

# تحلیل پوش‌اور<sup>۱</sup> دینامیکی سکوه‌های ثابت فراساحل تحت بارگذاری دریایی

سید عباس خیری جلودار<sup>i\*</sup>؛ محمدرضا بهاری<sup>ii</sup>

## چکیده

مبانی تحلیل پوش‌اور دینامیکی شبیه پوش‌اور استاتیکی است با این تفاوت که در آن بارگذاری زلزله یا موج به صورت دینامیکی به سازه اعمال و گام به گام با افزایش شدت بارگذاری دینامیکی، سازه مورد تحلیل دینامیکی قرار می‌گیرد. نتیجه هر دو تحلیل نموداری موسوم به نمودار پوش‌اور است که نشان دهنده رفتار و ظرفیت تحمل بار سازه است. در این تحقیق دو سکوی مورد مطالعه ابتدا مورد تحلیل پوش‌اور استاتیکی تحت بار موج و سپس تحلیل پوش‌اور دینامیکی قرار گرفتند. نتایج در دو حالت با هم مقایسه شد. در محدوده خطی از رفتار سکوها، رفتار سکو در دو تحلیل مشابه ولی در محدوده غیرخطی، حالت دینامیکی و استاتیکی با هم تفاوت دارند. تحلیل پوش‌اور دینامیکی در هر دو سکو ظرفیت ذخیره بیشتری را نسبت به حالت استاتیکی پیش‌بینی می‌کند. سکوه‌های مورد مطالعه، ظرفیت شکل‌پذیری بیشتری را در حالت پوش‌اور دینامیکی از خود نشان داده و توانایی پذیرش تعداد بیشتری از گسیختگی‌های جزئی در اعضا سازه هستند.

## کلمات کلیدی

تحلیل پوش‌اور دینامیکی، سکوه‌های ثابت، بارگذاری دریایی، کارکرد سازه‌ای، تحلیل دینامیکی غیرخطی

## *Dynamic Push-Over Analysis of Fixed Offshore Platforms Under Metocean Loading*

S.A.Kheiri; M.R.Bahaari

### ABSTRACT

Basics of dynamic push-over analysis and static push-over are same. But in the dynamic case the wave or seismic loads are exerted to structure dynamically. With increasing intensity of dynamic loading in every step, structure would then be analyzed. Results of these two analyses are “push-over graphs” that show behavior of structure. Two platforms were selected for investigation. At first static push-over analysis and then dynamic push-over was performed for two platforms. Results of the two analyses were compared to each other. FEM based program “ABAQUS” was used for modeling. In this investigation, following results were found: Jackets behavior in both dynamic and static push-over analysis is same for linear range of jacket behavior; but in nonlinear range, results are different. In dynamic push-over analysis reserve strength of jacket structures was estimated to be higher than that of static push-over analysis. In dynamic push-over analysis ductility capacity was increased compared with static push-over and structure can bear more partial failure in comparison with static case.

### KEYWORDS

Dynamic push-over analysis, fixed offshore platforms, metocean loading, structural performance, nonlinear dynamic analysis

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۴/۱۲/۲۲

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۶/۱۱/۸

<sup>i</sup> نویسنده مسئول و فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های دریایی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران:

Email: abbaskheiri@gmail.com

<sup>ii</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران: Email: mbahari@ut.ac.ir

دینامیکی بر اساس اطلاعات یک زلزله یا موج بدست آمده است و قرار است به عنوان مرجع بارگذاری محسوب شود. برای دست یافتن به بارگذاری نادرتر و با احتمال وقوع کمتر، یک روش ساده جهت تبدیل، مقیاس کردن یکنواخت با استفاده از فاکتور مقیاس است. با فرض این که بارگذاری مرجع  $a_1$  باشد آن گاه فاکتور مقیاس بارگذاری ضریب مثبت  $\lambda \in (0, +\infty)$  است که  $a_1$  را تبدیل به  $a_\lambda$  خواهد کرد.  $\lambda = 1$  نشانگر بارگذاری مرجع است،  $\lambda < 1$  معرف بارگذاری کاهش یافته و  $\lambda > 1$  معرف بارگذاری افزایش یافته است.

تعریف ۲- معیار شدت [IM]: معیاری است جهت تبیین بزرگی یا شدت باری که به سازه اعمال می‌گردد و تابعی از بارگذاری یا به عبارتی، تابعی از بارگذاری مرجع  $a_1$  و فاکتور مقیاس  $\lambda$  است. برای معیار شدت، مقادیر متفاوتی پیشنهاد شده است. معیارهای شدت قابل مقیاس می‌توانند شتاب حداکثر زمین (PGA)، سرعت حداکثر زمین (PGV)، شتاب طیفی مربوط به دوره تناوب مود اول ( $Sa(T_1)$ ) و پارامترهای مناسب دیگر باشند [۳].

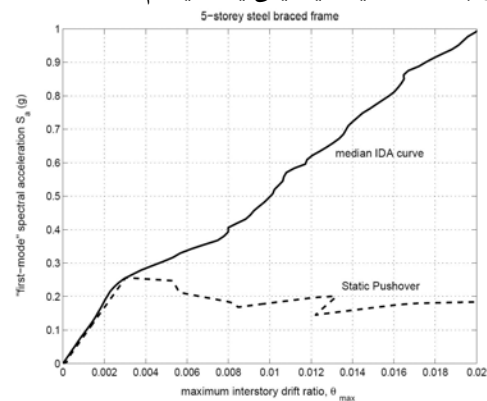
تعریف ۳- معیار آسیب [DM]: متغیری مربوط به حالت سازه که معرف پاسخ سازه ناشی از بارگذاری دینامیکی است. به عبارت دیگر DM یک قسمت از خروجی سازه تحت تحلیل دینامیکی غیر خطی می‌باشد. گزینه‌های ممکن برای معیار آسیب می‌توانند تغییر شکل جانبی، چرخش در یکی از درجات آزادی، تغییر شکل حداکثر طبقات، تغییر شکل نسبی طبقه، چرخش نسبی طبقات و یا بیشترین چرخش نسبی طبقات در یک ساختمان چند طبقه باشد. اما انتخاب DM مناسب، به کاربرد آن و خود سازه بستگی خواهد داشت. به طور مثال اگر آسیب‌پذیری اجزاء غیر سازه‌ای لازم به ارزیابی باشد آنگاه شتاب حداکثر طبقه به عنوان DM انتخاب خواهد شد [۲].

برای سازه‌های برشی، آسیب به سازه تابعی خواهد بود از تغییر شکل جانبی کل سازه. بنابراین در این نوع سازه‌ها کج شدگی یا خم شدن سازه را با معیار آسیب تغییر شکل جانبی می‌توان برآورد کرد. بدین سبب این انتخاب برای DM برای اغلب موارد مناسب است [۳].

تحلیلی که تحت عنوان تحلیل دینامیکی افزایشده یا پوش اور دینامیکی شناخته شده، شامل یک سری تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت بارگذاری‌های مقیاس شده از یک بارگذاری مرجع است و در آن IMها به نحوی انتخاب می‌شوند که تمامی گستره رفتار سازه شامل حالت الاستیک، غیر الاستیک و سرانجام فرو ریزش را پوشش دهد. هدف از انجام این نوع تحلیل بدست آوردن اندازه معیارهای آسیب (DM) مدل

مفاهیم تحلیل پوش اور دینامیکی اولین بار توسط Betred و بعدها در قالب تحقیقات محققانی چون Luco & Cornell، Mehanny & Deieleir، Yun & Foutch، Bazzurro & Cornell، Dubina و همکاران، Dematteis و همکاران، Nassar & Krawinkler، Psyaharis و همکاران، مورد مطالعه قرار گرفته است. چندی پیش توسط FEMA [۲،۱] تحت عنوان تحلیل دینامیکی افزایشده به عنوان روشی برای تعیین ظرفیت فروریزش کلی مورد توجه قرار گرفته است [۳].

تحلیل دینامیکی افزایشده (IDA) یا پوش اور دینامیکی به طور گسترده‌ای قابل استفاده بوده و اهدافش با توجه به شکل (۱) عبارتند از [۳]: ۱- دانستن گستره پاسخ یا تقاضا به ازای گستره بالقوه بارگذاری دینامیکی ۲- درک بهتر از مفهوم سازه-ای سطوح بارگذاری خیلی نادر ۳- درک بهتر از تغییرات در پاسخ سازه هنگامی بارگذاری دینامیکی افزایش می‌یابد ۴- تخمین بهتر از ظرفیت دینامیکی یک سیستم سازه‌ای.



شکل (۱): نمودار پوش اور استاتیکی در مقابل نمودار IDA برای ساختمان ۵ طبقه با قاب مهاربندی شده

با روش‌هایی مانند پوش اور استاتیکی غیر خطی [۴]، با مقیاس کردن مناسب الگوی بارگذاری، یک شکل پیوسته به عنوان گستره کامل رفتار سازه‌ای، از حالت خطی به حالت تسلیم و بالاخره فروریزش مورد تحقیق قرار می‌گیرد، که تا میزان زیادی در درک رفتار سازه‌ای کمک خواهد کرد [۳].

با تناسب و مقایسه در مورد رسیدن از تحلیل استاتیکی به تحلیل پوش اور افزایشده، می‌توان از یک تحلیل تاریخچه زمانی به یک تحلیل افزایشده دینامیکی یا همان پوش اور دینامیکی رسید، که در آن بار دینامیکی مقیاس می‌شود [۳].

برای شناخت مفاهیم این نوع آنالیز تمامی تعریف‌هایی که برای این تحلیل نیاز است به روشنی تشریح می‌شود.

تعریف ۱- فاکتور مقیاس [SF]: فرض کنید یک بارگذاری

جانبی شرایط طراحی است. نتایج تحلیل پوش‌اور دینامیکی با نتایج به دست آمده از تحلیل پوش‌اور استاتیکی مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص گردید فاکتور مقاومت ذخیره تحت بارگذاری دینامیکی نسبت به بارگذاری استاتیکی، به میزان ۲۰٪ افزایش از خود نشان می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن می‌باشد که سازه با شکل‌پذیری کافی برای جذب انرژی، فاکتور مقاومت ذخیره‌اش تحت بار دینامیکی بزرگتر از حالت استاتیکی است [۵].

### ۳-۱- ادامه تحقیقات

در این تحقیق، سکوه‌های نمونه بر گرفته از سکوه‌های موجود در خلیج فارس به عنوان مطالعه موردی برای مطالعه انتخاب شد. تحلیل‌های پوش‌اور استاتیکی و پوش‌اور دینامیکی تحت بارگذاری دریایی با کمک گرفتن از نرم افزار ABAQUS انجام و نتایج آن با هم مقایسه شده است. در این تحقیق به پرسش‌های زیر پاسخ داده شده است: ۱- رفتار سکوه‌های مورد مطالعه از لحاظ شکل پذیری چگونه خواهد بود؟ ۲- ظرفیت پایانی در دو حالت استاتیکی و دینامیکی چه تفاوتی با یکدیگر خواهد داشت؟ ۳- رفتار سازه در دو حالت استاتیکی و دینامیکی چه تفاوتی با یکدیگر خواهد داشت؟

روند تحلیل پوش‌اور استاتیکی شناخته شده است اما الگوریتم تحلیل پوش‌اور دینامیکی به صورت زیر گرفته شده است:

- ضریب بار مناسب اختیار شود.
- بارگذاری دینامیکی جانبی ناشی از گذر موج با ضریب بار مقیاس شود.
- تحلیل دینامیکی غیر خطی انجام و تغییر شکل جانبی سکو به صورت تابعی از زمان استخراج شود.
- گام‌های بالا تکرار گردد تا اینکه در ضریبی از بار فروریزش اتفاق افتد.
- نمودار پوش‌اور دینامیکی با استفاده از ضرایب بار و تغییر شکل جانبی حداکثر در هر یک از ضرایب، رسم گردد.

### ۲- روش انجام

#### ۲-۱- مشخصات سکوه‌های مورد مطالعه

دو سکو در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت. مشخصات این سکوها از دو سکو در خلیج فارس گرفته شده است. از این سکوها در تحقیق حاضر به نام های سکوی A و سکوی B یاد می‌شود.

سازه‌ای در سطوح مختلف معیار شدت (IM) است و معمولاً به صورت یک نمودار پیوسته رسم خواهد شد [۳].

تعریف ۴- منحنی IDA: نمودار معیار آسیب (DM) بر حسب معیار شدت بارگذاری (IM) موسوم به منحنی پوش‌اور یا منحنی IDA است [۳].

### ۱-۱- نمونه تحلیل پوش‌اور دینامیکی ساختمانها تحت اثر زلزله

در این مطالعات شتابهای ثبت شده زلزله به سازه مورد مطالعه اعمال می‌شود. در هر گام با مقیاس کردن این شتاب‌ها و اعمال آن به سازه و انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، رفتار سازه ثبت می‌گردد. این روند به میزانی ادامه پیدا می‌کند که در یکی از این گامها معیار آسیب از حد مجاز فراتر رود یا اینکه سازه دچار فروریزش گردد. به عبارتی آنقدر گسیختگی‌های جزئی در سازه زیاد شود که تحلیل عددی قادر به همگرایی نشود. نمونه‌ای از مقایسه تحلیل‌های پوش‌اور دینامیکی و استاتیکی، حاصل مطالعه روی یک ساختمان مهاربندی شده پنج طبقه، در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل به خوبی دیده می‌شود که در بارگذاری زلزله، نمودار عملکرد ساختمان در حالت دینامیکی، ظرفیت بیشتری را نسبت به حالت استاتیکی نشان داده ولی در حالت خطی جواب سازه با هم برابر است. شروع رفتار غیرخطی در نمودار پس از اولین گسیختگی که ممکن است در پی گسیختگی کمانشی اعضاء مهاربند باشد، اتفاق می‌افتد. بیشترین تفاوت دو روش در قسمت غیر خطی رفتار سازه می‌باشد [۳].

### ۲-۱- نمونه تحلیل پوش‌اور دینامیکی سکوی دریایی

در سال ۱۹۹۹ تحقیقی از سوی موسسه HSE در زمینه پوش‌اور دینامیکی تحت اثر بارگذاری دریایی روی یک سازه شابلونی انجام گرفته است. مطالعه تأثیرات بارگذاری دینامیکی روی مقاومت ذخیره سکو موضوع تحقیق بوده و تلاش گردیده تا تأثیرات بارگذاری دینامیکی روی برآورد پارامترهای طراحی نظیر نسبت مقاومت ذخیره که نقش بسزایی در برآورد سکوه‌های دریایی دارد، روی سازه‌های شابلونی دریایی شمال و به طور خاص سازه Kittiwake، مورد مطالعه قرار گیرد [۵].

تحلیل پوش‌اور استاتیکی و تحلیل‌های دینامیکی تحت بارگذاری-های دینامیکی با فاکتورهای متفاوت بارگذاری انجام شد تا فاکتور ظرفیت ذخیره سازه،  $RSR = \frac{F_{ult}}{F_D}$  تعیین گردد. در این تعریف  $F_{ult}$ ، حداکثر بار جانبی قابل تحمل سازه و  $F_D$ ، بار

غیرخطی داشته باشد و می‌توان از آن در آنالیزهای خطی یا غیر خطی استفاده کرد. طول مدفون شمع‌ها در سکوه‌های A و B به ترتیب ۴۲ و ۵۴ متر است. این طول به قسمت‌های دو متری تقسیم و در هر یک از این ترازاها از ۲ المان فنر متصل به زمین در جهات x، y و z استفاده شده است. در قسمت نوک شمع نیز یک المان فنر اضافی جهت مدل کردن مقاومت نوک شمع قرار داده شده است. نمونه‌ای از نمودارهای T-Z، P-Y و Q-Z در شکل (۱۶) ضمیمه و استفاده از المان spring۱ در مدل سکوها در شکل (۱۷) ضمیمه نشان داده شده است.

در سکوه‌های شابلونی، شمع‌ها از داخل پایه‌ها عبور می‌کنند. در تراز طبقات سکوه جزئیات خاصی بنام Pile Spacer که هدف آن هدایت صحیح شمع می‌باشد به کار برده می‌شود. در صورتی که فاصله بین شمع و پایه با گروت پر نشود این جزئیات باعث می‌شود درجات آزادی گره مشترک شمع و پایه در جهت محور شمع و پیچش حول این محور آزاد و در سایر جهات به یکدیگر مقید باشد. برای مدل کردن چنین رفتاری از المان اتصال Cylindrical Connector در تراز طبقات استفاده شده است. این المان درجات آزادی محوری و پیچش، در دو نقطه متصل به آن را به یکدیگر مقید می‌کند. در قسمت بالایی شمع به دلیل جوش کامل شمع و پایه به هم، تمام درجات آزادی نقاط مشترک پایه و شمع به یکدیگر مقید و از المان Weld Connector استفاده شده است.

با توجه به اهمیت نقش جرم در تحلیل دینامیکی، جرم اعضاء و روسازه باید به درستی مدل شود. حین تعریف المان می‌توان چگالی مصالح استفاده شده را به نرم افزار معرفی کرد. در اینصورت نرم افزار جرم اعضاء را محاسبه و در تحلیل دینامیکی از آن استفاده می‌کند. برای اعمال جرم روسازه از المان Mass استفاده شده است. این المان در نقطه بالایی شمع‌ها تعریف و سپس میزان جرم متناسب با وزن روسازه، به آن اختصاص داده شده است.

در روش برهم نهی مودها، نسبت میرایی برای هر یک از مودهای ارتعاشی تعریف می‌شود. این روش برای سیستمهای غیر خطی کاربرد ندارد. در این موارد ماتریس میرایی به صورت ترکیب خطی از ماتریس سختی و ماتریس جرم سیستم الاستیک ابتدایی بیان می‌گردد [۹].

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

که در آن  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایبی هستند که می‌توان با کمک گرفتن از درصد‌های میرایی بحرانی در ۲ مود غالب سیستم الاستیک ابتدایی، آنها را محاسبه کرد. رابطه موجود را می‌توان در مرجع [۹] یافت. این ضرایب به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

سکوی A در عمق آب ۲۸ متری قرار دارد. دارای ۶ پایه، و متناسب با آن دارای ۶ شمع می‌باشد. سکوی B در عمق آب ۴۹ متری، دارای ۴ پایه، و متناسب با آن دارای ۴ شمع می‌باشد. اشکال و مشخصات این دو سکوه در مرجع [۸] ارائه شده است.

## ۲-۲- مدلسازی

اعضاء سازه‌ای با المان Frame۳d مدل شده‌اند. از خصوصیات این المان قابلیت در نظر گرفتن رفتار کمانشی بر اساس روابط تجربی آیین‌نامه ISO و رفتار پس کمانشی بر اساس پوش مارشال است. در نظر گرفتن رفتار کمانشی در حین انجام تحلیل‌های غیرخطی به ویژه تحلیل دینامیکی غیرخطی از جمله مسائلی است که کمتر نرم افزاری قادر به انجام آن است. این ویژگی در مورد المان Frame۳d و سهولت استفاده از این ویژگی آن را از دیگر المانهای مشابه متمایز می‌کند.

برای تعریف رفتار الاستیک-پلاستیک مقاطع در تحلیل‌های غیر خطی از رفتار پیش فرض در نرم افزار استفاده شده است. در نظر گرفتن رفتار الاستیک-پلاستیک مقطع با منظور کردن رفتار پیش فرض N، M۱، M۲ و T بصورت تابعی از تنش تسلیم مصالح و هندسه مقطع، امکان پذیر است. اطلاعات الاستیک-پلاستیک مقطع در حقیقت پاسخ محوری، خمشی و پیچشی بعد از محدوده الاستیک را تعریف می‌کند [۶].

از آنجا که روسازه روی شمع‌ها نصب می‌شود برای در نظر گرفتن اثر آن روی سازه نیروهای ناشی از بارهای مرده و زنده به سر شمع‌ها وارد گشته است. نیروی روسازه در سکوه‌های A و B به ترتیب ۲۵۰۰ و ۸۰۰ تن می‌باشد. یعنی روی هر یک از شمع‌ها در سکوه‌های A و B به ترتیب نیروهای ۴۱۷ و ۲۰۰ تن به صورت ثقلی اعمال می‌شود.

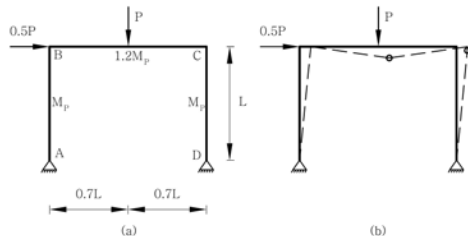
برای برآورد هر چه بهتر رفتار سازه باید اندر کنش خاک و سازه به درستی مدل شود. بهترین حالت، جایگزینی خاک اطراف شمع با فنرهای غیرخطی است که در این پژوهش بکار رفته است. رفتار غیرخطی خاک در طول شمع توسط منحنی‌های P-Y، T-Z، Q-Z تعریف شده است که این مولفه‌ها به ترتیب بیانگر مقاومت جانبی خاک بر حسب تغییر شکل جانبی خاک، مقاومت اصطکاکی جداره بر حسب میزان جابجایی قائم آن و مقاومت نوک شمع بر حسب جابجایی قائم نوک شمع می‌باشد. این اطلاعات در اعماق مختلف از بستر دریا طی آزمایشات ژئوتکنیک استخراج گردیده و در مراحل طراحی سکوه مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مدل کردن خاک از المان spring۱ استفاده شده است. این المان می‌تواند رفتار خطی یا

### ۳-۱- قاب پرتال

این قاب در مرجع [۱۰] مورد مطالعه قرار گرفته است. این قاب به عنوان مدل کمکی با ABAQUS مدل و نتیجه آن با نتایج قبلی مقایسه شد. قاب پرتال تحت بار افقی  $p$  و بار قائم  $P$  قرار گرفته است. سختی خمشی تمام اعضاء برابر با  $EI$  است. ظرفیت پلاستیک خمشی برای ستون برابر  $M_p$  و برای تیر برابر با  $1/2M_p$  است. مکانیزم بحرانی این سیستم در شکل (۲) نشان داده شده است.  $P_{cr}$  متناسب با فرو ریزش سازه که بار نهایی برای این قاب محسوب می‌شود، برابر است با:

$$P_{cr} = 3/67 \frac{M_p}{L} \quad (3)$$

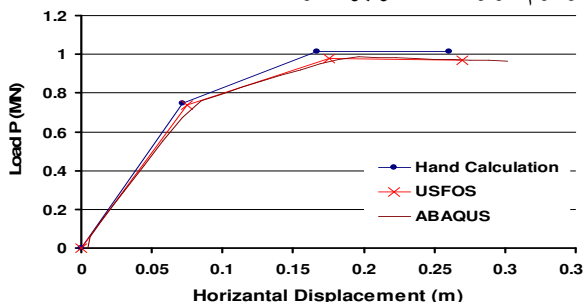
علاوه بر روش یاد شده بار متناسب با فروریزش را می‌توان به وسیله تحلیل الاستیک-پلاستیک گام به گام به صورت دستی محاسبه کرد.



شکل (۲): قاب پرتال (a) هندسه، (b) مکانیزم بحرانی

داده‌هایی که تحلیل عددی بر مبنای آن انجام گرفته، عبارتند از:  $L=5m$ ، ممان اینرسی  $I=8/VE^{-4} m^4$ ،  $\sigma_y = 300 MPa$  و مدول پلاستیک مقطع  $(\frac{M_p}{\sigma_y})$  برابر با  $4/68E^{-4} m^4$  است.

در این تحقیق در راستای بررسی مدل‌های کمکی، قاب در نرم افزار ABAQUS مدل و نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است که هماهنگی خوبی بین جوابها و خصوصاً با نتایج حاصله از نرم افزار USFOS وجود دارد.



شکل (۳): نمودار بار در مقابل جابجایی افقی مربوط به قاب پرتال

$$\alpha = 0.22$$

$$\beta = 0.0843 \quad (2)$$

$$[C]_{\alpha+\beta} = 0.22 [M] + 0.0843 [K]$$

### ۳-۲- بارگذاری

شرایط بارگذاری در نظر گرفته شده، بارگذاری دریایی مربوط به حالت طراحی و از مدارک و مدل‌های موجود مورد استفاده در طراحی این دو سکو گرفته شده است. با استفاده از ABAQUS/Aqua می‌توان بارگذاری موج را به صورت استاتیکی در فاز مشخصی از گذر آن یا به صورت دینامیکی به سازه اعمال کرد.

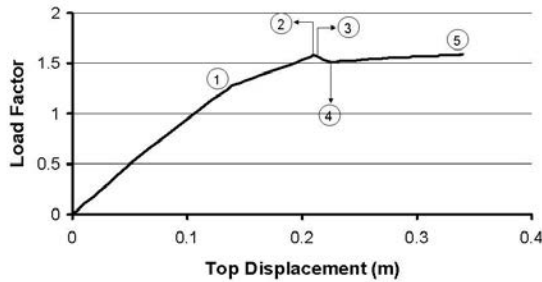
**بارگذاری سکوی A:** بارهای عملیاتی وارده به سکو برابر ۲۵۰۰ تن در جهت ثقل بر روی ۶ شمع این سکو توزیع و اعمال می‌شود. بار باد ۶۸ تن است که روی شش نقطه بالای شمع‌ها، وارد می‌شود. ارتفاع موج طرح ۱۱/۸ متر و دوره تناوب آن ۱۲ ثانیه است. سرعت جریان برابر ۱/۲۹ m/s است که در عمق ثابت فرض شده است.

**بارگذاری سکوی B:** بارهای عملیاتی وارده به سکو برابر ۸۰۰ تن در جهت ثقل بر روی ۴ شمع این سکو توزیع اعمال می‌شود. ارتفاع موج طرح ۱۱/۷ متر و دوره تناوب آن ۱۱/۵ ثانیه است. سرعت جریان برابر ۱/۲ m/s است که در عمق ثابت فرض شده است.

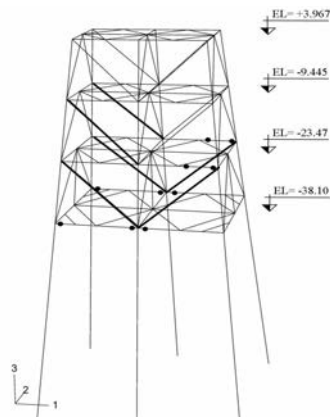
بر اساس مرجع [۷]، ضرایب دراگ و اینرسی به ترتیب برابر با ۱/۰۵ و ۱/۲ گرفته شده‌اند. با اعمال بارگذاری به صورت دینامیکی در یک دوره تناوب از موج و استخراج برش پایه می‌توان تشخیص داد برای یک دوره تناوب موج در چه زمانی بیشترین برش پایه اتفاق می‌افتد. بارگذاری استاتیکی در این لحظه به عنوان بارگذاری مرجع در تحلیل پوش اور استاتیکی استفاده شده است. در آنالیز پوش اور دینامیکی بارگذاری موج به صورت دینامیکی به سازه اعمال و در گام‌های مختلف از این تحلیل، شدت بارگذاری دینامیکی با ضریب بار افزایش داده می‌شود. حداکثر برش پایه ایجاد شده در سکوه‌های A و B به ترتیب برابر با ۴۹۰/۵ تن و ۲۴۹ است. حداکثر برش پایه در دوسکو نزدیک  $t=5/6$  sec رخ می‌دهد. برش پایه در یک دوره تناوب، در اشکال (۱۸) و (۱۹) ضمیمه ارائه شده است.

### ۳-۳- بررسی درستی روش انجام

در این بخش تلاش شده است درستی و دقت تحلیل، با مقایسه با تحقیقات انجام گرفته قبلی مورد بررسی قرار گیرد. در صورت مطابقت نتایج تحلیل با نتیجه‌های قبلی، می‌توان با



شکل (۶): نمودار پوش اور استاتیکی سکوی A



شکل (۷): محل گسیختگی‌ها در سکوی A در پوش اور استاتیکی

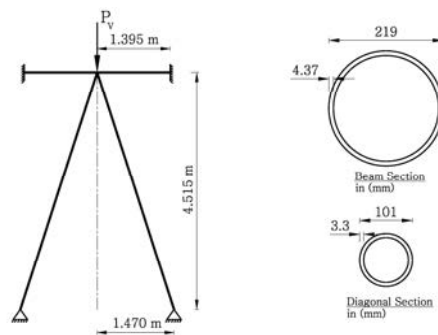
جدول (۱): ترتیب و نوع گسیختگی در اعضای سکوی A

ترتیب	ضریب بار	تغییر شکل جانبی (m)	نوع گسیختگی
۱	۱/۲۷۵	۰/۱۲۹	کمانش مهارهای فشاری بین تراز ۲۳/۴۷- و ۲۸/۱۰- و ۲۳/۴۷-
۲	۱/۵۷۶	۰/۲۱	کمانش مهارهای فشاری بین تراز ۲۳/۴۷- و ۹/۴۴۵- و ۲۳/۴۷-
۳	۱/۵۶۵	۰/۲۱۴	تسلیم خمشی ۲ المان در تراز ۲۳/۴۷-
۴	۱/۵۲۳	۰/۲۶۸	تسلیم مهار کششی بین تراز ۲۳/۴۷- و ۲۸/۱۰-
۵	۱/۵۸	۰/۳۳۹	تشکیل چند مفصل پلاستیک در تراز ۲۸/۱۰- و فروریزش

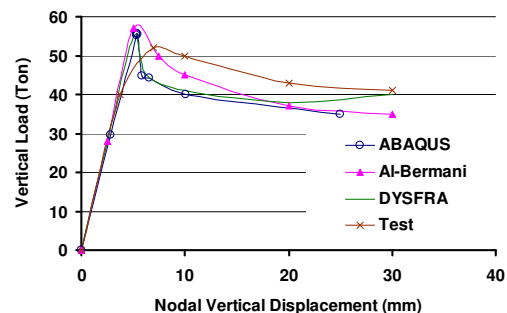
با کمانش دو عضو مهاربند فشاری در ضریب بار ۱/۲۷۵ سختی سازه کاهش می‌یابد ولی سازه توان تحمل بارهای بزرگتر را دارا است. اما با افزایش بار و حذف دو عضو مهاربند فشاری دیگر در ضریب بار ۱/۵۷۶ افتادگی در نمودار پدیدار و سختی سازه پس از آن دچار افت می‌شود. با این حال سازه با سختی بسیار کمی بار وارده را تحمل می‌کند تا در پایان با تغییر شکل جانبی ۳۴ سانتی‌متر فروریزش می‌کند. ظرفیت ذخیره سکوی A، RSR، برابر با ۱/۵۷۶ و سکوی رفتاری شبه منعطف از خود نشان داده است.

(ب) سکوی B: نتیجه تحلیل پوش اور روی این سکوی در

مشخصات هندسی این قاب در شکل (۴) دیده می‌شود. تنش تسلیم فولاد  $\sigma_y = 296 \text{ MPa}$  در نظر گرفته شده است. تحلیل پوش اور این قاب تحت بار قائم  $P_v$  توسط Al-Bermani با نرم افزار FENRIS [۱۱] انجام شده است. علاوه بر این، تحلیل این قاب به صورت عددی توسط Jun با نرم افزار DYSFERA انجام گرفته است. همچنین توسط Moan و همکاران تحت آزمایش عملی قرار گرفت. در این قسمت این قاب با نرم افزار ABAQUS مورد تحلیل قرار گرفته و در شکل (۵) با نتایج قبلی مقایسه شده است. نتایج حاصل از ABAQUS با نتایج قبلی، به ویژه نتایج حاصل از نرم افزارهای به کار رفته، انطباق خوبی دارد.



شکل (۴): مشخصات هندسی قاب K شکل



شکل (۵): نتایج تحلیل قاب K شکل

## ۴- نتایج و بحث

### ۴-۱- نتایج تحلیل پوش اور استاتیکی

الف) سکوی A: نتیجه تحلیل پوش اور این سکوی در شکل (۶) نشان داده شده است. در جدول (۱) ترتیب و نوع گسیختگی‌ها بیان، و در شکل (۷) محل گسیختگی‌ها مشخص گردیده است. ظرفیت ذخیره سکوی A، RSR، برابر با ۱/۵۷۶ و مطابق با تعاریف مرجع [۱۲] سکوی رفتاری شبه منعطف از خود نشان داده است.

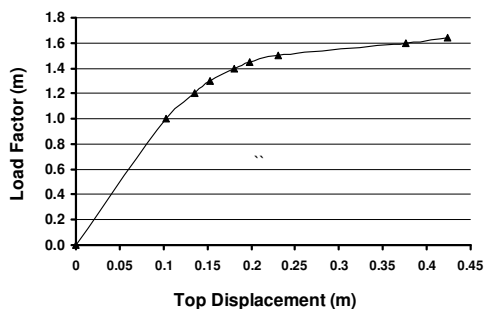


دینامیکی غیرخطی قرار گرفته اند. افزایش ضریب بار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در آن، تحلیل دینامیکی همگرا نشده یا به عبارتی گسیختگی‌ها آنقدر پیش‌روی می‌کنند که سازه قادر به متعادل کردن نیروهای خارجی و داخلی نمی‌شود. برای رسم نمودار پوش‌اور دینامیکی از ضرایب بار و حداکثر تغییر شکل جانبی عرشه در هر یک از این ضرایب استفاده شده است. مفاصل پلاستیکی که حین بارگذاری در اعضا بوجود می‌آید با گذشت زمان در سیکل بارگذاری و کاهش شدت بارگذاری از حالت پلاستیک کامل کاهش می‌یابد. بنابراین در آنها تغییرشکل‌های ماندگار باقی مانده و موجب تغییرشکل ماندگار در سکو می‌شوند.

**الف) سکو A:** نتایج تحلیل دینامیکی با ضرایب مختلف بار روی سکو A در شکل (۲۰) ضمیمه ارائه و خلاصه آن در جدول (۳) نشان داده شده است. با استفاده از این اطلاعات نمودار پوش‌اور دینامیکی این سکو در شکل (۱۰) رسم گردیده است. نوع گسیختگی‌هایی که در بزرگترین ضریب بار، ۱/۶۴ در این سکو رخ داده است به همراه زمان وقوع آن را در شکل (۱۱) و در جدول (۴) می‌توان مشاهده کرد. نسبت ظرفیت ذخیره، RSR، سکو A در نتیجه تحلیل پوش‌اور دینامیکی برابر با ۱/۶۴ تخمین زده شد.

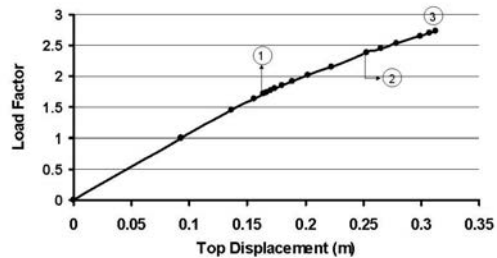
جدول (۳): نتایج تحلیل دینامیکی روی سکو A

Load Factor	Max. Displacement (m)	Residual Displacement (m)
۱	۰/۱۰۲	۰/۰۰۴۴
۱/۲	۰/۱۳۶	-۰/۰۰۵۹
۱/۳	۰/۱۵	-۰/۰۰۶
۱/۴	۰/۱۸۱	-۰/۰۳۰۵
۱/۵	۰/۲۳	۰/۰۴۷
۱/۶	۰/۳۷۶	۰/۱۲۴
۱/۶۴	۰/۴۲۴	۰/۱۲۳
۱/۶۵	۰/۴۱۸	فرو ریزش

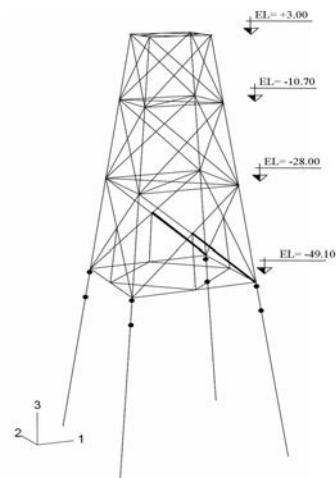


شکل (۱۰): نمودار پوش‌اور دینامیکی سکو A

شکل (۸) نشان داده شده است. در جدول (۲) ترتیب و نوع گسیختگی‌ها ذکر، و در شکل (۹) محل گسیختگی‌ها مشخص گردیده است. با کماتش دو مهاربند فشاری در ضریب بار ۱/۷۵ سختی سازه کاهش می‌یابد. افزایش بار باعث ایجاد مفاصل پلاستیک در شمع‌های فشاری و سپس در شمع‌های کششی، تحت اثر خمش می‌شود. بعد از این، سازه قادر به تحمل بارهای بزرگتر نبوده و دچار فروریزش می‌گردد. ظرفیت ذخیره، RSR، سکو B برابر با ۲/۷۳ و مطابق با تعاریف مرجع [۱۲] رفتار سکو شبه منعطف است.



شکل (۸): نمودار پوش‌اور استاتیکی سکو B



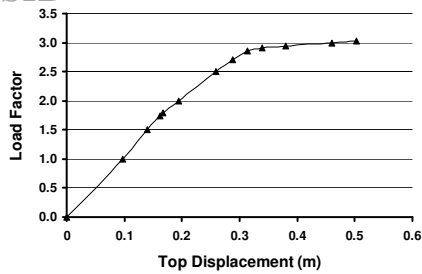
شکل (۹): محل گسیختگی‌ها در سکو B در پوش‌اور استاتیکی

جدول (۲): ترتیب و نوع گسیختگی در اعضا، سکو B

ترتیب	ضریب بار	تغییر شکل جانبی (m)	نوع گسیختگی
۱	۱/۷۵	۰/۱۶۷	کمانش ۲ مهار فشاری بین تراز -۲۸/۰۰ و -۴۹/۱۰
۲	۲/۳۷۶	۰/۲۵۰	تسلیم خمشی شمع‌های فشاری در نزدیکی بستر
۳	۲/۷۳	۰/۲۹۱	تسلیم خمشی شمع‌های کششی در نزدیکی بستر و فروریزش

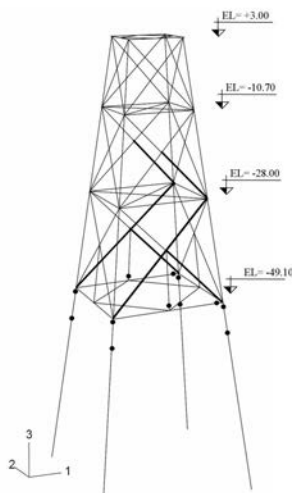
### ۸-۲- نتایج تحلیل پوش‌اور دینامیکی

بارگذاری دینامیکی ناشی از گذر موج و جریان در یک دوره تناوب از موج به سکوها اعمال شده است. سکوها تحت بارگذاری مختلف با ضرایب بار مقیاس شده مورد تحلیل



شکل (۱۲): نمودار پوش اور دینامیکی سکوی B

نوع گسیختگی‌هایی که در بزرگترین ضریب بار،  $3/0.3$  در این سکو رخ داده است به همراه زمان وقوع آن در شکل (۱۳) و در جدول (۶) ارائه شده است. نسبت ظرفیت ذخیره، RSR، سکوی B در نتیجه تحلیل پوش اور دینامیکی برابر با  $3/0.3$  تخمین زده شده است.



شکل (۱۳): محل گسیختگی‌ها در ضریب بار  $3/0.3$  در سکوی B

جدول (۶): گسیختگی‌ها در ضریب بار  $3/0.3$  در سکوی B

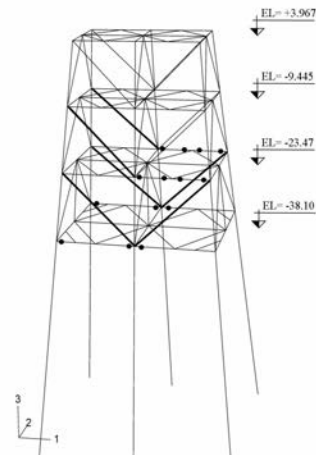
Load Factor= $3/0.3$		
ترتیب	زمان (SEC)	نوع گسیختگی
۱	۳/۹۲	کمانش ۲ مهار فشاری بین تراز $-49/10$ و $-28/00$
۲	۴/۴۸	تسلیم خمشی شمع های فشاری در نزدیکی بستر
۳	۴/۵۶	تسلیم خمشی شمع های کششی در نزدیکی بستر
۴	۵/۰۴	تسلیم مهارهای کششی بین تراز بین تراز $-49/10$ و $-28/00$
۵	۵/۲۸	تشکیل دو مفصل پلاستیک در تراز $-49/10$
۶	۵/۶۴	کمانش ۲ مهار فشاری بین تراز $-49/10$ و $-28/00$
۷	۵/۸۸	تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضاء قائم متصل به مهارها در تراز $-49/10$

### ۳-۶- مقایسه تحلیل پوش اور دینامیکی و استاتیکی

نمودارهای پوش اور استاتیکی و دینامیکی جهت مقایسه در شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، با هم رسم شده‌اند. با مقایسه نتایج به

جدول (۴): گسیختگی‌ها در ضریب بار  $1/64$  در سکوی A

Load Factor= $1/64$		
ترتیب	زمان (SEC)	نوع گسیختگی
۱	۴/۶	کمانش مهارهای فشاری بین تراز $-23/47$ و $-28/10$
۲	۵/۴۷	کمانش مهارهای فشاری بین تراز $-23/47$ و $-9/445$
۳	۵/۵۳	تسلیم خمشی ۲ المان در تراز $-23/47$
۴	۶/۱۷	تسلیم مهار کششی بین تراز $-28/10$ و $-23/47$
۵	۶/۸۲	تشکیل چند مفصل پلاستیک در تراز $-28/10$



شکل (۱۱): محل گسیختگی‌ها در ضریب بار  $1/64$  در سکوی A

(ب) سکوی B: نتایج تحلیل دینامیکی با ضرایب مختلف بار روی سکوی B در شکل (۲۱) ضمیمه ارائه و خلاصه آن در جدول (۵) نشان داده شده است. نمودار پوش اور دینامیکی این سکو در شکل (۱۲) رسم گردیده است.

جدول (۵): نتایج تحلیل دینامیکی روی سکوی B

Load Factor	Max. Displacement (m)	Residual Displacement (m)
۱	۰/۰۹۶	۰/۰۰۱۳
۱/۵	۰/۱۳۹	۰/۰۰۳۳
۱/۸	۰/۱۶۲	۰/۰۰۲۴۵
۲	۰/۱۶۷	۰/۰۰۲۹
۲/۵	۰/۱۹۴	۰/۰۱۵۲
۲/۷	۰/۲۵۹	۰/۰۲۳۷
۲/۸	۰/۲۸۹	۰/۰۲۹۳
۲/۹	۰/۳۱۴	۰/۰۵۶۷
۲/۹۵	۰/۳۳۹	۰/۱۲
۳	۰/۳۸	۰/۱۸۶
۳/۰۳	۰/۴۶	۰/۲۱
۳/۰۴	۰/۵۰۳	فرو ریزش



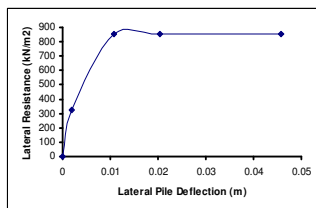
[۲-۴] بدان پرداخته شده است، مشاهده می‌گردد در حالت دینامیکی، سکو قادر به تحمل تعداد بیشتری گسیختگی نسبت به حالت استاتیکی است. درحالت دینامیکی با وجود گسیختگی‌های یکسان در سازه نسبت به حالت استاتیکی، سازه دچار فروریزش نشده و همچنان قادر به تحمل بار و تحمل گسیختگی‌های بیشتر در سیستم سازه‌ای می‌باشد. خلاصه‌ای از رفتار سکوها در دو حالت پوش‌اور دینامیکی و استاتیکی به طور خلاصه در جدول (۷) آمده است.

### ۵- خلاصه و نتیجه گیری

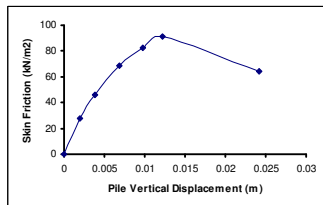
- با انجام تحلیل پوش‌اور دینامیکی محدود روی سکوهای مورد مطالعه و مقایسه با پوش‌اور استاتیکی مشخص گردید:
- نسبت ظرفیت ذخیره در سکوهای A و B به ترتیب به اندازه ۴٪ و ۱۱٪ نسبت به حالت استاتیکی افزایش یافته است. بنابراین به نظر می‌رسد تحلیل پوش‌اور استاتیکی روش محافظه‌کارانه‌ای در برآورد ظرفیت ذخیره سکو می‌باشد.
  - ظرفیت شکل پذیری سکوهای A و B به ترتیب به اندازه ۲۵٪ و ۵۸٪ نسبت به حالت استاتیکی افزایش یافته است.
  - در پوش‌اور دینامیکی، سکوها قادر به تحمل تعداد بیشتری گسیختگی در اعضا هستند.
  - برای نیل به نتیجه‌گیری کامل‌تر، ضروری است سکوهای با هندسه مختلف تحت بارهای متنوع دیگر تحلیل شود و تأثیر پارامترهای بارگذاری دینامیکی در مورد آنها مطالعه قرار گیرد.

### ۶- ضوابط

#### ۶-۱- مدل خاک

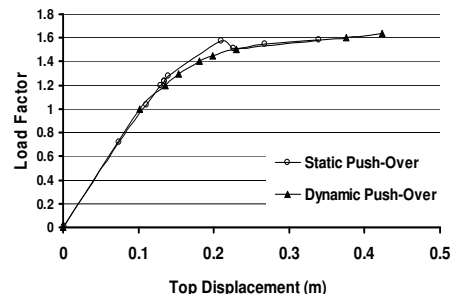


الف: نمونه ای از نمودار P-Y

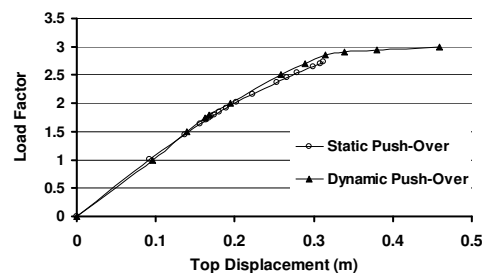


ب: نمونه ای از نمودار T-Z

دست آمده می‌توان به برداشت‌هایی دست یافت: ۱- انطباق خوبی بین نمودارها، تا قبل از اتفاق اولین گسیختگی، در ناحیه خطی نمودارها، وجود دارد و تفاوت حالات استاتیکی و دینامیکی بعد از این رخداد پدیدار می‌شود. ۲- در حالت پوش‌اور دینامیکی، ظرفیت ذخیره سکوهای A و B به ترتیب به میزان ۴٪ و ۱۱٪ افزوده شده است.



شکل (۱۴): مقایسه پوش‌اور دینامیکی و استاتیکی سکوی A

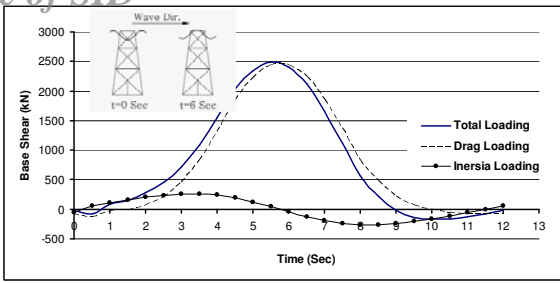


شکل (۱۵): مقایسه پوش‌اور دینامیکی و استاتیکی سکوی B

جدول (۷): خلاصه‌ای از رفتار سکوها در تحلیلهای پوش‌اور دینامیکی و استاتیکی

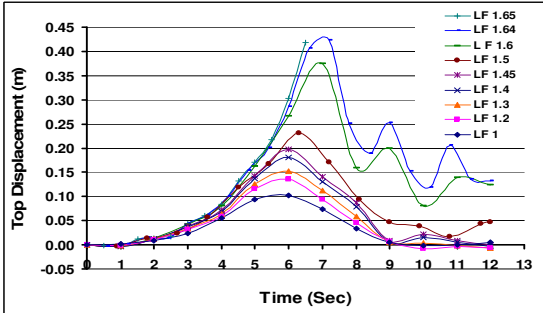
نوع سکو	نوع تحلیل پوش‌اور	نسبت ظرفیت ذخیره	تفاوت با حالت استاتیکی	تغییر شکل جانبی (m)	تفاوت با حالت استاتیکی
A	استاتیکی	۱/۵۷۶	-	۰/۳۳۹	-
	دینامیکی	۱/۶۴	٪+۴	۰/۴۲۴	٪+۲۵
B	استاتیکی	۲/۷۳	-	۰/۲۹۱	-
	دینامیکی	۳/۰۳	٪+۱۱	۰/۴۶۰	٪+۵۸

البته در مورد سکوی اول، افزایش ۴ درصدی با در نظر گرفتن خطاهای روشهای عددی در آنالیز ناچیز بوده و می‌توان گفت در مورد این سکو ظرفیت ذخیره در دو روش نزدیک و با هم برابر بوده است. افزایش ظرفیت ذخیره را به دلیل وجود نیروی اینرسی در درجه اول و نیروی میرایی در درجه دوم و کمک این نیروها به نیروی سختی سازه در تحمل بار خارجی است. ۳- ظرفیت شکل‌پذیری سکوها در تحلیل پوش‌اور دینامیکی نسبت به حالت استاتیکی در سکوهای A و B به ترتیب به میزان ۲۵٪ و ۵۸٪ افزایش یافته است. ۴- با مقایسه گسیختگی‌های بوجود آمده در سازه، که در بخش‌های [۴-۱] و

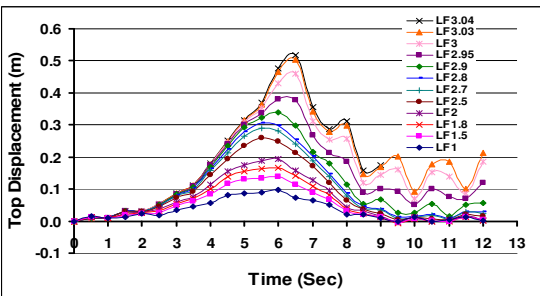


شکل (۱۹): برش پایه ناشی از جریان و گذر موج سکوی B

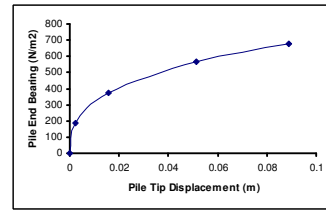
### ۳-۶- نتایج آنالیز دینامیکی



شکل (۲۰): پاسخ سکوی A در یک دوره تناوب موج تحت ضرایب بار مختلف

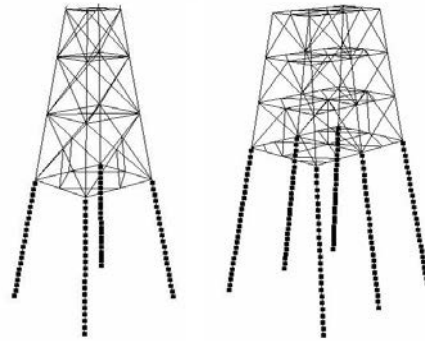


شکل (۲۱): پاسخ سکوی B در یک دوره تناوب موج تحت ضرایب بار مختلف



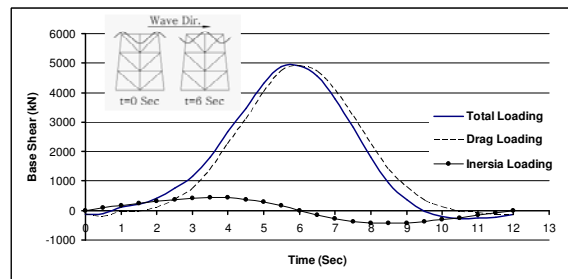
ج: نمونه ای از نمودار Q-Z

شکل (۱۶): نمونه ای از نمودارهای T-Z, P-Y و Q-Z



شکل (۱۷): مدل خاک با المان فنر درسکوهای A و B

### ۲-۶- برش پایه



شکل (۱۸): برش پایه ناشی از جریان و گذر موج سکوی A

### ۷- مراجع

- [۵] HSE; Health and Safety Executive.; Dynamic Push-Over Analysis of Jacket Structure, Offshore Technology Report- OTO 98 092, April 1999.
- [۶] ABAQUS Version 6.4 Documentation; "ABAQUS Analysis User's Manual", 2004.
- [۷] American Petroleum Institute.; Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, API-RP2A, Washington, DC 20th Edition, 1996.
- [۸] خیری جلودار، سید عباس؛ تحلیل پشاور دینامیکی سکوهای دریایی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.
- [۹] Farzad Naeim; Seismic Design Handbook, Chapter 4; Dynamic Response of Structure; 2004.
- [۱] Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings, Report No. FEMA-350, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2000.
- [۲] Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment-frame buildings, Report No. FEMA-351, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2000
- [۳] Dimitrios Vamvatsikos and C.Allin Cornell;"Incremental Dynamic Analysis", Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, 2001
- [۴] Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Report No. ATC-40, Advanced Technology Council, Redwood City, California, 1996.

Schmücker, D.G.; "Near-failure behavior of jacket-type offshore platforms in the extreme wave environment", PHD Thesis, Reliability of Marine Structures Program, Report RMS-21, Dept. Civil Eng., Stanford university CA, USA, 1996.

Poulos, H.G., Davis, E.H., "Pile Foundation Analysis And Design." John Wiley & Sons, Inc., 1980.

[۱۲]

Bjorn Skallerud & Jorgen Amdahl.; Nonlinear Analysis of Offshore Structures, Technical University of Denmark, 2002.

[۱۰]

Al-Bermani, F.G.A, Kitipornachi, S., "Elasto-Plastic Large Deformation Analysis of Thin-Walled Structures." Engineering Structures, Vol. 12, January 1990.

[۱۱]

[۱۳]

## ۸- زیر نویس ها:

---

<sup>1</sup> Push- Over

<sup>2</sup> Incremental Dynamic Analysis

<sup>3</sup> Health and Safety Executive

<sup>4</sup> Mechanism

<sup>5</sup> Semi Ductile