



تحلیل دینامیکی سکوی پایه ثابت بوسیله روش زمان دوام با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و آب

محمد علی داستان دیزناب^۱، محمد سعید سیف^۲، محمدرضا تابش پور^۳، حمید مهدیقلی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، قطب علمی هیدرودینامیک و متحرک‌های دریایی دانشگاه صنعتی شریف؛ daстан@mech.sharif.edu

^۲ استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و متحرک‌های دریایی دانشگاه صنعتی شریف؛ seif@sharif.edu

^۳ استادیار، قطب علمی هیدرودینامیک و متحرک‌های دریایی دانشگاه صنعتی شریف؛ tabeshpour@sharif.edu

^۴ استادیار، قطب علمی هیدرودینامیک و متحرک‌های دریایی دانشگاه صنعتی شریف؛ mehdi@sharif.edu

چکیده

روش زمان دوام یک روش رانشی دینامیکی است که عملکرد سازه را تحت توابع شتاب افزایش‌دهی که از قبل طراحی شده‌اند، بررسی می‌کند. در این روش سعی می‌شود که با حجم محاسباتی کمتر، رفتار دینامیکی سازه با دقت قابل قبولی ارزیابی گردد. در مطالعه فوق تلاش شده است که با توجه به اهمیت بار زلزله در طراحی سکوی پایه ثابت، پاسخ دینامیکی آن با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و آب تعیین گردد. در این راستا مدل دینامیکی ساده شده‌ای برای سکوی فروزان (FRZ) در نظر گرفته شده و میزان خطای روش زمان دوام نسبت به تحلیل تاریخچه‌زمانی در تعیین مقدار جابجایی و شتاب بررسی شده است.

کلمات کلیدی: تحلیل دینامیکی، روش زمان دوام، سکوی پایه ثابت، اندرکنش سازه و آب

مقدمه

بطور معمول سکوه‌ای پایه ثابت به عنوان مناسب‌ترین گزینه جهت استخراج نفت در مناطق کم عمق شناخته می‌شوند. حجم بزرگ و پیچیدگی این سکوها سبب زمان‌بر شدن تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌زمانی گشته است. از این رو مهندسان در عمل تمایل کمتری به استفاده از این روش‌ها نشان می‌دهند. از طرفی اندرکنش سازه و آب تاثیر قابل ملاحظه‌ای در رفتار دینامیکی این سکوها داشته که بررسی دقیق آن بر پیچیدگی‌ها و زمان تحلیل می‌افزاید.

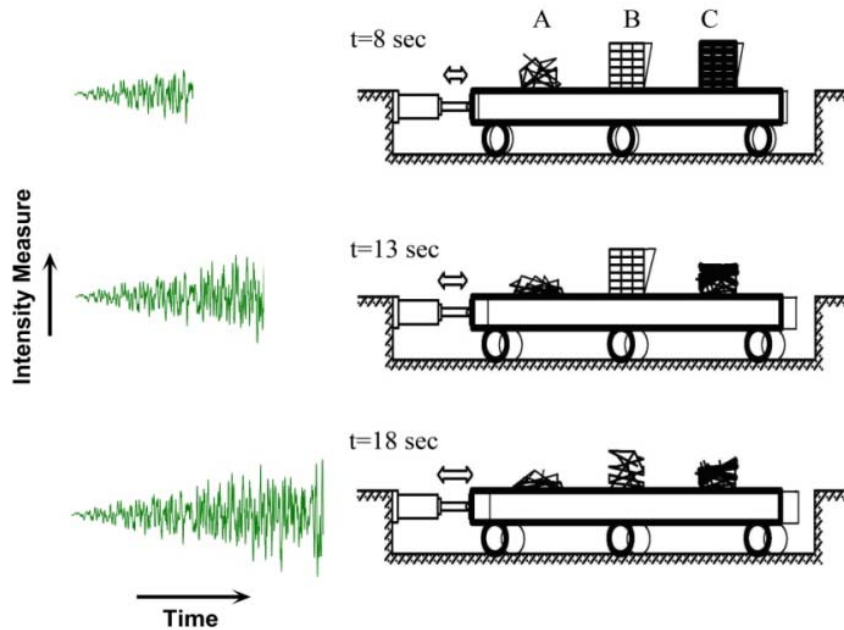
روش زمان دوام روشی نوین در تحلیل لرزه‌ای می‌باشد که توانایی بالقوه‌ای در کاهش محاسبات مربوط به آنالیز دینامیکی دارد [۱]. در این روش با اعمال یک تابع شتاب افزایش‌دهنده به سازه و رسم پاسخ سازه بر حسب زمان، به ارزیابی عملکرد سازه در زمانهای مختلف که هر یک معرف یک شدت لرزه‌ای می‌باشد، پرداخته می‌شود [۲].

روش زمان دوام

روش زمان دوام در ابتدا برای سازه‌های ساختمانی ارائه شده بود. 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 بار لرزه‌ای 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) شروع می‌شود (شکل ۱). با افزایش تدریجی شدت تهییج دامنه نوسان سازه‌ها نیز به تدریج زیاد می‌شود. به علت تقاضای افزایش تابع شتاب، سازه‌ها از تغییر شکل‌های الاستیک به حالت تسلیم و مرحله رفتار غیرخطی می‌رسند و در نهایت به ناپایداری دینامیکی کلی می‌رسند [۳]. در طول آزمایش می‌توان مقادیر شاخص‌های خرابی را به طور مستقیم بر حسب زمان رسم کرد. به عنوان مثال حداکثر نسبت تغییر مکان نسبی طبقات در شکل ۱ رسم شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود به طور کلی دامنه 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. مطلب دیگری که از این آزمایش می‌توان استنباط کرد، ظرفیت خرابی سازه‌ها می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱ مشخص است قاب A در زمان ۸ ثانیه، قاب C در زمان ۱۳ ثانیه و قاب B در زمان ۱۸ ثانیه به حد خرابی می‌رسند. این زمان، زمان دوام نام دارد که می‌تواند معیار مناسبی جهت مقایسه رفتار لرزه‌ای سازه‌ها باشد.

توابع شتاب که در روش زمان دوام مورد استفاده قرار می‌گیرند باید دارای دو مشخصه عمده باشند، یعنی اولاً توابع افزایش‌دهنده باشند، به این صورت که دامنه این توابع با زمان افزایش پیدا کند و ثانیاً به نحوی کالیبره شوند که در زمان هدف برای سازه یک درجه آزادی در حالت استاندارد، پاسخ سازه برابر حد مجاز آیین نامه مورد استفاده شود.



شکل ۱: معرفی شماتیک آنالیز زمان دوام در تشخیص مقاومت لرزه‌ای سیستم‌های مختلف [۴]

زمان هدف از دیگر مشخصات توابع شتاب می‌باشد. زمان هدف زمانی است که اگر طیف تابع شتاب از ابتدا تا زمان هدف تعیین گردد برابر طیف هدف می‌باشد. طیف هدف می‌تواند طیف آیین‌نامه، طیف حاصل از چندین رکورد زلزله خاص و یا هر طیف دیگری در نظر گرفته شود. انتخاب این زمان در تحلیل‌های خطی نسبتاً اختیاری بوده ولی در تحلیل‌های غیرخطی باید بگونه‌ای باشد که سازه بمیزان کافی از چرخه‌های بارگذاری را تحمل نماید [۵]. در تحقیقات اولیه نشان داده شده است که زمان ۱۰ ثانیه برای بارگذاری لرزه‌ای سطح طراحی مناسب می‌باشد [۶]. یکی از مشخصه‌هایی که باید در بررسی توابع شتاب مورد توجه قرار بگیرد روند افزایشی این توابع است. تحقیقاتی که انجام شده نشان می‌دهد که یکی از حالت‌های مناسب، روند افزایشی به صورت خطی است [۷]. بدین معنا که طیف توابع شتاب تا زمانی "a" برابر زمان هدف، مشابه "a" برابر طیف هدف می‌باشد. این خصوصیت سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در زمان تحلیل می‌گردد. بر این اساس طیف شتاب S_{aT} و طیف جابجایی S_{uT} به صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

$$S_{aT}(T, t) = \frac{t}{10} S_{aC}(T) \quad (1)$$

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

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 به نظر می‌رسد. از این رو با استفاده از بهینه‌سازی عددی، به حل مساله که به شکل رابطه (۲) تبدیل شده است، پرداخته می‌شود.

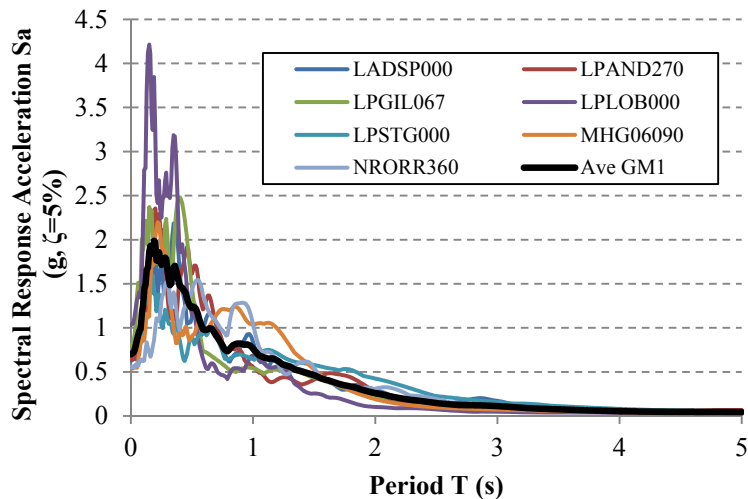
$$\text{Minimize } F(a_g) = \int_0^{T_{\max}} \int_0^{t_{\max}} \{ [S_a(T, t) - S_{aT}(T, t)]^2 + \alpha [S_u(T, t) - S_{uT}(T, t)]^2 \} dt dT \quad (2)$$

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.

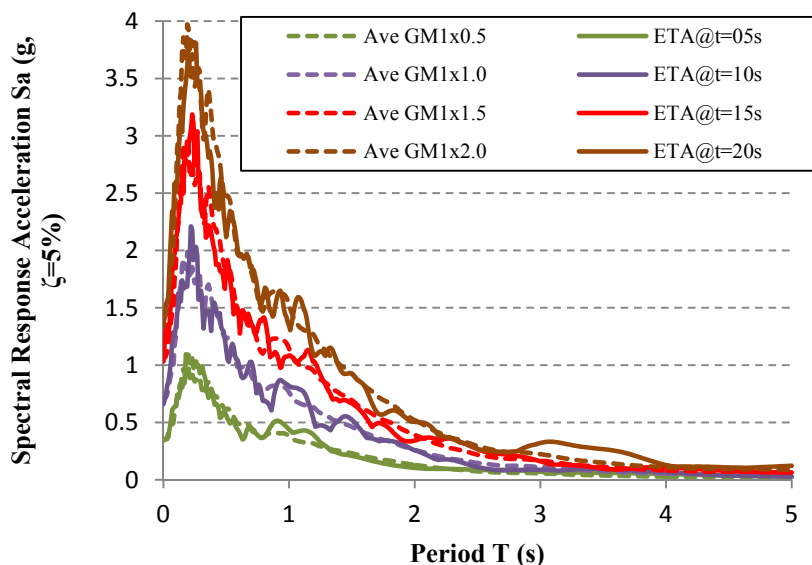
توابع شتاب FEMA440 انتخاب شده‌اند، بدست آمده است. جدول ۱ مشخصات شتاب نگاشت‌های GM1 و ضرایب مقیاس مربوط به آن‌ها را ارائه می‌دهد. طیف‌های حاصل از شتاب نگاشت‌های GM1 و میانگین آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۳ روند افزایشی خطی را در تابع شتاب ETA20e1 نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات شتاب‌نگاشت‌های GM1 و ضرایب مقیاس آن‌ها

Record name	Station number	PGA (g)	Scale factor
LADSP000	12149	0.171	3.6378
LPSTG000	58065	0.512	1.4370
LPGIL067	47006	0.360	2.2040
LPLOB000	58135	0.450	2.2890
LPAND270	1652	0.244	2.6092
MHG06090	57383	0.292	1.8360
NRORR360	24278	0.514	1.0730



شکل ۲: طیف پاسخ شتاب شتاب‌نگاشت‌های GM1



شکل ۳: طیف شتاب‌نگاشت‌های GM1 در سطوح مختلف و ETA20e01 در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه

اندرکنش سازه و آب

معادله حرکت سازه سکو که تحت اثر حرکت زمین قرار دارد را می‌توان به صورت معادله (۳) نوشت:

$$M\ddot{Z}_t + C\dot{Z}_t + KZ = \rho(k_m - 1)V(\ddot{X} - \ddot{Z}_t) + \rho V\ddot{X} + \rho k_d A(\dot{X} - \dot{Z}_t) \cdot |\dot{X} - \dot{Z}_t| \quad (3)$$

که بترتیب M ($n \times n$)، C ($n \times n$) و K ($n \times n$) ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه، Z_t ($n \times 1$) و Z ($n \times 1$) جابجایی مطلق و

نسبی سازه، ρ ، k_m ، k_d ، V و A چگالی آب دریا، ضریب اینرسی، ضریب پسا، حجم اعضا، مساحت سطح مقطع و جابجایی ذرات آب را

بیان می‌کنند. اگرچه ضریب‌های اینرسی و پسا با عمق تغییر می‌کنند ولی مقدار آن‌ها ثابت فرض می‌شود. ضرب نقطه‌ای ضرب تک‌تک اعضای بردار در یکدیگر را بیان می‌کند. با استفاده از مفهوم جرم و میرایی اضافه می‌توان معادله (۳) را به شکل زیر بازنویسی کرد.

$$M_0 \ddot{Z}_t + C\dot{Z} + KZ = C_m \ddot{X} + C_d (\dot{X} - \dot{Z}_t) \cdot |\dot{X} - \dot{Z}_t|$$

$$M_0 = M + M_a$$

$$M_a = \rho(k_m - 1)V$$

$$C_m = \rho k_m V$$

$$C_d = \rho k_d A$$
(۴)

از آنجا که در این مطالعه نیروی خارجی حرکت زمین می‌باشد، حرکت ذرات آب بر اثر موج وجود نداشته و از حرکت ذرات آب بر اثر ارتعاش سازه صرف نظر می‌گردد ($\dot{X} = \ddot{X} = 0$). اگر [1] بصورت بردار مشخصه‌ای که اعضای آن در جهت زلزله "۱" و در سایر جهت‌ها "۰" است، تعریف گردد، بردار جابجایی مطلق Z_t را می‌توان به شکل معادله (۵) نشان داد.

$$Z_t = Z + [1]z_g$$
(۵)

که z_g جابجایی زمین است. بنابراین معادله (۴) را می‌توان به صورت زیر ساده سازی نمود [۸].

$$M_0 \ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = F + H\ddot{z}_g$$

$$F = -C_d (\dot{X} - \dot{Z}_t) \cdot |\dot{X} - \dot{Z}_t|$$

$$H = -M_0 [1].$$
(۶)

با استفاده از معادله (۶) رفتار دینامیکی سکو مدل سازی شده است.

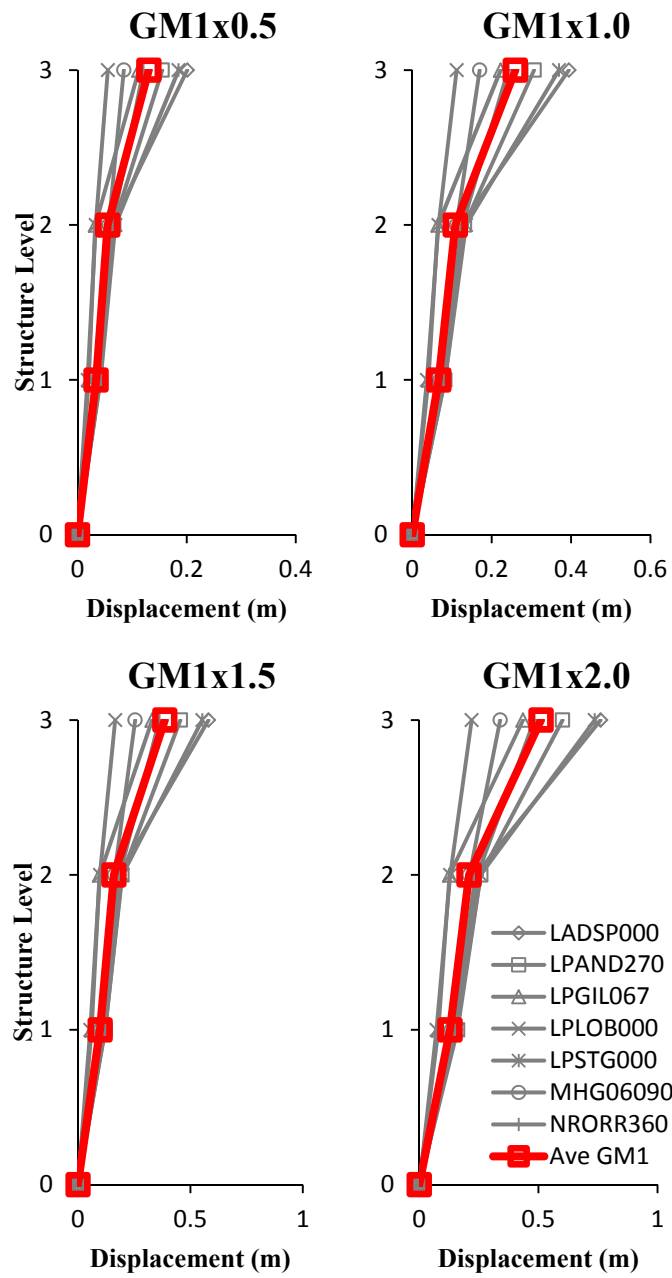
تحلیل دینامیکی و نتایج عددی

سکوی فروزان (FRZ) که در خلیج فارس قرار دارد، جهت بررسی انتخاب گردید. مدل تحلیلی این سکو به صورت سیستم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز ساده سازی 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 به گونه ای در نظر گرفته شده که همان پیوندهای ارتعاشی و محتوای انرژی جنبشی سازه اصلی را در مودهای در نظر گرفته ایجاد نماید [۹]. شکل کلی از نمای سکوی FRZ و سیستم سه درجه آزادی معادل آن در شکل ۴ نشان داده می‌شود. مشخصات بدست آمده برای این سکو، شامل سختی‌ها و جرم‌های ترازهای مختلف، در جدول ۲ ارائه می‌شود.

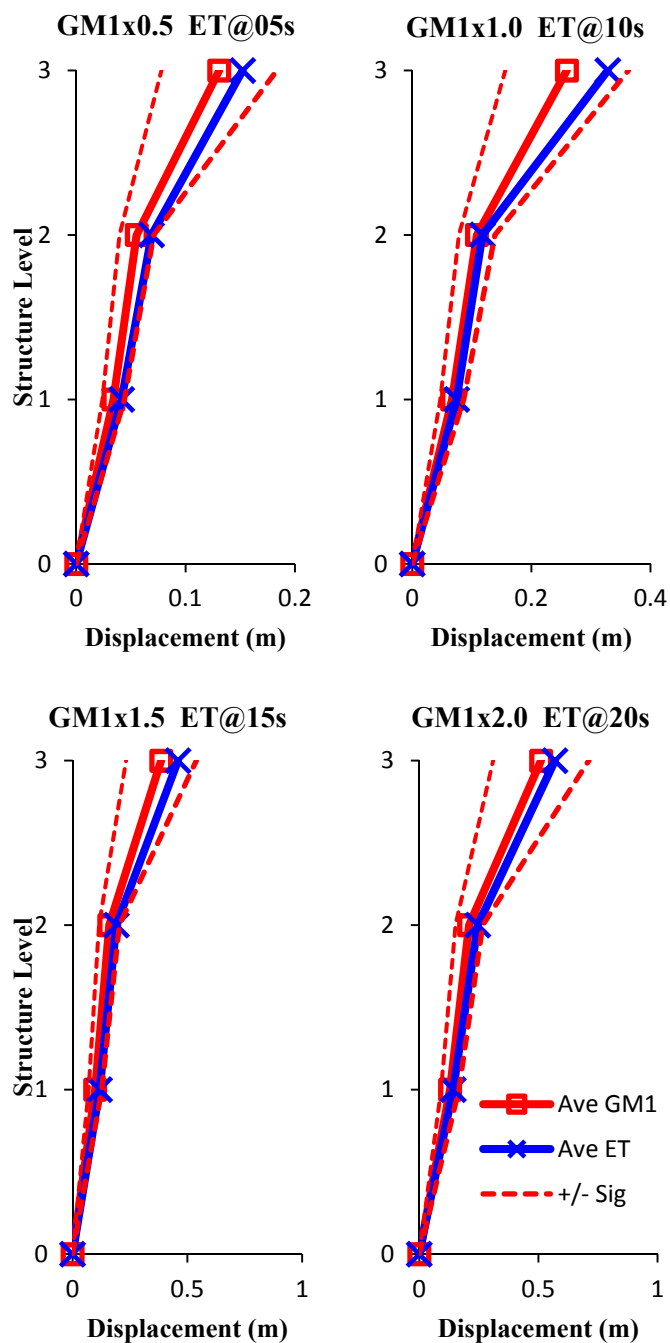
جدول ۲: مشخصات مدل تحلیلی سکو FRZ [۸]

k_1	k_2	k_3	m_1	m_2	m_3
(MN/m)	(MN/m)	(MN/m)	(Ton)	(Ton)	(Ton)
۳۳۵	۳۶۵	۳۲	۱۴۵۰	۲۰۵۰	۶۱۰۰

جهت مدل سازی از نرم افزار Matlab Simulink استفاده شده است. شتاب‌نگاشت‌های GM1 در مقیاس‌های ۰,۵، ۱,۰، ۱,۵ و ۲ برابر به سازه اعمال شده‌اند. بیشترین مقدار جابجایی مطلق در ترازهای مختلف تعیین گشته و به همراه میانگین آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. دو تابع شتاب زمان دوام بنام‌های ETA20e01 و ETA20e02 به سازه اعمال شده و میزان جابجایی مطلق حداکثر در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه تعیین گشته است. میانگین مقادیر توابع شتاب و متوسط مقادیر تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی به همراه انحراف معیار آن در شکل ۵ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد همخوانی مناسبی بین دو روش وجود داشته و به‌طور معمول نتایج حاصل از تحلیل‌های زمان دوام در بازه انحراف معیارهای تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی قرار دارد.



شکل ۴: بیشینه مقدار جابجایی مطلق در ترازهای مختلف برای سطوح شتاب‌نگاشت‌های GM1



شکل ۵: مقایسه نتایج بین تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی و زمان دوام برای سکوی FRZ

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله با شرح مختصری از روش زمان دوام، به بررسی اعمال آن برای سکوهای دریایی پرداخته شد. همچنین اثر اندرکنش سازه و آب نیز با اضافه شدن عبارتهای غیر خطی به معادلات دینامیکی حرکت سازه در نظر گرفته شد. در این راستا از مدل تحلیل ساده‌سازی شده‌ای که برای سکوی FRZ بر سنجش^۱ شده بود، استفاده گردید. با مقایسه نتایج حاصل از جابجایی سکو، همخوانی مناسبی بین روش زمان دوام و روش تحلیل تاریخچه زمانی مشاهده گردید. بر این اساس برای سکوی مورد مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که روش زمان دوام روشی مناسب با مدت زمان محاسباتی پایین است و می‌تواند رفتار کلی سکو را به‌طور مناسبی ارزیابی نماید. همچنین برای تعمیم این نتیجه‌گیری برای تمام سکوهای پایه ثابت، مطالعه‌های گسترده‌تری مورد نیاز است و می‌توان این مقاله را گام ابتدایی در این راستا ارزیابی نمود.

- [1] Estekanchi, H.E., Vafai, A. and Sadeghazar, M., 2004. "Endurance time method for seismic analysis and design of structures". *Journal of Scientia Iranica*, 11(4), pp.361-370.
- [2] 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*, 64(2), pp.145-155.
- [3] Riahi, H.T., Estekanchi, H.E. and Vafai, A., 2008. "Endurance time method - Application in nonlinear seismic analysis of SDOF systems", *Bulletin of Earthquake Engineering*, pp.10-20.
- [4] Estekanchi, H.E., Riahi, H.T. and Vafai, A., 2008. "Endurance time method: exercise test as applied to structures". *CJCE*, pp.40-50.
- [5] Valamanesh, V. and Estekanchi, H.E., 2010. "Compatibility of the endurance time method with codified seismic analysis approaches on three-dimensional analysis of steel frames, *Journal of the structural of tall and special buildings*". doi:10.1002/tal.666.
- [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] Riahi, H.T. and Estekanchi, H.E., 2008. "Application of endurance time method in seismic assessment of steel frames". *Journal of Engineering Structures*, 33(9), pp.2535-2546.
- [8] Kim, D. H. (2009). Neuro-control of fixed offshore structures under earthquake. *Engineering Structures*, 31(2), 517-522.
- [9] Golafshani, A. and Gholizad, A., 2009. "Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platforms". *Journal of Constructional Steel Research*, 65(1), pp.180-187.