

مروزی بر کنترل ارتعاشات سازه‌های دریایی

محمد رضا تابش پور

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک

قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی

دانشگاه صنعتی شریف

tabeshpour@sharif.edu

ابراهیم ملایجردی*

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی دریا

قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی

دانشگاه صنعتی شریف

malayjerdi_ebrahim@mech.sharif.edu

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۶

چکیده

امروزه با افزایش میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی و محدود بودن این انرژی در خشکی، نیاز به استخراج از بستر دریاها روزبه روز افزایش یافته و موجب توسعه و رشد قابل توجه سازه‌های فراساحلی شده است. این سازه‌ها معمولاً در معرض ارتعاشات ناشی از بارهای محیطی‌اند که سبب کاهش عمر خستگی آنها می‌شود. رویکرد نوین در طراحی سازه‌ها، استفاده از سازوکارهای کنترل بهمنظور کاهش اثر بارهای محیطی بر آنهاست که به تدریج در کنار روش‌های سنتی - که صرفاً مبتنی بر افزایش مقاومت سازه‌ها بوده‌اند - مطرح می‌گردد. عملکرد وسائل اتلاف انرژی تقریباً مشابه یکدیگر است و همگی انرژی جنبشی را به گرما تبدیل می‌کنند. در این مقاله، نخست به معرفی انواع میرایی، سازوکار کنترل و میراگر و معادلات حاکم بر آنها پرداخته شده است. سپس روش‌های کنترل بهصورت تفصیلی بیان شده و براساس نوع کنترل غیرفعال و فعال در سکوهای ثابت و شناور پژوهش‌های انجام‌شده مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها دو مطالعه موردي که به مقایسه سیستم‌های کنترل غیرفعال در سکوهای فراساحلی پرداخته‌اند، بررسی شده است.

واژگان کلیدی: کنترل ارتعاشات، انواع میرایی، سکوهای ثابت، سکوهای شناور

۱. مقدمه

دارد، در جامدات تحت تأثیر عواملی چون آثار حرارتی، پدیده خستگی و پاوشنینگر تغییر می‌کند. برای اینکه بتوان مصالحی با میرایی مشخص داشت، باید آثار این عوامل در مصالح موردنظر به حداقل برسد. روش‌های متنوعی برای تولید مصالح دارای میرایی معلوم، که اصطلاحاً میراگر نامید می‌شود، وجود دارد. میرایی سازه‌ها تحت نیروی تحریک

میرایی از خصوصیات ذاتی مواد است که در تمامی مواد موجود در طبیعت وجود دارد. همان‌گونه که با دانستن ضریب الاستیسیتیه یک ماده می‌توان محاسبات مربوط به مصالح تشکیل‌شده از آن را انجام داد، با دانستن میرایی یک ماده نیز می‌توان به تحلیل دقیق‌تری از سیستم‌ها دست یافت. میرایی ذاتی ماده، که به جنس آن بستگی

محدود سرعت نسبی حرکت سازه نسبت به ذرات آب رابطه دارد [۲-۱].

۲. روش‌های کنترل سازه

روش‌های کنترل را می‌توان به لحاظ نوع سازوکار بهصورت زیر طبقه‌بندی کرد [۴-۳].

۲-۱. روش‌های مبتنی بر تغییر و تنظیم خواص دینامیکی سیستم

۲-۱-۱. جداسازی پایه^۱

در این روش نصب جداسازها سبب کاهش انرژی ورودی به سازه فوقانی می‌شود؛ در نتیجه پریود طبیعی ارتعاش سازه افزایش می‌یابد. بنابراین شتاب طیفی وارد کاهش می‌یابد و خرابی محتمل در کل سازه به جذب و تمرکز خرابی موضعی در جداساز مبدل می‌گردد. جداساز لرزه‌ای شامل صفحات تکیه‌گاهی است که بین سازه و فونداسیون قرار می‌گیرد. این سیستم از جمله انواع معمول سیستم‌های کنترل غیرفعال است. عملکرد این صفحات، جداسازی لرزه‌ای سازه است که سبب کاهش شتاب کف‌ها و افزایش شکل‌پذیری و زمان تناوب اصلی سازه می‌شود. این سیستم انواع گوناگونی دارد که از آن جمله می‌توان به تکیه‌گاههای الاستیک سربی، لاستیکی فوق میر، الاستومتریک و اصطکاکی لفزنده اشاره کرد. از مهم‌ترین نقاط ضعف این سیستم ایجاد امکان واژگونی در تراز تکیه‌گاههای است، که خود موجب ناپایداری کلی در این سازه‌ها می‌شود. استفاده از جداسازهای لرزه‌ای بین جاکت و عرشه سبب کاهش ارتعاشات وارد بر عرشه می‌شود و افزایش طول عمر تجهیزات پرهزینه روی عرشه را دریی دارد؛ همچنین موجب آسایش کارمندان روی عرشه می‌شود.

۲-۱-۲. سازوکار بادبند با سختی متغیر^۲

در واقع سختی سیستم به‌طور همزمان بهنحو مناسبی تغییر می‌کند تا ارتعاش سازه به حداقل برسد. سختی سازه با

بهصورت ترکیبی از میرایی خارجی ویسکوز، میرایی داخلی ویسکوز، میرایی اصطکاکی، میرایی هیسترزیس و میرایی تشعشعی می‌باشد.

میرایی ویسکوز خارجی گونه‌ای از میرایی است که توسط سیالات و شرایط محیطی اطراف یک سازه بهوجود می‌آید. در مقایسه با انواع میرایی‌ها بسیار کوچک و در اکثر موارد با تقریب خوبی قابل صرفنظر است. مثلاً میرایی ویسکوز خارجی یک سکوی جاکت در برابر میرایی سازه‌ای قابل اغماس است. میرایی ویسکوز خارجی در سازه‌های دریایی به حرکت سازه شناور، سرعت جریان و سرعت موج وایسته است. میرایی داخلی ویسکوز در اصل خاصیت ویسکوزیته ماده و متناسب با سرعت است، به‌گونه‌ای که نسبت میرایی متناسب با فرکانس سازها افزایش می‌یابد. این نوع میرایی غالباً برای ارائه هر نوع میراگر به کار می‌رود و معروف‌ترین نوع میرایی است. میرایی اصطکاکی، میرایی کولمب نیز نامید می‌شود، بهعلت وجود اصطکاک در اتصالات یا نقاط تکیه‌گاهی پدید می‌آید. بدون توجه به سرعت و جابه‌جایی ثابت است و بسته به مقدار جابه‌جایی‌ها کوچک باشد برخورد می‌شود. اگر مقدار جابه‌جایی‌ها بزرگ باشد، بهعنوان یک میرایی داخلی و اگر مقدار جابه‌جایی بزرگ باشد، بهعنوان یک میرایی هیسترزیس در نظر گرفته می‌شود. میرایی هیسترزیس اما هنگامی اتفاق می‌افتد که رفتار ماده تحت بار رفت‌وبرگشته در محدوده الاستیک قرار می‌گیرد. مساحت چرخه هیسترزیس در واقع بیانگیر مقدار انرژی اتلاف‌شده در هر سیکل از بارگذاری است. در سازه‌های شناور مانند سکوهای پایه‌کششی، کشتی‌ها و موج‌شکن‌های شناور با نوسان و جابه‌جایی در سیال سبب تشعشع سیال اطراف آن می‌شود و میرایی تشعشعی بهوجود می‌آید. اتلاف و پراکندگی انرژی که سبب کاهش حرکت سازه در سیال می‌شود را دمپینگ تشعشعی می‌نامند. مثلاً با حرکت کشتی‌ها در دریا در سینه و پاشنه کشتی امواجی تشکیل می‌شود و میرایی را ایجاد می‌کند. دمپینگ تشعشعی با

۲-۲. روش‌های مبتنی بر تغییر و تنظیم میرایی سیستم

۲-۲-۱. میراگرهای لزج^۴

از انواع دیگر سیستم‌های کنترل منفعل می‌توان به میراگر ویسکوز اشاره کرد. این میراگر بسیار مشابه کمک‌فناوهای معمولی است و شامل سیلندری فلزی است که درون آن با سیالی همچون نفت یا سیلیکن پر شده است. حرکت پیستون سوراخدار داخل سیلندر موجب حرکت سیال شده و استهلاک انرژی را بهمراه دارد. نیروی مقاومی که این وسیله ایجاد می‌کند متناسب با جابه‌جایی و سرعت نسبی دو سمت آن است. وقتی بار به آرامی وارد شود، این وسیله مقاومت کمی در برابر جابه‌جایی از خود نشان می‌دهد، اما با افزایش سرعت اعمال بار مقاومت آن نیز افزایش می‌یابد. معادله حرکت یک سیستم یک درجه آزادی با نیروی میراگر f_d و نیروی تحریک f_w به صورت معادله ۱ می‌باشد.

[۴]

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f_d + f_w \quad (1)$$

$$m\ddot{x} + (c + c_d)\dot{x} + kx = f_w$$

میراگر ویسکوز المانی است که نیروی تولیدشده توسط آن با سرعت سیستم رابطه مستقیم دارد.

$$f_d = -c_d \dot{x} \quad (2)$$

گفتنی است اغلب میراگرهای ویسکوز در محدوده‌ای از سرعت باید به طور کامل خطی در نظر گرفته شوند. مقدار کار مستهلك شده در هر فاصله زمانی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$W_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} f_d \dot{x} dt \quad (3)$$

تحریک تناوبی انرژی که در هر سیکل مستهلك می‌شود نیز برابر است با:

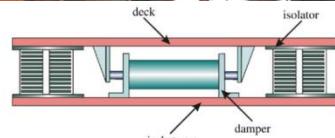
$$\text{نیز برابر است با:} \quad (4)$$

نیروی میراگر برای با میرایی ویسکوز غیرخطی نیز برابر

است با:

$$f_d = -c_{d-nonlinear} |\dot{u}|^n \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (5)$$

ایجاد کشش یا آزادسازی کابل‌هایی که به عنوان مهاربندی در سیستم عمل می‌کنند تغییر می‌یابد. از سیستم‌های مهاربندی کمانش‌نایپذیر^۳ برای کنترل و بهسازی یک سکوی شابلونی فولادی موجود تحت تحریک زلزله استفاده می‌شود. این سیستم به عنوان وسیله‌ای برای کنترل لرزه‌ای خواهد شد. سیستم مهاربندی کمانش‌نایپذیر شامل هسته فولادی شکل‌پذیر است و به گونه‌ای طراحی می‌شود که در نخست هسته فولادی در مقطعی فولادی قرار می‌گیرد؛ سپس داخل مقطع بیرونی با استفاده از بتون پر می‌شود. قبل از این کار، به‌منظور کمینه کردن یا حذف انتقال نیروی محوری از هسته فولادی به ملات و مقطع توخالی فولادی، یک گپ هوا یا ماده ضعیف بین فولاد هسته و بقیه اجزاء به کار می‌رود [۲۲].



شکل ۱. سیستم جداساز نصب شده بین جاکت و عرشه سکو [۹]

به طوری که f_y نیروی تسلیم، x_y جابه‌جایی ماده‌ای که شروع به تسلیم می‌کند، x_{\max} جابه‌جایی بیشینه، k_y سختی میراگر الاستیک و نسبت انعطاف‌پذیری μ به صورت معادله ۹ بیان می‌شود.

$$\mu = \frac{x_{\max}}{x_y} \quad (9)$$

برای یک میراگر متالیک نیروی میراگر برابر است با:

$$f_d = \left(\frac{NEw_0h^3}{6L^3} \right) x \quad (10)$$

به طوری که در این رابطه N تعداد ورق‌های مثلثی است که به صورت موازی قرار گرفته‌اند؛ همچنین x جابه‌جایی میراگر، h هر ورق، L طول و عرض می‌باشد.

۲-۴. میراگرهای ویسکوالاستیک^۷

این روش مشابه روش میراگرهای لزج از ماده‌های ویسکوالاستیک شبیه لاستیک بین لايه‌های فلزی استفاده می‌شود. تغییر شکل برشی ماده بین لايه‌های فلزی سبب اتلاف انرژی می‌شود. از این روش در سازه‌هایی چون جاکت برای کاهش آثار ناشی از تغییر مکان نسبی در اثر باد، زلزله و موج استفاده می‌شود. نیروی میراگر ویسکوالاستیک ترکیبی از میرایی و سکوز و سختی قطعات است [۴].

$$f_d = k_d x - c_d \dot{x} \quad (11)$$

سختی قطعات درون میراگر باعث می‌شود نمودار نیرو - جابه‌جایی بیضی‌شکل باشد و شبیه متوسط آن سختی k_d میراگر می‌باشد. همچنین نمودار نیرو به سرعت منحنی بیضی را تشکیل می‌دهد و شبیه متوسط آن لزجت میراگر c_d می‌باشد.

۳. روش‌های مبتنی بر تغییر و تنظیم جرم

میراگرهای دینامیکی در این بخش می‌گنجند. میراگر جرم هماهنگ‌شده^۸ و میراگرهای مایع هماهنگ‌شده^۹ نمونه‌هایی هستند که در آنها جابه‌جایی جرمی هماهنگ‌شده با سازه اصلی سبب کنترل ارتعاشات می‌شود.

به طوری که \dot{x} سرعت نسبی بین دو انتهای میراگر، $c_{d-nonlin}$ - لزجت غیرخطی میراگر و η توان قانون قدرت است. اگر $\eta = 1$ باشد، میراگر ویسکوز رفتار خطی دارد.

۲-۲-۲. میراگرهای اصطکاکی^۰

میزان اتلاف انرژی این میراگرهای به تغییر مکان سازه وابسته است و به سرعت آن و محتواهای فرکانسی ارتعاشات واردشده بستگی ندارد. اغلب میراگرهای اصطکاکی رفتاری پسمند با شکل پایدار مستطیل دارند، اگرچه برخی از آنها رفتار دوخطی نیز نشان می‌دهند. عملکرد میراگرهای اصطکاکی برخلاف میراگرهای ویسکوز مستقل از تغییرات دما و سرعت است [۴].

$$f_d = k_d |x| (-\text{sgn}(\dot{x})) \quad (6)$$

در این رابطه k_d فاکتور شبیه‌ساختی است. برای تحریک تناوبی شکل ۵ نشان‌دهنده نمودارهای نیرو - جابه‌جایی و نیرو - سرعت میراگر اصطکاکی است. انرژی مستهلكشده در هر سیکل برابر است با:

$$w = 4 \left(\frac{k_d x_{\max}^2}{2} \right) = 2k_d x_{\max}^2 \quad (7)$$

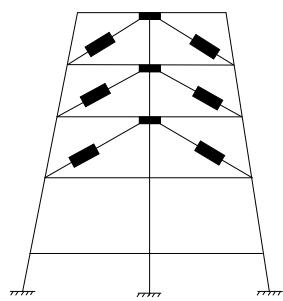
۲-۲-۳. میراگرهای تسلیم‌شونده فلزی^۶

امروزه ثابت شده است طراحی سازه‌ها به صورتی که برای مقابله با تحریک‌های شدید رفتار کاملاً الاستیک داشته باشند، از لحاظ اقتصادی مفروض به صرفه نیست. میراگرهای فلزی به علت سختی الاستیک نسبتاً زیاد، شکل پذیری مناسب و قابلیت جذب انرژی در ناحیه بعد از تسلیم را دارند و از جمله میراگرهای معمول و ارزان برای اتلاف انرژی در سازه می‌باشند. در نمودار تنش - کرنش شکل ۷ حالت‌های گوناگون میرایی هیسترزیس نمایش داده شده است. انرژی مستهلكشده در هر سیکل برای مواد الاستوپلاستیک به صورت روابط ۸ بیان می‌شود [۴].

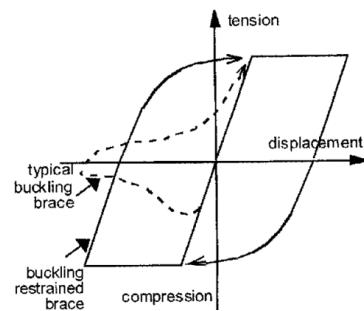
$$w = 4f_y(x_{\max} - x_y) \quad (8)$$

$$w = 4(k_y x_x)(x_{\max} - x_y)$$

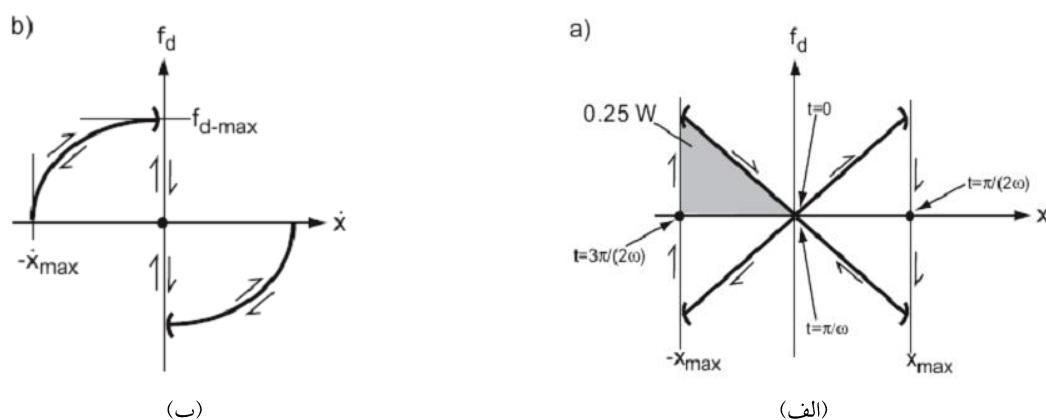
$$w = 4k_y x_y^2 (\mu - 1)$$



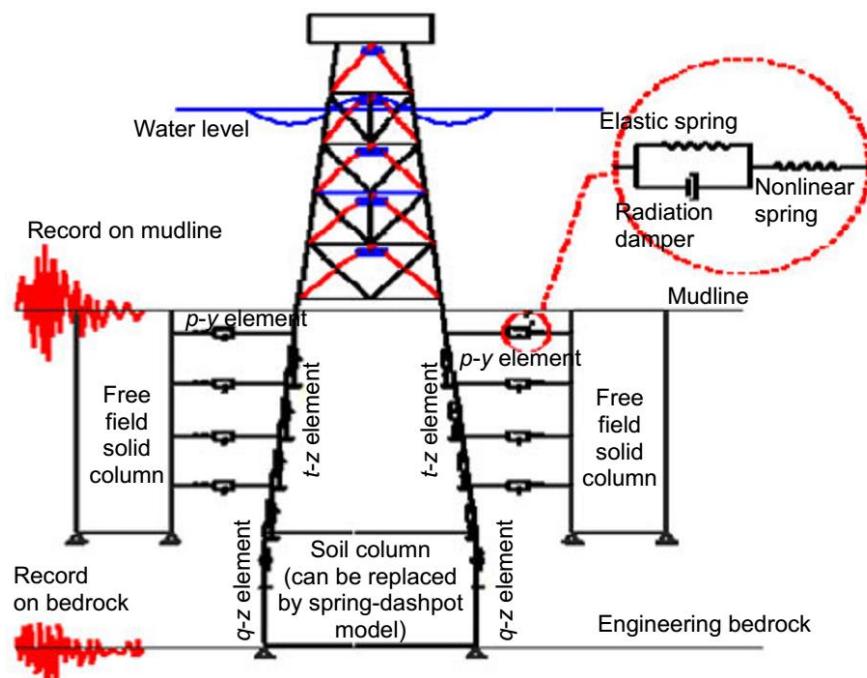
شکل ۳. سکوی جاکت مجهز به میراگر ویسکوز [۱۵]



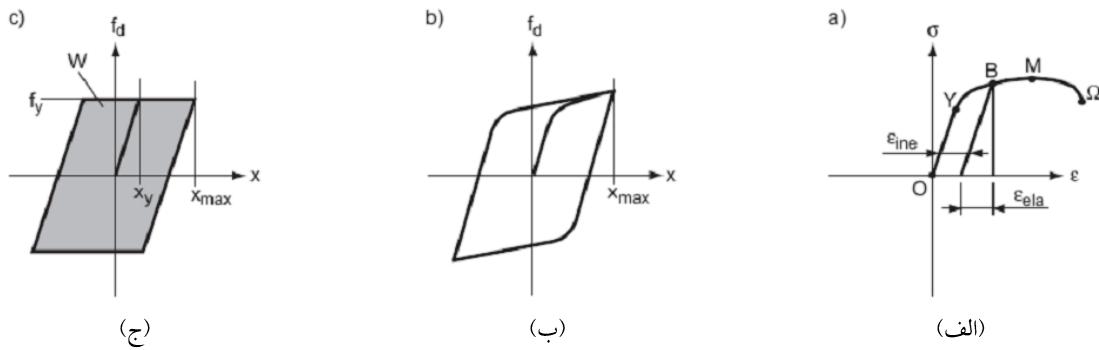
شکل ۲. رفتار مهاریندهای معمولی بر حسب [۲۲]BRB



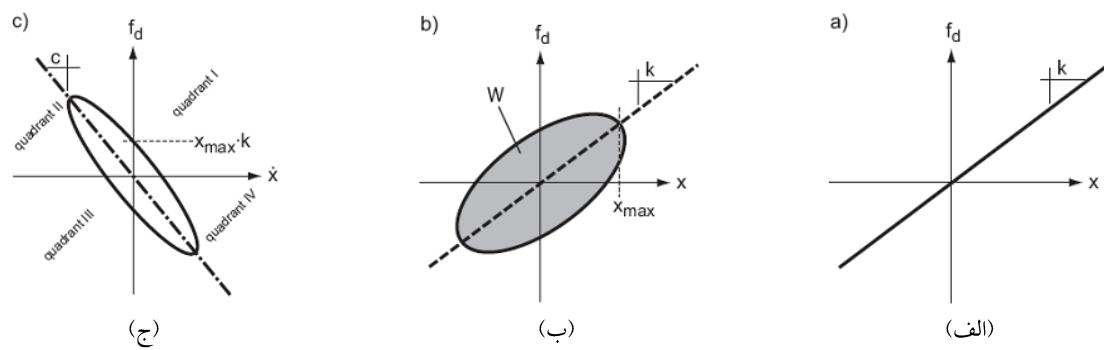
شکل ۴. نمودار نیرو به جایه‌جایی و نیرو به سرعت برای میراگر اصطکاکی [۴]



شکل ۵. سکوی جاکت مجهز به میراگر اصطکاکی [۱۶]



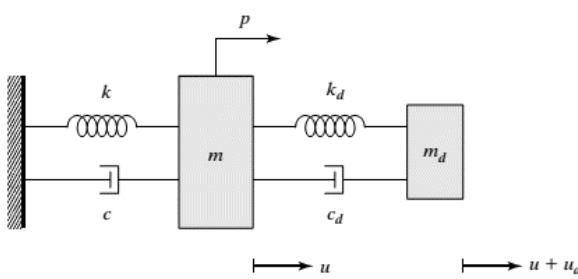
شکل ۶. نمایی از (الف) نمودار تنش کرنش اغلب مواد، (ب) رفتار میراگر هیسترزیس واقعی، (ج) رفتار میراگر هیسترزیس ایده‌آل [۴]



شکل ۷. نمایی از نمودار نیرو - جایه‌جایی (الف) مواد الاستیک، (ب) مواد ویسکوالاستیک [۴]

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \frac{k}{M} & \omega_d^2 &= \frac{k_d}{m_d} \\ C_d &= 2\xi_d \omega_d m_d \\ \bar{m} &= \frac{m_d}{M} \end{aligned} \quad (12)$$

به طوری که در این روابط ω_d و ξ_d بدترتیب فرکانس و درصد میرایی سیستم میراگر جرمی می‌باشد. شکل ۱۱ سیستم یک درجه آزادی و میراگر جرمی تنظیم‌شونده برای کاهش پاسخ دینامیکی را نمایش می‌دهد.



شکل ۸ سیستم یک درجه آزادی

۳-۲. میراگر جرمی متوازن شونده

میراگر جرمی تنظیم‌شونده در ساده‌ترین حالت شامل جرم، فنر و میراگر است که معمولاً در بالاترین تراز سازه یا در محلی که بیشترین تغییر مکان در آن اتفاق می‌افتد، نصب می‌شود تا پاسخ‌های سازه را تحت بارهای جانبی کاهش دهد. نحوه طراحی این سیستم به‌گونه‌ای است که فرکانس طبیعی ارتعاش آن با فرکانس ارتعاشی سازه تنظیم می‌شود و با اختلاف فازی نسبت به ارتعاش سازه که دارد باعث می‌شود پاسخ‌های سازه را در حالت روزانه کاهش یابد. در ادامه به نظریه طراحی میراگر جرمی تنظیم‌شونده برای سازه یک درجه آزادی تحت تأثیر نیروی هارمونیک پرداخته می‌شود. اندیس d مربوط به میراگر است و همچنین کل این سیستم به عنوان سیستمی یک درجه آزادی در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد استفاده در این محاسبات در زیر آمده است [۱]:

۲-۴-۱. سیستم‌های کنترل انفعالی^{۱۰}

در این روش‌ها عامل کنترل کننده ارتعاش در محل مناسبی از سازه قرار می‌گیرد و تا قبل از تحریک سازه به صورت انفعالی باقی می‌ماند. با شروع تحریک مثل موج برخوردی، سیستم کنترلی به کار افتاده و عملکرد کنترلی خود اعم از تعییر سختی، پریود، میرایی یا جرم را در حین تحریک انجام می‌دهد و پس از خاتمه تحریک مجدداً به حالت انفعالی بازمی‌گردد.

۲-۴-۲. سیستم‌های کنترل فعال^{۱۱}

در این روش با استفاده از سیستم‌های هوشمند، همزمان با اعمال تحریک نیروهای لازم به گونه‌ای به سازه اعمال می‌شود که تأثیر تحریک و نیروهای ناشی از آن را به سازه به حداقل مقدار ممکن کاهش دهد. در این روش‌ها، پاسخ سازه توسط اعمال نیروهایی در نقاط مختلف آن به صورت همزمان و با توجه به شرایط لحظه‌ای سازه کنترل می‌شود. این سیستم‌ها همواره برای شروع فعالیت و کنترل ارتعاشات آماده‌اند و بهمین دلیل اصطلاحاً فعال^{۱۲} نامیده می‌شوند.

۲-۴-۳. سیستم‌های کنترل مختلط یا توام^{۱۳}

این روش شامل دو سیستم کنترل فعال و انفعالی توأمان است که در ابتدای تحریک کاهش ارتعاشات سازه توسط سیستم انفعالی صورت گرفته و سپس در صورت نیاز سیستم فعال نیز وارد عمل می‌شود. در اینجا سیستم انفعالی ممکن است به فعالیت خود ادامه داده و یا در صورت عدم نیاز به آن از دور خارج شود. مقایسه نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهینه سیستم کنترل توأم در کاهش ارتعاشات سازه است. هدف از این ترکیب افزایش کارایی سیستم کنترل غیرفعال و کاهش انرژی خارجی مورد نیاز سیستم کنترل فعال است.

۲-۴-۴. سیستم‌های کنترل نیمه فعال^{۱۴}

براساس تعاریف ابزارهای کنترل نیمه‌فعال انرژی را به سازه تزریق نمی‌کنند، بلکه خصوصیاتی دارند که با کنترل آنها

با فرض اینکه سیستم تحت تأثیر نیروی خارجی قرار بگیرد،

معادلات حاکم بر حرکت سیستم به صورت زیر خواهد بود:

$$m\ddot{u} + ku + c\dot{u} - k_d u_d - c_d \dot{u}_d = p(t) - ma_g \quad (16)$$

$$m_d \ddot{u}_d + k_d u_d + c_d \dot{u}_d = -m_d a_g \quad (17)$$

۲-۳-۲. میراگر سیالی متوازن‌شونده

این میراگر در واقع نوعی از میراگر جرمی متوازن‌شونده است که در آن از حرکت سیال درون تانک برای استهلاک انرژی استفاده می‌شود. این میراگر شامل سیال و مخزن نیمه‌پر است که همانند میراگر جرمی به صورت غیرمستقیم باعث میرایی سیستم می‌شود و پاسخ‌های سازه را کاهش می‌دهد. اتلاف انرژی توسط میراگر سیالی متوازن‌شونده به کمک سازوکارهایی چون عملکرد ویسکوز سیال، تداخل امواج ایجادشده در سطح سیال و نهایتاً هندسه مخزن و میزان زیری دیواره تانک رخ می‌دهد. از مزایای این سیستم می‌توان به هزینه ساخت کم، نصب آسان و سادگی تنظیم فرکانس سیال با فرکانس سازه اشاره کرد. معادله حرکت برای سیال در لوله برابر است با [۱۹]:

$$\rho_d A_d L_d \ddot{H} + 0.5 \rho_d A_d h_d |\dot{H}| \dot{H} + 2 \rho_d A_d H = -\rho_d A_d B_d \ddot{X} \quad (18)$$

به طوری که h_d ضریب افت هد مایع، H ، \dot{H} و \ddot{H} به ترتیب جابه‌جایی، سرعت و شتاب سیال در لوله قائم می‌باشند. همچنین ρ_d دانسیتی سیال، A_d سطح مقطع لوله، B_d طول قسمت افقی میراگر و L_d طول لوله است. برای مثال معادله حرکت سرج سکوی پایه کششی مجهزشده به میراگر سیال تنظیم شده به صورت ۱۹ است.

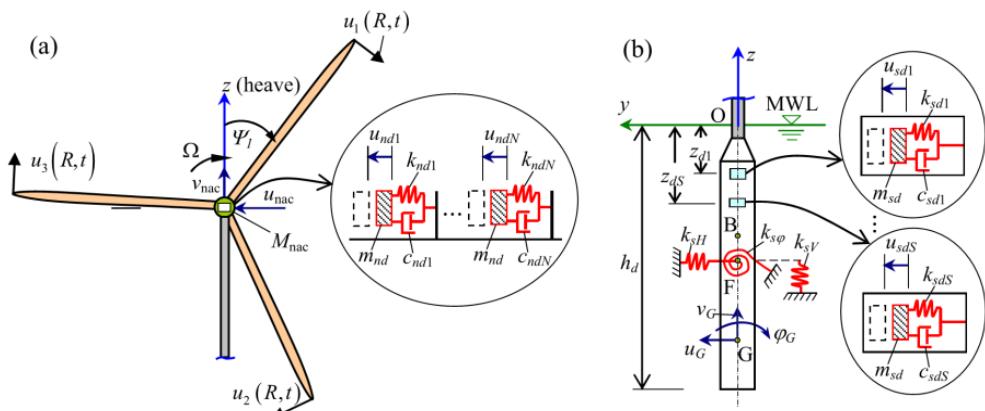
$$MX + C_x \dot{X} + K_x = -\rho_d A_d B_d \ddot{H} - \rho_d A_d L_d \ddot{X} \quad (19)$$

۲-۴. طبقه‌بندی براساس عملکرد سیستم کنترلی

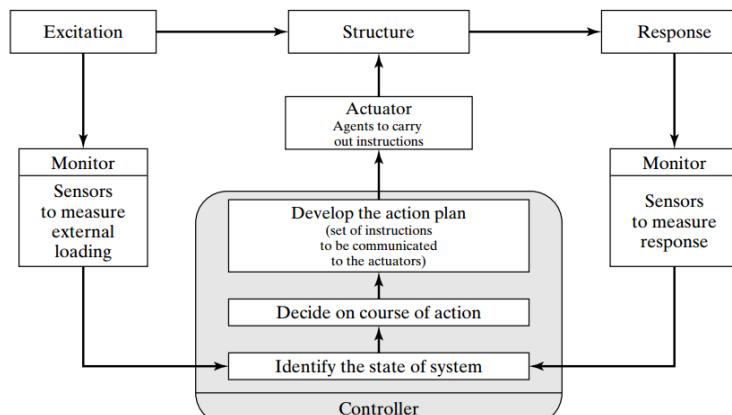
طبقه‌بندی براساس نحوه عملکرد به عنوان کلی‌ترین روش طبقه‌بندی روش‌های کنترل محسوب می‌شود و شامل بخش‌های پیش‌روست [۶].

خالف پاسخ استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از این سیستم‌ها که عبارت‌اند از: ابزار با سختی قابل کنترل مانند میراگر روزنه متغیر، ابزارهای اصطکاکی قابل کنترل، میراگرهای مایع سازش‌یافته قابل کنترل، میراگرهای مایع قابل کنترل مانند میراگرهای ای. آر. ^{۱۵} و ام. آر. ^{۱۶} و میراگر جرمی وفق‌یافته، میراگرهای مایع ویسکوژ قابل کنترل.

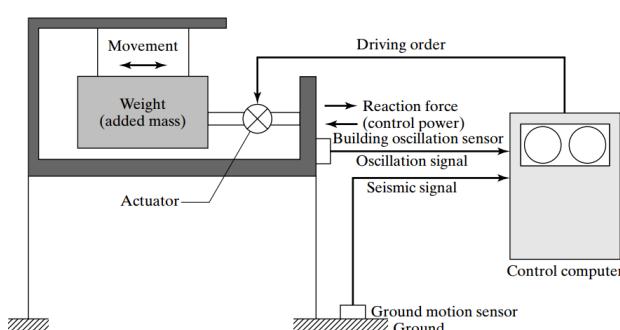
می‌توان پاسخ سازه را کاهش داد. مقایسه عملکرد سیستم‌های کنترل فعال و غیرفعال سبب پیدایش سیستم کنترل جدیدی تحت عنوان نیمه‌فعال شده است. وسائل کنترل نیمه‌فعال خواصی دارند که در هر لحظه قابل تنظیم است، اما قادر به اعمال انرژی به سازه کنترل شده نیستند. بلکه از پاسخ سازه جهت اعمال نیروی کنترلی در جهت



شکل ۹. میراگر جرمی روی جاکت و توربین بادی شناور



شکل ۱۰. الگوریتم کنترل فعال



شکل ۱۱. میراگر جرمی فعال

به طوری که θ ثابت میرایی، f_c نیروی اصطکاکی که وابسته به تنش تسلیم است و f_0 نیروی جبرانی متوسط غیرصفر که به علت حضور انباره مشاهده می‌شود.

۳. مطالعات کتابخانه‌ای

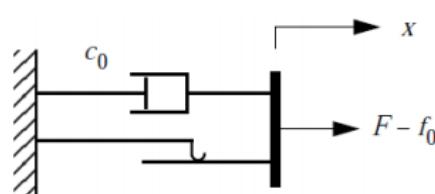
در جدول‌های ۱ تا ۳ مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده به اجمال مرور شده است.



شکل ۱۳. نصب میراگر آم. آر. در سکوی جاکت

مدل‌های ریاضی متنوعی برای میراگر آم. آر. ارائه شده است. در این مقاله به بیان مدل ریاضی بینگهام پرداخته شده است. مدل بینگهام شامل یک المان اصطکاک کولمبی است که به طور موازی با یک دمپر ویسکوز قرار می‌گیرد. در این مدل نیروی تولیدشده توسط میراگر برای سرعت غیرصفر پیستون به شکل رابطه ۱۹ می‌باشد [۴].

$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (19)$$



شکل ۱۲. مدل بینگهام برای دمپرهای با سیال قابل کنترل

جدول ۱. کنترل غیرفعال ارتعاشات سکوهای ثابت

نوع میراگر	نوسینده	تحلیل	نتایج
واندبویر و میتونه	[۷]	واندبویر و میتونه از نخستین محققانی هستند که دریاره کنترل ارتعاشات سکوی دریایی کار و تأثیر مخازن نگهداری سیال در پاسخ دینامیکی سکوهای فراساحلی را بررسی کردند	تلاطم مایعات در مخازن ممکن است فرکانس‌های طبیعی و میرایی سیستم را تغییر دهد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی ممکن است با حضور فرکانس مودهای مخزن سیار کم، افزایش یابد. با انتخاب درست هندسه مخازن، پاسخ سکو را می‌توان کاهش داد
پاتیل و جانگید	[۸] [۲۰۰۵]	پاتیل و جانگید پاسخ سکوی مجهز به ۳ نوع میراگر را بررسی و عملکرد میراگر ویسکوالاستیک، ویسکوز و اصطکاکی تحت بار موج مطالعه کردند	میراگر ویسکوالاستیک به افزایش سختی جانبی و میرایی سازه کمک می‌کند و فرکانس‌های طبیعی سازه را اصلاح می‌کند؛ توانایی کنترل ارتعاشات سکو تحت تحریک از بالا و پایه را دارد. در بین سه میراگر، میراگر ویسکوالاستیک بهینه‌ترین جایه‌جایی سکو را در تراز مختلف را دارد
جین پینگ	[۹] [۲۰۰۷]	به موضوع کنترل ارتعاشات سکوی جاکت با سیستم جداساز لرزه‌ای پرداخت. او در ابتدا یک سیستم جداساز لرزه‌ای مشتمل از یاتاقان‌های پلاستیکی و میراگرهای ویسکوز در سکوی جاکت JZ20-2MUQ نصب کرد. تأثیر پارامترهای کلیدی این سیستم با در نظر گرفتن جزئیات مطالعه شده است	سیستم جداساز لرزه‌ای شامل میراگر، بین جاکت و عرضه قرار می‌گیرد. چون سیستم جداساز لرزه‌ای سختی جانبی کمی فراهم می‌کند، بهمین دلیل سازه جداسازه عمده‌تاً در تراز اتصال سیستم دچار تغییر شکل می‌شود. میراگرهای ویسکوز قرار گرفته شده است در سیستم باعث انزال اثری ارتعاشات و کاهش پاسخ دینامیکی می‌شود که برخلاف فناوری سیستم‌های جدا ساز لرزه‌ای مرسوم است
جین و همکاران	[۱۰] [۲۰۰۷]	جین و همکاران عملکرد میراگر مخزن مایع استوانه‌ای را تحت بار زلزله بررسی کردند. در این مطالعه فرکانس میراگر طوری تنظیم می‌شود که به فرکانس طبیعی سازه و فرکانس حرکت زمین نزدیک باشد	چون محتوای فرکانسی حرکت زمین سیار زیاد و پیچیده است، فرکانس میراگر تنها با در نظر گرفتن فرکانس طبیعی سازه تنظیم می‌شود. همچنین هرچه جرم میراگر بیشتر باشد، عملکرد آن برای کنترل تحریک زمین لرزه بالاتر است، اما براساس هزینه و مسائل کاربردی، نسبت جرم بین ۱ درصد تا ۵ درصد پیشنهاد شده است

جدول ۱. کنترل غیرفعال ارتعاشات سکو های ثابت (ادامه)

نوع میراگر	نویسنده	تحلیل	نتایج
جرمی تنظیم شده	بیو و همکاران [۱۱] (۲۰۰۸)	بیو و همکاران میراگری جرمی پیشنهاد کردند که می تواند ارتعاشات ناشی از بار بخ را در سکو کاهش دهد	در مقایسه با بقیه میراگرهای یک میراگر جرمی می تواند انتخابی بهینه باشد؛ زیرا وقتی فرکانس طبیعی سکو نزدیک یا منطبق با فرکانس غالب نیروی هارمونیکی بار بخ می باشد، ارتعاشات کاهش می یابد
اصطکاکی	گل افشاری [۱۲] (۲۰۰۹)	در این پژوهش به ارزیابی عملکرد سکو با افزودن میراگر هیسترزیس و تحریک نیروهای موج تصادفی پرداخت. برای آنالیز سکو از آنالیز طیفی احتمالی استفاده کرد و یک روش خطی احتمالاتی به کاربرد تا رفتار غیرخطی میراگر هیسترزیس را در نظر بگیرد، همچنین در مقاله کاهش خوابی خستگی تجمعی و پاسخ دینامیکی سکو تحت بار موج را با پارامترهای قابل تنظیم میراگر اصطکاکی مقایسه و مقدار بهینه برای نیروی لغزش ابتدایی و سختی مهاربند فرعی محاسبه شده است	این میراگر هیسترزیس در حالت بهینه سبب کاهش قابل ملاحظه ای در واریانس جابه جایی و سرعت عرشه می شود. مقادیر بهینه پارامترهای قابل تنظیم میراگر به شرایط دریایی وابسته اند و عملکرد میراگر می تواند برای هر شرایط دریایی افزایش یابد
جرمی تنظیم شده	روجيانما [۱۳] (۲۰۰۹)	در این پژوهش روحيان به کنترل ارتعاشات سکوی جاکت با میراگر جرمی تنظیم شده پرداخت. او به دلیل اینکه ارتعاشات در دو راستای افقی و قائم را کنترل کند، دو نوع میراگر جرمی به ترتیب در راستای افقی و قائم طراحی و بالای سکو نصب کرد و مطالعه پارامتری بر مبنای مدل المان محدودی انجام شد	نتایج نشان می دهد که محدوده ای از پارامترهای بهینه مانند نسبت فرکانس ها، نسبت جرم ها، نسبت میراگر برای بیوبود عملکرد میراگر وجود دارد. شبیه سازی سیستم نشان می دهد که آثار کنترل زمانی رضایت بخش می باشد که مقادیر پارامترهای میراگر در محدوده بهینه خود باشد
اصطکاکی	کماچی و تابش پور [۱۴] (۲۰۱۱)	به بهسازی سکوی جاکت رسالت به وسیله میراگر اصطکاکی تحت تحریک از پایه (زلزله) پرداختند. آنها یک روش سریع برای طراحی میراگر اصطکاکی را ارائه کردند. اثر پارامترهای کلیدی میراگر در کاهش ارتعاشات سکو با جزئیات مورد بررسی قرار گرفته است	نتایج آنالیز پوش آور نمایش می دهد که استفاده از میراگر اصطکاکی جابه جایی را کاهش می دهد و همچنین کاهش اتفاقی سکوی جاکت زمانی که میراگر نصب می شود اتفاق نمی افتد. بنابراین به علت افزونگی کم سکو جاکت به کارگری سیستم میراگر اصطکاکی مفید است
ویسکوز	جانبازی و تابش پور [۱۵] (۲۰۱۱)	بررسی چیدمان بهینه میراگر ویسکوز در سکوی ثابت دریایی تحت بارگذاری تصادفی موج در حوزه فرکانس مطابق طیف پاسخ می توان نتیجه گرفت با افزودن میراگر، میزان تعییرات پیک اول نمودار که مربوط به نیروی تحریک می باشد تعییر چندانی نمی کند. وجود میراگر پاسخ سازه مربوط به نیروی موج را چندان تحت تاثیر قرار نمی دهد و عموما باعث کاهش پیک دوم نمودار مربوط به فرکانس می باشد، می گردد	بررسی چیدمان بهینه میراگر ویسکوز در سکوی ثابت دریایی تحت بارگذاری تصادفی موج در حوزه فرکانس

جدول ۲. کنترل غیرفعال ارتعاشات سکو های شناور

نوع میراگر	نویسنده	تحلیل	نتایج
مایع تنظیم شده	شین کولول و بیس واجیت [۱۶] (۲۰۰۷)	تحلیل دینامیکی توربین های بادی دریایی با میراگر ستون مایع متوازن شبیه سازی شده است	وقتی توربین بادی با LCD تجهیز می شود، پاسخ تا ۵۵ درصد کاهش پیدا می کند. اجرای یک میراگر مانند LCD در توربین بادی تا حد زیادی باعث افزایش عمر خستگی می شود
مایع تنظیم شده	لی [۱۷] (۲۰۰۶)	یک نوع سکوی پایه کششی شناور همراه با مایع میراگر متوازن ستوانی مطالعه شده است. هدف یافتن ابزاری مؤثر و اقتصادی بمنظور کاهش ارتعاشات ناشی از موج در سکوهای دریایی شناور است	با توجه به نتایج تحلیلی انرژی تلف شده از دستگاه LCD روی سکوی شناور ممکن است به مقدار بیش از ۵۰ درصد و در بسیاری موارد بالای ۷۰ شود. میزان کاهش انرژی تلف شده از ۷۳ درصد به ۵۵ درصد با توجه به افزایش ابعاد پاتلون در مورد مطالعه می باشد

جدول ۲. کنترل غیرفعال ارتعاشات سکوهای شناور (ادامه)

نویسنده	نوع میراگر	تحلیل	نتایج
چاند رسکان [۱۸] (۲۰۱۳)	جرائم تنظیم شده	میراگر جرمی به سکو اضافه می‌گردد تا دامنه حرکت را کنترل کند. در مطالعه حاضر کنترل پاسخ سکوی پایه کششی در دو حالت استفاده از یک میراگر جرمی و چند میراگر جرمی مقایسه گردیده است	سیستم‌های کنترل غیرفعال مانند میراگر جرمی زمانی که شرایط دریابی و خیم نمی‌باشد مؤثر نمی‌باشند و در شرایط دریابی نرمال سکو به علت جذب انرژی توسط خودش آن جنان حرکتی ندارد
لی (۲۰۱۲) [۱۹]	مایع تنظیم شده	در این مقاله یک سکوی پایه کششی که میراگر مایع تنظیم شده ستونی که در زیر آب قرار گرفته است به آن اضافه شده است، مطالعه شده است. در این سیستم جدید ابتدا لوله اریفیس با لوله افقی کوچکتر جایگزین می‌گردد و سپس سیستم TLCD با سیستم پاتسون زیرآب ترکیب می‌گردد	مطابق با تست‌های انجام شده، در حالی که میراگر UWTLCD نصب شده است. کاهش دامنه ارتعاشات حرکت سرج سکو به بالای ۳۰ درصد و حرکت پیچ سکو به بالای ۵۰ درصد خواهد رسید. در پریودهای امواج بالا کاهش دامنه پاسخ قابل ملاحظه‌تر است و همچنین اتفاقی برای امواج با ارتفاع‌های زیاد صورت می‌گیرد

جدول ۳. کنترل فعال ارتعاشات سکوهای فراساحلی

نویسنده	تحلیل	نتایج
روزن (۱۹۹۹) [۲۰]	این مقاله به کنترل فعال و غیر فعال سکوهای پایه کششی پرداخته است	کنترل فعال منجر به بیشترین کاهش دامنه جابه جایی قائم برای نسبت جرم مفروض شده است. کنترل غیرفعال نیازمند نسبت جرم بزرگتری برای رسیدن به کاهش مشابهی از دامنه پاسخ قائم است.
های هوی و نگ [۲۱] (۲۰۰۹)	کنترل ارتعاش بهینه از یک سکوی دریابی جاکتی با تأخیر ورودی با استفاده از میراگر جرمی فعال در بررسی شده است	این مقاله به توسعه روش طراحی بازخورد و feedforward برای کنترل بهینه یک سکوی فلزی جاکتی در معرض نیروهای ناشی از موج با تاخیر در ورودی می‌پردازد. ثابت شده است که در نظر گرفتن تحریک در کنترل بهعنوان feedforward بسیار مهم است.

۴. مطالعه موردی

۴-۱. مورد نخست

سکو وابسته است و میراگر اصطکاکی برای بیشتر مؤثر بهنظر می‌رسد. مقادیر بهینه برای پارامترهای تنظیم‌شونده میراگر جرمی بسیار به شرایط دریا که با پارامترهای پریود موج غالب و ارتفاع موج شاخص تعريف می‌شوند، وابسته می‌باشند و با استفاده از نسبت تنظیم‌شونده بهینه برای هر حالت دریابی موجب افزایش قابل ملاحظه عملکرد TMD می‌شوند. یک میراگر اصطکاکی بهینه باعث کاهش قابل ملاحظه واریانس جابه‌جایی و سرعت عرشه می‌شود. این کاهش پاسخ باعث طولانی‌کردن عمر خستگی این سکوهای فراساحلی می‌شود [۲۲].

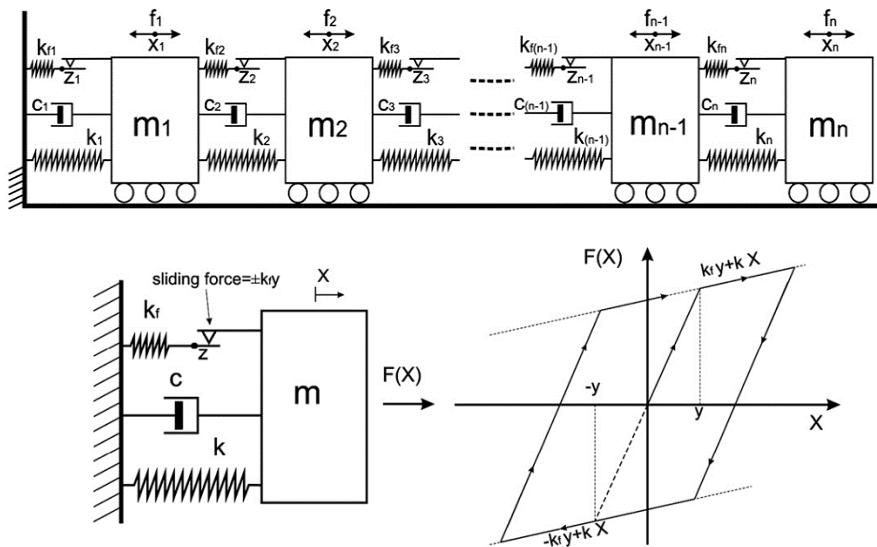
۴-۱. مورد دوم

در این مقاله پاسخ سکوهای فراساحلی جاکت که روی آن وسائل کنترل غیرفعال مانند میراگرهای ویسکوالاستیک،

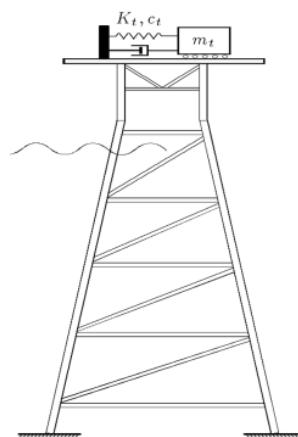
در این مقاله عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم شده و میراگرهای اصطکاکی برای کاهش پاسخ دینامیکی سکوی جاکت تحت ارتعاشات ناشی از امواج مقایسه شده است. به علت تصادفی بودن طبیعت امواج، یک روش تحلیل ارتعاشاتی کامل برای محاسبه پاسخ سازه مجهر به این میراگرهای استفاده شده است. در مطالعاتی برای ارزیابی و مقایسه عملکرد میراگرهای اصطکاکی و جرمی تنظیم شده به عنوان ابزار کنترل غیرفعال برای کاهش خسارت خستگی در سکوی فراساحلی جاکت انجام شده است. اگرچه عملکرد هر دو سیستم اتلاف انرژی برای سکوهای انعطاف‌پذیر به علت اهمیت پاسخ دینامیکی افزایش می‌یابد. میراگر جرمی تنظیم شده بیشتر به پارامترهای دینامیکی

میراگرهای ویسکوالاستیک می‌توانند هم میرایی و هم سختی جانبی به سیستم اضافه کنند؛ بنابراین پارامترهای دینامیکی سیستم را می‌تواند اصلاح کند. این نوع میراگر هم در فرکانس مربوط به فرکانس طبیعی سکو و هم در فرکانس موج برخورده کنترل کند. میراگرهای ویسکوز و اصطکاکی فرکانس طبیعی سکو را اصلاح نمی‌کنند. این میراگرها فقط میرایی اضافی به سکو اضافه می‌کنند تا پاسخ سازه را فقط در فرکانس طبیعی سکو کاهش دهند. در بین این سه نوع میراگر، میراگر ویسکوالاستیک بهینه‌تر است.

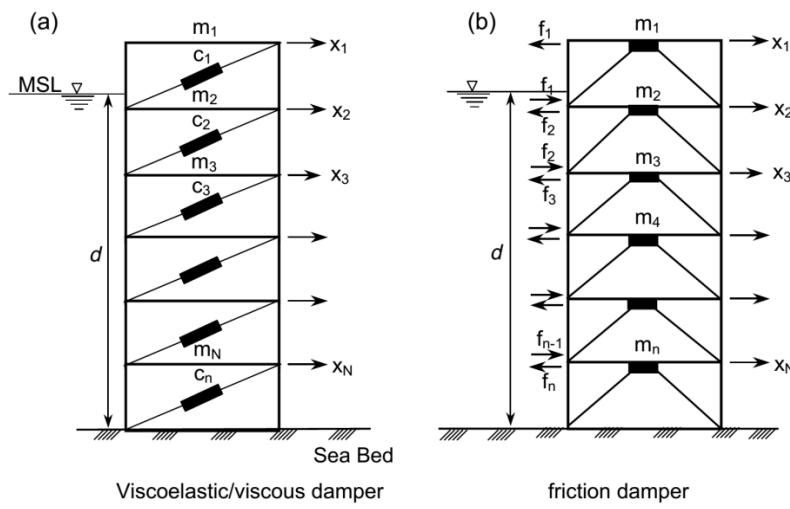
ویسکوز و اصطکاکی قرار گرفته‌اند و تحت بارگذاری امواج قرار دارند مطالعه شده است. موج تصادفی یک‌جهته با استفاده از طیف استاندارد پیرسون مسکوییج تولیدشده است. میراگرها، میرایی و سختی جانبی مکمل به سکو اضافه می‌کنند؛ بنابراین پارامترهای دینامیکی سکو را تغییر می‌دهند. در این مطالعه پاسخ سکو با سه نوع میراگر مذکور مقایسه شده است. نتایج این مطالعه بدین شرح است [۸]. ارتعاشات ناشی از موج برخورده به سکو می‌تواند به صورت مؤثر با استفاده از وسائل استهلاک انرژی مانند میراگرهای ویسکوالاستیک، ویسکوز و اصطکاکی کنترل شود.



شکل ۱۴. نمایی شماتیک از ترکیب مدل دینامیکی جاکت با میراگر اصطکاکی و نمودار هیسترزیس سیستم و میراگر [۲۳]



شکل ۱۵. نمایی شماتیک از ترکیب سکوی جاکت با میراگر جرمی تنظیم شده [۲۳]



شکل ۱۶. نمایی شماتیک از ترکیب سکوی جاکت با میراگر اصطکاکی، ویسکوالاستیک و ویسکوز [۸]

۵. نتیجه‌گیری

سکوهای دریایی که به دو خانواده بزرگ سکوهای ثابت و شناور تقسیم می‌شوند که بهدلیل اعمال بارهای محیطی تحت ارتعاشات قرار دارند. ارتعاشات موجب جابه‌جایی‌هایی در راستاهای مختلف، ایجاد تنش در المان‌های سکوی جاکت و شناور یا تنش و کرنش در تندون‌ها در سکوی پایه کشنشی یا خطوط مهار سکوی اسپار و در نهایت کاهش عمر خستگی می‌شود. بنابراین کنترل ارتعاشات سکوهای دریایی مهم است. در این مقاله بهمروز انواع میراگری اనواع سازوکارهای کنترل، میراگرها و معادلات حاکم بر آنها و

۶. مأخذ

- [1] Soong, T. T., G. F. Dargush, *Passive Energy Dissipation Systems in Structures Engineering*, John Wiley & Sons, 1997.
- [2] Symans, M. D., *Seismic Protective Systems*, Rensselaer Polytechnic Institute.
- [3] Connor, J. J., *Introduction to structural motion control*, Massachusetts of Technology, Pearson Education, New Jersey.
- [4] Weber, F., G. Feltrin, O. Huth, *Guidelines for Structural Control, Structural Engineering Research Laboratory*, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research Dübendorf, Switzerland, 2006.
- [5] Atreya, A., S. Hati, S. Chatterjee, P. V. Vishnu, N. Agrawal, M. Singh, M., *Structural Dampers*, 2013.
- [6] Miyamoto, H. K., R. D. Hanson, *Seismic Dampers. Structural practices*, 2004.

- [7] Vandiver, J. K., S. Dargush, *Effect of Liquid Storage Tanks on the Dynamic Response of Offshore Platform*, Department of Ocean Engineering, MIT.
- [8] Patil, K. C., R. S. Jangid. "Passive control of offshore jacket platforms." *Ocean Engineering* 32 (16), pp. 1933–1949.
- [9] Jingping. O., X. Long, Q. S. Li. "Vibration Control of steel jacket Offshore Structures with Damping Isolation Systems." *Engineering Structures*, 2007.
- [10] Qiao, J., X. Li, N. Sun, J. Guan. "Experimental and Numerical Study on Tuned Liquid Dampers for Controlling earthquake Response of Jacket Offshore Platform." *Marine Structures*, 2007.
- [11] Zhang, L., Q. J. Yue, W. S. Zhang, C. Hsiao. "Experimental study on mitigation of ice-induced vibration for offshore platforms with a tuned mass damper." *Engineering for the Maritime Environment*, 2008.
- [12] Golafshani, A. A., A. Gholizad. "Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platforms." *Journal of Constructional Steel Research*, 2009.
- [13] Ruijian, M., A. Haiting Zhang, Z. Dong. "Study on the anti-vibration devices for a model jacket platform." *Marine Structures*, 2009.
- [14] Komachi, Y., M. R. Tabeshpour, Golafshan. "Retrofit of Ressalat jacket platform (Persian Gulf) using friction damper device." *Physics & Engineering*, 2011.
- [۱۵] جانیازی، حسین، محمدرضا تابشپور. "بررسی چیدمان بهینه میراگر ویسکوز در سکوی ثابت دریایی تحت بارگذاری تصادفی موج در حوزه فرکانس"، شانزدهمین همایش صنایع دریایی، ۱۳۹۳
- [16] BISWAL, K. C., S. K. BHATTACHARYYA., P. K. SINHA. "Free-Vibration Analysis of Liquid-Filled Tank with Bafflese." *Journal of Sound and vibration*, 2003.
- [17] Lee, H. N., S. H. Wong, R. S. Lee. "Response mitigation on the offshore floating platform system with tuned liquid column damper." *Ocean Eng*, 2006.
- [18] Srinivasan Chandrasekaran, Ranjani Ramanathan. Dynamic Response of Tension Leg Platform with Tuned Mass Dampers." *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, 2013.
- [19] Lee, H. N., H. H. Juang. "Experimental study on the vibration mitigation of offshore tension leg platform system with UWTLCD." *Smart Structures and Systems*, 2011.
- [20] Rosane, M., C. RonaMo. "Active/Passive Control of Heave Motion for TLP Type Offshore Platform." International Offshore and Polar Engineering Conference, 1999.
- [21] Wang, H. H. "Optimal Vibration Control for Offshore Structures Subjected to Wave Loading with Input Delay", International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2000.
- [۲۲] تابشپور، محمدرضا، یونس کماچی. "به کارگیری مهاربندهای کمانش‌ناپذیر در اعضای قطری سکوهای دریایی بهمنظور بهسازی آنها"، پنجمین همایش ملی صنایع فراساحل، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۲
- [23] Golafshani, A. A., A. Gholizad. "Passive Devices for Wave Induced Vibration Control in Offshore Steel Jacket Platforms." *SCIENTIA IRANICA*, 2009.

-
- 1. base isolation
 - 2. variable-stiffness brace
 - 3. BRB
 - 4. viscous dampers
 - 5. friction dampers
 - 6. metallic yielding dampers
 - 7. viscoelastic dampers
 - 8. TMD
 - 9. TLD
 - 10. passive control systems
 - 11. active control systems
 - 12. active
 - 13. hybrid control systems
 - 14. semi-active control systems
 - 15. ER
 - 16. MR