



## کنترل ارتعاشات سکوی نفتی فراساحلی تحت اثر بارهای دینامیکی امواج دریا با استفاده از میراگر جرمی نیمه فعال خود توان

مازیار فهیمی فرزاد\*، بابک علی نژاد، رسول معروفی آذر، معتصم موسویان صفاخانه  
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹

### کلمات کلیدی:

سکوی نفتی  
میراگر جرمی نیمه فعال خود توان  
میراگر سیال مغناطیسی  
بار موج  
ژنراتور DC

**خلاصه:** سکوهای نفتی فراساحلی نقش مهمی در صنعت استخراج نفت و انرژی دارند، به همین دلیل کنترل ارتعاشات این سازه‌ها و افزایش طول عمر مفید آن‌ها از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این مطالعه پاسخ دینامیکی سکوی نفتی فراساحلی تحت اثر بار موج با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله بررسی شده است. برای کاهش پاسخ دینامیکی عرشه سکوی نفتی، میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال خود توان (SP-SATMD) استفاده گردیده و نسبت جرمی آن به صورت پیش فرض ۳ درصد در نظر گرفته شده است. انرژی میراگر سیال مغناطیسی (MR) موجود در میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال از ارتعاش میراگر جرمی و از طریق یک سیستم استحصال انرژی تامین می‌شود. این سیستم شامل ژنراتور جریان مستقیم DC، رگ و پینیون است. رگ و پینیون حرکت خطی میراگر جرمی را به حرکت زاویه‌ای تبدیل کرده و آن را برای تولید انرژی الکتریکی به ژنراتور DC اعمال می‌کنند. همچنین خود سیستم استحصال انرژی می‌تواند به عنوان یک میراگر الکترومغناطیس (EM) و الگوریتم کنترلی تناسبی در تعیین میرایی سیال مغناطیسی عمل کند. نتایج بیانگر این است که حداکثر جابه‌جایی و شتاب عرشه سکوی نفتی در حالت کنترل نیمه فعال خود توان به ترتیب ۱۵ و ۱۶/۲۴ درصد نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است.

### ۱- مقدمه

سکوهای نفتی از جمله سازه‌های مهم در صنعت استخراج انرژی هستند که طی چند دهه اخیر تحت تاثیر پیشرفت علم و فناوری و همچنین نیاز روز افزون بشر به انرژی و استخراج منابع موجود در دریاها و اقیانوس‌ها اهمیت فراوانی یافته‌اند و کنترل دینامیکی این سازه‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته است.

سکوهای نفتی فراساحلی به دلیل قرارگیری در شرایط جوی سخت و متغیر، تحت تاثیر انواع بارهای دینامیکی مانند: امواج، باد، یخ، جریان‌های دریایی و زلزله قرار می‌گیرند. این بارها باعث ارتعاش سازه و آسیب به تاسیسات استخراج انرژی و در نتیجه آن کاهش عمر مفید سازه و عدم امنیت کارکنان بر روی سکوی نفتی می‌گردد [۱]. کاهش ۱۵ درصدی دامنه ارتعاش یک سکوی نفتی عمر مفید آن را ۲ برابر می‌کند [۲]. این نکته از جهت اقتصادی استفاده از روش‌ها و ابزارهای کنترل سازه برای کاهش ارتعاشات سکوی نفتی را کاملاً توجیه می‌نماید. فرزاد و همکاران [۳] در

سال ۲۰۲۱ به بررسی سکوی نفتی رسالت تحت اثر بار موج پرداختند و برای کنترل ارتعاشات آن از میراگر جرمی تنظیم شده در حالت‌های غیرفعال و فعال استفاده نمودند. نتایج بررسی آنان عملکرد مطلوب‌تر میراگر جرمی فعال را نسبت به حالت غیرفعال نشان داد، به طوری که بیشینه شتاب عرشه سکو ۲۰ درصد و در طول زمان ۵۰ درصد کاهش پیدا کرد. قدیمی و تقی‌خانی [۴] در سال ۲۰۲۱ سکوی نفتی سیری را تحت بارگذاری‌های محیطی و دینامیکی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای کنترل این سازه از میراگر جرمی در حالت‌های غیرفعال و نیمه فعال استفاده کردند. در حالت نیمه فعال میرایی میراگر جرمی را توسط میراگر سیال مغناطیسی تامین می‌کردند و به منظور بهره‌برداری بهتر از میراگر سیال مغناطیسی، با استفاده از الگوریتم منطق فازی میزان ولتاژ اعمالی به آن را تنظیم کردند. نتایج آنان نشان داد که شتاب، جابه‌جایی، برش پایه و لنگر واژگونی به ویژه در حالت کنترل نیمه فعال به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد.

ابزارهای کنترل غیرفعال قابل اطمینان هستند و باعث ناپایداری سازه نمی‌شوند و برای فعال‌سازی به انرژی خارجی نیاز ندارند [۵]. نیروی کنترلی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.farzam@maragheh.ac.ir



الگوریتم فازی ولتاژ ورودی میراگر سیال مغناطیسی را تنظیم نمودند. آن‌ها نیز به این نتیجه رسیدند که در حالت کنترل نیمه‌فعال با استفاده از الگوریتم منطق فازی نتیجه مطلوب‌تری حاصل می‌گردد.

برداشت انرژی فرآیندی است که از طریق آن انرژی از منابع خارجی از قبیل انرژی‌های خورشیدی، حرارتی، باد و جنبشی برداشت و ذخیره می‌شوند [۱۶]. ارتعاشات مکانیکی از جمله مهم‌ترین منابع انرژی هستند که در سیستم‌ها و دستگاه‌های مختلف وجود داشته و معمولاً بدون استفاده هستند [۱۸ و ۱۷]. مفهوم برداشت انرژی از ارتعاشات سازه‌های عمرانی نخستین بار توسط اسکرانر و همکاران [۱۹] مطرح شد. تبدیل انرژی جنبشی میراگر جرمی به انرژی الکتریکی می‌تواند برای سیستم کنترل نیمه‌فعال و فعال مورد استفاده قرار گیرد [۲۰]. هر چند سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال به انرژی زیادی نیاز ندارند اما وجود یک منبع انرژی پایدار برای آن‌ها ضروری است. در سال‌های اخیر سیستم‌های برداشت انرژی از ارتعاشات مکانیکی مورد توجه زیادی قرار گرفته است، زیرا چنین سیستم‌هایی به طور معمول قادر به بازیابی انرژی جنبشی از ارتعاشات مکانیکی و استفاده از آن‌ها برای دستگاه‌های الکترونیکی و شبکه حسگرهای بی‌سیم هستند [۱۴]. با توجه به اینکه میراگرهای الکترومغناطیس و سیال مغناطیسی تحت بارهای دینامیکی دارای حرکت رفت و برگشتی هستند می‌توانند جهت حرکت و راه‌اندازی موتورهای هیدرولیکی و ژنراتورها مفید باشند [۱۵]. تانگ [۲۱] در پژوهش خود تخمین زد که میراگر جرمی برج تایپه ۱۰۱ تحت اثر ارتعاشات بار باد می‌تواند حداکثر ۲۰۸ کیلووات انرژی الکتریکی تولید کند. گزنالس و همکاران [۲۲] یک میراگر جرمی نیمه‌فعال را ارائه دادند و با استفاده از یک استحصالگر از ارتعاشات آن انرژی الکتریکی برداشت کردند. ماریین و جبارالیس [۲۳] از TMDI برای کنترل یک سازه یک درجه آزادی استفاده کردند و ظرفیت این سیستم را برای برداشت انرژی بررسی نمودند. لین<sup>۹</sup> و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۲۱ یک سازه آزمایشگاهی یک درجه آزادی را طراحی کردند و از سه میراگر جرمی متوازن به صورت موازی برای کاهش ارتعاش سازه بهره برده و برای میرایی آن‌ها از میراگر الکترومغناطیس استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از ژنراتور DC و جعبه دنده خطی، ساز و کاری را برای استحصال انرژی از ارتعاش سازه ارائه دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که این سیستم می‌تواند به طور همزمان پاسخ دینامیکی سازه را کاهش داده و انرژی الکتریکی تولید کند. ساینسکی<sup>۱۰</sup> و همکاران [۲۵] یک سیستم یک درجه آزادی در آزمایشگاه طراحی نموده و آن را به صورت تجربی

این ابزارها از طریق تغییر شکل سازه حاصل می‌شود [۲] و دارای قابلیت پایداری مقاوم در برابر خطاهای مدل‌سازی هستند. همچنین به کارگیری و نصب این ابزارها ساده است [۶]. از نظر اقتصادی هزینه به کارگیری میراگرهای غیرفعال نسبت به سایر میراگرها کمتر است [۸ و ۷].

میراگر جرمی تنظیم شونده از جمله میراگرهای غیرفعال است که اولین بار توسط فرام<sup>۱</sup> در سال ۱۹۰۹ برای کنترل ارتعاشات در کشتی‌ها پیشنهاد گردید [۹]. چند دهه پس از آن استفاده از این ابزار در سازه مورد توجه قرار گرفت و دن هارتوگ<sup>۲</sup> روابطی را برای محاسبه نسبت‌های فرکانس و میرایی بهینه آن جهت کنترل یک سازه یک درجه آزادی ارائه داد [۱۰]. در سال ۱۹۷۸ آیوا<sup>۳</sup> و آکید<sup>۴</sup> [۱۱] این روابط را برای سازه‌های با میرایی ذاتی اصلاح نمودند.

میراگرهای نیمه‌فعال نوعی از میراگرهای غیرفعال هستند، با این تفاوت که میرایی آن‌ها در هر لحظه قابل کنترل است و میزان تغییرات در ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها برحسب پاسخ دینامیکی سازه در یک گام زمانی قبل از ارتعاش دینامیکی به وسیله حسگرها و پردازنده‌ها تعیین می‌گردد. به طور معمول میراگر جرمی نیمه‌فعال جهت کاهش ارتعاشات ناشی از بارهای دینامیکی با دوره تناوب زیاد استفاده می‌شود [۱۰]. این ابزار در واقع سیستم TMD با قابلیت میرایی متغیر می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که عملکرد این ابزارهای نیمه‌فعال فراتر از سیستم‌های TMD است و قابل مقایسه با سیستم‌های فعال AMD<sup>۵</sup> می‌باشند [۱۰].

کیم<sup>۶</sup> و کانگ<sup>۷</sup> [۱۲] در سال ۲۰۱۲ به بررسی سازه ۷۶ طبقه معیار کنترل شده توسط میراگر جرمی نیمه‌فعال پرداختند. این محققین از الگوریتم منطق فازی برای تنظیم ولتاژ میراگر سیال مغناطیسی و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای منطق فازی استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که میراگر جرمی نیمه‌فعال به طور موثرتری در مقایسه با حالت غیرفعال پاسخ سازه را کاهش می‌دهد. کاوه و همکاران [۱۳] در ۲۰۱۵ یک سازه ۱۰ طبقه معیار کنترل شده با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال را ارائه دادند. آن‌ها از الگوریتم CSS<sup>۸</sup> جهت بهینه‌سازی پارامترهای ورودی الگوریتم منطق فازی استفاده کردند و با استفاده از

- 1 Frahm
- 2 Den Hartog
- 3 IOI
- 4 IKEDA
- 5 Active Mass Damper
- 6 Kim
- 7 Kang
- 8 Charged System Search

9 Lin, G.L  
10 Sapiński

## ۲-۱- ژنراتور DC

ژنراتور ماشینی است که از طریق القای الکترومغناطیسی انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در سال ۱۸۳۲ مایکل فارادی<sup>۲</sup> اصول عملکرد ژنراتورهای الکترومغناطیسی را کشف کرد. در این پژوهش نیروی محرکه، شدت جریان و ولتاژ تولیدی ژنراتور DC که از یک مدار RL ساده تشکیل شده است، برحسب قانون القای فارادی به صورت ایده‌آل و بر اساس مقاله‌ی وانگ و همکاران [۲۶] ارائه می‌گردد. سرعت زاویه‌ای میراگر جرمی ( $\dot{\theta}$ ) و نیرو محرکه ژنراتور ( $e$ ) به صورت معادله ۱ محاسبه می‌شود:

$$\dot{\theta} = \frac{V_d - V_i}{r}; e = K_e \dot{\theta}; \quad (1)$$

در این رابطه  $V_d$  و  $V_i$  به ترتیب سرعت خطی میراگر جرمی و تراز پایه آن است.  $r$  شعاع انتقال موثر رک و پینیون بوده و  $K_e$  ثابت نیرو محرکه می‌باشد. القاگر الکتریکی را می‌توان نادیده گرفت [۲۰] و بر این اساس شدت جریان الکتریکی ژنراتور  $i$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۶]:

$$i = \frac{e}{R_g + R_M} \quad (2)$$

$R_M$  و  $R_g$  به ترتیب مقاومت ژنراتور و مقاومت بارگذاری (میراگر سیال مغناطیسی) برحسب اهم می‌باشند. در نهایت ولتاژ خروجی ژنراتور ( $V$ ) و توان تولیدی آن ( $P$ ) از معادلات ۳ و ۴ اندازه‌گیری می‌شوند:

$$V = R_M i \quad (3)$$

$$P = R_M i^2 \quad (4)$$

## ۲-۲- میراگر سیال مغناطیسی

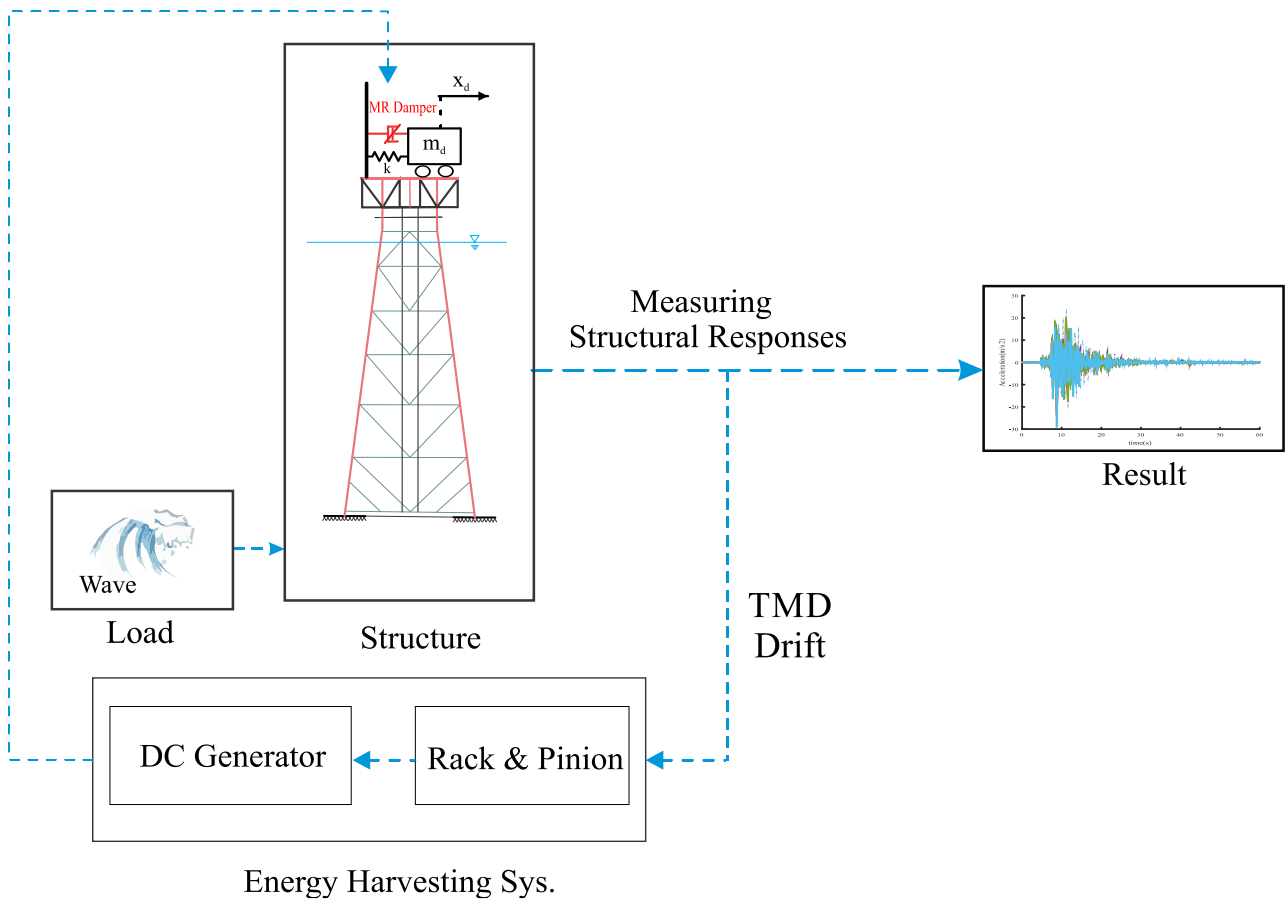
میراگر سیال مغناطیسی یک سیستم نیمه‌فعال و یکی از انواع میراگرهای ویسکوز است با این تفاوت که غلظت سیال درون آن با استفاده از انرژی الکتریکی قابل تغییر و کنترل است [۲۷]. رفتار این میراگر غیرخطی بوده و به شدت به الگوریتم مورد استفاده بستگی دارد [۲۸]. در این پژوهش از

تحت تحریکات سینوسی قرار دادند. ارتعاشات این سیستم یک درجه آزادی به وسیله میراگر سیال مغناطیسی کنترل و انرژی آن از طریق یک موتور DC و بر اساس قانون القای فارادی<sup>۱</sup> استحصال می‌گردد. نتایج نشان داد که استحصالگر انرژی می‌تواند به عنوان یک منبع انرژی پایدار جهت تغذیه میراگر سیال مغناطیسی عمل کند.

در مقاله حاضر، از میراگر جرمی در حالت نیمه‌فعال برای کنترل ارتعاشات دکل نفتی رسالت تحت اثر بار دینامیکی موج پرداخته شده است. میرایی میراگر جرمی در حالت نیمه‌فعال توسط میراگر سیال مغناطیسی (MR) تامین می‌شود. میراگر MR نیازمند انرژی خارجی است به همین دلیل برای تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز آن از ساز و کار ژنراتور DC، رک و پینیون استفاده شده است تا از ارتعاشات میراگر جرمی و سازه انرژی الکتریکی مورد نیاز میراگر MR تامین گردد؛ به این صورت که حرکت رفت و برگشتی میراگر جرمی تحت اثر بار دینامیکی موج، به وسیله رک و پینیون به حرکت زاویه‌ای قابل اعمال به ژنراتور DC تبدیل شده و انرژی الکتریکی تولید شده در ژنراتور به میراگر سیال مغناطیسی (MR) (که میرایی میراگر جرمی را بر عهده دارد) وارد می‌شود. این سیستم علاوه بر این که عملکردی همچون یک میراگر الکترومغناطیس دارد، به دلیل وابسته بودن رفتار آن به سرعت ارتعاشات سازه مانند یک الگوریتم کنترل کننده تناسبی ولتاژ ورودی به میراگر MR نیز عمل می‌کند.

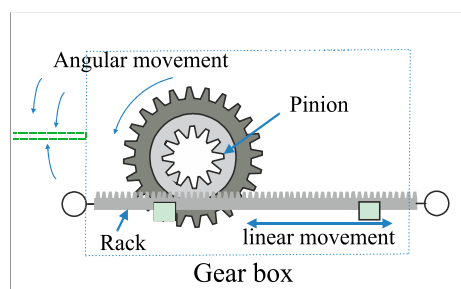
## ۲- سیستم استحصال انرژی

سیستم استحصال انرژی شامل دو بخش اصلی می‌باشد که این دو بخش عبارتند از رک و پینیون و سیستم مولد الکتریکی جریان مستقیم که در شکل ۱ نشان داده شده است. ارتعاشات خطی جرم میراگر از طریق رک و پینیون به مولد الکتریکی جریان مستقیم وارد شده و ولتاژ الکتریکی مورد نیاز میراگر MR تولید می‌شود. در این سیستم رک و پینیون که جزییات آن در شکل ۲ نشان داده شده است از یک سو به میراگر جرمی متصل است و از سوی دیگر به عرشه سکوی نفتی و حرکت خطی میراگر جرمی را از طریق پایانه‌های رک به چرخ دنده سیستم (پینیون) منتقل می‌کند. چرخ دنده نیز که خود ابزاری برای انتقال توان دورانی بین محورها است و می‌تواند گشتاور، سرعت و یا جهت چرخش را تغییر دهد حرکت زاویه‌ای قابل اعمال به ژنراتور DC را ایجاد می‌کند.



شکل ۱. نمایی شماتیک از کنترل سازه با میراگر SP-SATMD

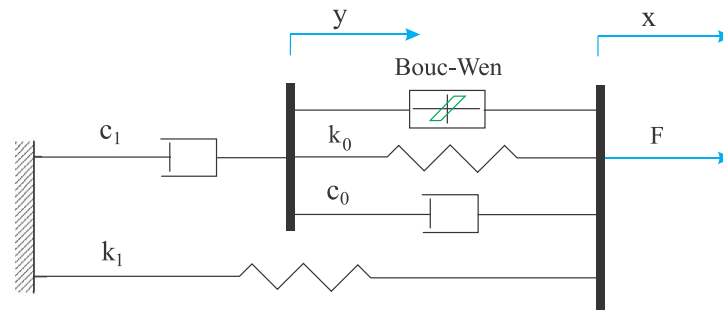
Fig. 1. Schematic representation of the controlled platform with SP-SATMD



Rack & Pinion

شکل ۲. سیستم رک و پینیون

Fig. 2. Rack and pinion system



شکل ۳. مدل بوک-ون اصلاح شده میراگر MR

Fig. 3. Modified Bouc-Wen model of the MR damper

میراگر سیال مغناطیسی مدل RD-1005 ساخت شرکت لورد کورپوریشن استفاده شده است. معادلات حاکم بر نیروی تولید شده توسط این میراگر با استفاده از مدل بوک-ون<sup>۱</sup> اصلاح شده که در شکل ۳ نشان داده شده، به صورت زیر است:

نیروی تولید شده توسط میراگر بوده و  $\dot{Z}$  معرف رفتار تاریخچه زمانی آن است. ولتاژ ورودی به میراگر بوده و مقادیر بهینه سایر پارامترهای موجود در این معادلات  $(c_{0a}, c_{0b}, k_0, c_{1a}, c_{1b}, k_1, x_0, \alpha_a, \gamma, u, A, n, \eta)$  در مقاله دایک<sup>۲</sup> و همکاران [۲۹] برای یک میراگر سیال مغناطیسی مشخص محاسبه و توضیح داده شده است.

### ۳- میراگر جرمی تنظیم شونده

میراگر جرمی یک سیستم جرم-فنر-میراگر است که در ارتفاع مناسبی از سازه (معمولاً تراز آخر) قرار داده می‌شود. مشخصات آن با استفاده از معادلات به گونه‌ای تعیین می‌گردد که فرکانس زاویه‌ای آن با فرکانس مود اول سازه هماهنگ شده و رفتاری خارج از فاز با سازه داشته باشد [۳۰]. برای محاسبه پارامترهای میراگر جرمی هماهنگ شده دن هارتوگ [۳۱] روابط زیر را ارائه داد که با استفاده از آن‌ها نسبت میرایی بهینه  $\xi_{opt}$  و نسبت فرکانسی بهینه  $\alpha_{opt}$  محاسبه می‌شوند.

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (12)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (13)$$

در این دو معادله  $\mu$  نسبت جرم میراگر به جرم کل سازه است. این

$$F_{MR} = C_1 \dot{y} + k_1 (x_d - x_0) \quad (5)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}_d - \dot{y}| |z| |z|^{n-1} - \beta (\dot{x}_d - \dot{y}) |z|^m + A (\dot{x}_d - \dot{y}) \quad (6)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \{ \alpha z + c_0 \dot{x}_d + k_0 (x_d - y) \} \quad (7)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (8)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} u \quad (9)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} u \quad (10)$$

$$\dot{u} = -\eta (u - v) \quad (11)$$

$\mathbf{F}_D$  از معادله موريسون  $\mathbf{F}_w$  محاسبه می‌شود. در یک جریان نوسانی با سرعت جریانی  $\mathbf{x}(t)$  معادله موريسون به شکل زیر است:

$$\mathbf{F}_w = \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_D \quad (17)$$

$$\mathbf{F}_i = \rho C_M \mathbf{V} \dot{\mathbf{x}}(t) \quad (18)$$

$$\mathbf{F}_D = C_d A' (\mathbf{x}(t) - \dot{\mathbf{U}}(t)) |\mathbf{x}(t) - \dot{\mathbf{U}}(t)| \quad (19)$$

در این معادلات  $\mathbf{x}(t)$  و  $\dot{\mathbf{x}}(t)$  سرعت و شتاب افقی ذرات موج بوده و در جهت عمود بر محور سازه می‌باشند.  $\rho$  چگالی آب بوده و برابر ۱۰۲۴ کیلوگرم بر متر مکعب است.  $C_M$  و  $C_d$  ضرایب اینرسی و پسا هستند که با توجه به آیین‌نامه API تعیین می‌شوند.  $\mathbf{V}$  و  $\mathbf{A}$  حجم و سطح تصویر شده اعضا هستند.

ماتریس جرم از جرم سازه  $\mathbf{M}_i$  و جرم افزوده  $\mathbf{M}_a$  تشکیل شده است:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_a \quad (20)$$

$$\mathbf{M}_a = \rho(C_M - 1)\mathbf{V} \quad (21)$$

با اضافه کردن میراگر جرمی نیمه‌فعال خود توان به سازه، یک درجه آزادی دیگر به ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی اضافه شده و بردار  $\mathbf{U}(t)$  به صورت یک ماتریس  $N+1$  درجه آزادی تعریف می‌شود. در حالت نیمه‌فعال نیروی میرایی میراگر جرمی توسط میراگر MR تامین می‌گردد.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 & & & & & \\ & M_2 & & & & \\ & & M_3 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & M_N & \\ & & & & & M_d \end{bmatrix} \quad (22)$$

روابط برای سازه‌های چند درجه آزادی و دارای میرایی ذاتی توسط آیوا و اکیدا [۱۱] به شکل زیر اصلاح شدند:

$$\bar{\alpha}_{opt} = \alpha_{opt} - (0.241 + 1.7\mu - 2.6\mu^2) \xi_s - (1 - 1.9\mu - \mu^2) \xi_s^2 \quad (14)$$

$$\bar{\xi}_{opt} = \xi_{opt} + (0.13 + 0.12\mu + 0.4\mu^2) \xi_s - (0.01 + 0.9\mu + 3\mu^2) \xi_s^2 \quad (15)$$

در این روابط  $\xi_s$  نسبت میرایی سازه است.

در این پژوهش میرایی میراگر جرمی تنظیم شونده در حالت نیمه‌فعال توسط میراگر سیال مغناطیسی فراهم می‌شود و انرژی الکتریکی میراگر سیال مغناطیسی از طریق سیستم استحصال انرژی تامین می‌گردد.

#### ۴- معادلات حاکم بر سازه

میراگر جرمی تنظیم شده همانند یک سازه یک درجه آزادی که در تراز آخر قرار می‌گیرد؛ مدل‌سازی می‌شود. نیروی میراگر MR که میرایی میراگر جرمی را تامین می‌کند از یک سو به تراز پایه خود (عرشه سکوی نفتی) وارد شده و معکوس آن به میراگر جرمی وارد می‌شود.

معادله دیفرانسیل یک سازه برشی چند درجه آزادی خطی تحت اثر بار موج در قالب‌های ماتریسی به صورت معادله ۱۶ است:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) = \mathbf{F}_w + \Delta\mathbf{F}_{MR} \quad (16)$$

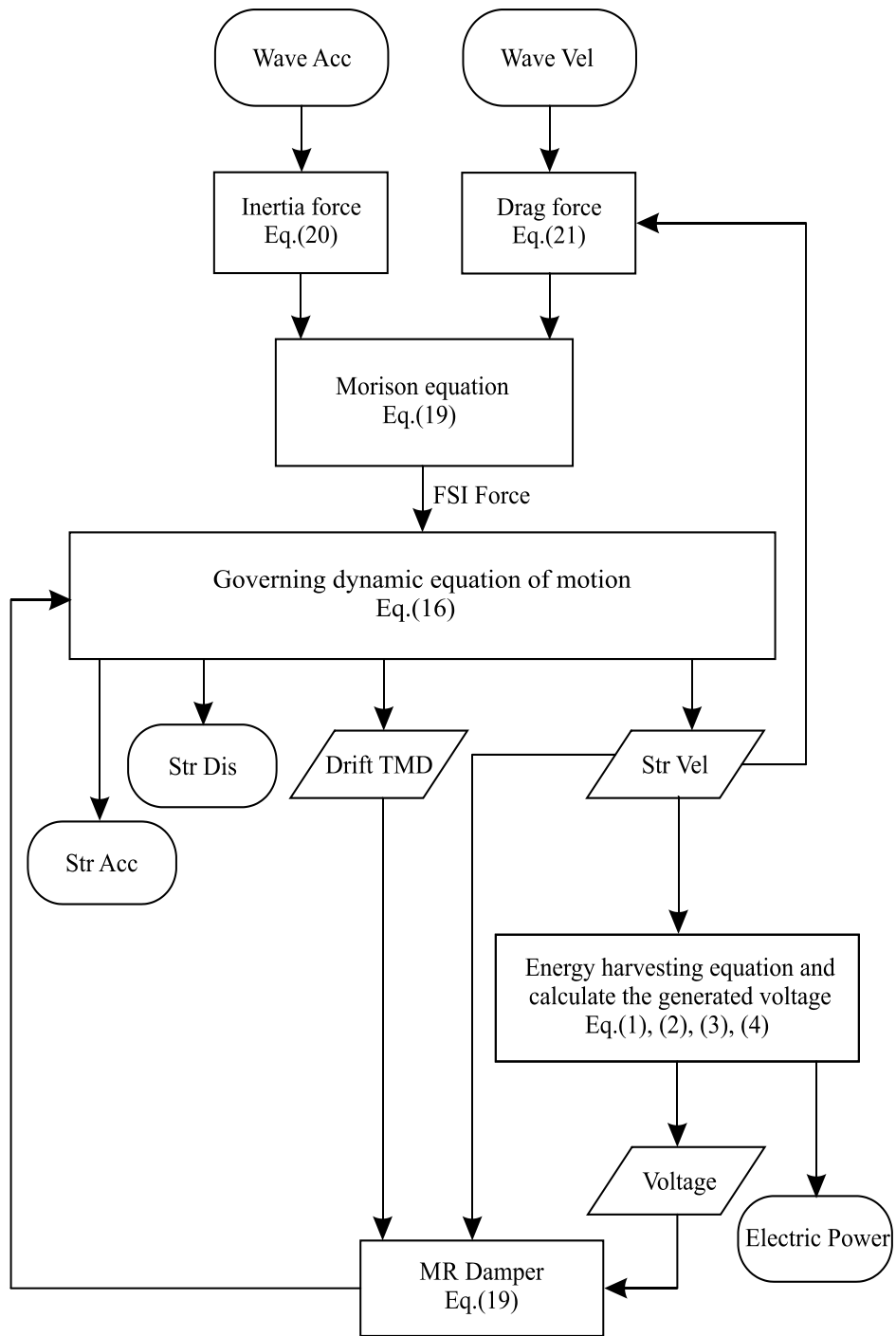
که  $\mathbf{M}$ ،  $\mathbf{C}$  و  $\mathbf{K}$  برای یک سازه  $N$  درجه آزادی به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی به ابعاد  $N \times N$  هستند.  $\mathbf{U}(t)$ ،  $\dot{\mathbf{U}}(t)$  و  $\ddot{\mathbf{U}}(t)$  بردارهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی هستند و  $\mathbf{F}_w$  نیروی موج وارد بر سازه می‌باشد.  $\mathbf{F}_{MR}$  نیروی میراگر MR بوده و  $\mathbf{\Lambda}$  ماتریس  $N \times 1$  است که نشانگر موقعیت اعمال نیروی کنترلی می‌باشد.

نیروی موج مطابق معادله ۱۷ و از طریق نیروهای اینرسی  $\mathbf{F}_i$  و پسا

- 2 Drag Force
- 3 Morison Equation

- 1 Inertia Force





شکل ۴. فلوچارت محاسباتی مدل‌سازی عددی

Fig. 4. Computational flowchart of the numerical modeling



جدول ۲. نتایج صحت‌سنجی سکوی نفتی مدل‌سازی شده توسط مهاجرنسب و همکاران

Table 2. Verification of the offshore jacket platform modeled by Mohajernasab et al

پارامتر	مهاجرنسب و همکاران	محاسبه شده	درصد خطا (%)
دوره تناوب مود اول (ثانیه)	۲,۳۵۵	۲,۳۴	۰/۴۲
حداکثر جابه‌جایی عرشه تحت موج ۱۰۰ سال (متر)	۰,۰۷۷	۰,۰۷۴۲	۳,۶۳

جدول ۳. مشخصات میراگر جرمی تنظیم شده [۴]

Table 3. Parameters of the designed tuned mass damper [4]

پارامتر	مقدار
نسبت میرایی سکوی نفتی	۲٪
نسبت جرمی	۳٪
فرکانس سکوی نفتی	۲,۳۱
نسبت فرکانسی بهینه	۰,۹۶۳۹
نسبت میرایی بهینه	۰,۱۰۶

همانطور که در بخش ۲ اشاره شد به منظور طراحی سیستم استحصال انرژی در صورت صرف‌نظر از اثر القاگر الکتریکی به ۴ پارامتر  $K_e$  (ثابت نیرو محرکه)،  $r$  (شعاع انتقال موثر رک و پینون)،  $R_g$  (مقاومت ژنراتور) و  $R_M$  (مقاومت بارگذاری) نیاز است که مقادیر این پارامترها به ترتیب در جدول ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۵ جزئیات اجرایی میراگر مورد استفاده بر روی عرشه سکوی نفتی نشان داده شده است؛ به این صورت که میراگر MR میرایی میراگر SP-SATMD را تامین کرده و انرژی مورد نیاز آن از ارتعاشات سازه فراهم می‌شود. میراگر MR مورد استفاده در حالت نیمه‌فعال خود توان، میراگر ۱۰۰۰ کیلو نیوتنی ارائه شده توسط دایک و اسپنسر [۲۹] می‌باشد. روش‌های مختلفی جهت تولید رکورد تاریخچه زمانی امواج پیشنهاد شده است که هزینه محاسباتی در آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

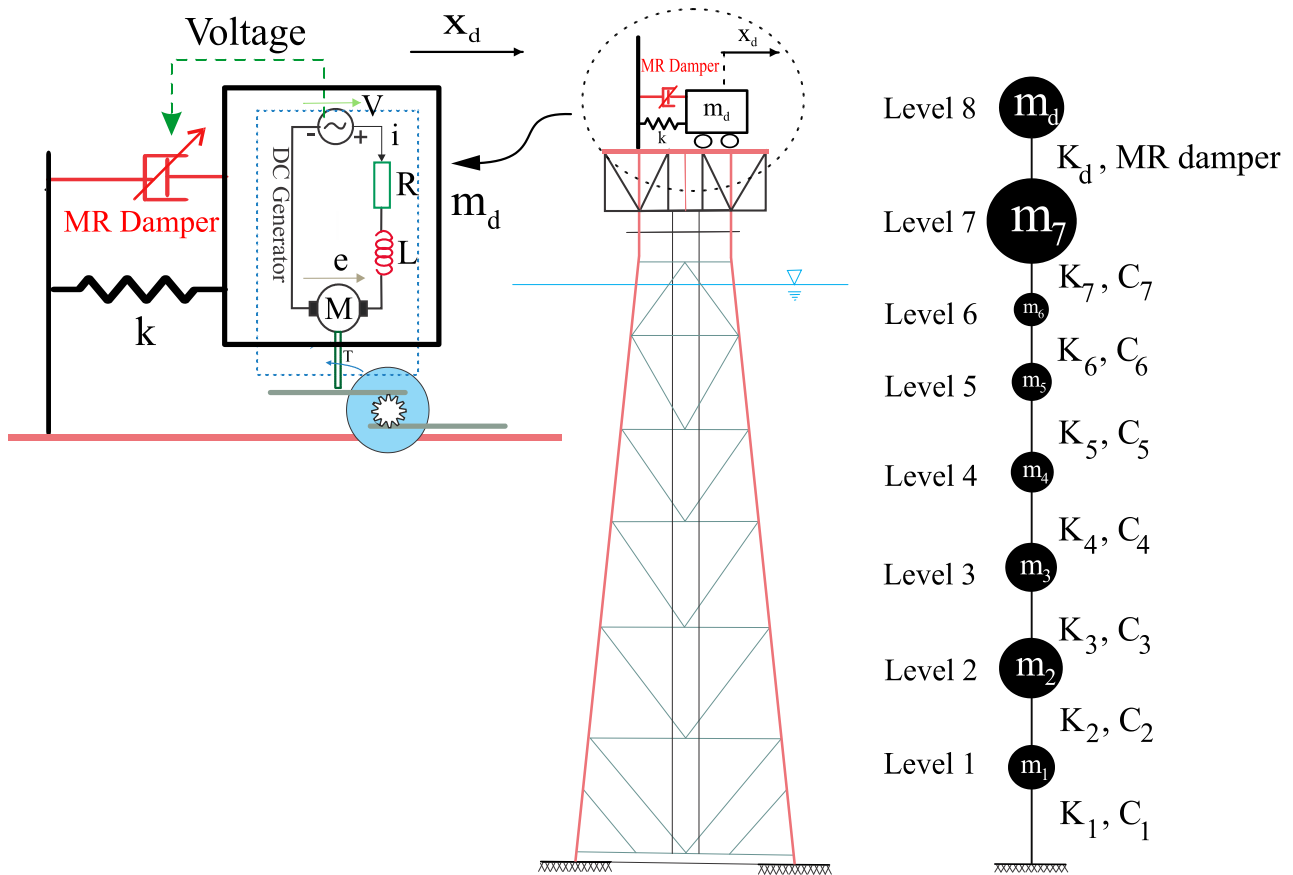
و بارگذاری موج مشابهی دارد مقادیر دوره تناوب مود اول سازه و حداکثر جابه‌جایی عرشه تحت بار موج با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در این مطالعه با مقادیر گزارش شده در مقاله مرجع مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مقایسه به طور خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر اختلاف برای هر دو شاخص دوره تناوب مود اول و حداکثر جابه‌جایی عرشه سکوی نفتی در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

برای کنترل ارتعاشات دینامیکی این سکوی نفتی از میراگر جرمی هماهنگ شده در حالت نیمه‌فعال خود توان استفاده شده است. برای طراحی میراگر جرمی هماهنگ شده، نسبت جرمی میراگر به صورت متداول کمتر از ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود که در این مطالعه نیز از نسبت جرمی ۳ درصد استفاده شده است. همچنین مقدار نسبت فرکانسی و نسبت میرایی میراگر بر طبق رابطه اصلاح شده توسط آیوا و اکیدا [۱۱] محاسبه شده و مقادیر این پارامترها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات سیستم استحصال انرژی [۲۶]

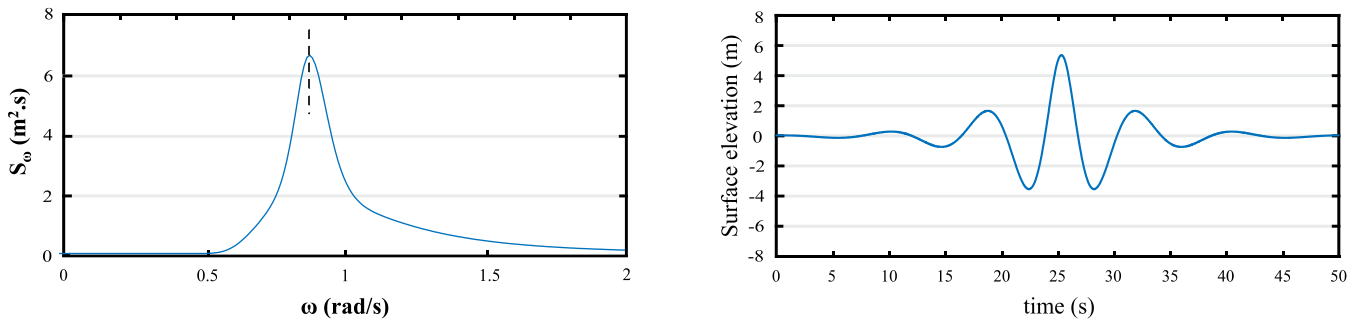
Table 4. Parameters of the energy harvesting system [26]

مقدار	پارامتر
۱۰ (V.s/m)	$K_e$
۱ (cm)	$r$
۴۱۷ ( $\Omega$ )	$R_g$
۱۵ ( $\Omega$ )	$R_M$



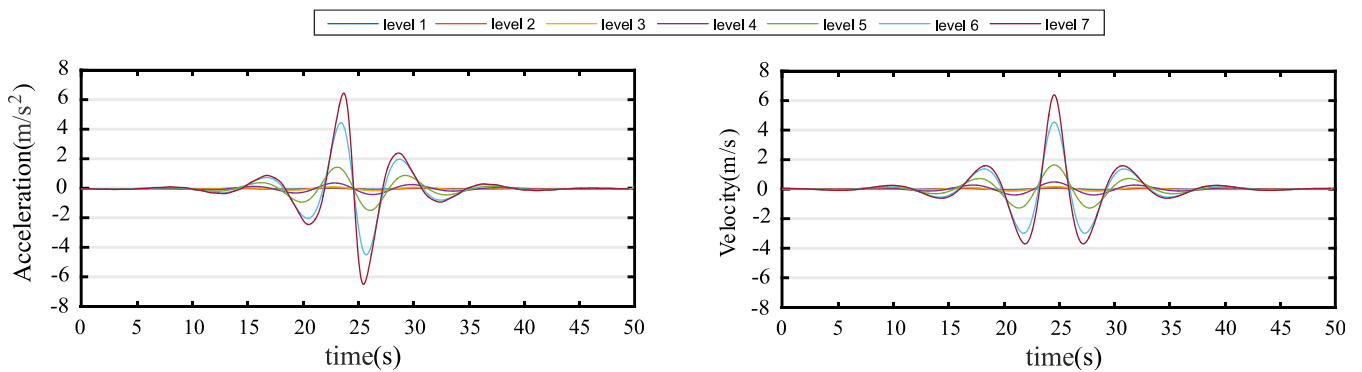
شکل ۵. دکل نفتی کنترل شده با میراگر جرمی نیمه فعال خود توان و جزئیات اجرایی آن

Fig. 5. Controlled offshore jacket platform with SP-SATMD and its implementation details



شکل ۶. تاریخچه زمانی رکورد موج و طیف مربوطه

Fig. 6. Time history of the wave record and its spectrum



شکل ۷. شتاب و سرعت بار موج با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله

Fig. 7. Acceleration and velocity of wave load with 100-year return period

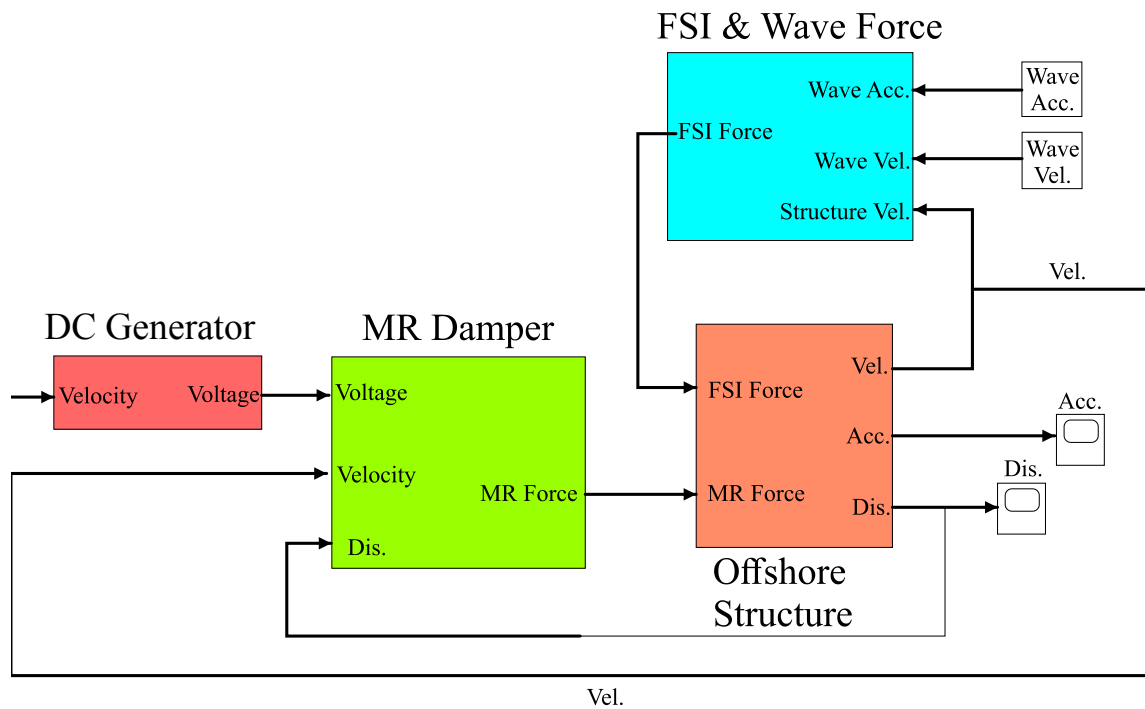
دوام اصلاح شده در شکل ۷ ارائه گردیده و نیروی اندرکنش سیال-سازه بر اساس معادله موريسون محاسبه شده است.

ضرایب اینرسی  $C_M$  و پسا  $C_d$  به ترتیب ۱٫۲ و ۱٫۰۵ در نظر گرفته شده‌اند. ارتفاع موج مشخصه، دوره تناوب قله طیف و تراز قله آن به ترتیب ۵٫۸۳ متر، ۷٫۱ ثانیه و ۴٫۷۷ متر می‌باشد.

در این مطالعه برای حل معادله حرکت تحت اثر بار دینامیکی موج و تحلیل تاریخچه زمانی آن، از محیط سیمولینک<sup>۱</sup> نرم‌افزار MATLAB و روش حلگر (ode45) استفاده شده است. بلوک‌های سیمولینک در

یکی از این روش‌ها، روش تحلیل موج دوام اصلاح شده است. این روش که تابع قطار موج نو افزایشی اصلاح شده است در سال ۲۰۱۴ توسط مهاجرنسب و همکاران [۳۲] پیشنهاد شد. در این روش بر اساس دوره تناوب قله طیف، زمان بهینه تحلیل محاسبه شده و به صورت دقیق‌تری رفتار امواج تعریف می‌شود. آن‌ها از این روش برای تولید رکوردهای امواج خلیج فارس در دوره‌های بازگشت مختلف جهت ارزیابی پاسخ سکوها دریاپی استفاده کردند. در این پژوهش نیز بار موج وارد بر سکوی نفتی، بار دینامیکی امواج خلیج فارس با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله می‌باشد که نمودار تاریخچه زمانی رکورد این موج در شکل ۶ و شتاب و سرعت آن بر اساس روش تحلیل موج

1 Simulink



شکل ۸. بلوک‌های سیمولینک متلب

Fig. 8. MATLAB Simulink blocks

در هنگام وقوع بارهای دینامیکی امکان آسیب به تاسیسات و قطع منبع انرژی بسیار زیاد است. همانطور که در نمودارهای شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است در سیستم کنترلی میراگر جرمی نیمه‌فعال خود توان، سیستم استحصال انرژی، انرژی الکتریکی مورد نیاز میراگر سیال مغناطیسی را به شکل بهینه‌ای تامین کرده و نیاز آن را به منبع انرژی خارجی برطرف نموده است. از آن جهت که عملکرد سیستم استحصال انرژی مبتنی بر سرعت ارتعاش میراگر جرمی است، با افزایش سرعت آن این سیستم انرژی الکتریکی بیشتری تولید کرده و برعکس؛ در واقع این سیستم همانند یک الگوریتم کنترل کننده پیوسته تناسبی مبتنی بر سرعت عمل کرده است. الگوریتم‌های کنترلی برای محاسبه ولتاژ مناسب، نیاز به حسگرهایی برای دریافت اطلاعات از سازه و پردازشگرهایی برای تحلیل آن‌ها دارند و از این جهت دارای تاخیر زمانی می‌باشند. اما سیستم استحصال انرژی به دلیل آن که خود جزوی از سیستم تولید ولتاژ اعمالی به میراگر MR است و با استفاده از رک-پینینون ارتعاشات سازه را مستقیماً دریافت می‌کند، تاخیر زمانی ندارد.

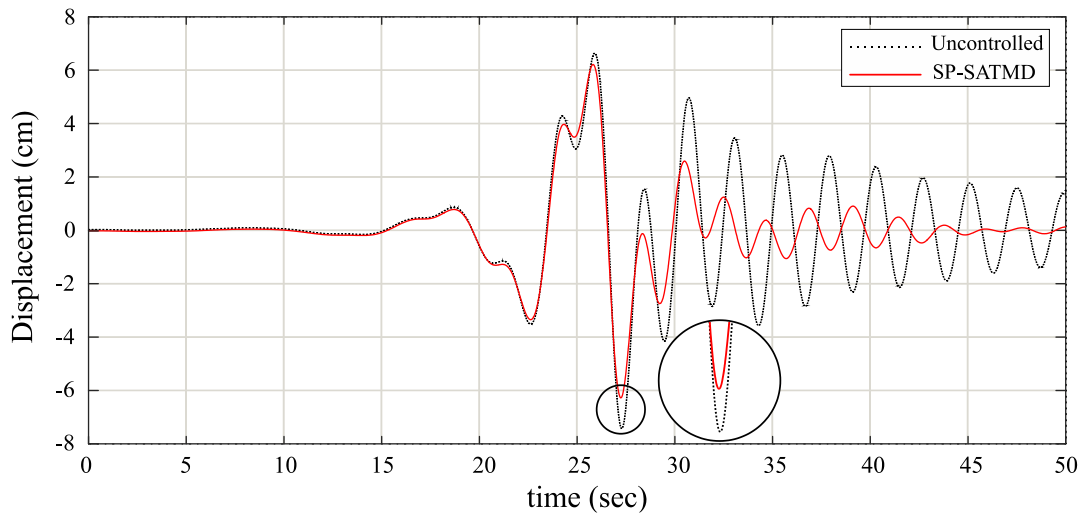
شکل ۸ نشان داده شده است. در بلوک FSI & Wave Force که ورودی‌های آن شتاب و سرعت موج و سرعت ترازهای سازه است با استفاده از معادله موريسون نیروی موج محاسبه می‌شود. ولتاژ تولیدی توسط سیستم استحصال انرژی که ورودی آن سرعت نسبی SP-SATMD است در بلوک DC Generator محاسبه می‌شود. در بلوک MR Damper که ورودی‌های آن دریافت و سرعت SP-SATMD و ولتاژ تولید شده با سیستم استحصال انرژی است نیروی میراگر MR محاسبه شده و بلوک offshore Structure نیروی موج را به ترازهای سازه و نیروی میراگر MR را به SP-SATMD و تراز پایه‌ی آن وارد کرده و معادله حرکت حاکم بر سازه را حل می‌کند.

نتایج تحلیل تاریخچه زمانی سکوی نفتی رسالت تحت بار موج با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در جدول ۵ و شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. این نتایج بیانگر کاهش حداکثر جابه‌جایی و شتاب عرشه سکوی نفتی در حالت کنترل نیمه‌فعال خود توان نسبت به حالت کنترل نشده به ترتیب به مقدار ۱۵ و ۱۶٫۲۴ درصد است.

جدول ۵. حداکثر جابه‌جایی و شتاب عرشه سکوی نفتی تحت اثر بار موج

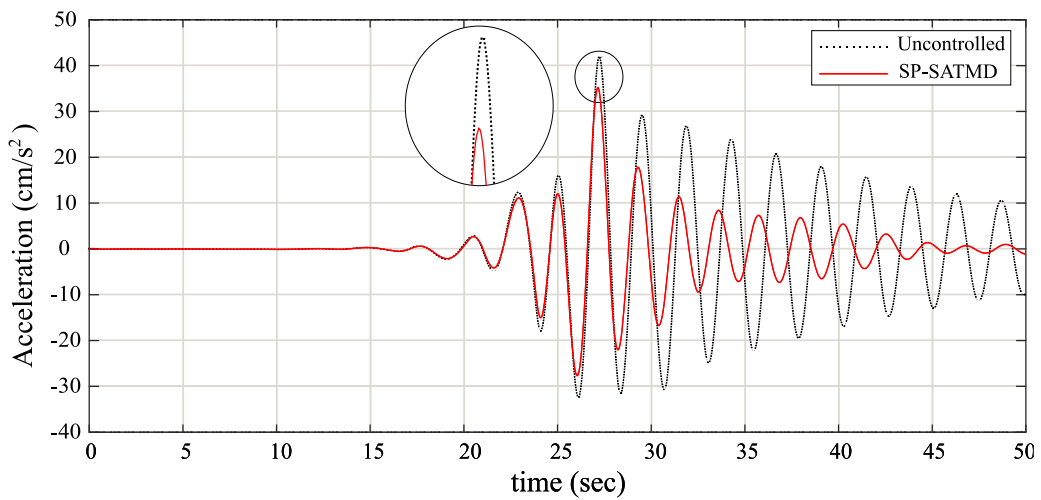
Table 5. Maximum displacement and acceleration of the deck of the jacket platform under the wave load

حداکثر شتاب ( $\text{cm/s}^2$ )	حداکثر جابه‌جایی (cm)	روش کنترل
۴۰/۶۵	۷/۴۲	کنترل نشده
۳۴/۰۵	۶/۳۰	کنترل نیمه‌فعال خود توان (SP-SATMD)



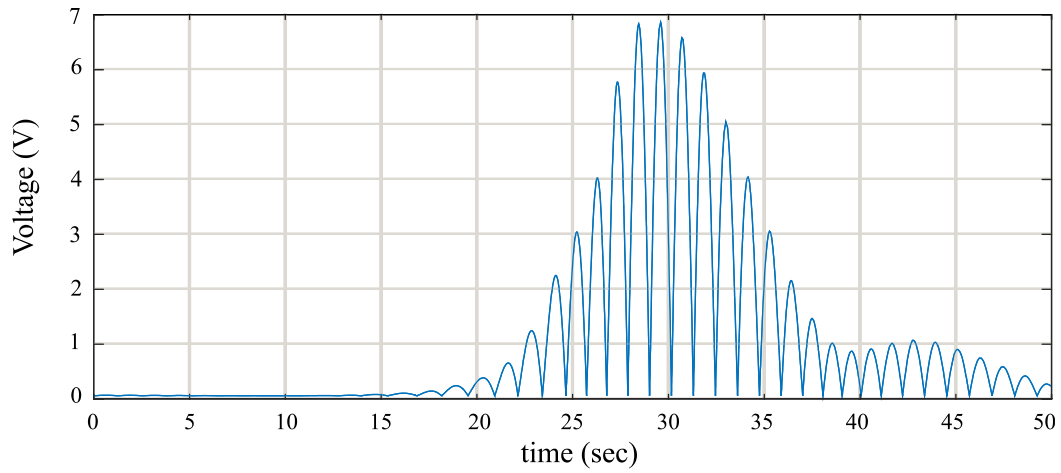
شکل ۹. مقایسه جابه‌جایی عرشه سکوی نفتی تحت اثر بار موج

Fig. 9. Displacement of the deck of the jacket platform under the wave load



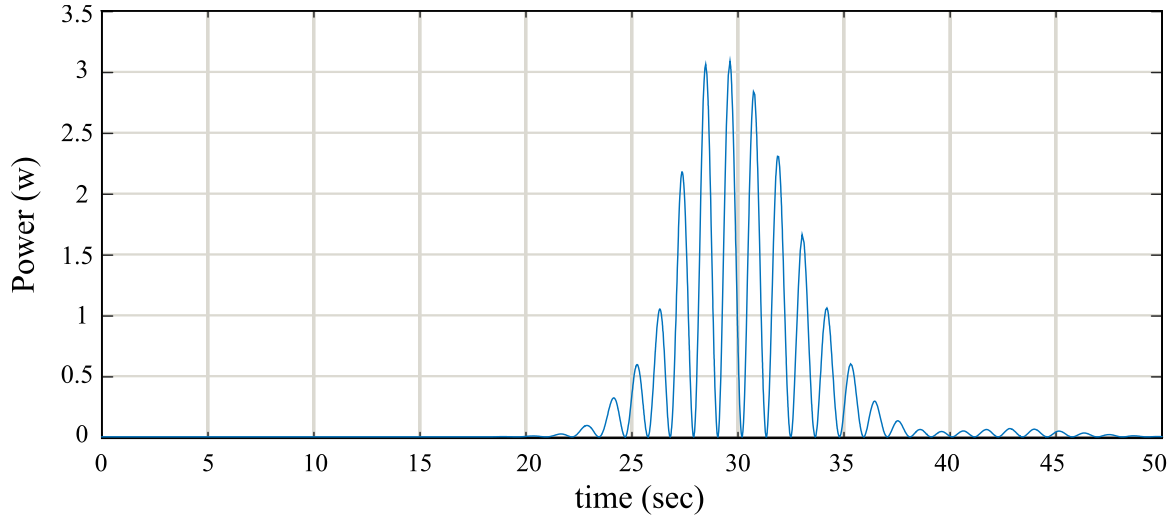
شکل ۱۰. مقایسه شتاب عرشه سکوی نفتی تحت اثر بار موج

Fig. 10. Absolute acceleration of the deck of the jacket platform under the wave load



شکل ۱۱. ولتاژ استحصال شده از ارتعاش سازه

**Fig. 11. Voltage harvested from the structural vibration**



شکل ۱۲. توان الکتریکی استحصال شده از ارتعاش سازه

**Fig. 12. Electric power harvested from the structural vibration**

- Dynamics, 89(2) (2017) 7.55-771
- [3] M. FahimiFarzam, S. Mousavi Gavgani, B. Alinejad, G. BEKDAŞ, Optimal control of jacket platform under wave vibration with Active Tuned Mass Damper, Sharif Journal of Civil Engineering, 37(1.2) (2021) 107-117.
- [4] B. Ghadimi, T. Taghikhany, Dynamic response assessment of an offshore jacket platform with semi-active fuzzy-based controller: A case study, Ocean Engineering, 238 (2021) 109747.
- [5] D. Lin, X. Wang, Observer-based decentralized fuzzy neural sliding mode control for interconnected unknown chaotic systems via network structure adaptation, Fuzzy Sets and Systems, 161(15) (2010) 2066-2080.
- [6] G. Housner, L.A. Bergman, T.K. Caughey, A.G. Chassiakos, R.O. Claus, S.F. Masri, R.E. Skelton, T. Soong, B. Spencer, J.T. Yao, Structural control: past, present, and future, Journal of engineering mechanics, 123(9) (1997) 897-971.
- [7] A. Javanmardi, Z. Ibrahim, K. Ghaedi, H.B. Ghadim, M.U. Hanif, State-of-the-art review of metallic dampers: testing, development and implementation, Archives of Computational Methods in Engineering, 27(2) (2020) 455-478.
- [8] P. Martinelli, M.G. Mulas, An innovative passive control technique for industrial precast frames, Engineering Structures, 32(4) (2010) 1123-1132.
- [9] M. Gutierrez Soto, H. Adeli, Tuned mass dampers, Archives of Computational Methods in Engineering, 20(4) (2013) 419-431.
- [10] J. Den Hartog, Mechanical Vibrations McGraw-Hill Book Company, New York, (1956) 122-169.
- [11] T. IOI, K. IKEDA, On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system, Bulletin of JSME, 21(151) (1978) 64-71.
- [12] H.-S. Kim, J.-W. Kang, Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic algorithm, Engineering Structures, 41 (2012) 242-257.
- [13] A. Kaveh, S. Pirgholizadeh, H.O. Khadem, Semi-active tuned mass damper performance with optimized fuzzy controller using CSS algorithm, (2015).

همانطور که اشاره شد میرایی میراگر جرمی نیمه‌فعال خود توان متغیر بوده و وابسته به تحریکات سازه است؛ به همین جهت برخلاف میراگر جرمی غیرفعال که دارای پارامترهای ثابت است می‌تواند در برابر بارهای دینامیکی نامشخص به صورت هوشمند عمل کرده و دامنه عملکرد وسیع‌تری دارد. از جمله محدودیت‌های میراگر SP-SATMD این است که به دلیل وجود میراگر MR و نیمه‌فعال بودن رفتاری غیرخطی دارد. این میراگر را نمی‌توان در ترازهای پایین و مستغرق در آب نصب کرد. همچنین به دلیل وجود سیستم استحصال انرژی، اجرای آن نسبت به سایر میراگرها مشکل‌تر است و نسبت به میراگرهای غیرفعال هزینه‌بر است. این میراگر فضای زیادی را اشغال می‌کند و دارای وزن زیادی است (۱ تا ۵ درصد وزن کل سازه).

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش کنترل نیمه‌فعال با استفاده از میراگر SP-SATMD از طریق مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار MATLAB بر روی سکوی نفتی فراساحلی رسالت تحت بار موج، با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد حداکثر جابه‌جایی و شتاب عرشه سکوی نفتی در کنترل با میراگر جرمی نیمه‌فعال خود توان به ترتیب به مقدار ۱۵ و ۱۶٫۲۴ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه کاهش ۱۵ درصدی ارتعاش عرشه عمر مفید سازه را دو برابر می‌کند، می‌توان گفت روش کنترلی پیشنهاد شده از نظر اقتصادی و هزینه‌های مربوط به استخراج انرژی بسیار مقرون به صرفه بوده و از اهمیت زیادی برخوردار است.

سیستم استحصال انرژی توانسته انرژی الکتریکی مورد نیاز میراگر SP-SATMD را به شکل بهینه‌ای تامین نماید و همانند یک الگوریتم کنترل کننده تناسبی عمل کند و با این روش نیاز میراگر SP-SATMD به انرژی خارجی را برطرف نماید. از این رو میراگر نیمه‌فعال SP-SATMD همانند میراگرهای غیرفعال عمل کرده و از مزایای آن‌ها، مبتنی بر عدم نیاز به انرژی خارجی برخوردار گشته است. همچنین به دلیل آن که سیستم استحصال انرژی خود جزوی از مدار انتقال انرژی به میراگر MR است، برخلاف سایر کنترل کننده‌های نیمه‌فعال فاقد تاخیر زمانی می‌باشد.

## منابع

- [1] B.-L. Zhang, Q.-L. Han, X.-M. Zhang, G.-Y. Tang, Active control of offshore steel jacket platforms, Springer, 2019.
- [2] B.-L. Zhang, Q.-L. Han, X.-M. Zhang, Recent advances in vibration control of offshore platforms, Nonlinear

- reduction, and energy harvesting, *Smart structures and systems*, 19(6) (2017) 665-678.
- [24] G.L. Lin, C.C. Lin, Y.J. Chen, T.C. Hung, Experimental verification of electromagnetic multiple tuned mass dampers for energy harvesting and structural control, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(13) (2021) 3483-3504.
- [25] B. Sapiński, P. Orkisz, Ł. Jastrzębski, Experimental Analysis of Power Flows in the Regenerative Vibration Reduction System with a Magnetorheological Damper, *Energies*, 14(4) (2021) 848.
- [26] Z. Wang, Z. Chen, B.F. Spencer Jr, Self-powered and sensing control system based on MR damper: presentation and application, in: *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2009*, International Society for Optics and Photonics, 2009, pp. 729240.
- [27] M. Rezaee, A.M. Aly, Vibration control in wind turbines to achieve desired system-level performance under single and multiple hazard loadings, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(12) (2018) e2261.
- [28] S. Dyke, B. Spencer, A comparison of semi-active control strategies for the MR damper, in: *Proceedings Intelligent Information Systems. IIS'97*, IEEE, 1997, pp. 580-584.
- [29] S. Dyke, B. Spencer, M. Sain, J. Carlson, Phenomenological model of a magnetorheological damper, *J. Eng. Mech. ASCE*, 123(3) (1997) 230-238.
- [30] A. Yakut, Overview of seismic performance assessment procedures for rc buildings in Turkey, (2020).
- [31] J. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, (1934), 103, in, McGraw-hill.
- [32] S. Mohajernasab, M.A. Dastan Diznab, M.R. Tabeshpour, H. Mehdigholi, M.S. Seif, 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) (2014) 71-82.
- [14] M. Safaei, H.A. Sodano, S.R. Anton, A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2018-2008), *Smart Materials and Structures*, 28(11) (2019) 113001.
- [15] D. Ning, S. Sun, H. Du, W. Li, N. Zhang, Vibration control of an energy regenerative seat suspension with variable external resistance, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 106 (2018) 94-113.
- [16] R. Maroofiazar, M.F. Farzam, Experimental investigation of energy harvesting from sloshing phenomenon: Comparison of Newtonian and non-Newtonian fluids, *Energy*, 225 (2021) 120264.
- [17] A. Munaz, B.-C. Lee, G.-S. Chung, A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet, *Sensors and Actuators A: Physical*, 201 (2013) 134-140.
- [18] D.W. Oh, D.Y. Sohn, D.G. Byun, Y.S. Kim, Analysis of electromotive force characteristics and device implementation for ferrofluid based energy harvesting system, in: *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, IEEE, 2014, pp. 2033-2038.
- [19] J. Scruggs, W. Iwan, Control of a civil structure using an electric machine with semiactive capability, *Journal of Structural Engineering*, 129(7) (2003) 951-959.
- [20] X. Tang, L. Zuo, Simultaneous energy harvesting and vibration control of structures with tuned mass dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(18) (2012) 2117-2127.
- [21] X. Tang, Simultaneous energy harvesting and vibration control of tall buildings using electricity-generating tuned mass dampers, State University of New York at Stony Brook, 2013.
- [22] A. Gonzalez-Buelga, L.R. Clare, A. Cammarano, S.A. Neild, S.G. Burrow, D.J. Inman, An optimised tuned mass damper/harvester device, *Structural Control and Health Monitoring*, 21(8) (2014) 1154-1169.
- [23] L. Marian, A. Giaralis, The tuned mass-damper-inerter for harmonic vibrations suppression, attached mass



چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Fahimi Farzam, B. Alinejad, R. Marooofiazar, M. Mousaviyan Safakhaneh, Control of Offshore Jacket Platform under Wave Loads Using Self-Powered Semi-Active Tuned Mass Damper, Amirkabir J. Civil Eng., 55(2) (2023) 247-264.*

DOI: 10.22060/ceej.2022.21295.7707



