

کنترل بهینه‌ی سکوی شابلونی تحت ارتعاش‌های امواج دریا با میراگر جرمی هماهنگ شده‌ی فعال

مازیا فهدیمی فوزام* (استادیار)

سید علی موسوی گاؤگانی (کارشناس ارشد)

بابک علی نژاد (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه مراغه

گابریل بکتاش (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه استانبول، ترکیه

سکوهای دریایی از سازه‌های حیاتی کشورهای نفت خیز محسوب می‌شوند، که معمولاً تحت تأثیر بارهای دینامیکی شدید امواج دریا قرار دارند. بنابراین کنترل ارتعاش‌های سکوهای دریایی برای افزایش بهره‌وری و جلوگیری از خرابی زودرس احتمالی ناشی از خستگی، اهمیت خاصی دارد. در مطالعه‌ی حاضر، به ارزیابی رفتار سکوی نفتی رسالت واقع در خلیج فارس تحت ارتعاش‌های ناشی از دو موج با دوره‌های بازگشت ۵° و ۱۰° سال پرداخته شده و سپس به منظور کنترل آن از میراگرهای جرمی هماهنگ شده‌ی غیرفعال و فعال استفاده شده است. برای محاسبه‌ی نیروی کنترل از الگوریتم هوشمند فازی و برای بهینه‌یابی توان عملگر از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده شده است. همچنین اندرکنش بین سازه و سیال، جرم افزوده و اشباع عملگر در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب سیستم کنترلی پیشنهادی است، که مقادیر بیشینه و نرم شتاب عرشه‌ی سکو را به ترتیب به مقادیر ۲° و ۵° درصد در طول زمان کاهش داده است.

واژگان کلیدی: سکوی شابلونی، میراگر جرمی هماهنگ شده، الگوریتم جستجوی هارمونی، اندرکنش بین سازه و سیال.

۱. مقدمه

سکوهای شابلونی از نوع سکوهایی با پایه‌ی ثابت هستند، که معمولاً در آب‌های با عمق کمتر از ۱۰۰ متر استفاده می‌شوند.^[۱] سکوهای شابلونی از سال ۱۸۹۰ به صورت گسترده‌ی برای اکتشاف منابع طبیعی استفاده شده‌اند و عمر مفید آن‌ها در حدود ۲۵ سال بوده است.^[۲] سازه‌های مذکور در طول عمر مفید خود در معرض بارهای محیطی مختلفی، مانند: موج دریا، باد، یخ، جریان دریایی و زلزله قرار دارند.^[۳] بارهای محیطی، ماهیت دینامیکی دارند و می‌توانند علاوه بر تأثیری منفی در روند بهره‌برداری از سکو، خرابی اجزاء سازه‌ی را نیز به همراه داشته باشند.^[۴]

از بین نیروهای دینامیکی ذکر شده، نیروی امواج و ارتعاش‌های ناشی از آن، نقش مؤثری در عملکرد و عمر سکو ایفا می‌کنند. همچنین در مناطق نه چندان

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۲/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۹/۶/۲، پذیرش ۱۳۹۹/۷/۵.

DOI:10.24200/J30.2020.55849.2784

زلزله‌خیز خلیج فارس، بار غالب جهت طراحی سکوها، نیروی موج است و اکنون صدها سکوی ثابت دریایی از نوع شابلونی در خلیج فارس موجود است.^[۵] با توجه به سختی کم سکوهای شابلونی و جرم قابل توجه عرشه در آن‌ها، کاهش میزان ارتعاش‌ها، نقش مهمی در عملکرد مناسب آن‌ها ایفا می‌کند. کاهش ۱۵ درصدی دامنه‌ی ارتعاش یک سکو می‌تواند منجر به افزایش دو برابری عمر خدمت‌رسانی سکو و کاهش هزینه‌های تعمیر، نگهداری و بازرسی شود.^[۶] یکی از ایده‌های مناسب برای کاهش ارتعاش‌های سازه‌ها، استفاده از روش‌های کنترل است. روش‌های کنترل سازه به صورت کلی به ۴ دسته‌ی: غیرفعال، فعال، نیمه فعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند.^[۷]

کنترل غیرفعال یکی از توسعه یافته‌ترین روش‌های کنترل است، که اولین بار توسط جان میلن^[۸] و بیش از ۱۲۰ سال پیش معرفی شد.^[۸] در سال ۱۹۷۹، برای اولین بار تأثیر ابزارهای کنترلی اشاره شده در کاهش ارتعاش‌های سکوی نفتی مطالعه شده است.^[۹] پژوهش‌گران از ابزارهای مختلفی برای کنترل غیرفعال سکوها

Archive of SID

بارهای دینامیکی، مواردی مانند: اشباع عملگر،^{۱۸} اثر سرریز^{۱۹} نیروی کنترل، امکان اجرای تعداد محدود حس‌گرها و کنترل‌کننده‌ها، ایجاد نویزهای تصادفی در حس‌گرها، تأخیر زمانی،^{۲۰} احتمال ناپایداری سازه در اثر اعمال نیروی مستقیم به سازه، نیاز به منبع انرژی بیشتر و پر هزینه بودن از مشکلات اجرایی سیستم کنترل فعال است.

بنابراین، ایده‌ی استفاده از کنترل نیمه‌فعال برای کاهش ارتعاش‌های سکوها نفتی، اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط لی^{۲۱} و همکاران با استفاده از میراگر سیال مغناطیسی (MR)^{۲۲} بررسی شد.^[۲۷] در ارتباط با سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال، تقریباً بیشتر مشکلات سیستم فعال به جز نیاز به منبع انرژی بیشتر و احتمال ناپایداری وجود دارد. همچنین سیستم‌های نیمه‌فعال به صورت غیرمستقیم و با تغییر میرایی یا سختی منجر به کنترل سازه می‌شوند، لذا عملگرهای کنترل نیمه‌فعال (میراگرهای سیال مغناطیسی، میراگر جرمی هماهنگ شده‌ی نیمه‌فعال و غیره) طبیعتی غیرخطی و هیستریزس دارند و به همین دلیل طراحی و حتی اجرای مناسب چنین سیستم کنترلی نیز در واقعیت بسیار مشکل است.^[۲۸] لذا در طول سال‌های اخیر، پژوهش‌های موازی و گسترده‌ی در مورد کنترل‌های غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال صورت گرفته است، که هدف از آن‌ها بررسی عملکرد روش‌های کنترلی ذکر شده تحت بارهای دینامیکی مختلف و بهبود عملکرد آن‌ها بوده است.

در چند سال اخیر نیز مطالعات بسیاری در خصوص انواع روش‌های کنترل سکوها انجام شده است. وو^{۲۳} و همکاران (۲۰۱۶) به صورت تجربی به بررسی عملکرد میراگر جرمی هماهنگ شده پرداختند و با مطالعه‌ی عملکرد لرزه‌ی یک سکوی نفتی ۴ ستونه دریافتند که میراگر جرمی هماهنگ شده قادر به میرا ساختن ارتعاش‌هاست و می‌تواند پایداری سکوی را تضمین کند.^[۲۹] همچنین ایشان در پژوهش دیگری به این نتیجه رسیدند که میراگر جرمی هماهنگ شده قادر به کاهش جابه‌جایی، شتاب و چگالی طیفی توان^{۲۴} پاسخ‌ها نیز است.^[۳۰] همچنین کاظمی (۲۰۱۷)، کنترل‌کننده‌ی برای پایدار نگه داشتن سکوی در برابر عدم قطعیت‌ها ارائه کرده است.^[۳۱] انفرادی و همکاران (۲۰۱۹) نیز به کنترل ارتعاش‌های سکوی تحت بار موج و با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار (SMA)^{۲۵} پرداختند.^[۱۷] همچنین قاسمی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار اقدام به تغییر مناسب پارامترهای میراگر جرمی هماهنگ شده برای کنترل ارتعاش‌های سکوها کردند.^[۳۲] در ادامه، حکم‌آبادی و همکاران (۲۰۱۹)، میراگر جدیدی با عنوان MR-TLCGD^{۲۶} ارائه کردند.^[۳۳] ما^{۲۷} و همکاران (۲۰۱۹)، نیز یک کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین تحت تأخیر زمانی تصادفی، حذف بسته^{۲۸} و بی‌نظمی^{۲۹} ارائه کردند، که در مقایسه با کنترل‌کننده‌های مختلف می‌تواند نوسان‌های سکوی دریایی را به طور قابل توجهی کاهش دهد.^[۳۴]

در پژوهش حاضر، به بررسی رفتار سکوی نفتی رسالت واقع در خلیج فارس تحت ارتعاش‌های ناشی از امواج دریا پرداخته شده است. برای کاهش ارتعاش‌های مذکور نیز از میراگر جرمی هماهنگ شده به صورت غیرفعال و فعال استفاده شده است. در کنترل فعال از الگوریتم کنترل فازی برای محاسبه‌ی نیروی کنترل و از الگوریتم جستجوی هارمونی برای بهینه‌یابی توان عملگر استفاده شده است. از نکات بارز در پژوهش حاضر، می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱. پژوهش حاضر، جزء اولین پژوهش‌ها در خصوص استفاده از الگوریتم فازی برای کنترل فعال سکوها نفتی است. ۲. اثر اشباع عملگر به عنوان یکی از مشکلات اجرایی مهم سیستم‌های کنترل فعال در نظر گرفته شده است. ۳. اثر جرم افزوده ناشی از ارتعاش سکوی درون سیال محاسبه شده است. ۴. اندرکنش بین سیال و سکوی واقعی‌تر شدن نتایج لحاظ شده است. ۵. از روشی جدید برای بارگذاری سکوی تحت نیروی امواج استفاده شده است.

استفاده کردند، که از آن جمله می‌توان به استفاده از میراگر ویسکوکشسان توسط لی^۲ (۱۹۹۷)،^[۱۰] میراگر ویسکوز توسط دینگ^۳ (۲۰۰۱)،^[۱۱] میراگر اصطکاکی توسط پاتیل و جانگید^۴ (۲۰۰۵)،^[۱۲] و جداساز توسط آوو^۵ و همکاران (۲۰۰۷)،^[۶] اشاره کرد.

یکی از توسعه یافته‌ترین ابزارهای کنترل غیرفعال، میراگر جرمی هماهنگ شده است. مطالعات گسترده‌ی در خصوص کنترل ارتعاش‌های سکوها دریایی با استفاده از میراگر جرمی هماهنگ شده انجام شده است. وانگ^۶ (۲۰۰۲)، ائتلاف انرژی سکوی نفتی همراه با میراگر جرمی هماهنگ شده را بررسی و یک طرح بهینه از میراگر جرمی هماهنگ شده ارائه کرد.^[۱۳] یو^۷ و همکاران (۲۰۰۹)، نیز به مطالعه‌ی تأثیر میراگر جرمی در کاهش ارتعاش‌های سکوها تحت بار یخ پرداختند و به عملکرد مناسب میراگر جرمی تحت نیروی یخ و بار باد اشاره کردند.^[۱۴] ما^۸ و همکاران (۲۰۱۰) نیز سیستم جدیدی بر پایه‌ی میراگر جرمی هماهنگ شده برای مقاوم کردن سکو تحت ارتعاش‌های افقی و قائم ارائه کردند و عملکرد سیستم پیشنهادی خود را مطالعه کردند.^[۱۵] در نتیجه به دلیل مزایایی همچون اثر بخشی در کاهش ارتعاش‌ها و سهولت در اجرا، میراگر جرمی هماهنگ شده به طور گسترده برای کاهش ارتعاش سکوها دریایی استفاده می‌شود.^[۱۶]

با وجود گستردگی کاربرد میراگرهای غیرفعال و داشتن مزایایی چون: حفظ پایداری، قابلیت اطمینان و سادگی اجرا، به دلیل عدم قابلیت انطباق، کارایی نامناسب تحت تحریک‌هایی با باند بسامدی گسترده و همچنین کارایی محدود در میرا ساختن ارتعاش‌ها، لازم است روش‌های دیگری نیز به منظور بهبود عملکرد میراگرهای غیرفعال بررسی شوند. از آن‌جا که نیروهای دینامیکی غالباً خاصیت تصادفی با باند بسامدی گسترده دارند، این دسته از ابزارهای کنترلی توانایی محدودی در استهلاک تحریک ورودی دارند و حتی در بعضی موارد، میراگرهای غیرفعال نمی‌توانند نیروی دینامیکی مورد نظر را کنترل کنند. به عبارت دیگر، به دلیل تنوع زیاد نیروهای وارد بر سکوها و همچنین تغییرات خصوصیات دینامیکی بارها، ابزارهای کنترلی غیرفعال، بازدهی مناسب را ندارند و می‌توان با کنترل فعال یا نیمه‌فعال سکوها، بازدهی ابزارهای کنترلی را بهبود بخشید.^[۱۷]

کنترل فعال در سکوها نفتی برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط کاوانو^۹ مطرح شد.^[۱۸] میراگر جرمی فعال به دلیل وزن و حجم کمتر، عملکرد مناسب در پهنای باند گسترده^{۱۰} و همچنین قابلیت خودتنظیمی^{۱۱} مورد توجه پژوهش‌گران بسیاری قرار گرفت.^[۱۹] به همین دلیل مطالعات متفاوتی در خصوص ابزارهای مختلف کنترل فعال و الگوریتم‌های مختلف برای بررسی رفتار سازه تحت نیروهای دینامیکی متنوع انجام شده است. به عنوان نمونه، وینسنزو و راگر^{۱۲} (۱۹۹۹) به مطالعه‌ی تأثیر روش کنترل فعال تحت نیروی حاصل از گردباد در سکوها پرداختند.^[۲۰] همچنین مهادیک و جانگید^{۱۳} (۲۰۰۳) تحت نیروی موج،^[۲۱] و کیم^{۱۴} تحت نیروی زلزله،^[۲۲] مطالعاتی را انجام دادند. الگوریتم‌های مختلفی نیز همچون: کنترل بهینه‌ی خطی کلاسیک (LQR)،^[۲۱] H_∞،^[۲۳] H₂،^[۲۴] مود لغزشی،^[۲۵] شبکه‌ی عصبی^[۲۶] و غیره بررسی شده است. در مطالعات مذکور به صراحت به کارآمدی الگوریتم‌های هوشمند، نظیر شبکه‌ی عصبی و فازی اشاره شده است. این نتیجه‌گیری به دلیل مزایایی چون توانایی در نظر گرفتن رفتارهای غیرخطی، مقاوم بودن، تحمل خطا و قابلیت تعمیم موجود در الگوریتم‌های هوشمند است.^[۱۶] از قابلیت‌های منحصر به فرد الگوریتم کنترلی فازی می‌توان به در نظر گرفتن غیرخطی‌ها و عدم قطعیت‌های سیستماتیک و اجرای ساده‌ی آن اشاره کرد.^[۱۶]

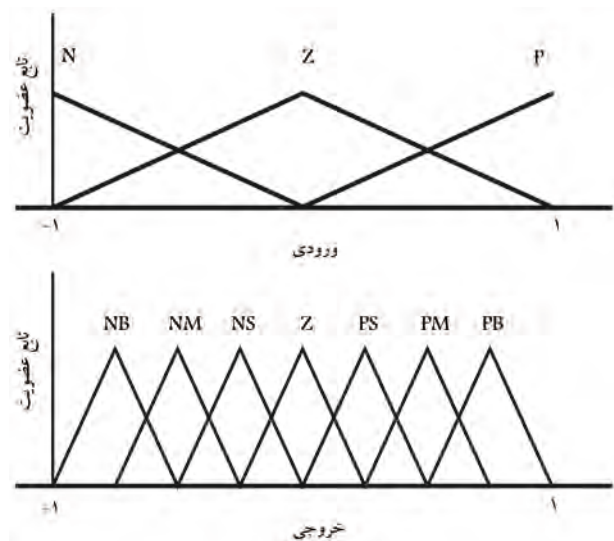
با وجود برتری قابل توجه سیستم‌های کنترل فعال در کاهش پاسخ سازه‌ها تحت

۲. الگوریتم کنترل فازی

در مطالعه‌ی حاضر، از منطق فازی برای کنترل فعال سازه استفاده شده است. منطق فازی، ۴ بخش اصلی فازی‌سازی، پایگاه قواعد، موتور استنتاج و غیرفازی‌سازی دارد. ورودی کنترل‌کننده‌ی فازی، جابه‌جایی و سرعت طبقه‌ی بام است. در بخش اول، به منظور فازی‌سازی داده‌ها، از توابع عضویت مختص ورودی‌ها استفاده شده است و برای هر یک از ورودی‌ها، ۳ تابع عضویت مثلثی در بازه‌ی $[-1, 1]$ به کار برده شده است. پارامتر خروجی نیروی کنترل بوده و برای غیرفازی‌سازی نیروی کنترل، ۷ تابع عضویت مثلثی مختص خروجی در بازه‌ی $[-1, 1]$ تعریف شده است.^[۲۵] شکل‌های مربوط به توابع عضویت ورودی و خروجی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

در بخش پایگاه قواعد فازی، از ۹ قانون استفاده شده است، که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. متغیرهای فازی Z, P, N که در توابع عضویت ورودی وجود دارند، به ترتیب معرف مجموعه‌های مثبت، صفر و منفی هستند. همچنین متغیرهای فازی $PM, PB, PS, Z, NS, NM, NB$ که در توابع عضویت خروجی وجود دارند، به ترتیب معرف مجموعه‌های مثبت بزرگ، مثبت متوسط، مثبت کوچک، صفر، منفی کوچک، منفی متوسط و منفی بزرگ هستند. در نهایت، در بخش موتور استنتاج فازی، از سیستم استنتاج مددانی استفاده شده است، که برای اولین بار توسط مددانی و آسیلین (۱۹۷۵) معرفی شده است.^[۲۶]

به‌طورکلی تعیین تعداد و شکل توابع عضویت به صورت سعی و خطاست و مبنای تجربی دارد. لذا در برخی مطالعات از الگوریتم‌های فراکاشی برای تعیین مقدار بهینه‌ی پارامترهای توابع عضویت استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال پورزیلی



شکل ۱. توابع عضویت ورودی و خروجی.

جدول ۱. قوانین فازی.

سرعت			
تغییر مکان	N	Z	P
N	PB	PM	PS
Z	PS	Z	NS
P	NS	NM	NB

و همکاران (۲۰۰۷)، بهینه‌یابی توابع عضویت ورودی‌ها (جابه‌جایی و سرعت)، هر کدام با ۵ تابع دوزنقه‌ی و توابع عضویت خروجی (نیروی کنترل فعال)، با ۷ تابع مثلثی را بررسی کردند. در مطالعه‌ی آن‌ها، فاصله‌ی بین توابع با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌یابی شده است، که منجر به کاهش بیشتر جابه‌جایی طبقه‌ی بام شده است.^[۲۷] همچنین مشکلات رضوی و شریعتمدار (۲۰۱۶) به بررسی محل بهینه‌ی توابع عضویت پرداختند.^[۲۸] در ادامه، جوئی^{۳۰} (۲۰۱۲) در پایان‌نامه‌ی خود به بررسی کارایی انواع توابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ی، سهمی و غیره پرداخت و با بررسی همه‌ی حالت‌ها به این نتیجه رسید که تمامی انواع توابع عضویت در کاهش پاسخ جابه‌جایی، عملکردی تقریباً یکسان دارند؛ ولی در کاهش پاسخ شتاب سازه، تابع عضویت مثلثی به‌طور محسوس، عملکرد مطلوب‌تری دارد.^[۲۹] همچنین با توجه به حجم کم عملیات در تابع عضویت مثلثی نیز استفاده از آن، اقتصادی‌تر است. در ادامه‌ی پژوهش اخیر، جوئی با بررسی پاسخ سازه در حالتی که دورودی (تغییرمکان و سرعت) و یا سه ورودی (تغییرمکان، سرعت و شتاب) به کنترل‌کننده‌ی فازی وارد شود، نشان داد که پاسخ تغییرمکان سازه در هر دو حالت با خطای بسیار اندکی، یکسان است. در خصوص انتخاب سیستم استنتاج مددانی نیز می‌توان به سادگی و شهودی بودن آن در مقایسه با سیستم استنتاج تاکاگی - سوگنو اشاره کرد. سیستم تاکاگی - سوگنو اصولاً برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی پیچیده با قوانین کم و دقت بالا استفاده می‌شود.^[۳۰]

۳. بار موج

روش‌های تحلیل مختلفی برای ارزیابی عملکرد سکوها‌ی دریایی تحت بار موج وجود دارند، که در هر کدام به نوعی سعی شده است تا زمان تحلیل کاهش یابد و تحلیل‌ها با قابلیت اعتماد بالایی انجام شوند. در آیین‌نامه‌ی API، سه تحلیل طیفی، پوش‌آور و تاریخچه‌ی زمانی برای ارزیابی سکوها پیشنهاد شده است.^[۳۱] روش تاریخچه‌ی زمانی به دلیل ماهیت دینامیکی و غیرخطی امواج دریا، روش مناسبی است، اما به علت طولانی شدن زمان تحلیل مورد اقبال پژوهش‌گران قرار نگرفته است. بنابراین پژوهش‌گران ضمن تمرکز بر روی حالت‌های متفاوتی از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، روش‌های جدیدی برای تولید رکورد‌های امواج ارائه کردند. به‌عنوان مثال، وامواتسکیس و کورنل^{۳۱} (۲۰۰۲)، روشی با عنوان تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) ۳۲ ارائه کردند، که برای ارزیابی رفتار سازه‌ها تحت ارتعاش‌های لرزه‌یی استفاده می‌شود.^[۳۲] این روش، مزایایی چون ارزیابی عملکرد سازه‌ها تحت ارتعاش‌هایی با شدت‌های مختلف و عدم قطعیت‌های حاصل از شتاب‌های مذکور را شامل می‌شود. اما روش تحلیل دینامیکی افزایشی معایبی نیز به همراه داشت. به‌عنوان نمونه، برای تغییر شدت شتاب‌ها، از ضریب مقیاس استفاده می‌شود، که فقط باعث تغییر در دامنه‌ی شتاب می‌شود و آثار مربوط به محتوای بسامدی لحاظ نمی‌شود.^[۳۳] گل‌افشانی و همکاران (۲۰۱۱) نیز روش جدیدی با عنوان روش تحلیل موج افزایشی (IWA) ۳۳ ارائه کردند،^[۳۴] که علاوه بر داشتن مزایای روش قبلی، برتری‌هایی نیز نسبت به آن داشت. در روش مذکور پیشنهاد شد به‌جای آنالیز ۳ ساعته، می‌توان بر روی پیشینه‌ی ارتفاع امواج تمرکز کرد، تا هزینه‌های محاسباتی کاهش محسوسی داشته باشد؛ اما این پیشنهاد نمی‌تواند ماهیت بارگذاری موج را در نظر بگیرد و در نوشتار خود محققین نیز اشاره شده است که روش اخیر ممکن است در سایر سکوها، جواب‌های متفاوتی ارائه دهد.^[۳۵] بنابراین زین‌الدینی و همکاران (۲۰۱۲) روش جدیدی با عنوان تحلیل موج دوام (EWA) ۳۴ برای سکوها‌ی شاپلونی ارائه کردند،^[۳۶] که برگرفته از روش توسعه‌یافته‌ی زمان دوام بود.^[۳۷] در روش موج دوام، زمان رکورد تولید شده بسیار

درصد اختلاف (%)	مقدار پارامتر		توضیح تکمیلی	پارامتر
	محاسبه شده	مهاجرنسب و همکاران		
۰/۴۲	۲/۳۴	۲/۳۵	مود اول	دوره‌ی تناوب (ثانیه)
۴	۰/۴۸	۰/۵۰	مود دوم	دوره‌ی تناوب (ثانیه)
۱/۹۷	۰/۰۵۹۸	۰/۰۶۱	تحت موج ۵۰ سال	بیشینه‌ی جابه‌جایی عرشه (متر)
۳/۵۱	۰/۰۷۴۳	۰/۰۷۷	تحت موج ۱۰۰ سال	بیشینه‌ی جابه‌جایی عرشه (متر)

۴. معادله‌های حرکت

معادله‌ی دیفرانسیل حرکت سکوی دریایی تحت نیروهای موج و کنترل را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱ بیان کرد:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_I + F_D + F_C \quad (1)$$

که در آن، M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی و x ، \dot{x} و \ddot{x} نیز به ترتیب بردارهای جابه‌جایی، سرعت و شتاب سازه هستند. به علاوه، F_I و F_D نیز معرف نیروی اینرسی^{۳۶} و پسا^{۳۷} هستند، که به ترتیب مطابق روابط ۲ و ۳ از معادله‌ی مورسون^{۳۸} به دست می‌آیند. [۴۸] در رابطه‌ی ۱، نیز نیروی کنترل است، که از الگوریتم کنترلی فازی محاسبه می‌شود.

$$F_I = \rho C_m V \circ \dot{U} \quad (2)$$

$$F_D = \rho C_d A' \circ (U - \dot{X}) \circ |U - \dot{X}| \quad (3)$$

که در آن‌ها، U و \dot{U} به ترتیب نشانگر سرعت و شتاب موج هستند و ρ نیز چگالی آب است، که برابر با ۱۰۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب فرض شده است. همچنین C_m و C_d ضرایب اینرسی و پسا هستند، که مطابق آیین‌نامه‌ی API به ترتیب برابر ۱/۲ و ۱/۵ در نظر گرفته شده‌اند. [۴۹] V و A نیز به ترتیب بردار حجم و مساحت سطح مقطع اعضا هستند، که مقادیر آن در جدول ۲ برای سکوی نفتی رسالت ارائه شده است. همچنین علامت «۰» بیانگر ضرب درایه به درایه‌ی ماتریسی^{۳۹} است.

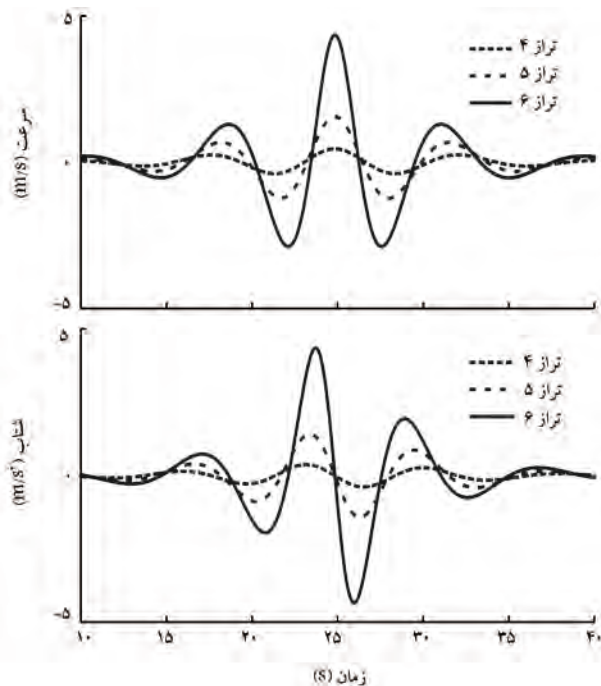
در رابطه‌ی ۱، ماتریس جرم M ، حاصل جمع جرم سازه M_s و جرم افزوده M_a است، که در رابطه‌ی ۴ ارائه شده است. جرم افزوده (جرم افزوده شده به سازه) به مقدار جرمی از سیال گفته می‌شود که به علت شتاب گرفتن سکوی درون سیال تحت نیروی موج، همراه با سکوی حرکت و نیرویی خلاف جهت حرکت به سکوی وارد می‌کند، که مقدار جرم افزوده مطابق رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود.

$$M = M_s + M_a \quad (4)$$

$$M_a = \rho (C_m - 1) V \quad (5)$$

۵. صحت‌سنجی و مطالعه‌ی عددی

در بخش کنونی به منظور اطمینان از روند حل مسئله، ابتدا به صحت‌سنجی مدل‌سازی و روش تحلیل پرداخته شده و در ادامه، مدل‌سازی صورت‌گرفته در مطالعه‌ی حاضر تشریح شده است.



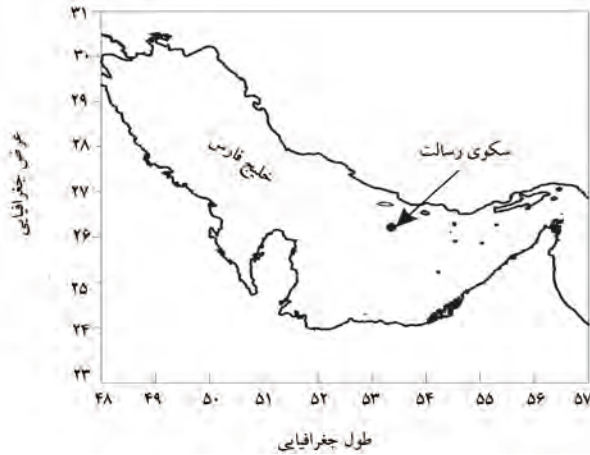
شکل ۲. سرعت و شتاب وارد بر ترازهای مختلف سکوی تحت بار موج. [۴۵]

کاهش پیدا کرده و برای تمامی حالت‌های دریایی یک زمان ثابت لحاظ شده است. در این روش، زمان رکوردها ۱۰۰ ثانیه می‌باشد، در حالی که مدت زمان استاندارد ۳ ساعت است. در خصوص معیار ۱۰۰ ثانیه، اگر این زمان زیاد فرض شود، هزینه‌های محاسباتی افزایش می‌یابد و معیار با مهم‌ترین مزیت روش مذکور است و اگر زمان معیار کوتاه فرض شود، احتمال از دست دادن پاسخ بحرانی و مانا شدن سطح آب وجود دارد. [۴۵] لذا روش موج دوام نیز نیازمند اصلاح است. بنابراین مهاجرنسب و همکاران (۲۰۱۴) روش تحلیل موج دوام اصلاح شده (MEWA) [۳۵] را معرفی کردند، که روشی جدید برای محاسبه‌ی زمان بهینه‌ی تحلیل بر اساس دوره‌ی تناوب قله‌ی طیف است، که بازه‌ی زمانی قابل قبولی برای رکوردها ارائه می‌دهد و زمان محاسبات بهینه می‌شود. همچنین کاربرد این روش ساده‌تر است و انطباق بیشتری با ماهیت امواج دارد. [۴۵]

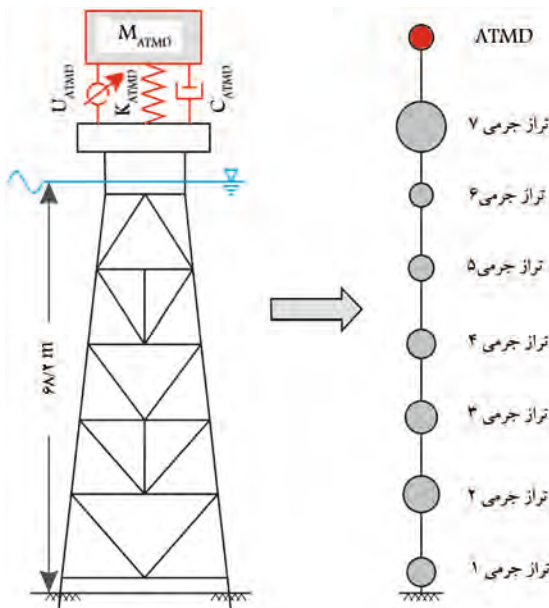
در نوشتار حاضر، سرعت و شتاب وارد بر ترازهای مختلف سکوی رسالت تحت شرایط دریایی مختلف با استفاده از روش تحلیل موج دوام اصلاح شده محاسبه و تحت دو موج با دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله بررسی شده است. به عنوان نمونه، برای موجی با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال، سرعت و شتاب وارد بر ۳ تراز از سکوی در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۲.۵. مدل سازی عددی

در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی رفتار دینامیکی سکوی رسالت واقع در خلیج فارس و ۸۰ کیلومتری جنوب جزیره‌ی لاوان تحت بار امواج در حالت‌های دریایی مختلف پرداخته شده است، و محل دقیق قرارگیری آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود. برای مدل کردن سکوی رسالت، از مدل ساده شده‌ی ۷ درجه آزادی معادل استفاده شده است، که پارامترهای معادل از مدل کردن سه‌بعدی سکوی رسالت در نرم‌افزار انسیس ۴^۰ و معادل سازی دوره‌های تناوب به دست آمده است. [۲۵] ایده‌ی ذکر شده در بسیاری از مطالعات به منظور کاهش هزینه‌ی محاسبات و تخمین رفتار کلی سازه استفاده می‌شود و نمایی شماتیک از آن و سکوی معادل مورد مطالعه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، که عرشه در تراز ۷ واقع شده است. همچنین پارامترهای معادل که شامل: جرم، سختی، حجم و مساحت سطح مقطع اعضا برای ترازهای مختلف سکو هستند، در جدول ۳ ارائه شده‌اند و ماتریس میرایی نیز با کمک میرایی رابلی ۴^۱ و نسبت میرایی ۰.۲٪ برای مودهای اول و دوم به دست آمده است. دوره‌ی تناوب سکوی معادل برابر ۲/۳۴ ثانیه بوده است.



شکل ۵. موقعیت قرارگیری سکوی رسالت در خلیج فارس.

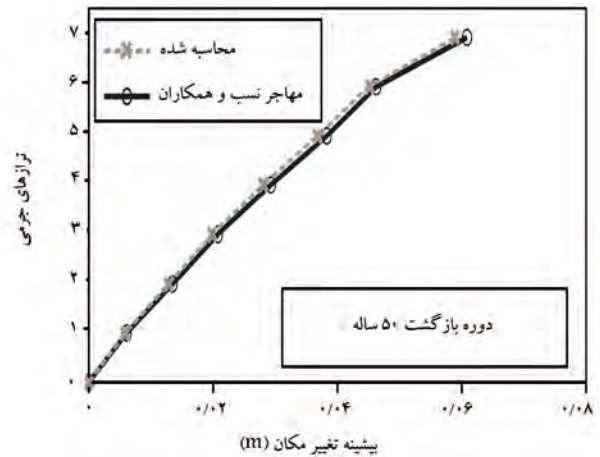


شکل ۶. سکوی کنترل شده به روش فعال و مدل ساده شده‌ی آن.

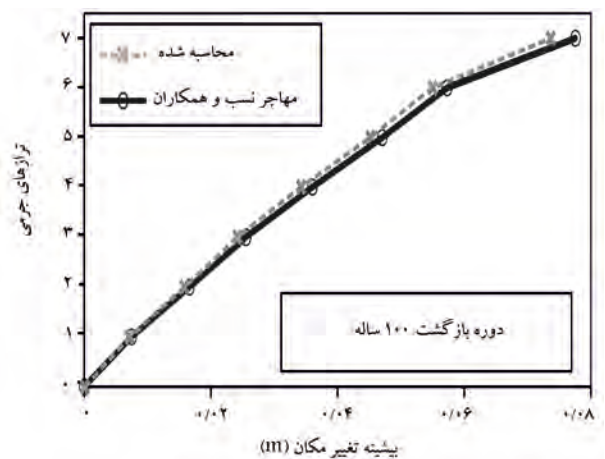
۱.۵. صحت سنجی

در بخش صحت سنجی، سکوی نفتی مورد مطالعه توسط مهاجرنسب و همکاران (۲۰۱۷)، [۲۹] مدل شده است. ایشان با تبدیل کردن سکو به سازه‌ی با ۷ درجه آزادی، از روش جدید بارگذاری اشاره شده برای بررسی عملکرد سکو استفاده کرده بودند. دوره‌ی تناوب دو مود اول اشاره شده در نوشتار مرجع، به ترتیب برابر ۲/۳۵ و ۰/۵۰ ثانیه بود، که پس از مدل سازی، مقادیر ۲/۳۴ و ۰/۴۸ ثانیه حاصل شد.

همچنین مقایسه‌ی بین نتایج پیشینه‌ی تغییر مکان عرشه در ترازهای جرمی مختلف سکوی رسالت و تحت دو بار موج با دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ سال، حاصل از مدل سازی و نوشتار مرجع بوده، انجام شده است، که نتایج مذکور در شکل ۳ برای دوره‌ی بازگشت ۵۰ سال و شکل ۴، برای دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال مشاهده می‌شود. در جدول ۲، درصد اختلاف مقادیر محاسبه شده با مقادیر ذکر شده در نوشتار مرجع، [۲۹] به صورت خلاصه ارائه شده است، مقادیر خطای به دست آمده، نشان دهنده‌ی تطابق مناسب نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج ارائه شده در نوشتار مذکور دارد.



شکل ۳. مقایسه‌ی پیشینه‌ی تغییر مکان عرشه‌ی سکو تحت بارگذاری موج با دوره‌ی بازگشت ۵۰ سال.

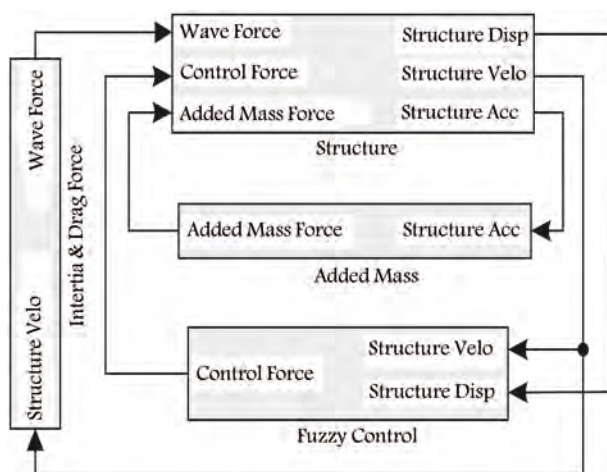


شکل ۴. مقایسه‌ی پیشینه‌ی تغییر مکان عرشه‌ی سکو تحت بارگذاری موج با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال.

تراز ۷	تراز ۶	تراز ۵	تراز ۴	تراز ۳	تراز ۲	تراز ۱	سکوی رسالت
۱۷۹۰	۶۳	۹۲	۱۰۵	۱۱۶	۱۲۹	۱۰۶	جرم (تن)
۳۸	۹۰	۱۰۶	۱۲۱	۱۴۶	۱۴۶	۱۷۹	سختی (مگانیوتن بر متر)
۰	۲۲	۱۰۳	۱۱۳	۱۱۷	۱۳۴	۱۳۴	حجم (مترمکعب)
۰	۳۵	۱۹۱	۲۰۹	۲۱۳	۲۳۸	۲۲۷	مساحت سطح مقطع اعضا (مترمربع)

جدول ۴. پارامترهای طراحی میراگر جرمی هماهنگ شده.

پارامتر	مقدار
نسبت میرایی سازه‌یی	٪۲
نسبت جرمی	٪۳
بسامد زاویه‌یی سازه	۲٫۶۸ رادیان بر ثانیه
نسبت بسامدی بهینه	۰٫۹۶۳۹
نسبت میرایی بهینه	۰٫۱۰۶



شکل ۷. مدل تهیه شده در نرم افزار سیمولینک.

مرتبط به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده‌اند. همچنین از الگوریتم جستجوی هارمونی برای بهینه‌یابی مقدار توان عملگر در هر لحظه و اعمال نیروی کنترل بهینه استفاده شده است. تابع هدف^{۴۴} مسئله‌ی بهینه‌یابی موردنظر، کمینه‌سازی تغییرمکان عرشه‌ی سکو در طول ارتعاش است و الگوریتم ذکر شده، مقدار توان عملگر بهینه را در بازه‌ی مشخص شده (بیشینه‌ی ظرفیت عملگر) محاسبه می‌کند. در بهینه‌یابی اشاره شده، اثر اشباع عملگر به صورت یک قید لحاظ شده است و با این فرایند برای هر ارتعاش، کنترل‌کننده‌ی بهینه‌ی طراحی می‌شود.

الگوریتم جستجوی هارمونی توسط لی و گیم^{۴۵} (۲۰۰۵) ارائه شده است.^[۵۲] در مسئله‌ی حاضر، پارامترهای اولیه‌ی این الگوریتم، که شامل اندازه‌ی حافظه‌ی هارمونی (HMS)،^{۴۶} نرخ تطبیق گام (PAR)^{۴۷} و نرخ در نظر گرفتن حافظه‌ی هارمونی (HMCR)^{۴۸} هستند، به ترتیب برابر ۰٫۲، ۰٫۱ و ۰٫۵ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در مطالعه‌ی حاضر، اندرکنش بین سیال و سازه،^{۴۹} به همراه تأثیر جرم افزوده لحاظ شده است. مدل‌سازی، بارگذاری، تحلیل، کنترل و بهینه‌یابی سکوها با استفاده از نرم‌افزار متلب^{۵۰} و محیط سیمولینک^{۵۱} انجام شده است. نمای شماتیک از مدل تهیه شده در نرم‌افزار سیمولینک در شکل ۷ مشاهده می‌شود، که مطابق آن سه نیروی موج، کنترل و جرم افزوده وارد بلوک Structure شده و پاسخ سکو اعم از جابه‌جایی، سرعت و شتاب در همه‌ی ترازها به دست می‌آید. برای محاسبه‌ی نیروی موج مطابق روابط ۲ و ۳ و همچنین اندرکنش بین سیال و سکو، از بلوک Inertia & Drag Force استفاده شده است، که نیازمند بازخورد^{۵۲} سرعت سکو است. بلوک Added Mass، اقدام به محاسبه‌ی جرم افزوده مطابق روابط ۴ و ۵ می‌کند و نیروی این اثر را به سازه اعمال می‌کند و نیازمند بازخورد شتاب است. نیروی کنترل نیز با استفاده از بلوک Control Fuzzy، محاسبه و همان‌طور که قبلاً

برای بارگذاری سکو از دو موج با دوره‌های بازگشت ۵° و ۱۰° سال استفاده شده است. برای موج ۱۰° سال، مقادیر ارتفاع موج مشخصه، دوره‌ی تناوب قله‌ی طیف و تراز قله به ترتیب برابر ۵٫۸۳ متر، ۷٫۱۰ ثانیه و ۴٫۷۷ متر و برای موج ۵° سال نیز به ترتیب برابر ۵٫۳۳ متر، ۶٫۷۷ ثانیه و ۴٫۳۶ متر بوده است.^[۴۵] برای کنترل ارتعاش‌های ناشی از امواج وارده، از میراگر جرمی هماهنگ شده‌ی غیرفعال و فعال استفاده شده است، که در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

برای طراحی میراگر جرمی هماهنگ شده از روابط معروف ارائه شده‌ی دن هارتوگ^{۴۲} (۱۹۴۲)،^[۵۰] و روابط اصلاح شده‌ی آیوا و اکیدا^{۴۳} (۱۹۷۸)،^[۵۱] استفاده شده است. در روابط دن هارتوگ، نسبت بسامدی بهینه (α_{opt}) و همچنین نسبت میرایی بهینه (ξ_{opt}) به ترتیب مطابق رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند:

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (6)$$

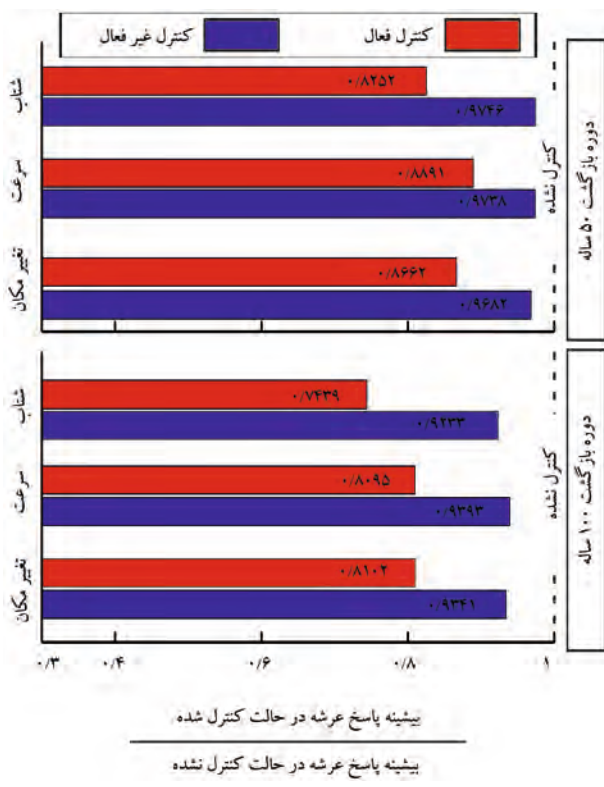
$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (7)$$

که در آن‌ها، μ معرف نسبت جرم میراگر به جرم سازه است. از آن‌جایی که روابط ۶ و ۷ برای سازه‌های بدون میرایی ذاتی محاسبه شده‌اند، روابط مذکور برای سازه‌های دارای میرایی ذاتی باید اصلاح شوند. روابط اصلاح شده که توسط آیوا و اکیدا معرفی شده‌اند، مطابق روابط ۸ و ۹ هستند.

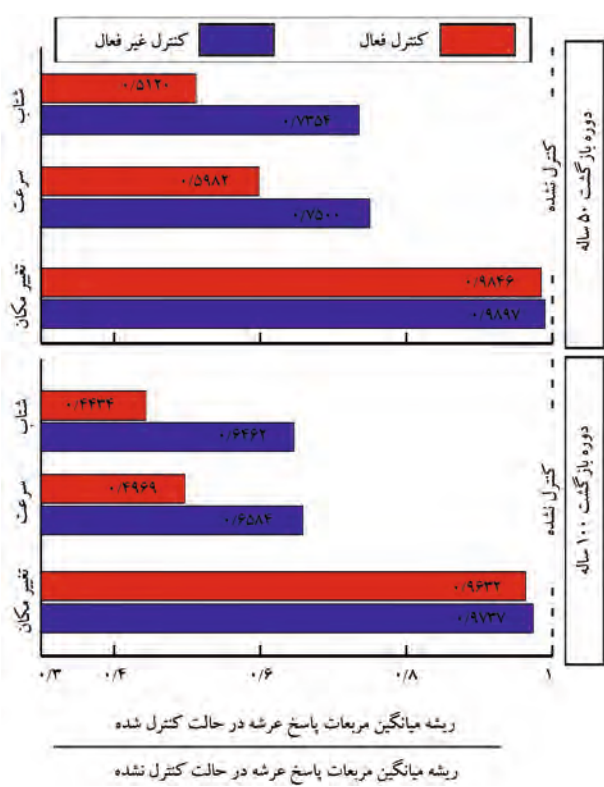
$$\bar{\alpha}_{opt} = \alpha_{opt} - (0/241 + 1/7\mu - 2/6\mu^2)\xi_s - (1 - 1/9\mu + \mu^2)\xi_s^2 \quad (8)$$

$$\bar{\xi}_{opt} = \xi_{opt} - (0/13 + 0/12\mu - 0/4\mu^2)\xi_s - (0/01 - 0/9\mu + 3\mu^2)\xi_s^2 \quad (9)$$

که در آن‌ها، ξ_s نسبت میرایی ذاتی سازه است. مقادیر پارامترهای محاسبه شده مطابق جدول ۴ است. برای کنترل فعال میراگر جرمی هماهنگ شده نیز از الگوریتم کنترلی فازی استفاده شده است، که توابع عضویت و قوانین



شکل ۸. مقایسه‌ی بیشینه‌ی پاسخ‌های کنترل‌شده به پاسخ‌های کنترل‌نشده‌ی سکو تحت موج‌هایی با دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ سال.



شکل ۹. مقایسه‌ی ریشه‌ی میانگین مربعات پاسخ‌های کنترل‌شده به پاسخ‌های کنترل‌نشده‌ی سکو تحت موج‌هایی با دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ سال.

اشاره شد، نیازمند بازخورد جابه‌جایی و سرعت است. اشباع عملگر و بهینه‌یابی توان عملگر نیز در بلوک اخیر اتفاق می‌افتد.

۶. ارزیابی نتایج

در بخش حاضر، ابتدا مقایسه‌ی بین پاسخ‌های (جابه‌جایی، سرعت و شتاب) کنترل‌نشده و همچنین کنترل‌شده با میراگرهای جرمی هماهنگ شده‌ی غیرفعال و فعال تحت دو موج با دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله انجام شده است. علاوه بر مقایسه‌ی بیشینه‌ی پاسخ‌های سازه، عملکرد سکو در طول زمان ارتعاش نیز بررسی شده است.

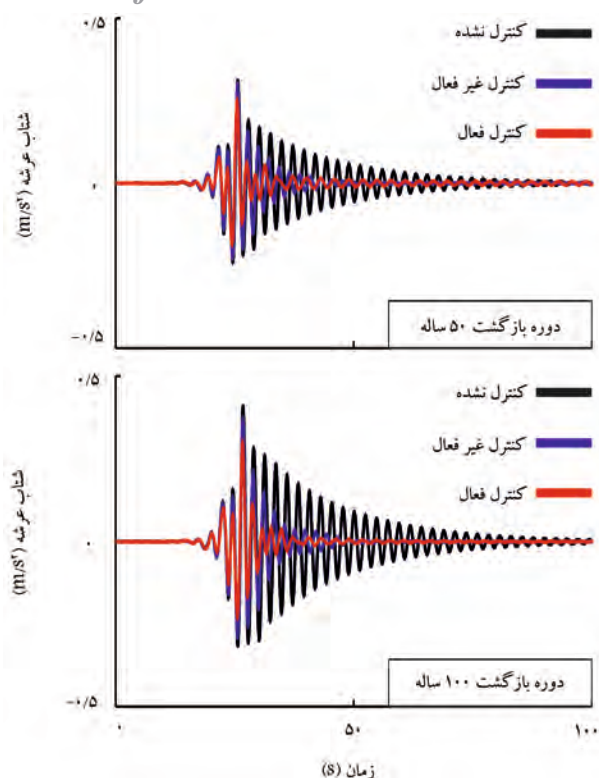
۱.۶. بررسی بیشینه‌ی پاسخ‌های سکو در تراز عرشه

بیشینه‌ی پاسخ‌های کنترل‌شده مربوط به جابه‌جایی، سرعت و شتاب سکو در تراز عرشه به بیشینه‌ی پاسخ‌های کنترل‌نشده تحت دو موج به صورت بی‌بعد در شکل ۸ مشاهده می‌شود، که مطابق آن نتایج مربوط به هر دو نوع کنترل غیرفعال و فعال ارائه شده است، که به ترتیب با رنگ‌های آبی و قرمز قابل تفکیک هستند. به‌عنوان مثال، تحت ارتعاش موجی با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال، در صورت استفاده از میراگر جرمی غیرفعال، بیشینه‌ی پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب به ترتیب در حدود ۷، ۷ و ۸ درصد کاهش می‌یابد، اما این مقادیر برای میراگر جرمی فعال به ترتیب ۱۹، ۲۰ و ۲۶ درصد است. با توجه به شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که درصد کاهش‌های مربوط به موجی با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال، در مقایسه با موجی با دوره‌ی بازگشت ۵۰ سال بزرگ‌تر است. همچنین در ارتباط با شکل ۸ می‌توان به این نکته اشاره کرد که کنترل فعال، بیشترین تأثیر را در شتاب سازه می‌گذارد و بیشترین کاهش در بین بیشینه‌ی پاسخ‌های سازه را شامل می‌شود، که برای موج‌های با دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ سال به ترتیب ۱۸ و ۲۶ درصد است. البته باید اشاره کرد که شتاب تراز عرشه در سکوهای دریایی جزء عوامل مؤثر در آسایش کارکنان، ایمنی سکو و تجهیزات روی آن است.^[۵۳] در کنترل غیرفعال، تقریباً عملکرد سیستم کنترلی در کاهش بیشینه‌ی پاسخ‌های متفاوت سکو یکسان است.

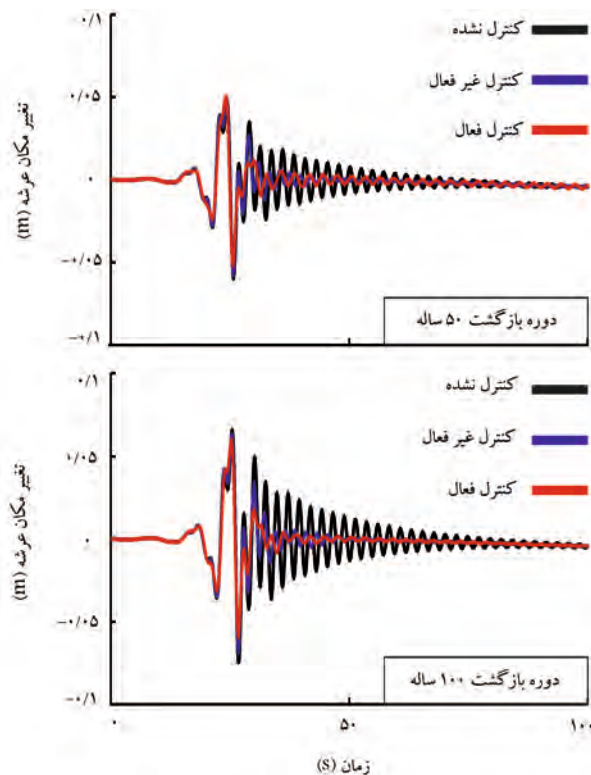
۲.۶. بررسی ریشه‌ی میانگین مربعات (RMS) ۵۳ پاسخ‌های سکو در تراز عرشه

یکی از شاخص‌های معیار در بررسی عملکرد سیستم‌های کنترلی، علاوه بر کاهش بیشینه‌ی پاسخ، عملکرد مناسب سیستم در طول زمان ارتعاش است، تا بتواند در همه‌ی زمان‌ها منجر به کاهش مناسب پاسخ شود و عمر خستگی سازه را افزایش دهد. برای این منظور می‌توان از ریشه‌ی میانگین مربعات استفاده کرد. در بخش کنونی، ریشه‌ی میانگین مربعات پاسخ کنترل‌شده به پاسخ‌های کنترل‌نشده در طول زمان و در تراز عرشه برای هر سه پاسخ جابه‌جایی، سرعت و شتاب تحت دو موج بررسی و در شکل ۹ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۹ و برای موج با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال، کاهش در ریشه‌ی میانگین مربعات جابه‌جایی تراز عرشه در حالت کنترل‌شده به کنترل‌نشده و با استفاده از کنترل غیرفعال و فعال به ترتیب ۳ و ۴ درصد بوده است. این مقادیر برای سرعت عرشه به ترتیب ۳۵ و ۵۱ درصد و برای شتاب عرشه نیز ۳۶ و ۵۶ درصد بوده است. با توجه به شکل ۹ می‌توان به این نتیجه



شکل ۱۱. مقایسه‌ی تاریخی‌ی زمانی شتاب عرشه.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی تاریخی‌ی زمانی جابه‌جایی عرشه.

الگوریتم فازی توانسته است هم‌زمان با کاهش بیشینه‌ی پاسخ‌های سازه، عملکرد مناسبی نیز در کل طول زمان تحریک داشته باشد. در بین پاسخ‌های مختلف نیز بیشترین کاهش پاسخ مربوط به شتاب سازه است، که بیشینه‌ی مقدار آن به‌طور متوسط بیش از ۲۰٪ و در طول زمان نیز به‌طور متوسط بیش از ۵۰٪ کاهش یافته است.

از نکات دیگر مطالعه‌ی حاضر می‌توان به این مورد اشاره کرد که کمترین تأثیر تحت کنترل غیرفعال و فعال، در پاسخ تغییرمکان سکو بوده است. بنابراین در پژوهش حاضر، طبق فرضیات انجام گرفته و تحت شرایط مورد بررسی، سیستم کنترل فعال برای کاهش بیشینه‌ی تغییرمکان سازه مناسب بوده است، اما در خصوص پاسخ سرعت و شتاب، هم بیشینه‌ی مقادیر آن‌ها را به مقدار مناسب کاهش داده و هم در طول زمان، تحریک سرعت و شتاب سکو را به صورت مناسبی کنترل کرده است.

همچنین با مقایسه‌ی پاسخ مربوط به دو موج با دوره‌های بازگشت مختلف می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین کاهش در بین پاسخ‌ها و سیستم‌های کنترلی مورد بررسی تحت موجی با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال نسبت به ۵۰ سال رخ داده است، که این امر علاوه بر بیشینه‌ی پاسخ سازه برای پاسخ سازه در طول زمان نیز صادق است. مقادیر کاهش بیشینه‌ی پاسخ سکو با استفاده از سیستم کنترل فعال و برای پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت، و شتاب و تحت موجی با دوره‌ی بازگشت ۵۰ سال به ترتیب برابر با ۱۴، ۱۲ و ۱۸ درصد بوده است؛ در حالی که مقادیر مذکور برای موجی با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال به ترتیب ۱۹، ۲۰ و ۲۶ درصد می‌باشد. همچنین در طول زمان نیز این مقادیر برای موج ۵۰ سال به ترتیب ۲، ۴۱ و ۴۹ درصد و برای موج ۱۰۰ سال نیز ۴، ۵۱ و ۵۶ درصد بوده است.

رسید که بیشترین کاهش در بین پاسخ‌ها و سیستم‌های کنترلی مورد بررسی تحت موجی با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال نسبت به ۵۰ سال رخ داده است. همچنین با مقایسه‌ی مقادیر ریشه‌ی میانگین مربعات پاسخ کنترل فعال مشاهده می‌شود که کاهش در پاسخ شتاب بیشتر از دو پاسخ دیگر و کاهش سرعت نیز بیشتر از جابه‌جایی بوده است. البته در کنترل غیرفعال، پاسخ‌های سرعت و شتاب تقریباً به یک اندازه کاهش یافته و این دو پاسخ برای هر دو موج در حدود ۲۵ الی ۳۰ درصد بیشتر از پاسخ جابه‌جایی سکو کاهش پیدا کرده است.

۳.۶. بررسی تاریخی‌ی پاسخ تغییرمکان و شتاب سکو

به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد کلی سیستم کنترل غیرفعال و فعال در کل طول زمان تحریک، تاریخی‌ی پاسخ جابه‌جایی و شتاب عرشه تحت هر دو موج ۵۰ و ۱۰۰ ساله به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ رسم شده است، که مطابق آن‌ها، عملکرد سیستم کنترل فعال مورد استفاده در کل طول زمان تحریک بهتر از کنترل غیرفعال بوده است.

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، عملکرد میراگرهای جرمی غیرفعال و فعال با الگوریتم فازی به منظور کاهش ارتعاش‌های سکوی نفتی رسالت تحت امواج دریا با دوره‌های بازگشت مختلف بررسی شده است. همچنین برای بهینه‌سازی توان عملکرد و به دنبال آن بهینه شدن نیروی کنترل، از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده شده است. تحت بار موج در نظر گرفته شده و در شرایط دریایی مورد بررسی سیستم، کنترل فعال با

پانویسها

1. John Milne
2. Lee
3. Ding
4. Patil and Jangid
5. Ou
6. Wang
7. Yue
8. Ma
9. Kawano
10. Wider bandwidth
11. self-diagnosis
12. Vincenzo and Roger
13. Mahadik and Jangid
14. Kim
15. linear quadratic regulator
16. sliding mode
17. neural network
18. actuator saturation
19. spillover effects
20. time delay
21. Li
22. magneto-rheological damper
23. Wu
24. power spectral density
25. shape memory alloy
26. magneto-rheological tuned liquid column gas damper
27. Ma
28. packet dropout
29. disordering
30. Joei
31. vamvatsikos and Cornell
32. incremental dynamic analysis
33. incremental wave analysis
34. endurance wave analysis
35. modified endurance wave analysis
36. inertia force
37. drag force
38. morison equation
39. element-wise product operator
40. ANSYS
41. rayleigh damping
42. den hartog
43. ioi and ikeda
44. criterion function
45. Lee and Geem
46. harmony memory size
47. pitch adjustment rate
48. harmony memory consideration rate
49. fluid-structure interaction
50. MATLAB
51. SIMULINK
52. Feedback
53. root mean square

3. Hirdaris, S., Bai, W., Dessi, D. and et al. "Loads for use in the design of ships and offshore structures", *Ocean Engineering*, **78**, pp. 131-174 (2014).
4. Wang, S.-Q. and Li, N. "Semi-active vibration control for offshore platforms based on LQG method", *Journal of Marine Science and Technology*, **21**(5), pp. 562-568 (2013).
5. Gholizadeh, A. "Feasibility and efficiency of vibration control algorithms on offshore platforms", Ph.D. Dissertation, Sharif University of Technology (In Persian) (2008).
6. Ou, J., Long, X., Li, Q. and et al. "Vibration control of steel jacket offshore platform structures with damping isolation systems", *Engineering Structures*, **29**(7), pp. 1525-1538 (2007).
7. Rahman, M., Ong, Z.C., Chong, W.T. and et al. "Performance enhancement of wind turbine systems with vibration control: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **51**, pp. 43-54 (2015).
8. Housner, G., Bergman, L.A., Caughey, T.K. and et al. "Structural control: past, present, and future", *Journal of Engineering Mechanics*, **123**(9), pp. 897-971 (1997).
9. Vandiver, J.K. and Mitome, S. "Effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms", *Applied Ocean Research*, **1**(2), pp. 67-74 (1979).
10. Lee, H.H. "Stochastic analysis for offshore structures with added mechanical dampers", *Ocean Engineering*, **24**(9), pp. 817-834 (1997).
11. Ding, J. "Theoretical and experimental study on structural vibration repressed system using viscous fluid dampers", PhD Thesis, Harbin Institute of Technology, China (In Chinese) (2001).
12. Patil, K. and Jangid, R. "Passive control of offshore jacket platforms", *Ocean Engineering*, **32**(16), pp. 1933-1949 (2005).
13. Wang, S., Li, H., Ji, C. and et al. "Energy analysis for TMD-structure systems subjected to impact loading", *China Ocean Eng*, **16**(3), pp. 301-310 (2002).
14. Yue, Q., Zhang, L., Zhang, W. and et al. "Mitigating ice-induced jacket platform vibrations utilizing a TMD system", *Cold Regions Science and Technology*, **56**(2-3), pp. 84-89 (2009).
15. Ma, R., Zhang, H. and Zhao, D. "Study on the anti-vibration devices for a model jacket platform", *Marine Structures*, **23**(4), pp. 434-443 (2010).
16. Zhang, B.-L., Han, Q.-L. and Zhang, X.-M. "Recent advances in vibration control of offshore platforms", *Non-linear Dynamics*, **89**(2), pp. 755-771 (2017).
17. Enferadi, M.H., Ghasemi, M.R. and Shabakhty, N. "Wave-induced vibration control of offshore jacket platforms through SMA dampers", *Applied Ocean Research*, **90**, 101848 (2019).
18. Kawano, K. "Active control effects on dynamic response of offshore structure", *The 3rd International Offshore and Polar Engineering Conference*, (International Society of Offshore and Polar Engineers) (1993).
19. Kandasamy, R., Cui, F., Townsend, N. and et al. "A review of vibration control methods for marine offshore structures", *Ocean Engineering*, **127**, pp. 279-297 (2016).

منابع (References)

1. Chakrabarti, S., *Handbook of Offshore Engineering (2-volume set)*, Elsevier (2005).
2. Graff, W.J., *Introduction to Offshore Structures: Design, Fabrication, Installation*, Gulf Publishing Company, Book Division (1981).

20. Vincenzo, G. and Roger, G. "Adaptive control of flow-induced oscillation including vortex effects", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **34**(5), pp. 853-868 (1999).
21. Mahadik, A. and Jangid, R. "Active control of offshore jacket platforms", *International Shipbuilding Progress*, **50**(4), pp. 277-295 (2003).
22. Kim, D.H. "Neuro-control of fixed offshore structures under earthquake", *Engineering Structures*, **31**(2), pp. 517-522 (2009).
23. Li, H.J., Hu, S.-L.J. and Jakubiak, C. "H2 active vibration control for offshore platform subjected to wave loading", *Journal of Sound and Vibration*, **263**(4), pp. 709-724 (2003).
24. Zhang, B.-L., Ma, L. and Han, Q.-L. "Sliding mode H8 control for offshore steel jacket platforms subject to nonlinear self-excited wave force and external disturbance", *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, **14**(1), pp. 163-178 (2013).
25. Zhang, B.-L., Tang, G.-Y. and Ma, H. "Optimal sliding mode control with specified decay rate for offshore steel jacket platforms", *China Ocean Engineering*, **24**(3), pp. 443-452 (2010).
26. Zhou, Y.-J. and Zhao, D.-Y. "Neural network-based active control for offshore platforms", *China Ocean Eng*, **17**(3), pp. 461-468 (2003).
27. Li, H., Wang, S. and Ji, C. "Semi-active control of wave-induced vibration for offshore platforms by use of MR damper", *China Ocean Eng*, **16**(1), pp. 33-40 (2002).
28. Xu, L., Yu, Y. and Cui, Y. "Active vibration control for seismic excited building structures under actuator saturation, measurement stochastic noise and quantisation", *Engineering Structures*, **156**, pp. 1-11 (2018).
29. Wu, Q., Zhao, X. and Zheng, R. "Experimental study on a tuned-mass damper of offshore for vibration reduction", *Journal of Physics: Conference Series*, **744**, 012045 (4-6 July 2016).
30. Wu, Q., Zhao, X., Zheng, R. and et al. "High response performance of a tuned-mass damper for vibration suppression of offshore platform under earthquake loads", *Shock and Vibration*, 2016, Article ID 7383679 (2016).
31. Kazemy, A. "Robust mixed H8/passive vibration control of offshore steel jacket platforms with structured uncertainty", *Ocean Engineering*, **139**, pp. 95-102 (2017).
32. Ghasemi, M.R., Shabakhty, N. and Enferadi, M.H. "Vibration control of offshore jacket platforms through shape memory alloy pounding tuned mass damper (SMA-PTMD)", *Ocean Engineering*, **191**, 106348 (2019).
33. Hokmabady, H., Mohammadyzadeh, S. and Mojtahedi, A. "Suppressing structural vibration of a jacket-type platform employing a novel magneto-rheological tuned liquid column gas damper (MR-TLCGD)", *Ocean Engineering*, **180**, pp. 60-70 (2019).
34. Ma, H., Hu, W. and Tang, G.-Y. "Networked predictive vibration control for offshore platforms with random time delays, packet dropouts and disordering", *Journal of Sound and Vibration*, **441**, pp. 187-203 (2019).
35. Shariatmadar, H., Golnargesi, S. and Akbarzadeh, T. "Vibration control of buildings using ATMD against earthquake excitations through interval type-2 fuzzy logic controller", *Asian Journal of Civil Engineering*, **15**(3), pp. 321-338 (2014).
36. Mamdani, E. and Assilian, S. "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *International Journal of Man-Machine Studies*, **7**(1), pp. 1-13 (1975).
37. Pourzeynali, S., Lavasani, H. and Modarayi, A. "Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms", *Engineering Structures*, **29**(3), pp. 346-357 (2007).
38. Meshkat Razavi, H. and Shariatmadar, H. "Design of an optimized FLC system for seismic structural response reduction", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32.2**(2.1), pp. 49-58 (In Persian) (2016).
39. Joei, P. "Multi-objective and semi-active control of buildings using variable stiffness and fuzzy logic", MSc Thesis, University of Guilan, Iran (In Persian) (2012).
40. Kwak, S.-I., Choe, G., Kim, I.-S. and et al. "A Study of a modeling method of TS fuzzy system based on moving fuzzy reasoning and its application", *Cornell University*, **24** p. (2015).
41. RP2A-WSD, A. "American petroleum institute recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design", American Petroleum Institute, Washington (2007).
42. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. "Incremental dynamic analysis", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**(3), pp. 491-514 (2002).
43. Luco, N. and Bazzurro, P. "Does amplitude scaling of ground motion records result in biased nonlinear structural drift responses?", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **36**(13), pp. 1813-1835 (2007).
44. Golafshani, A., Bagheri, V., Ebrahimian, H. and et al. "Incremental wave analysis and its application to performance-based assessment of jacket platforms", *Journal of Constructional Steel Research*, **67**(10), pp. 1649-1657 (2011).
45. Mohajenasab, S., Diznab, D., Ali, M. and et al. "Application of New-wave theory in the Endurance Wave method to assess offshore structures under the Persian Gulf wave conditions", *Journal of Marine Engineering*, **9**(18), pp. 71-82 (In Persian) (2014).
46. Zeinoddini, M., Nikoo, H.M. and Estekanchi, H. "Endurance wave analysis (EWA) and its application for assessment of offshore structures under extreme waves", *Applied Ocean Research*, **37**, pp. 98-110 (2012).
47. Estekanchi, H., Valamanesh, V. and Vafai, A. "Application of endurance time method in linear seismic analysis", *Engineering Structures*, **29**(10), pp. 2551-2562 (2007).
48. Dastan Diznab, M.A., Jahanmard, V., Tabeshpour, M.R. and et al. "Wave endurance time: a new concept for structural assessment under extreme waves", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, **230**(2), pp. 364-377 (2016).

Archive of SID

49. Mohajernassab, S., Diznab, M.A.D., Mehdigholi, H. and et al. "Modification of endurance wave analysis based on New-wave theory", *Ships and Offshore Structures*, **12**(3), pp. 330-340 (2017).
50. Den Hartog, J. and Vibrations, M., *McGraw-Hill Book Co*, New York (1947).
51. IOI, T. and IKEDA, K. "On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system", *Bulletin of JSME*, **21**(151), pp. 64-71 (1978).
52. Lee, K.S. and Geem, Z.W. "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **194**(36-38), pp. 3902-3933 (2005).
53. Liu, X., Li, G., Yue, Q. and et al. "Acceleration-oriented design optimization of ice-resistant jacket platforms in the Bohai Gulf", *Ocean Engineering*, **36**(17-18), pp. 1295-1302 (2009).