

مروری بر کنترل ارتعاشات سازه‌های دریایی

ابراهیم ملایجردی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی دریا

قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی

دانشگاه صنعتی شریف

malayjerdi_ebrahim@mech.sharif.edu

محمد رضا تابش پور*

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک

قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی

دانشگاه صنعتی شریف

tabeshpour@sharif.edu

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۱۳

چکیده

امروزه با افزایش میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی و محدود بودن این انرژی در خشکی، نیاز به استخراج از بستر دریا روزبه‌روز 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 به منظور 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 هم 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 به صورت تفصیلی بیان شده و براساس نوع کنترل غیرفعال و فعال در سکوه‌های ثابت و شناور پژوهش‌های انجام‌شده مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها دو مطالعه موردی که به مقایسه سیستم‌های کنترل غیرفعال در سکوی‌های فراساحلی پرداخته‌اند، بررسی شده است.

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

۱. مقدمه

دارد، در جامدات تحت تأثیر عواملی چون آثار حرارتی، پدیده خستگی و پاشینگر 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 الاستیسیته 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

به صورت ترکیبی از میرایی خارجی ویسکوز، میرایی داخلی ویسکوز، میرایی اصطکاکی، میرایی هیستریزس و میرایی تشعشی می باشد.

میرایی ویسکوز خارجی گونه‌ای از میرایی است که توسط سیالات و شرایط محیطی اطراف یک سازه به وجود می آید. در مقایسه با انواع میرایی بسیار کوچک و در اکثر موارد با تقریب خوبی قابل صرف نظر است. مثلاً میرایی ویسکوز خارجی یک سکوی جاکت در برابر میرایی سازه‌های دریایی اغماض است. میرایی ویسکوز خارجی در سازه‌های دریایی به حرکت سازه شناور، سرعت جریان و سرعت موج وابسته است. میرایی داخلی ویسکوز در اصل خاصیت ویسکوزیته ماده و متناسب با سرعت است، به گونه‌ای که نسبت میرایی متناسب با فرکانس سازه‌ها افزایش می یابد. این نوع میرایی غالباً برای ارائه هر نوع میراگر به کار می رود و معروف ترین نوع میرایی است. میرایی اصطکاکی، که میرایی کولمب نیز نامید می شود، به علت وجود اصطکاک در اتصالات یا نقاط تکیه گاهی پدید می آید. بدون توجه به سرعت و جابه جایی ثابت است و بسته به مقدار جابه جایی به دو نحو با آن برخورد می شود. اگر مقدار جابه جایی ها کوچک باشد به عنوان یک میرایی داخلی و اگر مقدار جابه جایی بزرگ باشد، به عنوان یک میرایی هیستریزس در نظر گرفته می شود. میرایی هیستریزس اما هنگامی اتفاق می افتد که رفتار ماده تحت بار رفت و برگشتی در محدوده الاستیک قرار می گیرد. مساحت چرخه هیستریزس در واقع بیانگر مقدار انرژی اتلاف شده در هر سیکل از بارگذاری است. نوع دیگر میرایی، میرایی تشعشی است. در سازه‌های شناور مانند سکوه‌های پایه کشتی، کشتی‌ها و موج شکن‌های شناور، با نوسان و جابه جایی در سیال سبب تشعشع سیال اطراف آن می شود و میرایی تشعشی به وجود می آید. اتلاف و پراکندگی انرژی که سبب کاهش حرکت سازه در سیال می شود را دمپینگ تشعشی می نامند. مثلاً با حرکت کشتی‌ها در دریا در سینه و پاشنه کشتی امواجی تشکیل می شود و ایجاد میرایی می کند. میرایی تشعشی با مجذور

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

۲. روش‌های کنترل سازه

روش‌های کنترل را می توان به لحاظ نوع سازوکار به صورت زیر طبقه بندی کرد [۳-۴].

۲-۱. روش‌های مبتنی بر تغییر و تنظیم خواص

دینامیکی سیستم

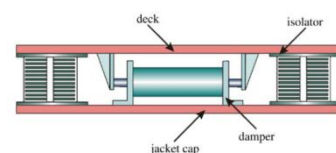
۲-۱-۱. جداسازی پایه^۱

در این روش نصب جداسازها سبب کاهش انرژی ورودی به سازه فوقانی می شود؛ در نتیجه پریود طبیعی ارتعاش سازه افزایش می یابد. بنابراین شتاب طیفی وارده کاهش می یابد و خرابی محتمل در کل سازه به جذب و تمرکز خرابی موضعی در جداساز مبدل می گردد. جداساز لرزه‌ای شامل صفحات تکیه گاهی است که بین سازه و فونداسیون قرار می گیرد. این سیستم از جمله انواع معمول سیستم‌های کنترل غیرفعال است. عملکرد این صفحات، جداسازی لرزه‌ای سازه است که سبب کاهش شتاب کف‌ها و افزایش شکل پذیری و زمان تناوب اصلی سازه می شود. این سیستم انواع گوناگونی دارد که از آن جمله می توان به تکیه گاه‌های الاستیک سربی، لاستیکی فوق میرا، الاستومتریک و اصطکاکی لغزنده اشاره کرد. از مهم ترین نقاط ضعف این سیستم ایجاد امکان واژگونی در تراز تکیه گاه‌هاست، که خود موجب ناپایداری کلی در این سازه‌ها می شود. استفاده از جداسازهای لرزه‌ای بین جاکت و عرشه سبب کاهش ارتعاشات وارد بر عرشه می شود و افزایش طول عمر تجهیزات پرهزینه روی عرشه را در پی دارد؛ همچنین موجب آسایش کارمندان روی عرشه می شود.

۲-۱-۲. سازوکار بادبند با سختی متغیر^۲

در واقع سختی سیستم به طور همزمان به نحو مناسبی تغییر می کند تا ارتعاش سازه به حداقل برسد. سختی سازه با

ایجاد کشش یا آزادسازی کابل‌هایی که به‌عنوان مهاربند در سیستم عمل می‌کنند تغییر می‌کند. از سیستم‌های مهاربندی کمانش‌ناپذیر^۳ برای کنترل و به‌سازی یک سکوی شابلونی فولادی موجود تحت تحریک زلزله استفاده می‌شود. این سیستم به‌عنوان وسیله‌ای برای کنترل لرزهای سازه‌هایی که در مکان‌های لرزه‌خیز قرار گرفته‌اند معرفی خواهد شد. سیستم مهاربندی کمانش‌ناپذیر شامل هسته فولادی شکل‌پذیر است و به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که در کشش و فشار جاری شود. برای جلوگیری از کمانش، نخست هسته فولادی در مقطعی فولادی قرار می‌گیرد؛ سپس داخل مقطع بیرونی با استفاده از بتن پر می‌شود. قبل از این کار، به‌منظور کمینه‌کردن 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 به‌کار می‌رود [۲۲].



شکل ۱. سیستم جداساز نصب‌شده بین جاکت و عرشه سکوی [۹]

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 کمک‌فناهای معمولی است و شامل سیلندری فلزی است که درون آن با سیالی چون نفت یا سیلیکون پر شده است. حرکت پیستون سوراخ‌دار داخل سیلندر موجب حرکت سیال می‌شود و استهلاك انرژی را به‌همراه 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 کمی در برابر جابه‌جایی مقاومت می‌کند، 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 به‌صورت معادله ۱ می‌باشد [۴].

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

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 به‌طور کامل خطی در نظر گرفته شوند. مقدار کار مستهلک‌شده در هر فاصله زمانی به‌صورت رابطه ۳ بیان می‌شود:

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

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

$$(4)$$

نیروی میراگر برای میرایی ویسکوز غیرخطی برابر است با:

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

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

۲-۲-۲. میراگرهای اصطکاکی^۵

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

$$f_d = k_d |x| (-\operatorname{sgn}(\dot{x})) \quad (۶)$$

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

$$w = 4 \left(\frac{k_d x_{\max}^2}{2} \right) = 2k_d x_{\max}^2 \quad (۷)$$

۳-۲-۲. میراگرهای تسلیم‌شونده فلزی^۶

ثابت شده است طراحی سازه‌ها به‌صورتی که برای مقابله با تحریک‌های شدید رفتار کاملاً الاستیک داشته باشند، از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه نیست. میراگرهای فلزی به‌علت سختی الاستیک نسبتاً زیاد، شکل‌پذیری 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 ۷ حالت‌های گوناگون میرایی هیستریزس نمایش داده شده است. انرژی مستهلک‌شده در هر سیکل برای مواد الاستوپلاستیک به‌صورت ۸ بیان می‌شود [۴].

$$\begin{aligned} w &= 4f_y (x_{\max} - x_y) \\ w &= 4(k_y x_x)(x_{\max} - x_y) \\ w &= 4k_y x_y^2 (\mu - 1) \end{aligned} \quad (۸)$$

به‌طوری 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 به‌صورت معادله ۹ بیان می‌شود:

$$\mu = \frac{x_{\max}}{x_y} \quad (۹)$$

برای یک میراگر متالیک نیروی میراگر برابر است با:

$$f_d = \left(\frac{NEw_0 h^3}{6L^3} \right) x \quad (۱۰)$$

به‌طوری که در این رابطه N تعداد ورق‌های مثلی است که به‌صورت موازی قرار گرفته‌اند؛ همچنین x جابه‌جایی میراگر، h هر ورق، L و w_0 طول و عرض می‌باشد.

۴-۲-۲. میراگرهای ویسکوالاستیک^۷

در این روش مشابه میراگرهای لزج از مواد ویسکوالاستیک بین لایه‌های فلزی استفاده 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 وسکوز و سختی قطعات است [۴].

$$f_d = k_d x - c_d \dot{x} \quad (۱۱)$$

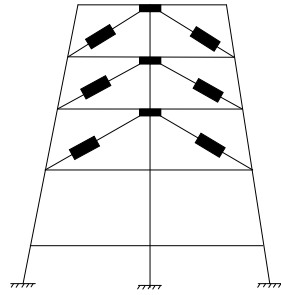
سختی قطعات درون میراگر باعث می‌شود نمودار نیرو - جابه‌جایی بیضی‌شکل و شیب متوسط آن سختی k_d میراگر باشد. همچنین نمودار نیرو به‌سرعت منحنی بیضی را تشکیل می‌دهد و شیب متوسط آن لزجت میراگر c_d می‌باشد.

۳-۲-۳. روش‌های مبتنی بر تغییر و تنظیم جرم

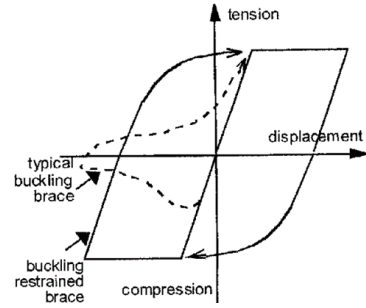
میراگرهای دینامیکی در این بخش می‌گنجند. میراگر جرم هماهنگ‌شده^۸ و میراگرهای مایع هماهنگ‌شده^۹ نمونه‌هایی هستند که در آنها جابه‌جایی جرمی هماهنگ‌شده با سازه اصلی سبب کنترل ارتعاشات می‌شود.

۱-۳-۲. میراگر جرمی متوازن شونده

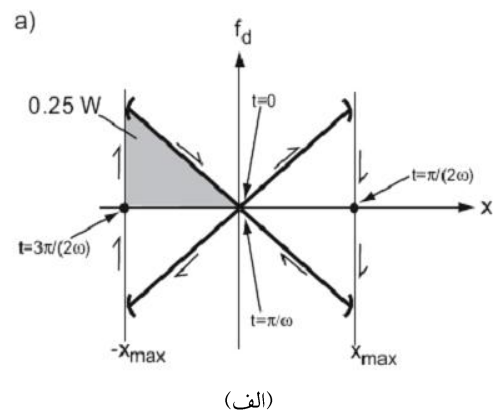
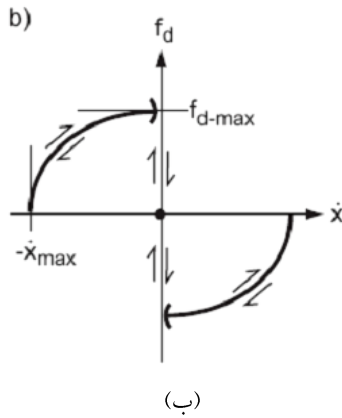
میراگر جرمی تنظیم‌شونده در ساده‌ترین حالت شامل جرم، فنر و میراگر است و معمولاً در بالاترین تراز سازه یا در محلی که بیشترین تغییر مکان رخ می‌دهد، نصب می‌شود تا پاسخ‌های سازه را تحت بارهای جانبی کاهش دهد.



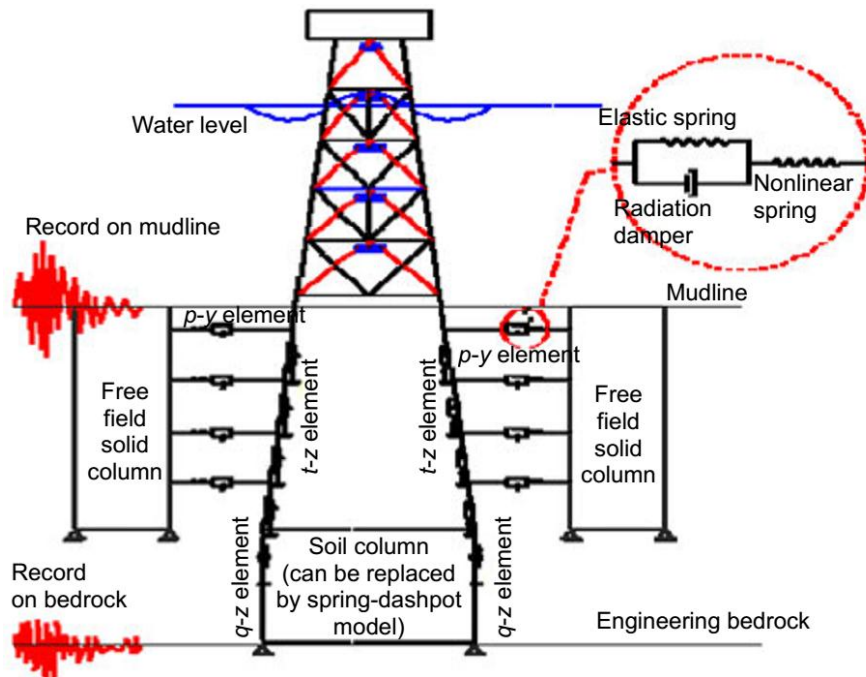
شکل ۳. سکوی جاکت مجهز به میراگر ویسکوز [۱۵]



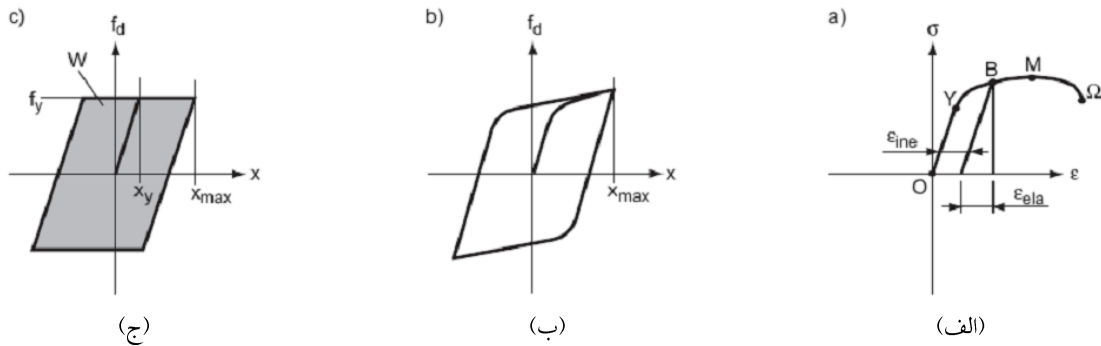
شکل ۲. رفتار مهاربندهای معمولی بر حسب BRB [۲۲]



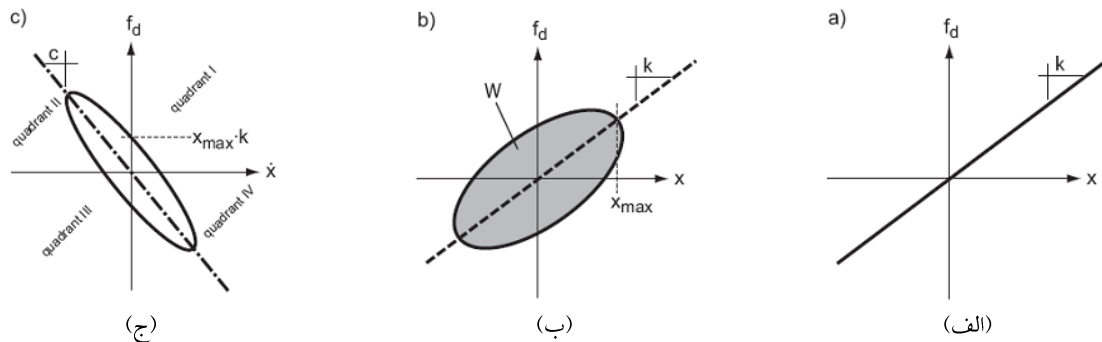
شکل ۴. نمودار نیرو به جابه‌جایی و نیرو به سرعت برای میراگر اصطکاکی [۴]



شکل ۵. سکوی جاکت مجهز به میراگر اصطکاکی [۱۴]

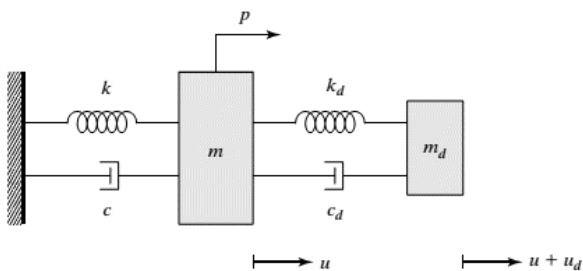


شکل ۶. نمایی از الف) نمودار تنش - کرنش اغلب مواد، ب) رفتار میراگر هیستریزس واقعی، ج) رفتار میراگر هیستریزس ایده آل [۴]



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

به طوری که در این روابط ω_d و ξ_d به ترتیب 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

با فرض اینکه سیستم تحت تأثیر نیروی خارجی قرار بگیرد، معادلات حاکم بر حرکت سیستم به صورت زیر خواهد بود:

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

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

نحوه طراحی این سیستم به گونه‌ای است که فرکانس طبیعی ارتعاش آن با فرکانس ارتعاشی سازه تنظیم می‌شود و با اختلاف فازی نسبت به ارتعاش سازه که باعث می‌شود پاسخ‌های سازه را در حالت رزونانس 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]:

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

۲-۳-۲. میراگر سیالی متوازن شونده

این میراگر در واقع نوعی از میراگر جرمی متوازن شونده است که در آن از حرکت سیال درون تانک برای استهلاک انرژی استفاده می‌شود. این میراگر شامل سیال و مخزنی نیمه پر است که همانند میراگر جرمی به صورت غیرمستقیم باعث میرایی سیستم می‌شود و پاسخ‌های سازه را کاهش می‌دهد. اتلاف انرژی توسط میراگر سیالی متوازن شونده به کمک سازوکارهایی چون عملکرد ویسکوز سیال، تداخل امواج ایجاد شده در سطح سیال و نهایتاً هندسه مخزن و میزان زبری 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]:

$$\rho_d A_d L_d \ddot{H} + 0.5 \rho_d A_d h_d \left| \dot{H} \right| \dot{H} + \quad (18)$$

$$2 \rho_d A_d H = -\rho_d A_d B_d \ddot{X}$$

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 دانسیته 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 مجهز شده 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 کنترل

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

۲-۴-۱. سیستم‌های کنترل انفعالی^{۱۰}

در این روش‌ها عامل کنترل‌کننده 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 تغییر سختی، پرپود، 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 به همین دلیل اصطلاحاً فعال^{۱۲} نامیده می‌شوند.

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

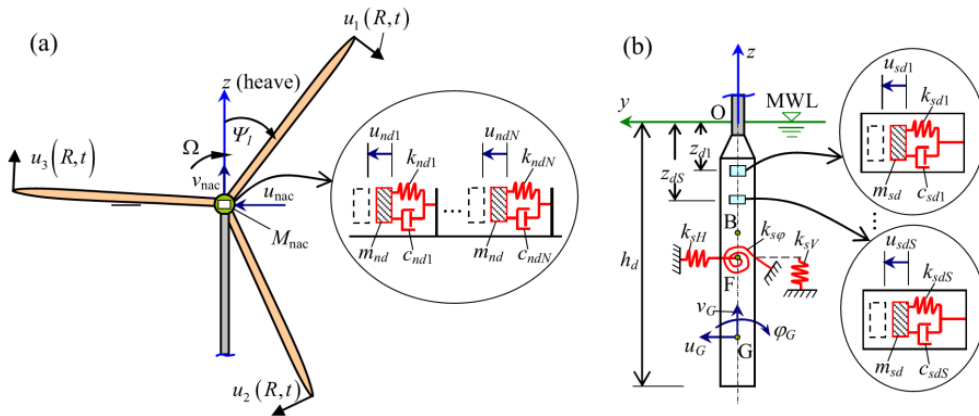
این روش شامل دو سیستم کنترل فعال و انفعالی توأم است که در ابتدای تحریک کاهش ارتعاشات سازه توسط سیستم انفعالی صورت گرفته و سپس در صورت نیاز سیستم فعال نیز وارد عمل می‌شود. در اینجا سیستم انفعالی ممکن است به فعالیت خود ادامه داده و یا در صورت عدم نیاز به آن از دور خارج شود. مقایسه نتایج نشان‌دهنده عملکرد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

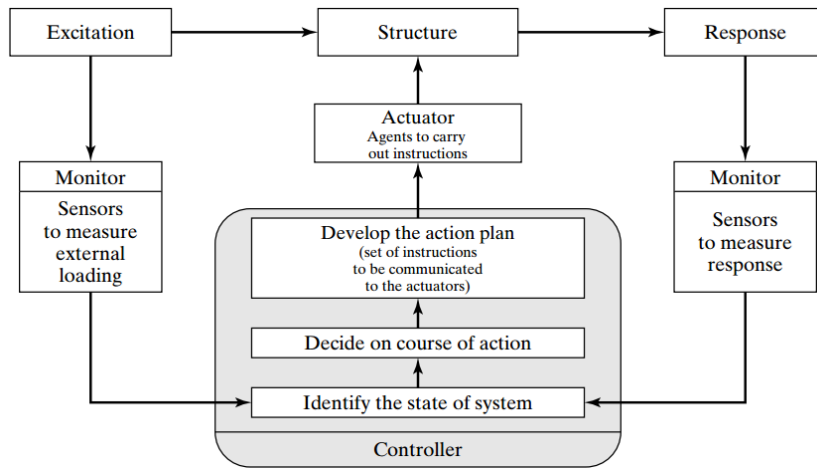
براساس تعاریف ابزارهای کنترل نیمه‌فعال انرژی را به سازه تزریق نمی‌کنند، بلکه خصوصیتی دارند که با کنترل آنها می‌توان پاسخ سازه را کاهش داد. مقایسه عملکرد سیستم‌های کنترل فعال و غیرفعال سبب پیدایش سیستم کنترل جدیدی تحت عنوان نیمه‌فعال شده است. وسائل کنترل نیمه‌فعال خواصی دارند که در هر لحظه قابل تنظیم

متغیر، ابزارهای اصطکاکی قابل کنترل، میراگرهای مایع سازش یافته قابل کنترل، میراگرهای مایع قابل کنترل مانند میراگرهای ایبی. آر.^{۱۵} و ام. آر.^{۱۶} و میراگر جرمی وفق یافته، میراگرهای مایع ویسکوز قابل کنترل.

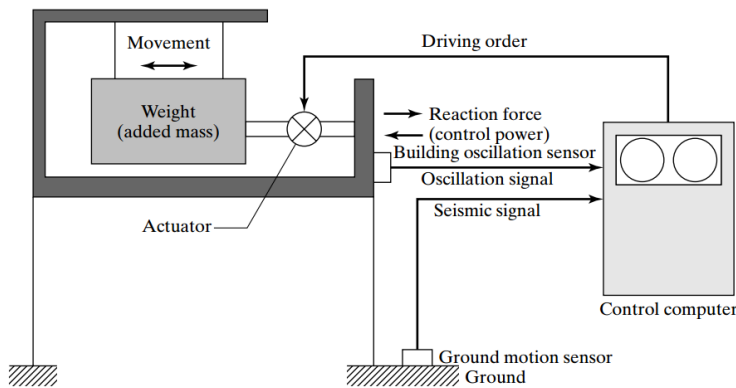
است، اما قادر به اعمال انرژی به سازه کنترل شده نیستند. بلکه از پاسخ سازه جهت اعمال نیروی کنترلی در جهت مخالف پاسخ استفاده می شود. نمونه هایی از این سیستم ها که عبارتند از: ابزار با سختی قابل کنترل مانند میراگر روزنه



شکل ۹. میراگر جرمی روی جاکت و توربین بادی شناور



شکل ۱۰. الگوریتم کنترل فعال



شکل ۱۱. میراگر جرمی فعال

به طوری که c_0 ثابت میراگر، f_c نیروی اصطکاکی که وابسته به تنش تسلیم است و f_0 نیروی جبرانی متوسط غیرصفر که به علت حضور انبار مشاهده می شود.

۳. مطالعات کتابخانه‌ای

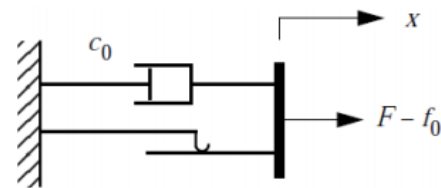
در جدول‌های ۱ تا ۳ مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده به اجمال مرور شده است.

مدل‌های ریاضی متنوعی برای میراگر ام. 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 تولید شده 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 ۱۳. نصب میراگر ام. آر. در سکوی جاکت



شکل ۱۲. مدل بینگهام برای دمپ‌های با سیال قابل کنترل

جدول ۱. کنترل غیرفعال ارتعاشات سکوی ثابت

| نویسنده | نوع میراگر | تحلیل | نتایج |
|------------------------------|--------------------------------|---|---|
| واندیویر و میتونه (۱۹۹۸) [۷] | مایع تنظیم شده | واندیویر و میتونه از نخستین محققانی هستند که درباره کنترل ارتعاشات سکوی دریایی کار و تأثیر مخازن نگهداری سیال در پاسخ دینامیکی سکوی 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 بسیار کم افزایش یابد. با انتخاب درست هندسه مخازن، پاسخ سکوی را می‌توان کاهش داد |
| پاتیل و جانگید (۲۰۰۵) [۸] | ویسکوالاستیک، ویسکوز و اصطکاکی | 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 سکوی تحت تحریک از بالا و پایه را دارد. در بین سه میراگر، میراگر ویسکوالاستیک بهترین جابه‌جایی سکوی را در تراز مختلف را دارد |
| جین پینگ (۲۰۰۷) [۹] | سیستم جداساز لرزه‌ای | به موضوع کنترل ارتعاشات سکوی جاکت با سیستم جداساز لرزه‌ای پرداخت. او در ابتدا یک سیستم جداساز لرزه‌ای متشکل 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 عرشه قرار می‌گیرد. چون سیستم جداساز لرزه‌ای سختی جانبی کمی فراهم می‌کند، به همین دلیل سازه جدا شده عمدتاً در تراز اتصال سیستم دچار تغییر شکل می‌شود. میراگرهای ویسکوز قرار گرفته شده است در سیستم باعث اتلاف انرژی ارتعاشات و کاهش پاسخ دینامیکی می‌شود که برخلاف فناوری سیستم‌های جدا ساز لرزه‌ای مرسوم است |
| جین و همکاران (۲۰۰۷) [۱۰] | مخزن مایع استوانه‌ای | جین و همکاران عملکرد میراگر مخزن مایع استوانه‌ای را تحت بار زلزله بررسی کرده‌اند. در این مطالعه فرکانس میراگر طوری تنظیم می‌شود که به فرکانس طبیعی سازه و فرکانس حرکت زمین نزدیک باشد | چون محتوای فرکانسی حرکت زمین بسیار 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 سکوه‌های ثابت (ادامه)

| نویسنده | نوع میراگر | تحلیل | نتایج |
|-----------------------------------|-------------------|--|--|
| یو و همکاران (۲۰۰۸) [۱۱] | جرمی تنظیم‌شده | یو و همکاران میراگری جرمی پیشنهاد کردند که می‌تواند ارتعاشات ناشی از بار یخ را در سکو کاهش دهد | در مقایسه با بقیه میراگرها، یک میراگر جرمی می‌تواند انتخابی بهینه باشد؛ زیرا وقتی فرکانس طبیعی سکو نزدیک یا منطبق با فرکانس غالب نیروی هارمونیک بار یخ می‌باشد، ارتعاشات کاهش می‌یابد |
| گل افشانی (۲۰۰۹) [۱۲] | اصطکاکی | در این پژوهش به ارزیابی عملکرد سکو با افزودن میراگر هیستریزس 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 هیستریزس را در نظر بگیرد، همچنین در مقاله کاهش خرابی 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 هیستریزس در حالت بهینه سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در واریانس جابه‌جایی و سرعت عرشه می‌شود. مقادیر بهینه پارامترهای قابل تنظیم میراگر به شرایط دریایی وابسته‌اند و عملکرد میراگر می‌تواند برای هر شرایط دریایی افزایش یابد |
| روجیانما (۲۰۰۹) [۱۳] | جرمی تنظیم‌شده | در این پژوهش روجیان به کنترل ارتعاشات سکوی جاکت با میراگر جرمی تنظیم‌شده 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 می‌دهد که محدوده‌ای از پارامترهای بهینه مانند نسبت فرکانس‌ها، نسبت جرم‌ها، نسبت میرایی برای بهبود عملکرد میراگر وجود دارد. شبیه‌سازی سیستم نشان می‌دهد که آثار کنترل زمانی رضایت‌بخش می‌باشد که مقادیر پارامترهای میراگر در محدوده بهینه خود باشد |
| کماچی و تابش‌پور (۲۰۱۱) [۱۴] | اصطکاکی | 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 بوش‌آور نمایش می‌دهد که استفاده از میراگر اصطکاکی جابه‌جایی را کاهش می‌دهد و همچنین کاهش اتفاقی سکوی جاکت زمانی که میراگر نصب می‌شود اتفاق نمی‌افتد. بنابراین به علت افزونگی کم سکو جاکت به کارگیری سیستم میراگر اصطکاکی مفید است |
| جانبازی و تابش‌پور (۲۰۱۱) [۱۵] | ویسکوز | بررسی چیدمان بهینه میراگر ویسکوز در سکوی ثابت دریایی تحت بارگذاری تصادفی موج در حوزه فرکانس | مطابق طیف پاسخ می‌توان نتیجه گرفت با افزودن میراگر، میزان تغییرات پیک اول نمودار که مربوط به نیروی تحریک می‌باشد تغییر چندانی نمی‌کند. وجود میراگر پاسخ سازه مربوط به نیروی موج را چندان تحت تاثیر قرار نمی‌دهد و عموماً باعث کاهش پیک دوم نمودار مربوط به فرکانس می‌باشد، می‌گردد |

جدول ۲. کنترل غیرفعال ارتعاشات سکوه‌های شناور

| نویسنده | نوع میراگر | تحلیل | نتایج |
|--------------------------------------|----------------|---|---|
| شین کولول و بیس واجیت (۲۰۰۷) [۱۶] | مایع تنظیم‌شده | تحلیل دینامیکی توربین‌های بادی دریایی با میراگر ستون مایع متوازن شبیه‌سازی شده است | وقتی توربین بادی با TLCD تجهیز می‌شود، پاسخ تا ۵۵ درصد کاهش پیدا می‌کند. اجرای یک میراگر مانند TLCD در توربین بادی تا حد زیادی باعث افزایش عمر خستگی می‌شود |
| لی (۲۰۰۶) [۱۷] | مایع تنظیم‌شده | یک نوع سکوی پایه‌کشتی شناور همراه با مایع میراگر متوازن ستونی مطالعه شده است. هدف یافتن ابزاری مؤثر و اقتصادی به منظور کاهش ارتعاشات ناشی از موج در سکوه‌های دریایی شناور است | با توجه به نتایج تحلیلی انرژی تلف شده از دستگاه TLCD 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 پانتون در مورد مطالعه می‌باشد |

جدول ۲. کنترل غیرفعال ارتعاشات سکوه‌های شناور (ادامه)

| نویسنده | نوع میراگر | تحلیل | نتایج |
|------------------------|----------------|---|---|
| چاند رسکان [۲۰۱۳] [۱۸] | جرمی تنظیم‌شده | 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 شده است | سیستم‌های کنترل غیرفعال مانند میراگر جرمی زمانی که شرایط دریایی وخیم نمی‌باشد مؤثر نمی‌باشند و در شرایط دریایی نرمال سکو به‌علت جذب انرژی توسط خودش آن‌چنان حرکتی ندارد |
| لی [۲۰۱۲] [۱۹] | مابع تنظیم‌شده | در این مقاله یک سکوی پایه‌کششی که میراگر مابع تنظیم‌شده 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 پانتون زیرآب ترکیب می‌گردد | مطابق با تست‌های انجام شده، در حالتی 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 پیوندهای امواج بالا کاهش دامنه پاسخ قابل ملاحظه‌تر است و همچنین اتفاقی برای امواج با ارتفاع‌های زیاد صورت می‌گیرد |

جدول ۳. کنترل فعال ارتعاشات سکوه‌های فراساحلی

| نویسنده | تحلیل | نتایج |
|-------------------------|---|---|
| رزون [۱۹۹۹] [۲۰] | این مقاله به کنترل فعال و غیر فعال سکوه‌های پایه‌کششی پرداخته است | کنترل فعال منجر به بیشترین کاهش دامنه جابه‌جایی 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 ونگ [۲۰۰۹] [۲۱] | کنترل ارتعاش بهینه از یک سکوی دریایی 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 تأخیر 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

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

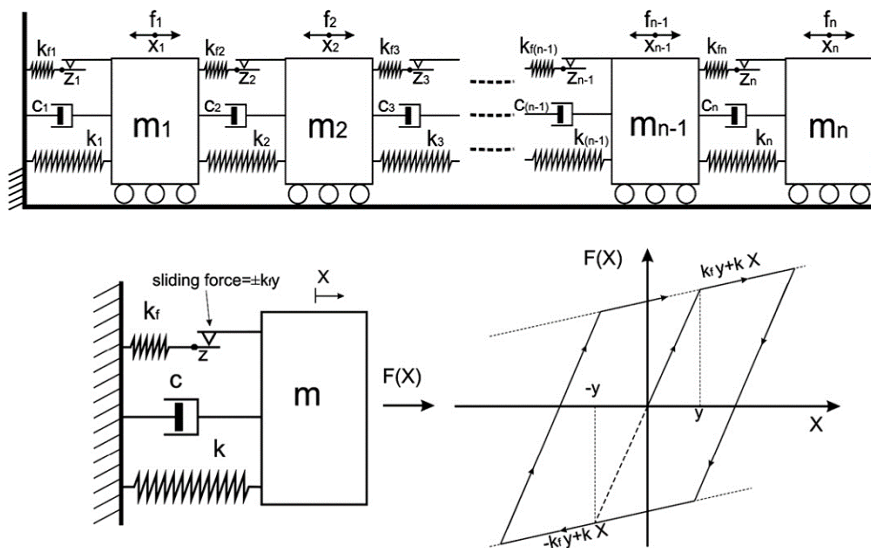
سکو وابسته است و میراگر اصطکاکی برای بیشتر مؤثر به‌نظر می‌رسد. مقادیر بهینه برای پارامترهای تنظیم‌شونده میراگر جرمی بسیار به شرایط دریا که با پارامترهای پیروید موج غالب و ارتفاع موج شاخص تعریف می‌شوند، وابسته می‌باشند و با استفاده از نسبت تنظیم‌شونده بهینه برای هر حالت دریایی موجب افزایش قابل ملاحظه 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 سکوه‌های فراساحلی می‌شود [۲۳].

۴-۱. مورد دوم

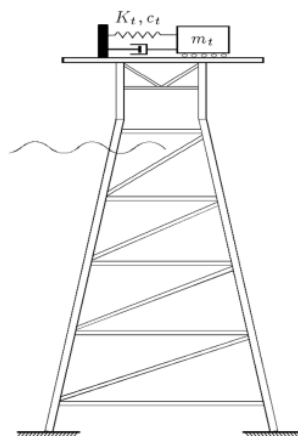
در این مقاله پاسخ سکوه‌های فراساحلی جاکت که روی آن وسایل کنترل غیرفعال مانند میراگرهای ویسکوالاستیک،

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 برخوردی 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.

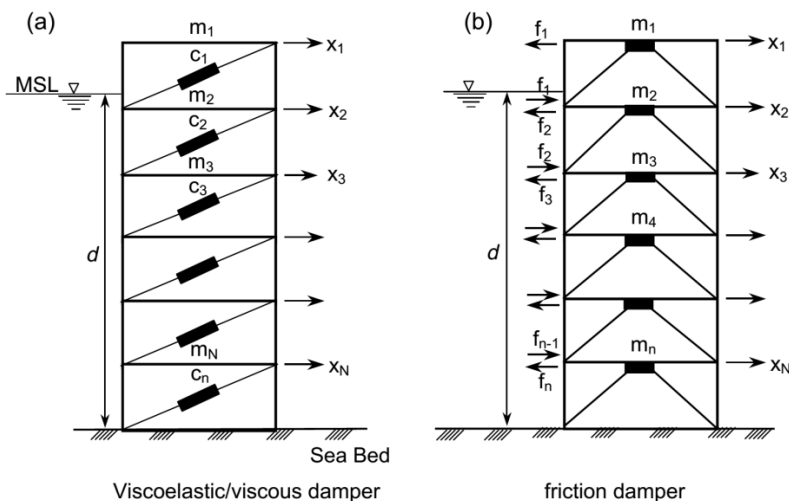
ویسکوز و اصطکاکی قرار گرفته‌اند و تحت بارگذاری امواج قرار دارند مطالعه شده است. موج تصادفی یک‌جهته با استفاده از طیف استاندارد پیرسون مسکوویچ تولید شده است. میراگرها، میرایی و سختی جانبی مکمل به سکو اضافه می‌کنند؛ بنابراین پارامترهای دینامیکی سکو را تغییر می‌دهند. در این مطالعه پاسخ سکو با سه نوع میراگر مذکور مقایسه شده است. نتایج این مطالعه بدین شرح است [۸]. ارتعاشات ناشی از موج برخوردی 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 هیستریزس سیستم و میراگر [۲۳]



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



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

۵. نتیجه‌گیری

بهمرور مقالات و پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه کنترل ارتعاشات سازه‌های دریایی پرداخته شده است. در انتها دو مطالعه موردی که به کنترل غیرفعال ارتعاشات سکوی جاکت پرداخته‌اند بررسی شده است. در مطالعه موردی نخست به مقایسه دو نوع میراگر اصطکاکی و جرمی تنظیم‌شونده، که روی سکوی جاکت نصب شده است، پرداخته شده است؛ در مطالعه موردی دوم اما ترکیب سکوی جاکت با میراگرهای اصطکاکی، ویسکوز و ویسکوالاستیک بررسی و مقایسه شده است.

سکوهای دریایی که به دو خانواده بزرگ سکوهای ثابت و شناور تقسیم می‌شوند که به دلیل 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 کششی یا خطوط مهار سکوی اسپار و در نهایت کاهش عمر خستگی می‌شود. بنابراین کنترل ارتعاشات سکوهای دریایی مهم است. در این مقاله به‌مرور انواع میرایی انواع 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*, Renssler 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] Rujian, 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 Resselat jacket platform (Persian Gulf) using friction damper device." *Physics & Engineering*, 2011.
- [۱۵] جانبازی، حسین، محمدرضا تابش پور. "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 Baffle." *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] تابش پور، محمدرضا، یونس کماچی. "به کارگیری مهاربندهای کماتش ناپذیر در اعضای قطری سکوه‌های دریایی به منظور 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