



بررسی عملکرد لرزه‌ای سکوی پایه ثابت مجهز به بادبند غیرکمانشی (BRB)

محمد رضا تابش پور^۱، علی اکبر گل افشانی^۲، ولی الله پرتوی کلور^۳

^۱استادیار، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی؛ Tabeshpour@sharif.edu

^۲دانشیار، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران؛ golafshani@sharif.edu

^۳دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران؛ Valiollah.Partovi@gmail.com

چکیده

سکوهای دریایی از سازه‌های با اهمیت بالا می‌باشند و بهسازی سکوهای موجود برای تداوم بهره‌برداری از آن‌ها امری ضروری است. سکوهای شابلونی، از جمله سازه‌های با درجه نامعینی پایین هستند که خرابی یکی از اعضای آن‌ها می‌تواند منجر به فروریزش کلی و یا مختل شدن عملکرد کلی سازه شود. از خرابی‌های محتمل در سکوهای شابلونی، کمانش اعضای قطری می‌باشد، که در صورت وقوع ممکن است سکو به حد نهایی عملکرد خود برسد و فعالیت آن دچار اختلال گردد. بادبندهای غیرکمانشی از مناسب‌ترین سیستم‌های کنترل لرزه‌ای در سازه‌های متعارف هستند. در این مقاله به کمک مدلسازی در نرم افزار اپنسیس^۱ سکوی مجهز شده به بادبند غیرکمانشی تحت تحریک زلزله قرار داده شد و با مقایسه نتایج تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی این سکو با سکوی موجود، بهبود رفتار لرزه‌ای سکو مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: سکوی پایه ثابت^۲، بهسازی لرزه‌ای، بادبند غیرکمانشی^۳، بادبند کمانش تاب، تحلیل تاریخیچه زمانی، تحلیل دینامیکی غیرخطی، بار زلزله

مقدمه

به دلایل اقتصادی در بسیاری از موارد ادامه فعالیت یک سکوی موجود بر نصب سکوی جدید ارجح است و استفاده از آن برای مدت طولانی‌تر از عمر مفید مطلوب می‌باشد. بنابراین ارزیابی و بهسازی سکوهای موجود اهمیت بسیار بالایی دارد. روش‌های مرسوم مقاوم سازی مانند افزایش سطح مقطع اعضا و اضافه کردن اعضای کمکی، مقاومت سکو را افزایش می‌دهد، اما تاثیر چندانی بر افزایش شکل پذیری سازه ندارد، در کنار مباحث افزایش ظرفیت سازه، کاربرد میراگرها به منظور اتلاف انرژی مورد توجه است. استفاده از میراگرها تنش اعضای اصلی و انرژی جذب شده توسط سازه را کاهش می‌دهد. عموماً کاهش ۱۵ درصدی دامنه تنش‌های دینامیکی سکوی دریایی می‌تواند عمر خدمت دهی سکو را تا دو برابر افزایش دهد و همچنین هزینه‌های نگهداری و بازرسی سکو را کاهش دهد [۱].

با استفاده از بادبندهای غیرکمانشی، شکل پذیری سازه به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در واقع به جای مقاوم کردن سازه، انرژی بیشتری توسط بادبندهای غیرکمانشی جذب می‌گردد و به این ترتیب سازه اصلی انرژی کمتری جذب می‌کند و مقدار تنش اعضای سازه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین با تمرکز خرابی در بادبندها احتمال خرابی در سایر اعضای اصلی کاهش می‌یابد. در این مطالعه کنترل کمانش اعضای قطری و بهسازی سکوهای پایه ثابت، به کمک مهاربندهای غیرکمانشی موردنظر می‌باشد.

کنترل سکوهای دریایی

از مطالعات صورت گرفته بر روی سکوهای دریایی می‌توان به ارزیابی سکوهای موجود توسط کریگر و همکاران^۴ (۱۹۹۴) اشاره کرد. همچنین گل افشانی و همکاران (۲۰۰۹) به ارزیابی لرزه‌ای سکوهای پایه ثابت پرداخته‌اند [۲]. کوانو^۵ و ونکاترامانا^۶ (۱۹۹۲) و کوانو (۱۹۹۳) پاسخ سکوهای دریایی، مجهز به میراگر جرمی میزان شده فعال را بررسی کردند و دریافتند که این سیستم برای کاهش پاسخ سازه در مقابل بار موج کاملاً موثر است [۳]. سونجا^۷ و دتا^۸ (۱۹۹۸ و ۱۹۹۹) تاثیر سیستم کنترل فعال را در کاهش پاسخ‌های سکوهای پایه مفصلی^۹ در مقابل بار موج بررسی کردند [۴]. ونداپور^{۱۰} و میتوم^{۱۱} (۱۹۷۹) از تانکرهای ذخیره بر روی سکو (میراگرهای مایع متعادل شده)^{۱۲} به منظور کاهش پاسخ‌ها تحت بار موج

⁷ Suneja

⁸ Datta

⁹ Articulated leg platforms

¹⁰ Vandiver

¹¹ Mitome

¹² TLD

¹ OPENSEES

² Jacket Platform

³ Buckling-Restrained Brace (BRB)

⁴ Krieger et al.

⁵ Kawano

⁶ Venkataramana

استفاده کردند. عبدالرحمان^۱ (۱۹۹۶) بر روی کاربرد مکانیسم‌های کنترل فعال و غیرفعال برای کاهش پاسخ دینامیکی سکوه‌های شابلونی فولادی در مقابل بار حاصل از موج مطالعاتی انجام داد [۵]. آوو و همکاران (۲۰۰۶) رفتار سکوی مجهز به جداساز عرشه را تحت بارهای یخ و زلزله مورد ارزیابی قرار دادند [۱]. گل افشانی و قلیزاد (۲۰۰۹) پاسخ سکو را با بکارگیری میراگرهای اصطکاکی بررسی کردند [۶]. کماچی و همکاران (۲۰۱۱) با مدلسازی عددی سکوی رسالت، مجهز به میراگرهای اصطکاکی، بهبود رفتار سکو نسبت به حالت عادی را تایید کردند [۷]. تابش پور و کماچی به منظور ارزیابی و مقاوم‌سازی سکوه‌های پایه ثابت پیشنهاداتی ارائه نموده‌اند [۸].

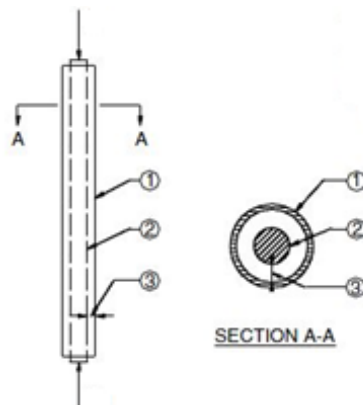
بادبندهای غیرکمانشی

در سکوه‌های جاکت برای تحمل نیروی جانبی از سیستم بادبندی استفاده می‌شود. سیستم بادبندی مرسوم به دلیل کمانش در فشار، میزان استهلاک انرژی ناچیزی دارد (تنگ و گوئل ۱۹۸۸).^۲ در سالیان اخیر مطالعات بسیاری بر روی بادبندهای غیرکمانشی صورت گرفته است. نخستین بار در سال ۱۹۸۰ پرفسور وادا^۳ تلاش کرد تا کمانش را در عضو فشاری حذف کند و ایده اولیه بادبند غیرکمانشی مطرح گردید. واتنبل و همکارانش^۴ (۱۹۸۸) اثرات مثبت بادبند غیرکمانشی و اثر غلاف بر افزایش باربری جانبی را تایید کردند [۹]. تربلی و همکارانش^۵ (۱۹۹۹) با بارگذاری شبه‌استاتیکی سخت شوندگی کرنشی^۶ بادبند غیرکمانشی را مورد بررسی قرار دادند. کومار و همکارانش^۷ (۲۰۰۷) تاثیر بادبند غیرکمانشی بر کنترل دررفت^۸ طبقات یک قاب ۱۰ طبقه را تایید نمودند. همچنین چوی و کیم^۹ (۲۰۰۹) تقاضای انرژی در بارگذاری زلزله؛ روی قاب مجهز به بادبند غیرکمانشی را بررسی نمودند.

استفاده از سیستم بادبندهای غیرکمانشی برای کاربردهای لرزه‌ای در ژاپن بعد از زلزله ۱۹۹۵ کوبه؛ بسیار متداول شده است (رینا و نورمیل^{۱۰} ۱۹۹۷). این سیستم سازه‌ای در آمریکا و پس از زلزله ۱۹۹۴ نرتریج^{۱۱} بسیار استفاده شده است (کلارک و همکاران^{۱۲} ۱۹۹۹) [۱۰].

این بادبندها از نوع کنترل هیستریزیسی و غیرفعال می‌باشند و مزیت اصلی استفاده از آنها، جذب انرژی در مهاربندها می‌باشد، به این ترتیب از آسیب‌های سازه اصلی کاسته می‌شود. این بادبندها دارای چرخه هیستریزیس پایدار می‌باشند، به نحوی که امکان جاری شدن در کشش یا فشار وجود دارد. با توجه به شکل ۱ بادبند غیرکمانشی از قسمت‌های زیر تشکیل شده است:

۱. غلاف بیرونی
۲. هسته فولادی
۳. بتن
۴. قسمت غیر چسبنده

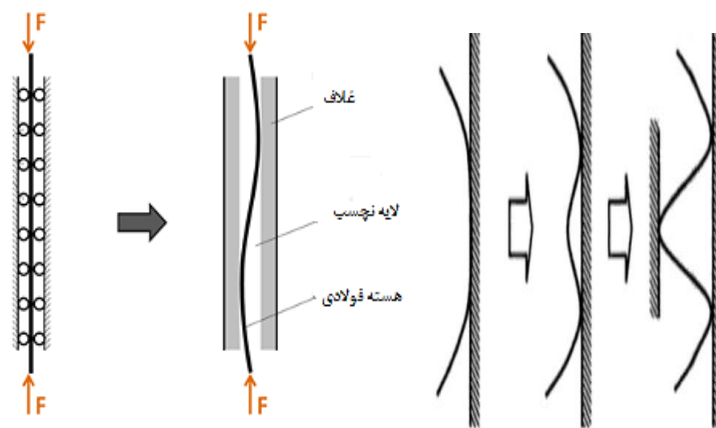


شکل ۱: قسمت‌های مختلف بادبند غیرکمانشی [۱۱].

مطابق شکل ۲ زمانی که هسته تحت فشار قرار می‌گیرد، غلاف از کمانش کلی هسته جلوگیری می‌کند و هسته را به کمانش در موده‌های بالاتر و می‌دارد، به این ترتیب هسته می‌تواند در فشار جاری شود. به منظور جلوگیری از دخالت غلاف در تحمل نیروی محوری، میان هسته و بتن ماده‌ای نجسب و یا گپ در نظر گرفته می‌شود، به گونه‌ای که هسته به راحتی درون غلاف بلغزد^{۱۳} (کیانگ ۲۰۰۵). گپ نباید آنقدر کم باشد که به دلیل اصطکاک، غلاف در تحمل نیروی محوری درگیر شود، همچنین نباید آنقدر زیاد باشد که کمانش در موده‌های اولیه رخ دهد و هسته نتواند در فشار جاری شود. میزان گپ بسته به نوع بادبند غیرکمانشی بین ۰٫۷ تا ۳٫۵ میلی‌متر انتخاب می‌گردد [۱۲].

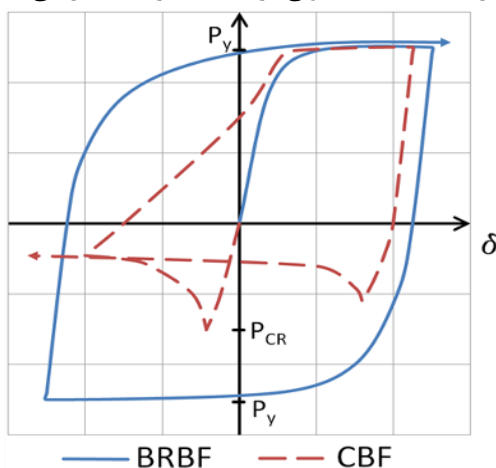
⁸ Drift
⁹ Choi and Kim
¹⁰ Reina & Normile
¹¹ Northridge
¹² Clark
¹³ Qiang

¹ Abdel-Rohman
² Tang & Goel
³ Wada
⁴ Watanbe et al
⁵ Trebly et al
⁶ Strain Hardening
⁷ Kumar et al.



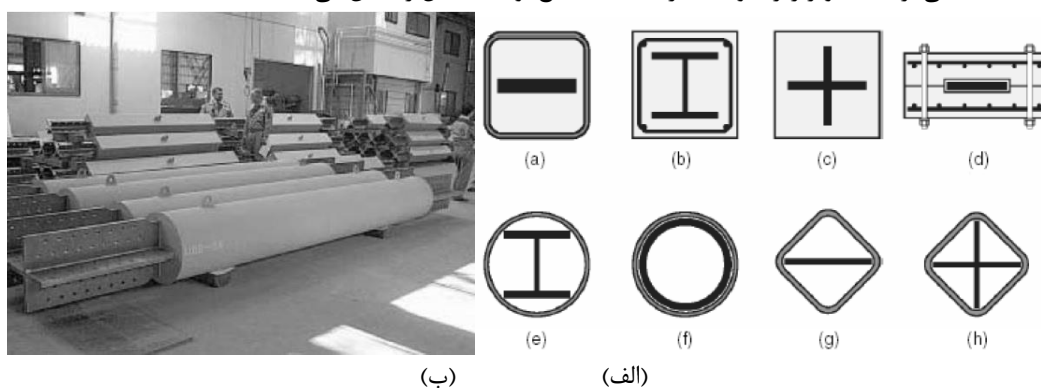
شکل ۲: فلسفه جلوگیری از کماتش در بادبند غیر کماتشی

در شکل زیر چرخه هیستریزس بادبند غیر کماتشی (خط ممتد) و بادبند معمولی (خط چین) نشان داده شده است. مشاهده می کنیم که بادبند غیر کماتشی دارای چرخه ای پر می باشد؛ بنابراین از استهلاک انرژی بیشتری برخوردار است، همچنین چرخه متقارن است، پس هسته علاوه بر کشش و در فشار نیز امکان جاری شدن دارد. در حالیکه بادبند معمولی در ناحیه فشاری کماتش می کند.



شکل ۳: مقایسه رفتار مهاربند متداول (خط چین) و مهاربند غیر کماتشی (خط ممتد) تحت بار چرخه ای

بادبند غیر کماتشی دارای تنوع مقطع بسیاری است. در مورد سکوهای دریایی با توجه به نیروهای محیط دریا و مباحث مربوط به خوردگی از غلاف با مقاطع لوله ای استفاده می گردد. تصویر زیر نمونه ای از غلاف با مقطع لوله ای شکل را نشان می دهد.



شکل ۴: (الف) مقاطع بادبند غیر کماتشی (ینگ و همکاران، ۲۰۰۴)^۱ (ب) بادبند غیر کماتشی با غلاف لوله ای (براون و همکاران ۲۰۰۱)^۲

بر اساس هدف طراحی می توان سطح مقطع و نیز طول قسمت جاری شونده هسته را تعیین کرد. می توان گفت طول مناسب، برای قسمت جاری شونده بادبند غیر کماتشی طولی بیش از یک سوم طول کل بادبند می باشد [۱۳].

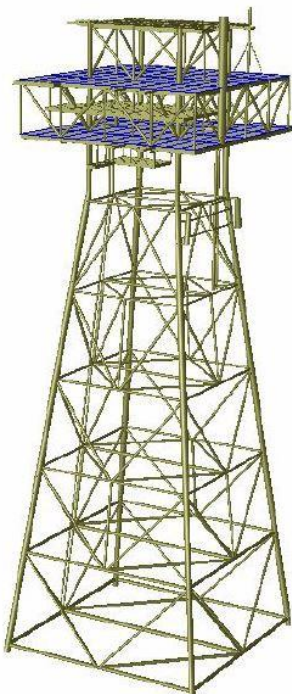
² Brown et al.

¹ Uang et al.

مطالعه موردی

مشخصات سکو و مدلسازی

حوزه رسالت در آب‌های خلیج فارس، در فاصله ۸۰ کیلومتری جنوب جزیره لاوان و در عمق ۶۷ متری واقع شده است [۱۴]. این حوزه در سال ۱۹۶۸ میلادی توسعه پیدا کرده است و در دوران جنگ ایران و عراق و همچنین به دلایل محیطی دچار آسیب‌هایی شده است. سکوی خدمت رسالت در عمق ۶۷٫۴ متری واقع است. این سکو شامل یک جاکت چهارپایه و عرشه می‌باشد که با پل به سکوی تولید متصل شده است. عمر خدمت دهی این سکو ۲۵ سال است.



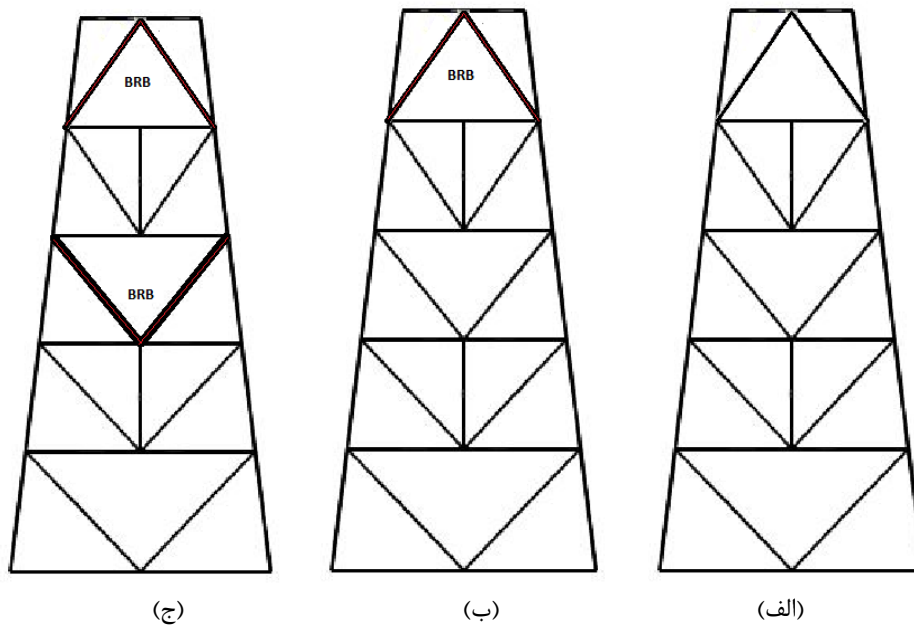
شکل ۵: سکوی رسالت واقع در خلیج فارس

برای مدلسازی از برنامه آپنسیس استفاده شد [۱۵]. شبیه‌سازی پاسخ اعضای قاب سکو با استفاده از المان‌های تیر-ستون، بر مبنای نیرو و با پلاستیسیته گسترده و با مقطع از نوع فیبر صورت گرفته است. برای مدلسازی از STEEL 02 با ضریب سخت‌شوندگی کمانشی ۰٫۳٪ استفاده شده است. همچنین میرایی سازه سکو، برابر ۲ درصد لحاظ شده است.

جدول ۱: جزئیات مربوط به مدل ایجاد شده در نرم افزار اپنسیس

Uniaxial Material	Steel02
Section	Fiber
Element	Non Linear Beam-Column
Geometric Transformation	Corotation
Constrain	Plain
Numberer	RCM
System	Band General
Test	Energy Increment
Algorithm	KrylovNewton
Intrgator	Newmark
Analysis	Transient

به منظور بررسی عملکرد بادبند غیرکمانشی از سه حالت زیر استفاده نموده‌ایم.



شکل ۶: حالات جاگذاری باربند غیر کمانشی

الف) این حالت مربوط به سکوی موجود با بادبندهای متعارف می باشد.

ب) در تراز زیر عرشه دو بادبند غیر کمانشی جایگزین شده است.

ج) مطابق شکل در حالت آخر ، علاوه بر بادبندهای غیر کمانشی حالت (ب) ، بادبندهای تراز سوم نیز با بادبند غیر کمانشی جایگزین شده است. نوع اتصال بادبند از نوع اتصال مفصلی می باشد که با کاهش لنگرهای ثانوی ممکن است عمرخستگی اتصال را افزایش دهد. تاثیر بادبند غیر کمانشی بیشتر در حالت غیر خطی ظاهر می گردد، پس برای بررسی تاثیر این سیستم از تحلیل های غیر خطی استفاده می شود. برای بررسی عملکرد لرزه ای ، سکوها تحت تحریک زلزله نورتریج (۱۹۹۴) با حداکثر شتاب زمین ۰٫۳۵۶ (واحد g) قرار داده شد. همچنین برای بررسی میزان تاثیر بادبندهای غیر کمانشی در زلزله با PGA^1 های متفاوت ، رکورد مذکور به سه مقدار ۰٫۷ و ۱ و ۱٫۳ مقیاس شد.

جدول ۲: رکوردهای تحمیل شده بر سکو

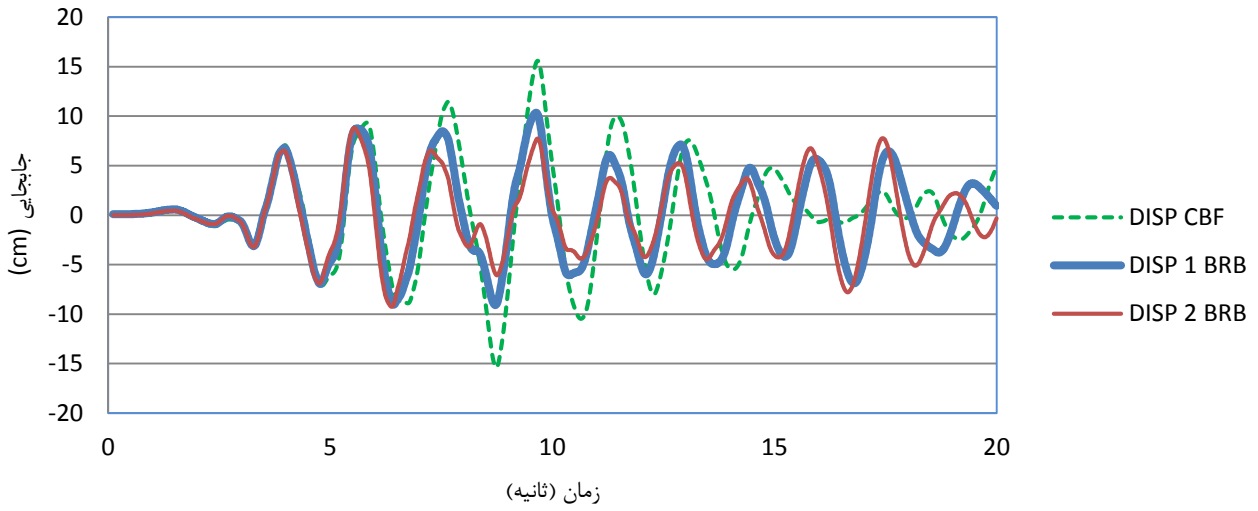
تحریک	ضریب مقیاس	PGA (g)
اول	0.7	0.249
دوم	1	0.356
سوم	1.3	0.463
NORTHRIDGE :PGA=0.356 (g)		

نتایج

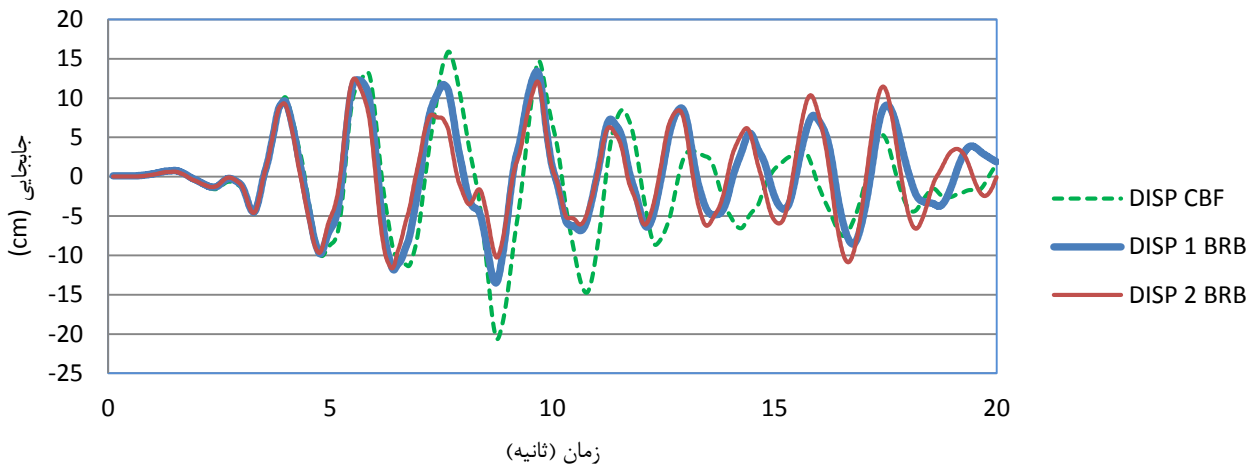
در نمودارهای زیر تاریخچه زمانی جابجایی قسمت فوقانی سکو ، تحت تحریک ؛ در سه حالت الف (CBF) ، حالت ب (1BRB) و حالت ج (2BRB) ، نشان داده شده است. (شکل ۶)

¹ Peak Ground Acceleration

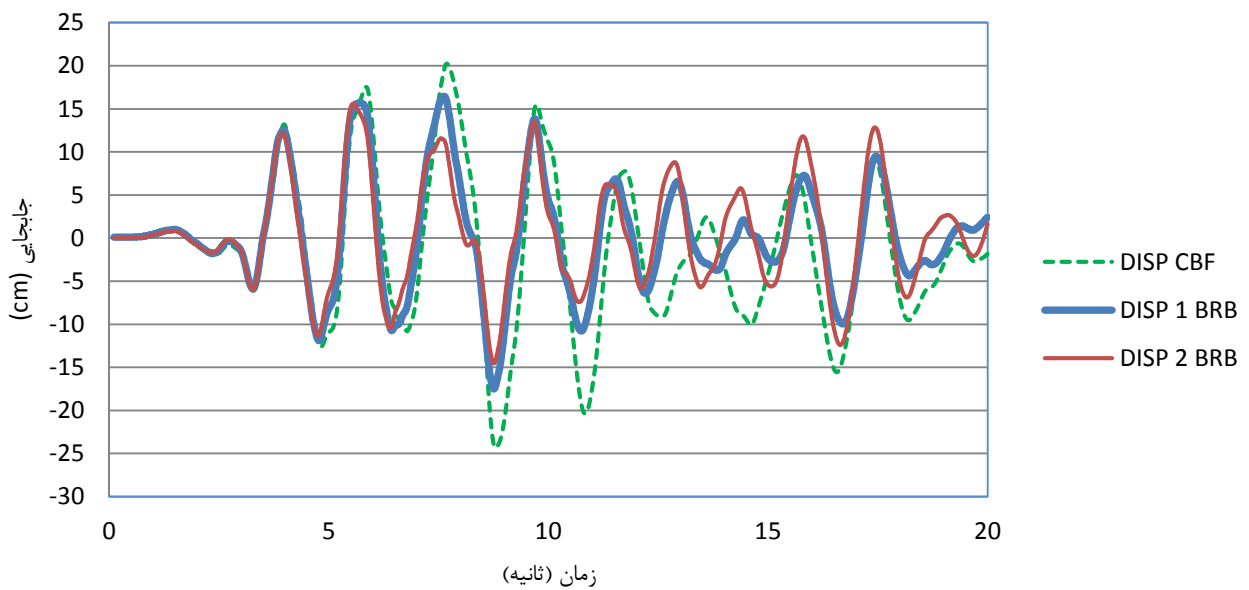
نمودار ۱: جابجایی تراز عرشه , $PGA=0.249g$



نمودار ۲: جابجایی تراز عرشه , $PGA=0.356g$

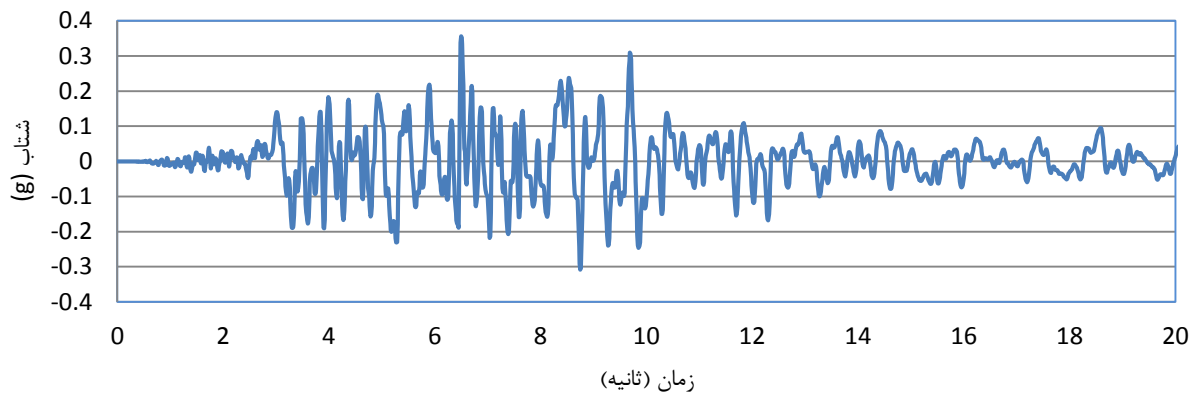


نمودار ۳: جابجایی تراز عرشه , $PGA=0.463g$



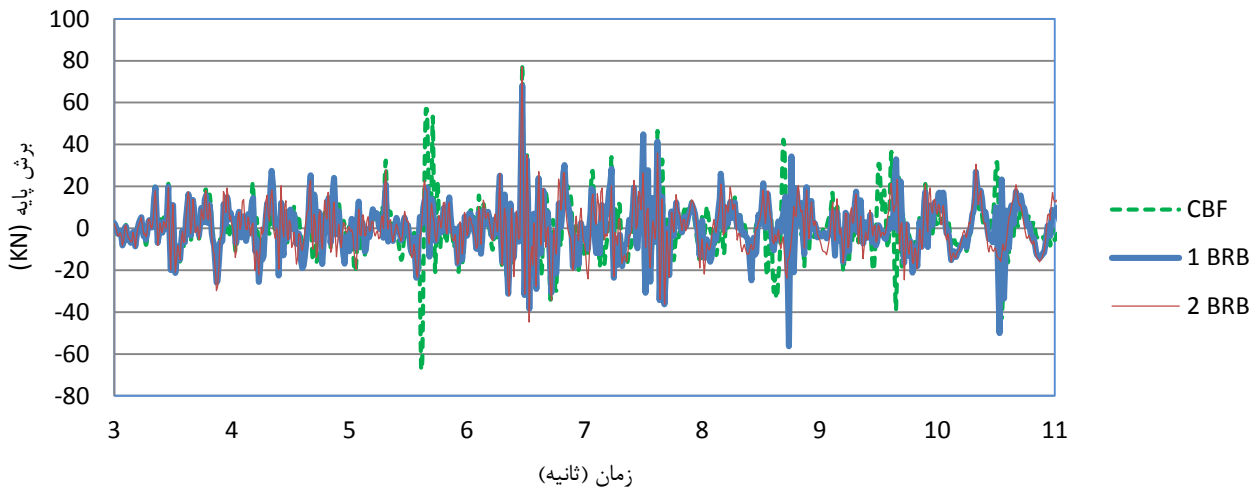
استفاده از بادبند غیرکمانشی برای اعضای قطری سکو، به نحو مناسبی عملکرد سکو را، بخصوص در محدوده غیرخطی، بهبود می‌بخشد. با توجه به نمودارها مشاهده می‌گردد که استفاده از بادبند غیرکمانشی (حالات ب و ج) جابجایی تراز عرشه را به نحو مطلوبی کاهش می‌دهد. تاثیر بادبندهای غیرکمانشی در زلزله با PGA بزرگتر بیشتر می‌باشد، چراکه در زلزله‌های بزرگتر بادبند غیرکمانشی بیشتر وارد حوزه غیرخطی می‌گردد، این در حالیست که بادبندهای معمولی (حالت الف) تمایل به کمانش دارند. به این ترتیب مشاهده می‌گردد که بادبند غیرکمانشی در محدوده‌ی غیرخطی تاثیر بسیار زیادی بر بهبود رفتار لرزه‌ای سازه دارد. هرچند در برخی زمان‌ها ممکن است جابجایی نسبت به حالت عادی افزایش پیدا کرده باشد، اما بیشینه جابجایی به‌خوبی کاهش یافته است.

نمودار ۴: رکورد شتاب مربوط به زلزله نورتریج
NORTHRIDGE E.Q. PGA=0.356 g

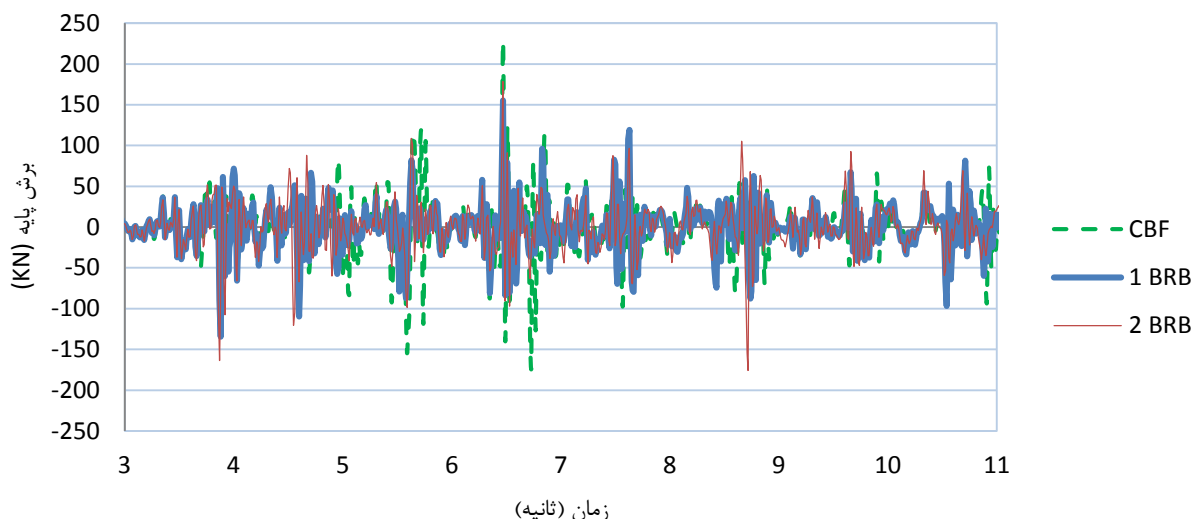


در ادامه تاریخچه زمانی برش پایه سکو ارائه شده است. برای نمایش بهتر جزئیات، تاریخچه نیروی برش پایه در فواصل زمانی ۳ تا ۱۱ ثانیه؛ که تحریک نورتریج، دارای بیشترین محتوای فرکانسی می‌باشد، رسم شده است. با توجه به نمودار ۵، مشاهده می‌گردد هرچند در برخی زمان‌ها نسبت به حالت بادبند متداول، برش‌ها افزایش یافته است، اما بیشینه برش پایه در هر سه حالت نزدیک است. یعنی سیستم غیرکمانشی با حفظ بیشینه برش پایه، جابجایی را کاهش داده است.

نمودار ۵: نیروی برش پایه، PGA=0.249g



نمودار ۶: نیروی برش پایه , $PGA=0.463g$



باتوجه به نمودار ۶، تاریخچه زمانی برش در تحریک با PGA بزرگتر، کاهش برش پایه حداکثر در سکو با سیستم غیرکمانشی را گزارش می‌کند، چراکه بادبندهای غیرکمانشی بیشتر وارد حوزه غیرخطی می‌شوند و با استهلاک بیشتر انرژی باعث کاهش نیروی ورودی به اعضای دیگر شده است. البته این نکته قابل ذکر است که، از مزایای بادبند های غیرکمانشی استقلال سختی و مقاومت عضو در طراحی می‌باشد، که دست طراح را بسیار باز می‌گذارد.

جدول زیر حداکثر جابجایی تراز عرشه را در سه حالت جاگذاری بادبند و تحت تحریک‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۳: حداکثر پاسخ‌های جابجایی

حالت	PGA(g)	حداکثر جابجایی (cm)
CBF(الف)	0.249	15.5892
	0.356	15.8856
	0.463	20.219
BRB ^۱ (ب)	0.249	10.3408
	0.356	13.4146
	0.463	16.4589
BRB ^۲ (ج)	0.249	8.82483
	0.356	12.4875
	0.463	15.5829

نتیجه‌گیری و جمع بندی

در این مقاله تاثیر بادبندهای غیرکمانشی در بهبود رفتار لرزه‌ای سکوی رسالت بررسی شد. عملکرد سازه در سه حالت بادبندی، مورد بررسی قرار گرفت و در هر حالت؛ سه تحریک زلزله بر سکو وارد شد و تحلیل تاریخچه زمانی برای آن صورت گرفت. بادبند غیرکمانشی به خوبی جابجایی حداکثر سکو را کاهش داد. با استفاده از بادبند غیرکمانشی با اتصال مفصلی، علاوه بر کنترل جابجایی، به دلیل کاهش لنگرهای ثانوی و کاهش تنش در اتصال؛ شاید سبب افزایش عمر خستگی اتصال گردد، این موضوع در سکوهای دریایی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. همچنین بادبند غیرکمانشی با میرایی هیستریزیسی خود انرژی بیشتری را استهلاک می‌کند و انرژی ورودی به سازه را کاهش می‌دهد. استفاده از سیستم غیرکمانشی با توجه به مواردی مانند هزینه کم، نصب و نگهداری آسان و عملکرد مناسب در فشار، می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب برای بهسازی سکوهای موجود در مقابل بارهای شدید مانند زلزله مورد استفاده قرار گیرد.

- [1] Ou, J., and Long, X., and Li, Q.S., and Xiao, Y.Q“ .,Vibration control of steel jacket offshore platform structures with damping isolation systems ,”Engineering Structure, 29(7), 1525-1538, 2006.
- [2] Golafshani , A. A.,and Tabeshpour, M. R.,and Komachi, Y., FEMA Approaches in Seismic Assessment of Jacket Platforms. Const. Steel Research. 65, 1979-1986,2009.
- [3] Kawano, K, “Active control effects on dynamic response of offshore structures”, Proc. of 3rd ISOPE Conference , 3, 494-498,1993.
- [4]. Suneja, B.P.,and Datta, T.K.,”Active control of ALP with improved performance function” ,Ocean Engineering, 25, 817–835,1998.
- [5] Abdel-Rohman, M., “ Structural control of steel jacket platform ” ,Structural Engineering and Mechanics, 4, 25-38, 1996.
- [6] Golafshani, A.A.,and Gholizad, A. . "Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platforms." Journal of Constructional Steel Research, 65(1), 180-187, 2009 .
- [7] Komachi, Y., and Tabeshpour, M.R, and Mualla, I, and Golafshani, A.A., " Retrofit of Ressalat Jacket Platform (Persian Gulf) using Friction Damper Device", Journal of Zhejiang University, 12(9),680-691,2011
- [8] Tabeshpour, M. R., and Komachi, Y., " Assessment and Rehabilitation of Jacket Platforms, Earthquake-Resistant Structures - Design, Assessment and Rehabilitation", Prof. Abbas Moustafa (Ed.), ISBN: 978-953-51-0123-9, InTech, DOI: 10.5772/29927(2012).
- [9] Watanabe A.,and Hitomoi Y. ,and Saeki E, and Wada A, and Fujimoto M. Properties of braces encased in buckling-restrained concrete and steel tube. In: Proceeding of 10th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo-kyoto, Japan, 1988 .
- [10] Clark, P., Aiken, I., Kasai, K., Ko, E. and Kimura, I., "Design procedures for buldings incorporating hysteretic damping devices", Proc. 69th Annual Convention of SEAOC, Sacramento, CA. 1999.
- [11] Prasad,B., Proc . 33rd AIAA Structures,Structural Dynamics and Materials Conference , Dallas , TX .
- [12] Xie, Q. , "State of the art of buckling-restrained braces in Asia" ,Journal of Constructional Steel Research, 61,727–748 , 2005.
- [13] Deulkar,W. N. ,Modhera,C. D. ,Patil, H. S. ,"Buckling Restrained Braces for vibration control of building structure ", IJRRAS 4 (4) ,363-372, September 2010 .
- [14] Resalat (R1) Offshore Complex Renovation and Reconstruction Project, Production Platform-In place Analysis Report, Rsl-P1-St-Cn-1001-C2, Amid Engineering & Development Company.,1992.
- [15] OpenSees. Open system for earthquake engineering simulation. Available online:<http://opensees.berkeley.edu>.(2005)