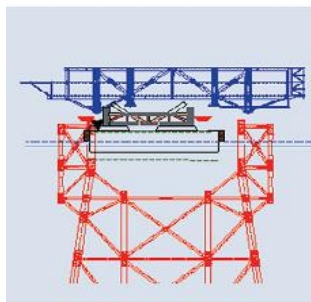
**کلید واژه‌ها:** سکوهای ثابت دریایی، روش Float Over، رفتار لرزه‌ای، اندرکنش شمع و خاک، تحلیل تاریخچه زمانی

### چکیده

هزینه‌های هنگفت طراحی، ساخت و نصب سکوهای دریایی، محققان و شرکت‌های نفتی را به استفاده از روشهای جدیدی که ضمن حفظ اطمینان از رفتار سازه، کاهش هزینه‌ها را در پی داشته باشد متمایل نموده است. نصب قسمت فوقانی سکو به روش شناوری یا Float Over یکی از این روشها می‌باشد که بعلاوه تغییرات در هندسه جاکت نیازمند بررسی‌های دقیقتر در تحلیل‌های دینامیکی بخصوص در هنگام وقوع زلزله می‌باشد. در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از نرم افزار کاربردی SAP2000 و با انتخاب مدل مناسب رفتار خاک و سازه، رفتار لرزه‌ای یک سکوی ثابت دریایی طی یک تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با ملحوظ نمودن رفتار اندرکنش شمع و خاک بررسی گردد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در سکوی مورد مطالعه علاوه بر وجود پتانسیل تسلیم در پایه‌های عرشه، جاکت از ایمنی و شکل پذیری یکسانی در دو جهت برخوردار نیست. همچنین نتیجه گرفته شد که تحلیل غیرخطی استاتیکی با شمع معادل، تقریب نسبتاً مناسبی از ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک و روند غیرخطی شدن المانهای جاکت ارائه می‌دهد.

### مقدمه

یکی از روشهای نصب قسمت فوقانی (Topside) سکوها روش Float Over می‌باشد در این روش نصب قسمت فوقانی بصورت یکپارچه بدون استفاده از جرثقیل‌های سنگین انجام می‌گردد. در این روش بارج حامل قسمت فوقانی به جاکت نزدیک شده با استفاده از مهارها و سیستم‌های کنترلی شناور در فضای بالای جاکت قرار می‌گیرد (شکل ۱). سپس با افزایش آب‌خور شناور یا پایین آوردن جکهایی که وزن قسمت فوقانی را تحمل می‌کنند امکان قرارگیری پایه‌های عرشه در محل مناسب فراهم می‌گردد. رفتار لرزه‌ای اینگونه سکوها بعلاوه حذف اعضای مورب در بالای جاکت نیازمند تحلیل‌های دقیقتر با توجه به رفتار اندرکنش خاک و شمع طی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی می‌باشد که در این مقاله بررسی گردیده است.



شکل ۱: نحوه قرارگیری شناور در داخل جاکت

## روشهای تحلیل و طراحی سکوه‌های ثابت دریایی در برابر زلزله

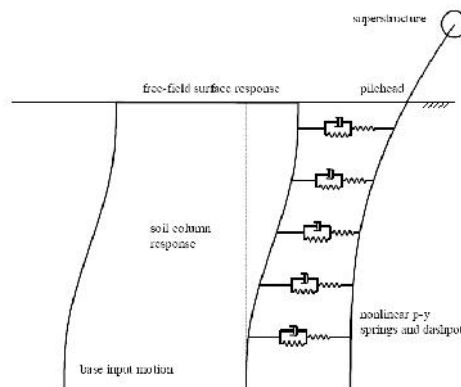
تحلیل و طراحی لرزه‌ای سکوه‌های دریایی براساس آئین نامه API-RP2A برای تأمین دو هدف اساسی ذیل می‌باشد: ۱- عدم وقوع هرگونه خسارت و یا رفتار غیرخطی در برابر زلزله متوسط (زلزله سطح مقاومت) ۲- جلوگیری از فروریزش سکو در هنگام وقوع زلزله شدید (زلزله سطح شکل پذیری).

در طراحی برای زمین لرزه سطح مقاومت لازم است رفتار سازه در حد ارتجاعی کنترل گردد و از وقوع هرگونه خسارت سازه‌ای و یا رفتار غیرخطی جلوگیری گردد. سکوی دریایی باید برای زمین لرزه سطح مقاومت با استفاده از روش دینامیکی طیفی و یا روش تاریخچه زمانی خطی مورد تحلیل قرار گیرد. هدف از تحلیل و طراحی سکو برای شکل پذیری، اطمینان از وجود ظرفیت اضافه برای جلوگیری از فروریزش سکو در هنگام زلزله شدید و نادر (زمین لرزه سطح شکل پذیری) می‌باشد. برای این منظور می‌توان سکو را با استفاده از روش استاتیکی غیرخطی (Push-Over) و یا تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مورد تحلیل قرار داد.

## اثرات اندرکنش خاک و سازه

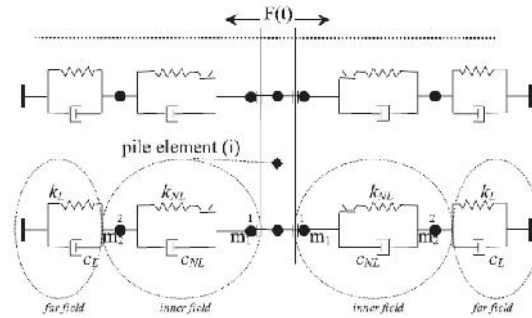
یکی از مواردی که در تحلیل سکوه‌های ثابت دریایی لازم است بررسی گردد، تاثیر اندرکنش خاک و سازه و رفتار دینامیکی شمع‌ها بر روی پاسخ سکو می‌باشد. روشهای مختلفی به منظور بررسی پاسخ دینامیکی شمع‌ها توسط محققان ارائه گردیده است که از روشهای پیچیده اجزا محدود و المان‌های مرزی تا مدل‌های فیزیکی و روشهای ساده کاربردی را شامل می‌گردد.

یکی از روشهای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش شمع و خاک در تحلیل سکو‌ها استفاده از مفهوم شمع معادل می‌باشد. در این روش شمع و خاک اطراف با یک شمع یکسر گیر دار که به انتهای سازه متصل می‌باشد جایگزین می‌گردد. این روش با وجود سادگی نمی‌تواند رفتار فیزیکی واقعی شمع و خاک را نشان دهد. یکی دیگر از روشها استفاده از روش فونداسیون وینکلر (۱۸۷۶) می‌باشد که با فرض اینکه هر لایه خاک رفتاری مستقل از لایه‌های مجاور دارد، رفتار شمع متکی بر خاک را می‌توان با یک تیر که فنرهایی در طول آن قرار دارند مدل کرد. هر چند این فرض از برش بین لایه‌های خاک صرف نظر می‌کند ولی بعنوان یک روش عمومی و مؤثر در بارگذاری جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش فنر و میراگرهایی برای مدل سازی سختی و میرایی در هر لایه خاک در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲). از منحنی  $p-y$  جهت مدل سازی سختی غیر خطی این فنرها استفاده می‌شود.



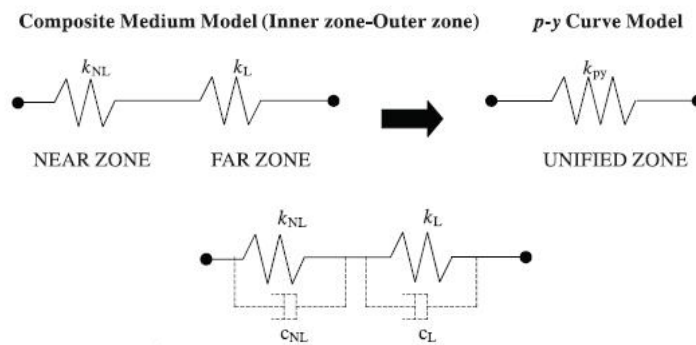
شکل ۲: نحوه اعمال جابجایی خاک در مدل وینکلر

در مجموعه‌ای از مدل‌ها که بر اساس مدل وینکلر برای آنالیز پاسخ دینامیکی شمع‌های منفرد توسعه یافته‌اند، گروهی هستند که پارامترهای خاک با تلفیقی از روشهای تحلیلی و مطالعات تجربی محاسبه می‌شوند. از این گروه نوگامی و همکاران در سال ۱۹۹۲ (Nogami et al., 1992) مدلی برای آنالیز دینامیکی غیر خطی شمع منفرد و گروه شمع‌ها با تقسیم خاک اطراف شمع به دو ناحیه داخلی و خارجی با استفاده از تعدادی فنر و میراگر ارائه نمودند. در سال ۱۹۹۸ نوگامی و کونای (Nogami and Konagai, 1998) این روش را در حوزه فرکانس و حوزه زمان گسترش دادند. در سال ۱۹۹۲ الناگار و نوواک (El Naggar and Novak, 1992) نیز مدل مشابه کارآمدی جهت بیان رفتار دینامیکی شمع و گروه شمع‌ها با لحاظ کردن میرایی هندسی و مصالح ارائه نمودند (شکل ۳). در این روش خاک اطراف شمع به دو ناحیه نزدیک یا درونی و ناحیه دور یا بیرونی تقسیم می‌گردند. ناحیه نزدیک، محدوده‌ای است که رفتار غیر خطی شدیدی در اندرکنش شمع و خاک روی می‌دهد. این ناحیه با رفتار پلاستیک مشتمل بر میرایی هیستریسیس مصالح می‌باشد. ناحیه دور، محدوده‌ای دورتری از شمع می‌باشد که رفتار ابتدایی خطی و الاستیک می‌باشد و نهایتاً حدفاصل شمع و ناحیه نزدیک خاک، یک المان جداکننده یا gap می‌باشد که بیانگر حفره ایجاد شده طی ارتعاش شمع در هنگام زلزله می‌باشد این حفره معمولاً تا وقوع زلزله بعدی پر می‌گردد.



شکل ۳: فنر و میراگرها در مدل پیشنهادی الناکار و نوواک

در روش الناکار و نوواک (El Naggar and Novak, 1992) مبتنی بر منحنی  $p-y$ ، ابتدا مشخصات ناحیه خارجی برای سختی مختلط واحد طول استوانه صلب مرتعش در محیط خطی ویسکو الاستیک محاسبه می‌گردد که ترکیبی از یک فنر خطی و یک میراگر بصورت موازی می‌باشد. میراگر بیانگر میرایی عمدتاً ناشی از میرایی تشعشی می‌باشد و سختی ناحیه درونی چنان انتخاب می‌شود که سختی مجموع معادل سختی مماسی حاصل از منحنی  $p-y$  گردد (شکل ۴).



شکل ۴: مدل روش ترکیبی و روش مبتنی بر منحنی  $p-y$  و نحوه اعمال میرایی

در این روش سختی ناحیه غیر خطی بصورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\frac{1}{k_{py}} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{k_{NL}} \quad (1)$$

$$k_{NL} = \frac{k_{py} k_L}{k_L - k_{py}} \quad (2)$$

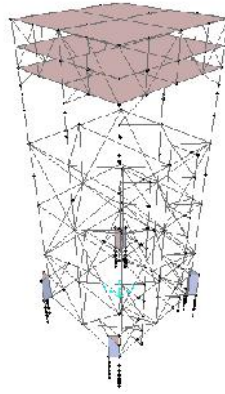
سختی الاستیک خطی فنر  $k_L$  از روش کرنش صفحه ای معادله بدست می‌آید و سختی استاتیک خاک  $k_{py}$  از منحنی  $p-y$  در عمق

مورد نظر بدست می‌آید. ضریب میرایی ناحیه دور  $C_L$  که عمدتاً ناشی از میرایی تشعشی می‌باشد و میرایی هیسترتیس ناحیه نزدیک  $C_{NL}$  نیز بصورت میراگری به موازات فنر ناحیه نزدیک در نظر گرفته می‌شود. فنر و میراگرها در دو طرف بطور جداگانه مدل می‌شود تا امکان مدل سازی gap در هر سمت بطور مستقل فراهم گردد. گره های خاک و شمع در هر لایه به فنرهایی که تحمل نیروی کشش را ندارند متصل می‌گردند. جرم ناحیه داخلی به صورت دو جرم متمرکز در گره های دو سر ناحیه داخلی قرار داده می‌شود.

### مشخصات سکوی مورد مطالعه

سکوی مورد مطالعه، یک سکوی گازی می‌باشد که در آبهای خلیج فارس در عمق حدود ۷۰ متری نصب شده است این سکوی نوع ۶ پایه ای می‌باشند که ۲ شمع (skirt) در زیر هریک از ۴ پایه کناری قرار دارند (شکل ۵). وزن قسمت فوقانی سکوی حدود ۶۸۰۰ تن می‌باشد. بعلت وزن زیاد قسمت فوقانی سکوها برای نصب آن از روش float over استفاده گردیده است. اتصال بین شمع ها و غلاف شمع ها در جاکت توسط گروت ریزی در داخل غلاف شمع ها تامین شده است.

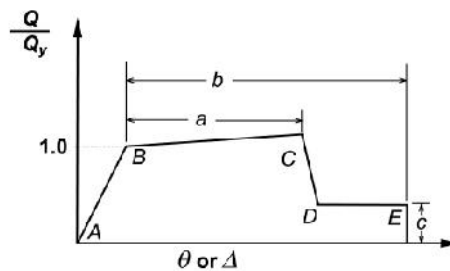




شکل ۵: نمایی از سکوی مورد مطالعه

## مدل سازی سکوها و المانهای خاک

در این تحقیق جهت اعتبارسنجی، تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی از دو مدل مجزا که در نحوه مدل نمودن رفتار اندرکنش خاک و سازه متفاوت می‌باشند استفاده می‌گردد. در مدل ۱ با استفاده از نرم افزار sap2000 ابتدا سازه جاکت شمع ها و قسمت فوقانی مدل می‌گردد و بارهای وارده بر سکو اعمال می‌گردد. رفتار غیر خطی مصالح با پیش بینی مفاصل پلاستیک برای درجات آزادی های مورد نظر در محل هایی که احتمال رفتار پلاستیک در آنها وجود دارد در مدل وارد می‌گردد. تا هنگامی که میزان نیرو و یا لنگر به حد تسلیم نرسد عضو رفتار الاستیک خواهد داشت. در بادبندها از مفصل پلاستیک از نوع کمانش تحت بار محوری و در وسط عضو استفاده می‌گردد و در اعضا با رفتار خمشی غالب از مفاصل پلاستیک خمشی حول یک محور در دو سر عضو و در اعضا با رفتار تیر ستونی با رفتاری مشتمل بر اندرکنش نیروی محوری با لنگرهای جهات اصلی از مفاصل پلاستیک که امکان در نظر گرفتن اندرکنش نیروی محوری با لنگرهای جهات اصلی را دارا می‌باشد در دو سر عضو استفاده می‌گردد. مشخصات مفاصل پلاستیک بر اساس آیین نامه FEMA-356 در هر عضو با توجه به نوع رفتار تعیین می‌گردند (جدول ۱).



شکل ۶: مشخصات مفاصل بر اساس متغیرهای  $a, b$  و  $c$  در آیین نامه FEMA-356

جدول (۱): مشخصات مفاصل پلاستیک مورد استفاده برای المانهای افقی و عمودی

مشخصات مقطع لوله ای	ضریب a	ضریب b	ضریب c
کلیه اعضای افقی	۶	۸	۰.۲
پایه های عمودی در خمش خالص	۶	۸	۰.۲
پایه های عمودی در نیروی محوری معادل با ۰.۲ نیروی کمانشی پایه ها	۴	۶	۰.۲
پایه های عمودی در نیروی محوری معادل با ۰.۵ نیروی کمانشی پایه ها	۲.۵	۳.۷۵	۰.۲

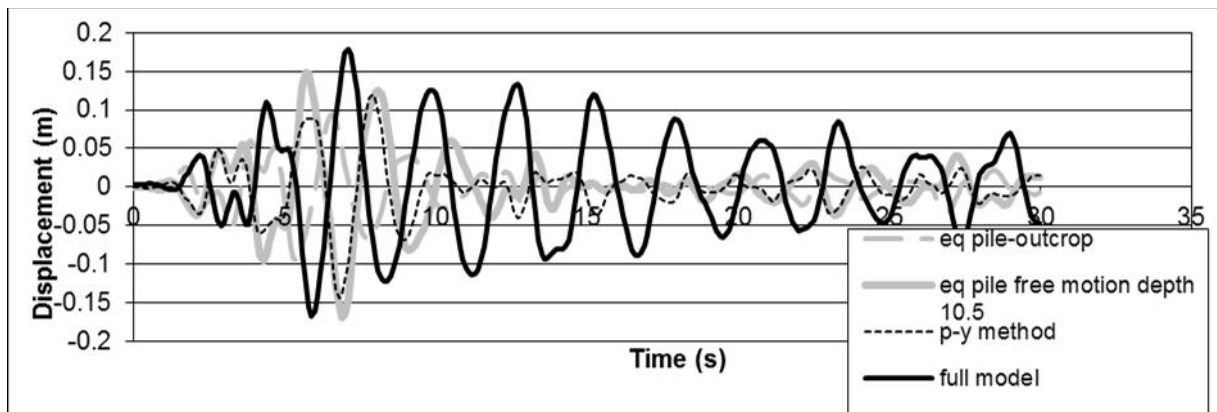
در مدل ۱ جهت ملحوظ کردن اثرات انرکنش خاک و سازه از روش شمع معادل استفاده می‌گردد. عمق گیرداری معادل با مساوی قرار دادن سختی ها در حدود ۱۰.۵ متری محاسبه می‌شود. مدل ۲ مشابه مدل ۱ می‌باشد با این تفاوت که جهت اعمال اثرات اندرکنش خاک و سازه از مدل نواک-الناگار استفاده شده است. برای تحلیل تاریخچه زمانی از سه شتاب نگاشت طیس، السنترو و لوما پریتا استفاده شده است که نسبت به شتاب ماکزیمم ۰.۱۰، ۰.۲۰، ۰.۲۵، ۰.۳۰ و ۰.۳۵ هم پایه شده اند. و در انتها نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی مقایسه می‌گردد

## نتایج تحلیل

در این بخش ابتدا به منظور اعتبار سنجی روشها و مقایسه آنها مدل ۱ و مدل ۲ تحت شتاب زلزله السنترو با شتاب ماکزیمم 0.1g مقایسه می‌گردد. ملاحظه می‌گردد که بیشینه جابجایی حاصل از مدل ۱ در حدود ۱۵ درصد کوچکتر از نتایج حاصل از مدل نواک-الناگار می‌باشد



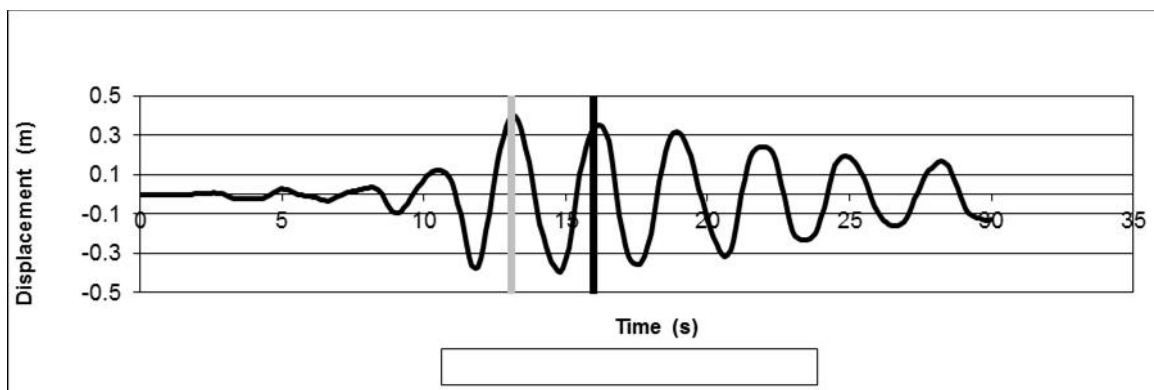
و نیز جابجایی در مدل نواک-الناگار بر خلاف مدل های دیگر به مرور میرا می گردد.



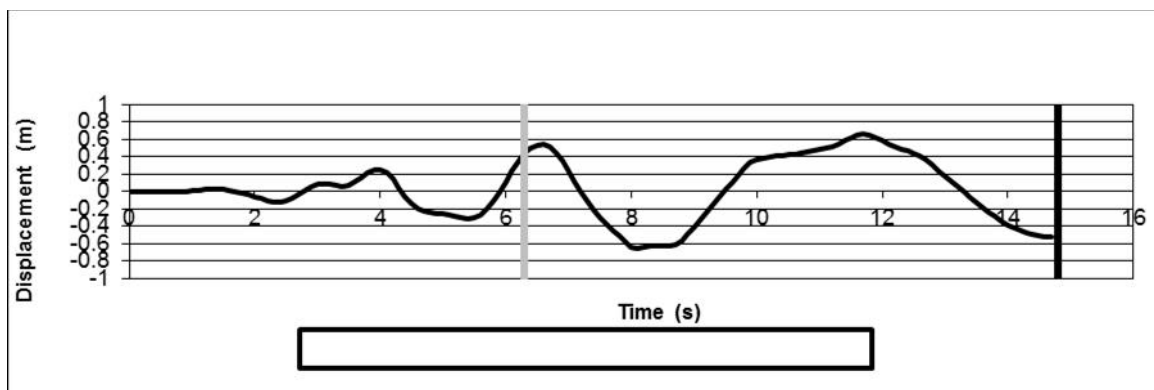
شکل ۷: مقایسه نمودار جابجایی اختلاف جابجایی تراز عرشه و پایین پایه ها در مدل ۱ و ۲

### نتایج تحلیل تاریخچه زمانی در جهت محور X

سکوی مورد مطالعه در مدل ۲ تحت شتاب نگاشت لوما پریتا تا شتاب ماکزیمم  $0.30g$  در جهت X در حالت خطی باقی می ماند ولی با شتاب ماکزیمم  $0.35g$  از ثانیه  $13.1$  با تسلیم یکی از بادبندها وارد مرحله غیرخطی می گردد (شکل ۸). این سکو تحت شتاب نگاشت السنترو تا شتاب ماکزیمم  $0.20g$  در جهت X در حالت خطی باقی می ماند ولی با شتاب ماکزیمم بالاتر با تسلیم بادبندهای طرفین وارد حالت غیر خطی می شود و در شتاب ماکزیمم  $0.35g$  در ثانیه  $15$  سازه ناپایدار می گردد (شکل ۹). این مدل تحت شتاب نگاشت طبس تا شتاب ماکزیمم  $0.30g$  در جهت X در حالت خطی می باشد ولی با شتاب ماکزیمم  $0.35g$ ، از ثانیه  $14.8$  با تسلیم بادبندهای طرفین وارد حالت غیر خطی می شود (شکل ۱۰).

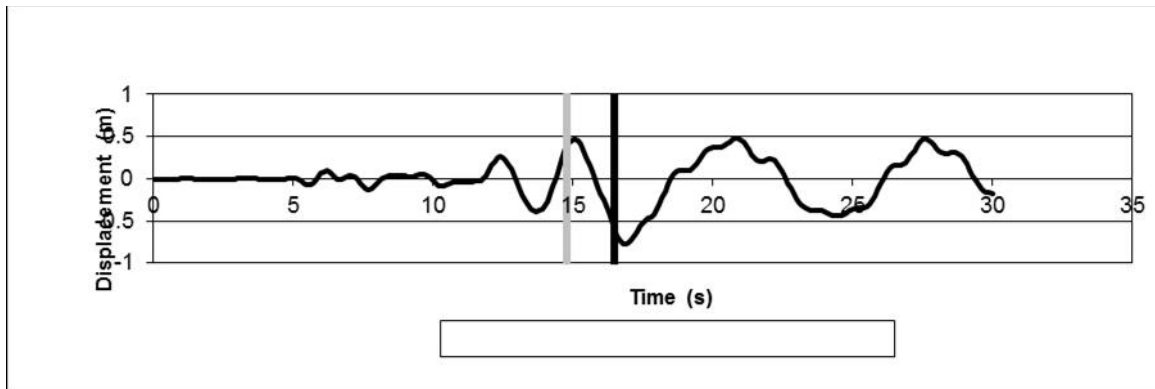


شکل ۸: جابجایی سکو در جهت X طی شتاب نگاشت لوما پریتا  $PGA=0.35g$



شکل ۹: جابجایی سکو در جهت X طی شتاب نگاشت السنترو  $PGA=0.35g$

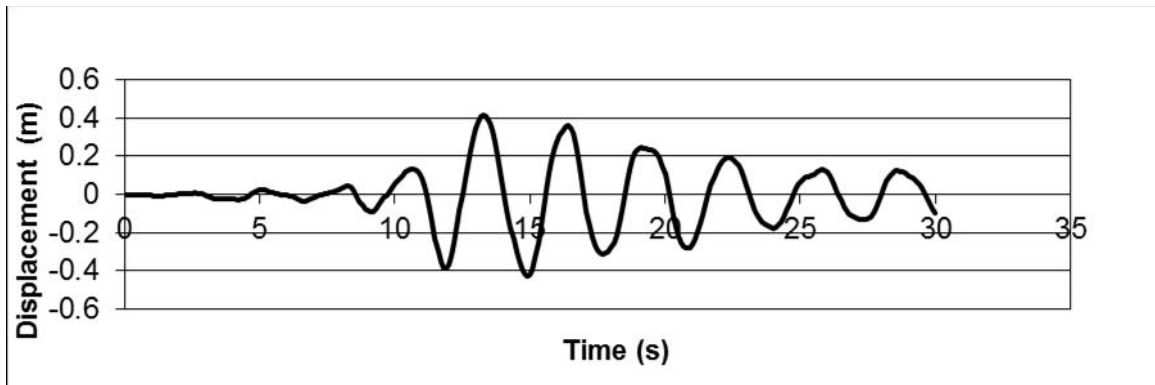




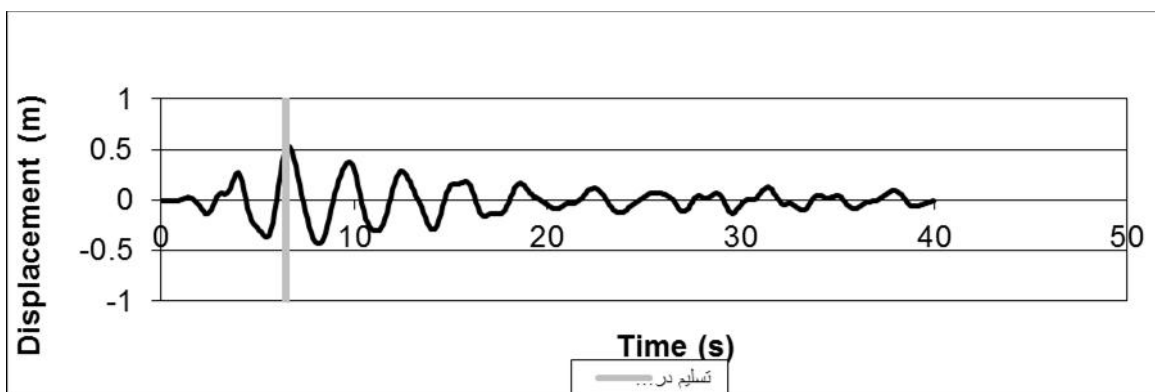
شکل ۱۰: جابجایی سکو در جهت  $x$  طی شتاب نگاشت طیس  $PGA=0.35g$

### نتایج تحلیل تاریخچه زمانی در جهت محور $y$

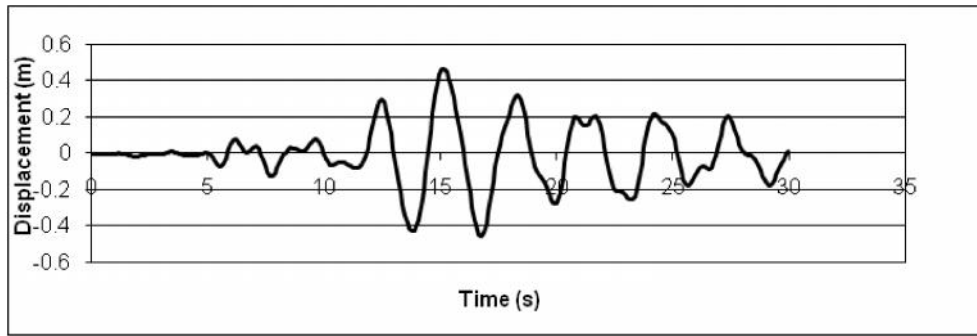
سکوی مدل ۲ تحت شتاب نگاشت لوماپریتا تا شتاب ماکزیمم  $0.35g$  در جهت  $y$  در حالت خطی می‌باشد. ولی تحت شتاب نگاشت السنترو با شتاب ماکزیمم  $0.35g$ ، از ثانیه ۶.۵ قبل از تسلیم باندنها با تسلیم شدن پایه های جاکت در زیر قسمت فوقانی وارد حالت غیر خطی می‌شود. سازه تا پایان زلزله دچار انهدام نمی‌گردد. این مدل تحت شتاب نگاشت طیس تا شتاب ماکزیمم  $0.35g$  در جهت  $y$  نیز در حالت خطی باقی می‌ماند.



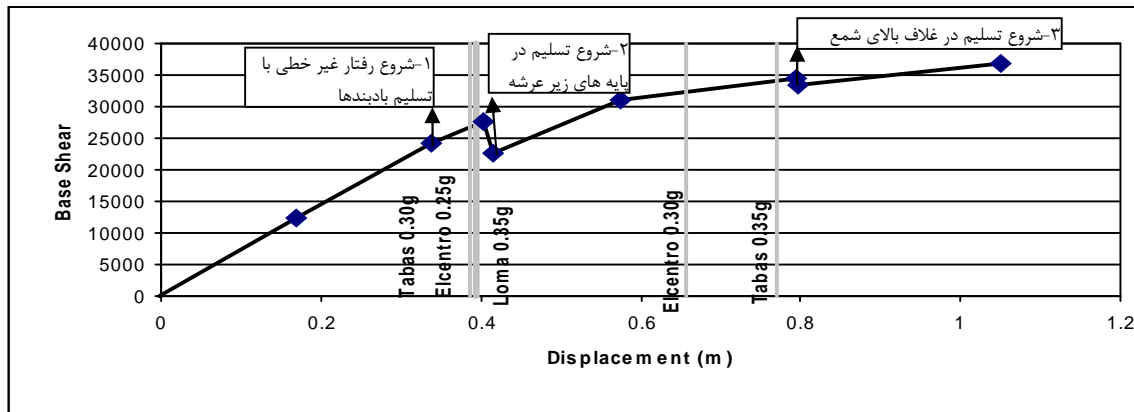
شکل ۱۱: نمودار جابجایی سکو در جهت  $y$  طی شتاب نگاشت لوما پریتا  $PGA=0.35g$



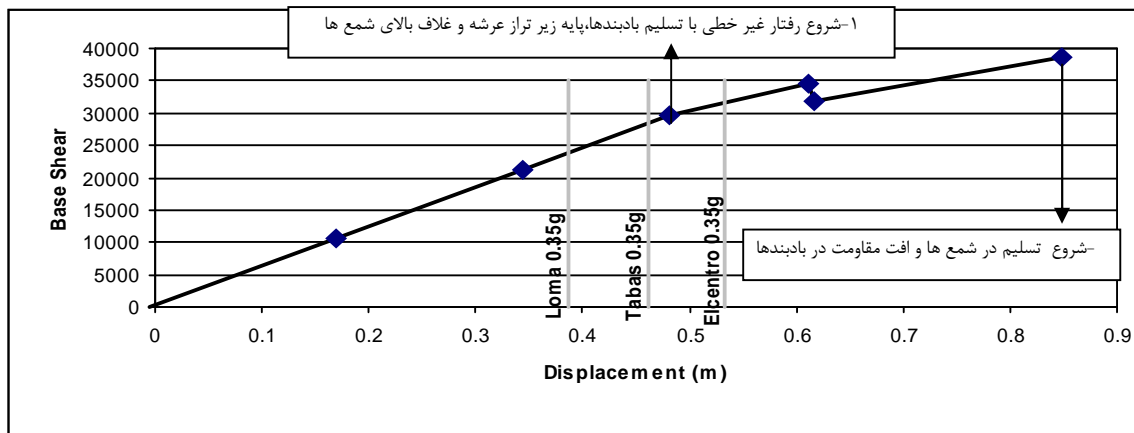
شکل ۱۲: نمودار جابجایی سکو در جهت  $y$  طی شتاب نگاشت السنترو  $PGA=0.35g$



شکل ۱۳: نمودار جابجایی سکو در جهت  $y$  طی شتاب نگاشت طیس  $PGA=0.35g$



شکل ۱۴: مقایسه نتایج تاریخچه زمانی غیر خطی و منحنی پوش اور در جهت  $x$



شکل ۱۵: مقایسه نتایج تاریخچه زمانی غیر خطی و منحنی پوش اور در جهت  $y$

در شکل های ۱۴ و ۱۵ نتایج تحلیل های تاریخچه زمانی بر روی منحنی ظرفیت سکو که از تحلیل های استاتیکی غیر خطی بدست آمده است منعکس شده است. ملاحظه می گردد تطابق خوبی میان تحلیل استاتیکی غیر خطی و تحلیل تاریخچه زمانی در مورد روند غیرخطی شدن و ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک وجود دارد.

## نتیجه گیری

- ۱- استفاده از روش نواک در مدلسازی رفتار خاک ضمن سهولت در محاسبه، قابلیت اعمال در نرم افزار sap2000 را دارا می باشد که به دلیل سهولت و امکان دسترسی آسان ابزار مناسبی برای تحلیل و بررسی غیر خطی رفتار سکو های دریایی در حین زلزله می باشد.
- ۲- نتایج تحلیل تاریخچه زمانی بعلاوه وابستگی رفتار المانهای مدل کننده خاک در روش نواک-الناگار به محتوای فرکانسی شتابنگاشت و نیز پارامترهای دینامیکی سکو، متأثر از محتوای فرکانسی شتابنگاشت ها خواهد بود که در بررسی پاسخ جاکت و انتخاب شتاب نگاشتهای مناسب

می‌باید در نظر گرفت.

۳- نتایج تحلیل تاریخچه زمانی حاصله از روش هایی که رفتار اندرکنش خاک با شمع با روش شمع معادل مدل می‌گردند منتهی به جوابهایی کمتر از واقع می‌گردند.

۴- در سکوهایی که الزامات نصب به روش شناوری منجر به تغییراتی در هندسه آنها گردیده است پتانسیل تسلیم در پایه های فوقانی وجود دارد بطوریکه در سکوی مورد مطالعه مفاصل پلاستیک در این پایه ها قبل از تشکیل مفصل پلاستیک در تیرها و در مواقعی همزمان با تشکیل مفصل پلاستیک در مهاربندها بوجود می‌آیند که موجب کاهش شکل پذیری می‌گردند. در این سکو در جهتی که بعلت امکان ورود شناور، مهاربندها حذف شده اند رفتار ضعیفتر و شکل پذیرتری دارند بعبارت دیگر طی زلزله های با شتاب ماکزیمم یکسان در این جهت اول جاکت سریعتر به مرحله غیر خطی و تسلیم می‌رسد و حتی ممکن است سازه ناپایدار گردد.

## مراجع

- API-RP2A (1993). "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms – Working stress design." 20th Edition, American Petroleum Institute, Washington, DC.
- Computer and Structures, Inc. (2008). "Csi analysis reference manual for sap2000®, etabs®, and safe™". California, Berkeley.
- El Naggar, M.H. and Novak, M. (1996), "Nonlinear analysis for dynamic lateral pile response", Soil Dyn. Earthq. Eng., 15(4), 233-44.
- El Naggar, M.H., and Bentley, K.J. (2000). "Dynamic analysis for laterally loaded piles and dynamic p-y curves", Canadian geotechnical journal, 37 . 1166-1183.
- FEMA 356 (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Konagai, K. and T. Nogami (1987), "Time Domain Axial Response of Dynamically Loaded Pile Groups", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 113(3), pp.417-430, 1987.
- Nogami, T., Konagai, K., Otani, J. and Chen H.L. (1992). "Nonlinear soil-pile interaction model for dynamic lateral motion." J. Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 1, PP. 106-116.

