یادداشت فنی

ارزیابی رفتار لرزه‌ای سکوهای پایه ثابت با استفاده از روش زمان دوام

محمد سعید سیف[۱]، حمید مهدیقلی[۲]، همایون استکانچی[۳]، محمد علی داستان[۴*]

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف
۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۴- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

بررسی رفتار لرزه‌ای سکو های دریایی، یکی از مهم ترین شاخص‌های طراحی آن‌ها در مناطق لرزه‌خیز می باشد. با این وجود روش‌های تحلیلی‌ای که در این زمینه از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند، به دلیل پیچیدگی و زمان‌بر بودن، در عمل چندان مورد توجه مهندسین قرار نگرفته‌اند. روش زمان دوام، روش مناسبی جهت حل این مشکل می‌باشد. در این روش می‌توان با قبول محدوده مناسبی از خطا، زمان تحلیل را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش داد، بطوری که با انجام یک تحلیل زمان دوام رفتار سازه را در سطوح مختلف لرزه‌ای ارزیابی کرد. در این مقاله ابتدا به معرفی روش‌های مختلف تحلیل در آیین نامه‌ها و روش زمان‌دوام پرداخته شده و در ادامه رفتار لرزه‌ای سه سکو با استفاده از تحلیل طیفی آیین نامه ۲۸۰۰ و توابع شتاب زمان دوام مورد مقایسه قرار گرفته است. بدین منظور از تابع شتابی که در روش زمان‌دوام بر مبنای طیف آیین نامه ۲۸۰۰ تولید گشته، استفاده شده و میزان اختلاف در نتایج در مقایسه با تحلیل طیفی آیین نامه ۲۸۰۰ ارائه گردیده است که از تطابق مناسبی.برخوردار می‌باشند.

کلمات کلیدی: سکوی پایه ثابت، روش زمان‌دوام، رفتار لرزه‌ای، تحلیل طیفی

TECHNICAL NOTE

Evaluation of Seismic Behavior of Fixed Offshore Platforms with Endurance Time Method

M.S. Seif[1], H. Mehdigholi[2], H.E. Estekanchi[3], M.A. Dastan[4]

1- Professor, Mech. Eng. Dep., Sharif University of Tech.
2- Assistant Professor, Mech. Eng. Dep., Sharif University of Tech.
3- Professor, Civil Eng. Dep., Sharif University of Tech.
4- Ph.D. Candidate, Mech. Eng. Dep., Sharif University of Tech.

Abstract

Evaluation of seismic behavior of offshore platforms is one of the important design steps in seismic regions. Nevertheless, because of complication and time cost of these methods, engineers usually do not study them deeply. Endurance Time (ET) method is a good solution for this problem. In this method, with acceptance of a reasonable region of errors, the time of analysis can be reduced considerably. Besides with one ET analysis, the behavior of structure can be evaluated in different seismic levels. In this paper, the ET and other usual methods in standards are introduced and then the seismic behavior of three platforms is compared with ET and response spectrum method. In this comparison, the acceleration function which is generated

* نویسنده مسئول مقاله dastan@mech.sharif.edu

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.5.6]

base on Iranian cod (2800 standard), is used and the differences are considered in relation to spectral analysis of 2800 standard. The results show appropriate conformity between two methods.

Keywords: Fixed Offshore Platform, Endurance Time Method, Seismic Behavior, Spectral Analysis

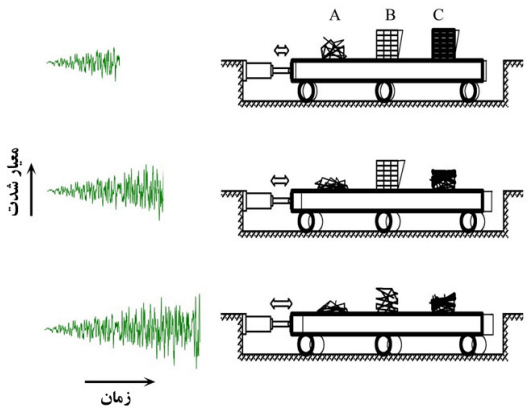
۱ - مقدمه

امروزه با گسترش اکتشاف و استخراج نفت در مناطق فراساحل، تعداد بسیار زیادی سکو دریایی در نقاط مختلف جهان ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. کشور ایران یکی از نفت خیزترین کشورهای جهان می باشد که مقدار قابل توجهی از ذخایر نفتی آن در مناطق دور از ساحل قرار دارد. با توجه به عمق کم آب، سکوی پایه ثابت مناسب‌ترین گزینه برای انجام عملیات نفتی در این منطقه می‌باشد که بررسی دقیق رفتار آن‌ها - با توجه به اهمیت این سازه‌ها و هزینه بالای آن‌ها- امری اجتناب ناپذیر است. در میان بارهای اعمالی بر سکو در منطقه خلیج فارس، دو بار موج و زلزله نقش کلیدی در طراحی سکو دارند. روش‌های مختلفی در آیین‌نامه‌ها برای طراحی سکو تحت بارهای فوق ارائه شده است. آیین نامه ای‌پی‌آی[1] روش‌های تحلیل را بصورت روش‌های خطی و غیر خطی دسته بندی می‌کند [۲]. روش‌های خطی نمی‌توانند رفتار پلاستیک سازه را بررسی نمایند. با توجه به اینکه سازه در زلزله‌های سطح شکل پذیری وارد رفتار غیرخطی می‌گردد، در نظر گرفتن این رفتار برای مناطقی که خطر لرزه‌خیزی بالایی دارند امری ضروری است. بهترین روش در نظر گرفتن رفتار سازه بصورت دینامیکی غیرخطی در حوزه زمان است. از طرف دیگر بار زلزله پدیده‌ای تصادفی است و نمی‌توان تنها با اعمال یک رکورد تاریخچه‌زمانی، رفتار سازه را بطور کامل ارزیابی نمود. آیین نامه‌ها اعمال حداقل ۳ تا ۷ رکورد را ضروری می‌دانند [۳]. مشکلی که در این روش تحلیل وجود دارد هزینه بسیار بالای محاسباتی آن می‌باشد.

از طرف دیگر روش زمان دوام روشی نوین در تحلیل زلزله می باشد که توانایی بالقوه ای در کاهش محاسبات مربوط به آنالیز دینامیکی دارد [۴]. در این روش با اعمال یک شتابنگاشت افزاینده به سازه و رسم پاسخ سازه بر حسب زمان، به ارزیابی عملکرد سازه در زمانهای مختلف که هر یک معرف یک شدت زلزله می باشند، پرداخته می‌شود [۵].

۲- روش زمان دوام

مفهوم زمان دوام را می‌توان به خوبی با یک آزمایش فرضی توضیح داد. به عنوان مثال عملکرد سازه‌ای سه سازه مختلف با خصوصیات نامشخص در برابر زلزله می‌خواهد مورد تحقیق قرار بگیرد. برای بررسی عملکرد این سازه‌ها، این سه سازه بر روی میز لرزان قرار می‌گیرند. آزمایش با تهییج میز لرزان تحت ارتعاش اتفاقی که به تدریج شدت آن در طول زمان افزایش پیدا می‌کند (تابع شتاب[2]) شروع می‌شود (شکل ۱). با افزایش تدریجی شدت تهییج دامنه نوسان سازه ها نیز به تدریج زیاد می شود. به علت تقاضای افزاینده تابع شتاب، سازه‌ها از تغییر شکلهای الاستیک به حالت تسلیم و مرحله رفتار غیرخطی می‌رسند و در نهایت به ناپایداری دینامیکی کلی می‌رسند [۶]. در طول آزمایش می‌توان مقادیر شاخصهای خرابی را به طور مستقیم بر حسب زمان رسم کرد.



شکل ۱ - معرفی شماتیک آنالیز زمان دوام در تشخیص مقاومت لرزه‌ای سیستمهای مختلف [۷]

همانطور که مشاهده می‌شود به طور کلی دامنه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.5.6]

شاخصهای خرابی در قاب A از بقیه بیشتر و در قاب B از بقیه کمتر است. در نتیجه می‌توان گفت که عملکرد سازه B نسبت به دو سازه دیگر در شدتهای مختلف مطلوب‌تر است [۸].

۲ -۱ خواص توابع شتاب

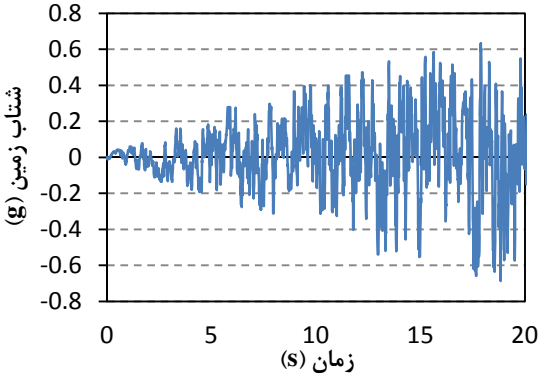
یکی از پارامترهایی که باید در بهینه‌سازی توابع شتاب مورد بررسی قرار گیرد روند افزایشی این توابع است. با تحقیقاتی که انجام شده است مشخص گردیده که یکی از حالت‌های مناسب، روند افزایشی به صورت خطی است [۸]. این خطی بودن بدین صورت است که طیف پاسخ زمان دوام در زمان ۱۰ ثانیه مطابق با آیین نامه زلزله ایران و دو برابر طیف پاسخ در زمان ۵ ثانیه می‌باشد. همچنین طیف پاسخ زمان دوام در زمان ۲۰ ثانیه دو برابر طیف پاسخ در زمان ۱۰ ثانیه است. این خصوصیت سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در زمان تحلیل می‌گردد. بر این اساس طیف شتاب S_{aT} و طیف جابجایی S_{uT} به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

$$S_{aT}(T,t)=\frac{t}{10}S_{aC}(T)$$
$$S_{uT}(T,t)=\frac{t}{10}S_{aC}(T)\times\frac{T^2}{4\pi^2} \qquad (۱)$$

که T بیانگر دوره تناوب و t نشان دهنده زمانی است که تا آن زمان طیف پاسخ از تابع شتاب بدست می‌آید. یافتن راه‌حل تحلیلی که بتواند رابطه (۱) را ارضا کند، بسیار سخت به‌نظر می‌رسد. از این رو با استفاده از بهینه‌سازی عددی، به حل مساله که به شکل رابطه (۲) تبدیل شده است، پرداخته می‌شود.

$$\text{Minimize } F(a_g)=$$
$$\int_0^{T_{\max}}\int_0^{t_{\max}}\{[S_a(T,t)-S_{aT}(T,t)]^2+\alpha[S_u(T,t)-S_{uT}(T,t)]^2\}dt\,dT \qquad (۲)$$

که a_g تابع شتاب زمان دوام و α متغییر وزنی نسبی است که میزان جریمه را با مقایسه انحراف طیف جابجایی نسبت به انحراف طیف شتاب از مقدار هدف تعیین می‌کند. مقادیر بالای α سبب می‌شود که تابع هدف به تغییرات در طیف جابجایی حساس شود در حالیکه مقادیر پایین α سبب ایجاد حساسیت تابع هدف نسبت به تغییرات طیف شتاب می‌گردد [۹]. با در نظر گرفتن $\alpha=1$ تابع شتاب زمان دوام ETA20b01 بر مبنای آیین‌نامه زلزله ایران (آیین‌نامه ۲۸۰۰) برای خاک نوع دو تولید شده است که در شکل ۲ نشان داده می‌شود.



شکل ۲ – تابع شتاب زمان‌دوام ETA20b01

۳ - تحلیل دینامیکی و نتایج عددی

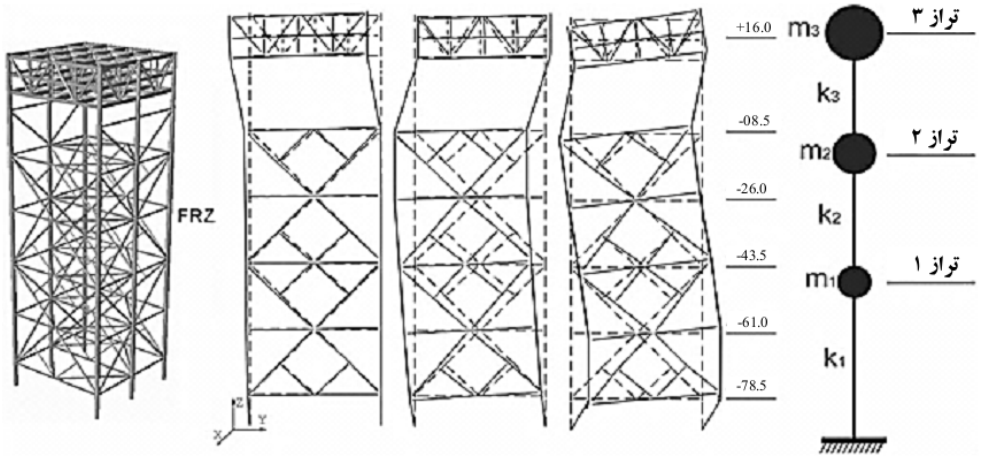
در این مطالعه سه سکوی واقعی NRB، FRZ و Dalane مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. عرشه سکوهای NRB و FRZ با روش شناوری نصب شده که استفاده از این روش مستلزم حذف مهاربندهای جکت در تراز سطح دریا می‌باشد و منجر به نرمی‌قابل توجهی در تراز فوقانی سکو می‌گردد [۱۰].

مدل تحلیلی این سکوها به صورت سیستم‌های چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز ساده شده است. اثر خاک در محاسبه سختی فنرها در نظر گرفته شده است. تعداد کافی از مودهای ارتعاشی و به همان تعداد درجات آزادی در نظر گرفته شده بطوریکه مجموع جرم موثر مودهای در نظر گرفته شده سهم قابل توجهی از جرم سازه را شامل شود. جرم‌های متمرکز و ضرایب سختی برای مدل ساده شده، بر مبنای مطالعات گل‌افشانی و همکاران انتخاب شده است [۱۰]. برای نمونه، شکل کلی از نمای سکوی FRZ همراه با مودهای ارتعاشی و سیستم سه درجه آزادی معادل آن در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصات بدست آمده برای این سه سکو، شامل دوره تناوب مود اول و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.5.6]

سختی ها و جرم های ترازهای مختلف، در جدول ۱ ارائه شده است.

جهت مدل سازی این سیستم سه درجه آزادی از نرم‌افزار انسیس[۳] استفاده شده است. در ابتدا طیف حاصل از رکورد زمان دوام ETA20b01، در زمان‌های مختلف تحصیل گردیده و جهت هموار کردن نمودار این طیف‌ها از روش میانگین‌گیری ۲۱ نقطه‌ای استفاده شده است که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد. مقایسه طیف‌های حاصل از آیین نامه ۲۸۰۰ و ET نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. در ادامه با استفاده از تحلیل طیفی به مقایسه روش آیین نامه و زمان دوام پرداخته می‌شود. اگر دقت مطلوبی بین نتایج حاصل از این دو روش مشاهده گردد، می‌توان از تحلیل تاریخچه زمانی خطی روش زمان دوام، جهت بررسی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها استفاده نمود. بدین صورت پاسخ سازه در هر زمان تحلیل تاریخچه زمانی روش زمان دوام، بیانگر سطحی از طیف آیین نامه ۲۸۰۰ می‌باشد.

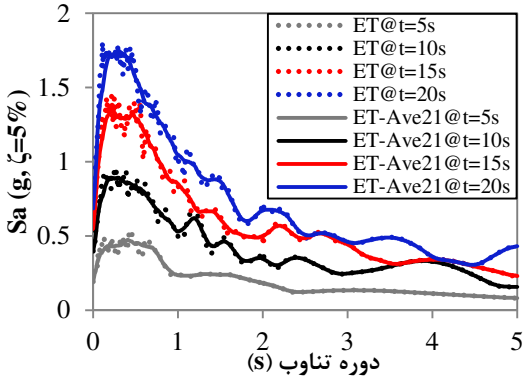


شکل ۳ – نمونه سکوی شابلونی مطالعه شده، مودهای ارتعاشی آن و سیستم‌های سه درجه آزادی معادل [۱۰]

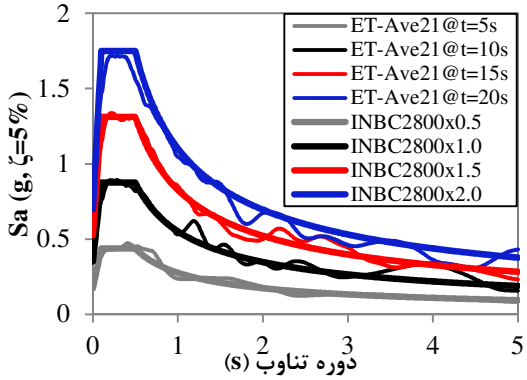
جدول ۱- مشخصات دینامیکی نمونه سکوهای مورد مطالعه [۱۰]

Platform	*Period (s)*	k_1 *(MN/m)*	k_2 *(MN/m)*	k_3 *(MN/m)*	m_1 *(Ton)*	m_2 *(Ton)*	m_3 *(Ton)*
NRB	۴/۸	۴۰۰	۴۳۰	۷۵*	۹۰۰۰	۱۱۰۰۰	۳۱۰۰۰
FRZ	۲/۷	۳۳۵	۳۶۵	۳۲	۱۴۵۰	۲۰۵۰	۶۱۰۰
Dalane	۱/۵	۵۸	۵۰	۵۳	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۳۱۰۰

* این عدد برای ایجاد دوره تناوب ۴/۸ ثانیه در مود اول تغییر داده شده است.

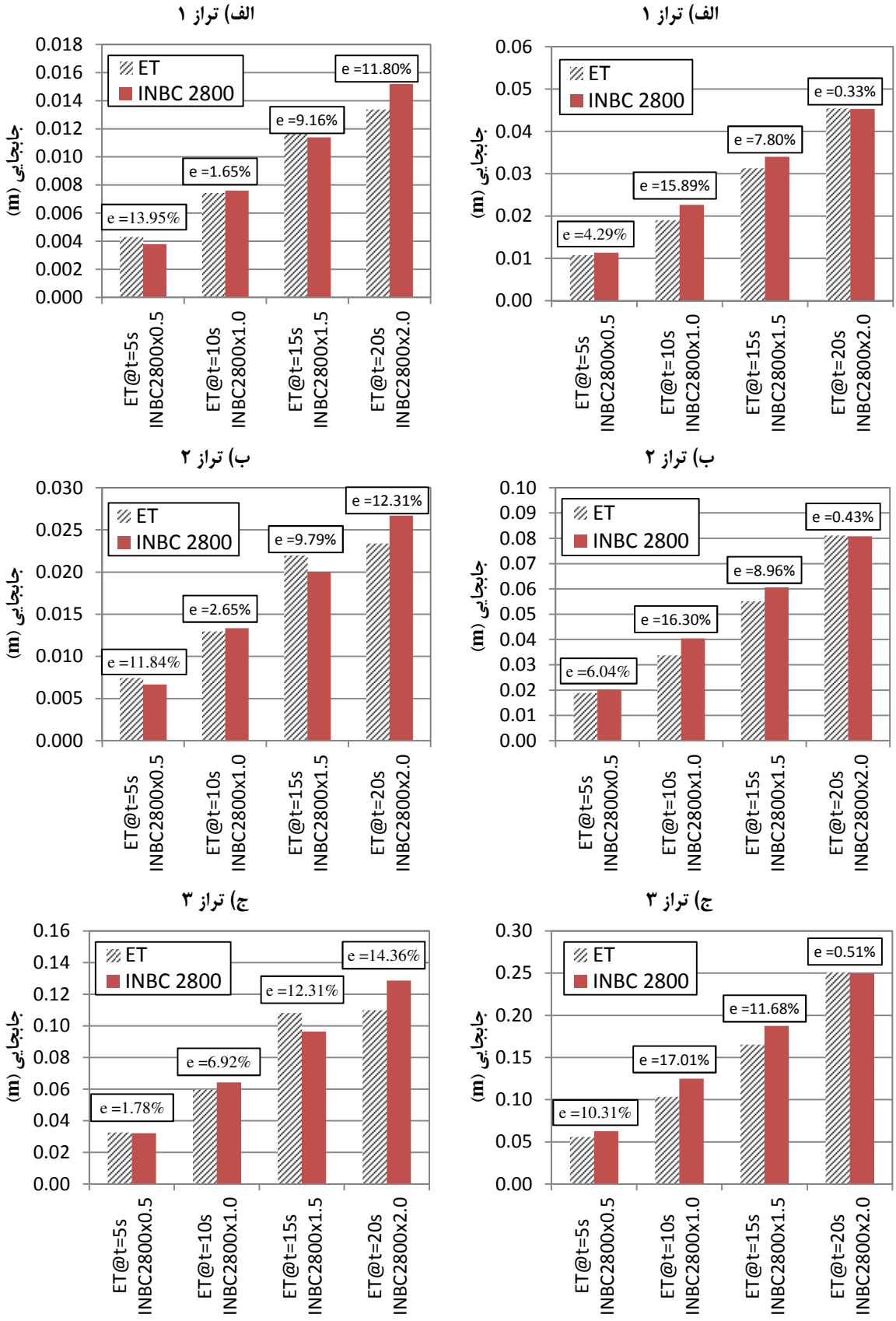


شکل ۴ – طیف حاصل از رکورد زمان‌دوام در زمان‌های مختلف و هموارسازی آن‌ها



شکل ۵ – طیف حاصل از آیین نامه ۲۸۰۰ در سطوح مختلف و ET در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه

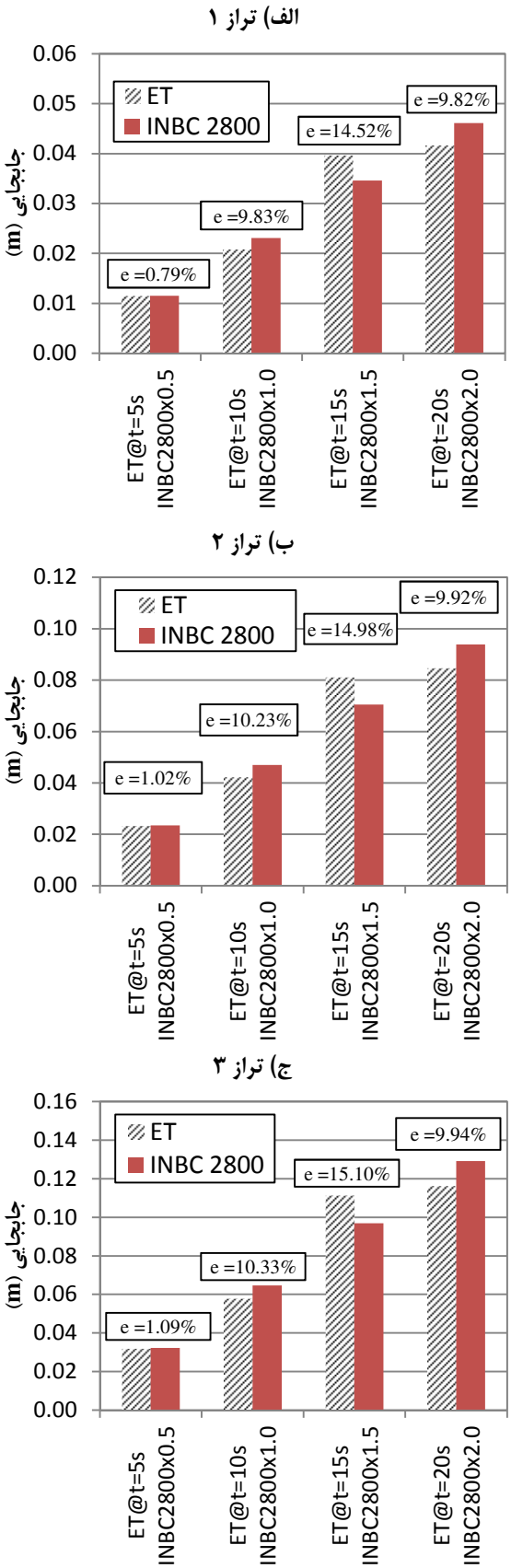
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.5.6]



شکل ۶ - تحلیل طیفی بر مبنای روش زمان‌دوام و آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای سکوی NRB در ترازهای مختلف

شکل ۷ - تحلیل طیفی بر مبنای روش زمان‌دوام و آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای سکوی FRZ در ترازهای مختلف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.5.6]



شکل ۸ – تحلیل طیفی بر مبنای روش زمان‌دوام و آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای سکوی Dalane در ترازهای مختلف

جهت مقایسه نتایج از جابجایی درجات آزادی که به روش CQC و با میرایی ۵٪ و با اعمال تحریک حاصل از طیف به‌صورت یک جهته بدست آمده، استفاده شده است. نتایج این تحلیل برای سکوهای مختلف در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نمایش داده شده است. زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه سطوح مختلف لرزه‌ای را نشان می‌دهند. برای رکورد زمان دوام مورد مطالعه، طیف حاصل از رکورد تا زمان ۵ ثانیه برابر نصف طیف لرزه‌ای ۲۸۰۰ ، تا زمان ۱۰ ثانیه برابر طیف لرزه‌ای ۲۸۰۰، تا زمان ۱۵ ثانیه ۱,۵برابر طیف لرزه‌ای ۲۸۰۰ و تا زمان ۲۰ ثانیه ۲ برابر طیف لرزه‌ای ۲۸۰۰ است. این موضوع خصوصیتی است که رکوردهای زمان دوام بر مبنای آن ایجاد شده اند. درصد اختلاف نسبت به آیین نامه ۲۸۰۰ نیز در بالای این نمودارها نشان داده شده است. همچنین میانگین و انحراف معیار اختلاف‌ها در تحلیل‌های فوق در جدول ۲ ارائه می‌گردد.

جدول ۲- بررسی نحوه پراکندگی اختلاف‌ها

سکو	میانگین اختلاف‌ها	انحراف معیار اختلاف‌ها
NRB	۸/۳۰	۶/۷۰
FRZ	۹/۰۴	۵/۱۶
Dalane	۸/۹۶	۵/۸۰

همانطور که مشاهده می‌گردد، نتایج حاصل از روش زمان دوام همخوانی مناسبی با نتایج آیین نامه‌ای داشته و میزان اختلاف آن‌ها از ۱۷٪ تجاوز نمی‌کند. علت این موضوع را می‌توان به همخوانی در طیف‌های تحریک مربوط دانست. در رابطه با نحوه پراکندگی اختلاف‌ها می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که بیشترین مقدار اختلاف و انحراف معیار آن در سکوی NRB وجود دارد، زیرا همانطورکه در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، بطور کلی در دوره تناوب‌های بالا تفاوت بین طیف‌های تحریک افزایش می‌یابد. ذکر این نکته ضروری است که منشا اختلاف‌های فوق در تفاوت بین طیف‌های تولید شده از توابع شتاب زمان دوام و طیف آیین‌نامه بوده و مربوط به روش زمان دوام نمی‌باشد و با تولید توابع شتابی که طیف آن‌ها انطباق بیشتری با طیف آیین‌نامه داشته باشد، این اختلاف‌ها نیز کاهش می‌یابند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.5.6]

۴ - نتیجه گیری

در این مقاله به معرفی روش زمان دوام و روش‌های مختلف آیین نامه جهت تحلیل سکوهای پایه ثابت پرداخته شد. با مقایسه طیف‌های حاصل از توابع شتاب زمان دوام و آیین نامه ۲۸۰۰ دقت مناسبی بین آن‌ها تایید گردید. در ادامه سه سکوی NRB، FRZ و Dalane که دارای دوره تناوب‌های متفاوتی بودند مورد مطالعه قرار گرفتند. تحلیل طیفی بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ و روش زمان دوام در سطوح مختلف لرزه‌ای بر روی این سه سکو انجام شد. با مقایسه جابجایی‌ها در ترازها و سطوح لرزه‌ای مختلف که با استفاده از روش CQC و با میرایی ۵٪ تعیین شده بودند، مشخص گردید که تفاوت بین نتایج حاصل از تحلیل طیفی توابع شتاب زمان دوام و آیین نامه ۲۸۰۰ در سکوهای فوق، به کمتر از ۱۷٪ محدود می‌گردد. این تفاوت به علت اختلاف در طیف‌های حاصل از توابع شتاب زمان‌دوام و آیین‌نامه می‌باشد که می‌توان با ایجاد توابع شتابی که طیف آن‌ها تطابق بیشتری با طیف آیین‌نامه داشته باشد، آن را کاهش داد.

کلید واژگان

1-API
2-Acceleration function
3-ANSYS

۵ - مراجع

1-Ma, R., Zhang, H. and Zhao, D., (2010), Study on the anti-vibration devices for a model jacket platform, Journal of Marine Structures, vol.23, no.4, p.434-443.
2-American Petroleum Institute (API), (2005), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design, Washington, API recommended practice 2A-WSD (RP 2A-WSD).
3-Chang, B., Abraham, M. and Peng, B.F., (2005), Comparison of ISO and API seismic design guidelines using 3 existing offshore platforms, Offshore Technology Conference (OTC), Houston, TX, U.S.A..
4-Estekanchi, H.E., Vafai, A. and Sadeghazar, M., (2004), Endurance time method for seismic analysis and design of structures, Journal of Scientia Iranica, Vol.11, No.4, p.361-370.
5-Estekanchi, H.E., Arjomandi, K. and Vafai, A., (2008), Estimating structural damage of steel moment frames by Endurance Time method, Journal of Constructional Steel Research, vol.64, no.2, p.145-155.
6-Bazmooneh A, (2009), Application of endurance time method in seismic evaluation of existing steel buildings, civil engineering, SUT, Tehran, Iran, Thesis presented to Sharif University of Technology as a partial requirement of MS degree. (In Persian)
7-Estekanchi, H.E., Riahi, H.T. and Vafai, A., (2008), Endurance time method: exercise test as applied to structures, CJCE, pp.40-50.
8-Riahi, H.T. and Estekanchi, H.E., (2008), Application of endurance time method in seismic assessment of steel frames, Journal of Engineering Structures, vol.33, no.9, p. 2535-2546.
9-Estekanchi, H.E., Valamanesh, V. and Vafai, A., (2007), Application of endurance time method in linear seismic analysis, Journal of Engineering Structures, vol.29, no.10, p. 2551-2562.
10-Golafshani, A. and Gholizad, A., (2009), Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platforms, Journal of Constructional Steel Research, vol.65, no.1, p.180-187.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.15.5.6]