مبانی و سازوکار چاه غیرخطی انرژی در کاهش ارتعاشات

علی ابراهیمی ممقانی[1]، روح اله حسینی[2]

۱ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، a.ebrahimimamaghani@gmail.com

۲ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۲۹

چکیده

حذف ارتعاشات ناخواسته سازه‌های مهندسی موضوع شمار بسیاری از پژوهش‌های علمی است. از جمله جدیدترین و کارآمدترین جاذب‌های ارتعاشاتی که به‌تازگی مورد توجه محققان قرار گرفته است، چاه غیرخطی انرژی است. این جاذب غیرخطی که به‌صورت عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی روی سیستم‌های مختلف بررسی و آزمایش شده است، قادر است انرژی را از سیستم اولیهٔ تحت بارگذاری‌های متفاوت خارجی به‌صورت یک‌طرفه، غیرفعال و در گسترهٔ وسیعی از فرکانس‌های تحریک جذب و دفع نماید. در این مقاهل پس از آشنایی با مفاهیم اولیهٔ ارتعاشات و جاذب‌ها، کاربرد، مزایا، نحوهٔ عملکرد و ویژگی‌های چاه غیرخطی انرژی در کاهش ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی نسبت به سایر جاذب‌های ارتعاشاتی بررسی می‌شود. از جمله مشخصه‌های غیرخطی این جاذب‌ها، ایجاد ناپایداری‌هایی در سیستم است که به خارج کردن انرژی از سیستم اولیه منجر می‌شود. در نهایت نیز انواع مختلف چاه غیرخطی انرژی و رژیم‌های پاسخ به سیستم‌های همراه با این جاذب غیرفعال به‌صورت کامل بررسی می‌گردد.

واژگان کلیدی: چاه غیرخطی انرژی، فنریت غیرخطی، جاذب غیرخطی، انتقال هدفمند انرژی، رژیم نوسانات تخفیف‌یافته

۱. مقدمه

از بین بردن یا کنترل نوفه و ارتعاشات ناخواسته، از جمله مهم‌ترین خواسته‌هایی است که مهندس طراح باید به آن توجه نماید تا سازه در برابر بارهای دینامیکی مزاحمی که سبب اختلال در عملکرد آن و همچنین استهلاک و کاهش عمر و یا شکست در اثر پدیدهٔ خستگی می‌گردد، محافظت شود. بنابراین ارتعاشات ایزوله از جمله مسائلی است که بیشتر در ساختارهای مهندسی اثر می‌گذارد و تأثیر به‌سزایی در زندگی روزمره دارد. به‌طور ایده‌آل، منبع می‌تواند به‌گونه‌ای طراحی شود که ارتعاشات سطح پایین را تولید کند و با ابزارهای خارجی مثل جاذب ارتعاشاتی[1] یا عملگر نیرو[2] در میزان کاهش نیرو اثر گذارد. انتخاب معمول، انتخاب در افزودن ابزاری بین منبع و گیرنده است که به‌وسیلهٔ آن مسیر انتقال را تصحیح می‌کنند.

۲. ارتعاشات ایزوله برای سیستم یک درجه آزادی

اگر فرکانس نیروی خارجی برابر با فرکانس طبیعی سیستم باشد، حالت تشدید[3] اتفاق می‌افتد و تغییر مکان حاصل از ارتعاش که روبه افزایش است می‌تواند سبب ایجاد تنش‌ها و کرنش‌های ناخواسته و صدمه‌دیدن سیستم شود. بنابراین باید فرکانس‌های

طبیعی سیستم را کنترل کرد. فرکانس‌های طبیعی سیستم را می‌توان با تغییر جرم و ضریب صلبیت آن تغییر داد. در اغلب کاربردهای عملی، جرم را به‌راحتی نمی‌توان تغییر داد، چون مقدار آن توسط محاسبات مربوط به نقش آن جز در سیستم تعیین می‌شود. بنابراین صلبیت سیستم مهم‌ترین عاملی است که جهت تغییر فرکانس‌های طبیعی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنانچه فرکانس نیروی محرک ثابت نباشد یا شامل یک دسته از فرکانس‌های مختلف باشد، نمی‌توان از طریق تغییر فرکانس‌های طبیعی به نتیجه مطلوب رسید [۱] . ایجاد میرایی و سازوکارهای اتلاف انرژی معمولاً دامنهٔ ارتعاش را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. بنابراین برای جلوگیری از بروز حالت تشدید، می‌توان روی سیستم میرایی اعمال کرد تا اینکه بتوان پاسخ آن را کنترل نمود، اما با این کار کارایی سیستم کاهش می‌یابد و در مقابل تحریک نوسانی، تصادفی و جز این‌ها در گسترهٔ کاری نمی‌تواند کارایی لازم را داشته باشد [۲].

۳. روش‌ها و تکنیک‌های جذب ارتعاشات

از جمله تجهیزاتی که به‌منظور کنترل ارتعاشات استفاده می‌شود، می‌توان به جاذب‌های ارتعاشی اشاره کرد. در ادامه به تشریح هر یک از این موارد پرداخته می‌شود.

۳-۱. جاذب‌های غیرفعال[۴]

ارتعاشات ایزولهٔ غیرفعال اولین و مهم‌ترین راه‌حل برای ارتعاش انتقال‌یافته است که مزیت اصلی در ساده‌بودن آنهاست که احتیاج به منبع تغذیهٔ خارجی، کامپیوتر، کنترلر و دیگر وسائل گران‌قیمت ندارند. جذب‌کننده‌های ارتعاش غیرفعال عبارت‌اند از یک سیستم کمکی جرم و فنر قابل تنظیم که پاسخ سیستم را با میرایی جزئی به‌میزان بسیار زیادی کاهش می‌دهند [۳]. این نوع جاذب نخستین‌بار توسط فراهام اختراع شد و به‌صورت نظری فرکانس طبیعی این جاذب‌ها برابر بافرکانس تحریک است و جرم اصلی ارتعاش نمی‌کند [۴].

۳-۲. جاذب‌های نیمه‌فعال[۵]

در این جاذب‌ها، ایزوله‌سازی توسط المان‌های غیرفعال انجام می‌پذیرد، اما خواص المان‌ها را می‌توان بهبود داد. سیستم‌های کنترل الکتریکی[۶] و کنترل مغناطیسی[۷]، اگرچه شبیه سیستم‌های کنترلی فعال هستند، اما نیروهای خارجی سهمی در تغییر ایزوله‌سازی ندارند. درواقع ایزولاتور نیمه‌فعال به یک سیستم غیرفعال و یک سیستم کنترلی فعال غیرقوی وضع می‌شود که به‌علت احتیاج به منبع تغذیهٔ ضعیف خارجی فقط نیاز به تصحیح یا دمپینگ هست. در این جاذب‌ها وقتی میدان الکتریسیته یا میدان مغناطیسی بر سیال اثر می‌گذارند، ویسکوز سیال را تغییر می‌دهند و این‌چنین قادر به کنترل رفتار دینامیک سیستم هستند [۵].

۳-۳. جاذب‌های فعال

این نوع ایزولاتورها را با نیرویی که توسط ابزارهای کنترلی (موتورها، عملگر و جز این‌ها) تولید می‌شوند استفاده می‌کنند. از جمله ویژگی‌های این جاذب‌ها می‌توان به نیرومندی و انعطاف‌پذیری سیستم، کارایی و در باند فرکانسی وسیع، عدم تأثیرپذیری سیستم کنترلی از شرایط محیطی و پیچیده و پرهزینه بودن و نیاز به تجهیزات جانبی آنها اشاره نمود.

۴. جاذب‌های خطی و محدودیت‌ها

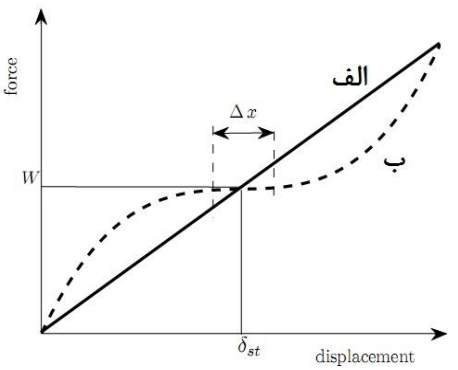
مشکل جاذب خطی وقتی ایجاد می‌شود که فرکانس نیروی تحریک ثابت نباشد و جاذب در یک سری محدودهٔ فرکانسی اثر معکوس داشته و دامنه ارتعاشات را بیشتر نماید. این سیستم‌ها علاوه بر اینکه قلهٔ تشدید را در منحنی پاسخ به دو قلهٔ کوچکتر تقسیم می‌کنند، سبب کاهش دامنهٔ پاسخ سیستم در هر یک از قله‌ها نیز می‌شوند [۶]. استفاده از جاذب ارتعاش دینامیکی خطی فاقد دمپر در هیچ موردی مناسب نمی‌باشد، به‌خصوص در مواردی که فرکانس نیروی محرک ثابت نیست. وقتی سیستم اصلی دقیقاً در فرکانس طبیعی خود تحریک نشده است، شیب منحنی رزونانس سیستم بعد از افزودن جاذب بسیار تیز می‌شود. سپس حتی یک تغییر کوچک در فرکانس تحریک، می‌تواند جاذب ارتعاش را به تقویت‌کنندهٔ ارتعاش تبدیل کند. پهنای باند مؤثر توسط میرایی جاذب کنترل می‌شود و یک جایگزینی مابین کاهش بازدهی و پهنای باند وجود دارد [۷].

۵. جاذب‌های غیرخطی

به‌طورکلی دو روش کنترل فرکانس‌های طبیعی سیستم، افزودن جرم‌های ثانویه و استفاده از جاذب دینامیکی خطی در موارد زیر قابل‌استفاده نیستند:

۱. در کاربردهای عملی که جرم را نمی‌توان تغییر داد
۲. در مواردی که فرکانس نیروی محرک ثابت نباشد یا شامل دسته‌ای از فرکانس‌های مختلف باشد

بنابراین نیاز به طراحی جاذب‌هایی که در گسترهٔ وسیعی از فرکانس‌های تحریک مؤثرند، منجر به مطالعه جاذب‌هایی شد که دارای مشخصه‌های غیرخطی می‌باشند [۸].



شکل ۱. نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی در فنرهای خطی و غیرخطی [۲]

فنر خطی با ضریب k_1 را در نظر بگیرید که به‌صورت خط مشکی پررنگ در شکل ۳ نمایش داده شده است. اگر جرم روی فنر گذاشته شود فنر به‌اندازهٔ δ_{st} جابه‌جا می‌شود تا به نقطهٔ تعادل برسد. اگر جرم بارگذاری شده حول نقطهٔ تعادل استاتیکی شروع به اغتشاش به‌اندازهٔ Δx می‌کند، شیب این بخش از منحنی به‌عنوان سفتی دینامیک، در حالت فنر خطی مطرح می‌گردد. در این حالت سفتی ثابت نیست و تابعی درجه سوم از جابه‌جایی است. فنر غیرخطی را می‌توان طوری طراحی کرد به‌طوری‌که وقتی بار w به آن اثر کند همان جابه‌جایی استاتیکی را که در فنر خطی در شکل ۱ به‌صورت خط‌چین نشان داده شده است، به نمایش می‌گذارد. اختلاف اصلی بین حالت خطی و غیرخطی برای اغتشاشات حول نقطه تعادل است. در گسترهٔ تغییر Δx می‌توان گفت که فنر غیرخطی دارای سفتی دینامیکی کمتری است. میزان تأثیر جملات غیرخطی بر روی عملکرد به عواملی بستگی دارد که برخی از آنها در ادامه معرفی شده است.

۵-۱. جابه‌جایی فرکانس طبیعی و پدیدهٔ پرش[۸]

بسته به نوع جملات غیرخطی موجود در سیستم، فرکانس طبیعی ممکن است به چپ یا راست فرکانس طبیعی خطی سیستم روی نمودار قابلیت انتقال منتقل شود. محققان نشان داده‌اند که یک جاذب با میزان غیرخطی نرم به سیستم با میزان غیرخطی سفت برتری دارد. افزایش توان میرایی سبب کاهش پهنای پدیدهٔ پرش در سیستم گردید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از جملات غیرخطی نرم در سختی سیستم در فرکانس‌های پایین و جملات با غیرخطی سفت در سختی سیستم در فرکانس‌های بالا می‌تواند در کاهش انتقال ارتعاشات مفید باشد در کل فنرهای نرم کمک می‌کنند که پهنای باند فرکانس ایزوله‌سازی پهن‌تر شود اما جابه‌جایی استاتیک بیشتر می‌گردد [۹].

۵-۲. پاسخ آشوبناک[۹]

تحت تحریک هارمونیک، یک جاذب غیرخطی می‌تواند در یک بازه و با پارامترهای مشخص رفتار آشوبناک را از خود نشان دهد. تحقیقات نشان داده است که برای کنترل سیستم در یک رفتار آشوبناک موردنظر، جاذب باید سختی و میرایی متغیر داشته باشد. در کل بعضی از محققان به این نتیجه رسیدند که کارایی جذب ارتعاشات برای جاذب ارتعاشات غیرخطی در حالات آشوبناک بسیار بهتر از حالت غیر آشوبناک است. همچنین نشان داده شده است که میرایی غیرخطی می‌تواند به‌صورت یک سازوکار غیرفعال میزان آشوب را کاهش دهد [۱۰].

۶. چاه غیرخطی انرژی[۱۰]

به‌کارگیری چاه غیرخطی انرژی به‌منظور کاهش ارتعاش در تجهیزات مختلف مهندسی، یکی از موضوعاتی است که در یک دههٔ گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است. چاه‌های غیرخطی را می‌توان به دسته‌های متصل به زمین و غیرمتصل به زمین، یک درجه آزادی و چند درجه آزادی، هموار و غیرهموار و دارای میرایی خطی و میرایی غیرخطی تقسیم‌بندی نمود.

منظور از چاه غیرخطی انرژی، جرم کوچکی (نسبت به جرم کل سیستم) است که از طریق یک دمپر خطی (یا غیرخطی) و یک فنر کاملاً غیرخطی به سیستم اولیه متصل شده است. گفتنی است برای تعیین میزان جرم چاه غیرخطی انرژی، باید جرم کل سیستم را در یک مقدار بسیار کوچک ε ($\varepsilon << 1$) ضرب نمود. اصولاً برای $\varepsilon << 1$ اتلاف انرژی از طریق چاه غیرخطی انرژی اتفاق می‌افتد، اما جهت دستیابی به ماکزیمم اتلاف انرژی در سیستم، مقدار ε به سیستم اولیه بستگی خواهد داشت [۱۱]. به‌طورکلی دو نوع چاه غیرخطی انرژی وجود دارد:

نوع اول که متشکل است از یک فنر شدیداً غیرخطی ($F=kx^3$)، یک دمپر خطی یا غیرخطی و یک جرم بسیار کوچک (نسبت به جرم کل سیستم).

نوع دوم نیز متشکل است از: یک فنر غیرخطی ضعیف یا نوع دافینگ[11] ($F=k_1x+k_2x^3$)، یک دمپر خطی و یک جرم بسیار کوچک (نسبت به جرم کل سیستم). فنر غیرخطی نوع دوم که دارای سفتی استاتیک بالا و سفتی دینامیک پائین است را به‌اختصار HSLDS[12] می‌نامند [۱۲].

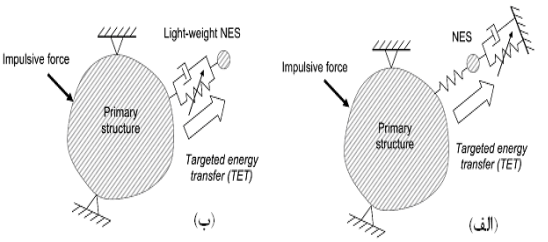
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در چاه غیرخطی نوع دوم به‌علت وجود فنر غیرخطی ضعیف، بازده اتلاف انرژی نسبت به نوع اول کمتر می‌باشد. از اینرو در تحقیقات انجام‌شده غالباً به نوع اول پرداخته شده است و منظور از چاه غیرخطی انرژی، چاه غیرخطی نوع اول می‌باشد [۱۳].

۶-۱. تقسیم‌بندی چاه‌های غیرخطی انرژی

از نظر نحوهٔ قرار گرفتن جاذب نسبت به زمین و سیستم اصلی، دو نوع ترکیب‌بندی کلی وجود دارد که در شکل ۲ نمایش داده شده است: در ترکیب‌بندی نخست، چاه غیرخطی انرژی از یک‌سو به زمین متصل بوده و از سوی دیگر از طریق یک فنر با سفتی کم به سیستم اصلی وصل می‌شود. این نوع پیکربندی جزء نسل‌های اولیه چاه‌های غیرخطی انرژی به‌حساب می‌آید که در سال‌های بعد دیگر مورد توجه قرار نگرفته است. از سوی دیگر، در ترکیب‌بندی دوم، جاذب از یک‌سو به سیستم اصلی متصل بوده و از سوی دیگر کاملاً آزاد است. همچنین، تحریکات اعمالی به سیستم اصلی وارد شده و مستقیماً به جاذب اعمال نمی‌شود. از سوی دیگر، چاه‌های غیرخطی انرژی را می‌توان به دو نوع یک درجه آزادی و چند درجه آزادی تقسیم نمود. منظور از نوع چند درجه آزادی غالباً همان دو درجه آزادی می‌باشد. نوع یک درجه آزادی از ابتدایی‌ترین و متداول‌ترین دسته‌بندی‌هاست که به‌علت سادگی در غالب مقالات مورد مطالعه قرار گرفته است. در مقایسه، نوع چند درجه آزادی دارای دینامیک پیچیده‌تری است، اما اثبات شده که کارایی به‌مراتب بهتری از خود نشان خواهد داد.

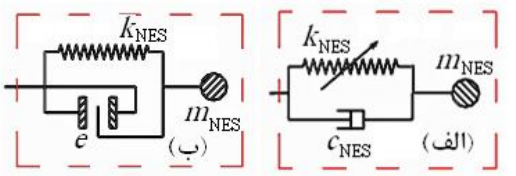
در یک نوع تقسیم‌بندی دیگر، در نوع هموار چاه غیرخطی انرژی، از مجموعهٔ جرم، فنر غیرخطی و دمپر ویسکوز تشکیل شده است (شکل ۳ (الف)). نوع غیرهموار، از مجموعه جرم، فنر و یک سازوکار ضربه‌ای تشکیل شده است (شکل ۳ (ب)).

سازوکار ضربه‌ای سبب ایجاد عدم یکنواختی[13] در دینامیک مجموعه می‌شود، از اینرو این نوع مستهلک‌کننده‌ها را اصطلاحاً ارتعاشی - ضربه‌ای[14] یا به‌عبارتی همان غیرهموار (غیریکنواخت) می‌نامند، مانند دمپرهای درجه سه، چندضابطه‌ای یا بوس‌ون[15].



شکل ۲. پیکربندی چاه غیرخطی انرژی

الف) متصل به زمین، ب) غیرمتصل به زمین [۱۰]



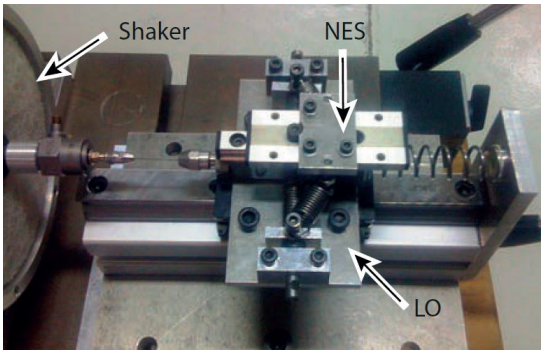
شکل ۳. پیکربندی چاه انرژی؛ الف) هموار، ب) غیرهموار [۱۰]

در این نوع جاذب، سازوکار ضربه‌ای سبب عدم یکنواختی در متغیرهای سیستم و در نتیجه نوعی دینامیک غیرخطی به مجموعهٔ القا می‌کند. از طرف دیگر، با هر بار ضربه بین سیستم اصلی و جاذب، حجمی از انرژی مجموعه میرا می‌شود. در مقایسه با نوع هموار، جاذب ارتعاشی - ضربه‌ای به‌علت ایجاد تغییرات سرعت غیریکنواخت و ناگهانی در مجموعه و همین‌طور هزینهٔ احتمالی بیشتر به نسبت در کاربردهای مختلف این نوع ایزولاسیون کمتر مورد استفاده بوده است [۱۴]. با توجه به این مطالعات، برتری‌های چاه غیرخطی انرژی نسبت به جاذب دینامیکی خطی به شرح زیر می‌باشد:

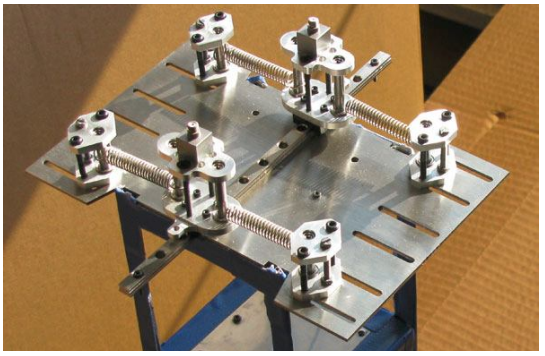
۱. در جذب انرژی یکسان، تغییر شکل بسیار کمتر و امکان به‌کارگیری جرم کوچکتری در آن نسبت به جاذب دینامیکی خطی
۲. دارانبودن فرکانس رزونانس قابل ترجیح و در نتیجه قابلیت جذب ارتعاش در همسایگی فرکانس طبیعی تحریک شده و عدم نیاز به تنظیم در یک فرکانس خاص
۳. پمپاژ انرژی از سیستم اولیه به چاه غیرخطی انرژی به‌صورت کاملاً برگشت‌ناپذیر

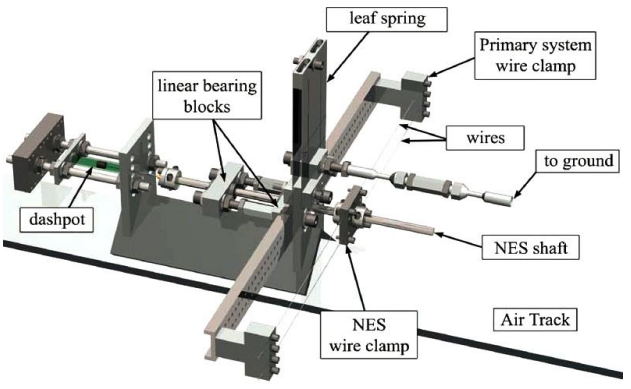
۴. قابلیت جذب بالای انرژی ارتعاشی و کاهش دامنهٔ سیستم تحت ارتعاش در محدودهٔ فرکانسی وسیع از طریق انتقال هدفمند انرژی چندفرکانسی

در این مطالعات نشان داده شده است که با طراحی مناسب، اتصالات با درجه غیرخطی بالا می‌توانند تحت شرایط خاصی و به‌صورت غیرفعال، انرژی را از زیرسیستم اصلی تحت بارگذاری خارجی جذب نموده و به‌صورت گرما اتلاف نمایند و بنابراین به‌عنوان یک چاه غیرخطی انرژی عمل کنند. به‌طور کلی انتقال انرژی هدفمند یک‌طرفه از سیستم اولیه به چاه غیرخطی انرژی در گسترهٔ وسیعی از فرکانس‌های تحریک امکان‌پذیر می‌باشد و همین موضوع چاه غیرخطی انرژی را از دیگر جاذب‌های ارتعاش متمایز می‌نماید [۱۰]. چون اولین تحقیقات صورت‌گرفته در مورد چاه غیرخطی انرژی، تحت حمایت‌های مالی سازمان‌های نظامی کشورهای غربی از جمله ایالات متحدهٔ امریکا انجام شده است، لذا تا به‌حال نمونهٔ تجاری این جاذب خاص ارائه نشده است و فقط در پژوهش‌های صورت‌گرفته در مؤسسات علمی و دانشگاه‌ها، نمونه‌های آزمایشگاهی آن مورد بررسی و پژوهش انجام گرفته است و نتایج این تحقیقات در چند سال گذشته در اختیار محققان دیگر قرار گرفته است که سه مورد از نمونه‌های آزمایشگاهی این جاذب غیرخطی در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ آورده شده است. گفتنی است معمولاً در این پژوهش‌ها برای طراحی و ساخت چاه غیرخطی انرژی و استحصال و مدل‌کردن فنریت غیرخطی این جاذب، از یک سیم ضخیم استفاده می‌شود که وقتی همزمان تحت کشش جانبی و طولی قرار بگیرد، رابطهٔ نیروی کششی سیم با جابه‌جایی طولی آن، با تابع درجه سوم تقریب زده می‌شود.



شکل ۴. شماتیک کلی سیستم آزمایشگاهی [۹]


شکل ۵. دو چاه غیرخطی موازی در بالای سازه [۱۱]



شکل ۶. شماتیک سیستم اصلی همراه با چاه غیرخطی انرژی [۱۵]

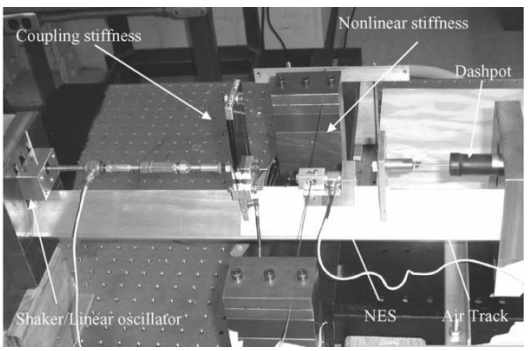
۷. رژیم‌های مختلف پاسخ

برای بررسی کامل رژیم‌های مختلف پاسخ در سیستم‌های شامل چاه غیرخطی انرژی، در این قسمت به بررسی و توصیف کامل برخی از مفاهیم مورد استفاده پرداخته می‌شود.

۷-۱. انتقال هدفمند انرژی

در دههٔ اخیر مفهوم جدیدی به نام انتقال هدفمند انرژی[۱۶] توسط دانشمندان مطرح شده است. بر این اساس می‌توان با اتصال سیستم ارتعاشی غیرخطی به سیستم اصلی مجموعه‌ای را

تشکیل داد که در صورت تحریک ارتعاشی این مجموعه، انرژی اعمال‌شده به سیستم به‌صورت یک‌طرفه و برگشت‌ناپذیر از سیستم اصلی منتقل‌شده و سپس توسط سیستم غیرخطی متصل‌شده، خنثی شود. این انتقال انرژی بر اساس پدیدهٔ تطبیق رزونانسی گذرا[۱۷] بین سیستم اصلی و سیستم متصل شده رخ خواهد داد. این پدیده در واقع برمبنای یک رزونانس داخلی لحظه‌ای بین سیستم غیرخطی متصل شده و سیستم اصلی برمبنای حفظ شرایط کافی برای یک‌سویه بودن انتقال انرژی از سیستم اصلی به سیستم غیرخطی متصل شده صورت می‌پذیرد.

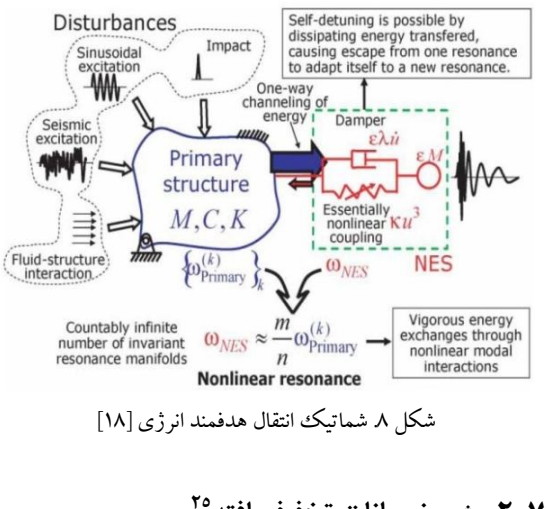


شکل ۷. دو چاه غیرخطی موازی در بالای سازه [۱۶]

یکی از مشکلات چاه غیرخطی انرژی این است که پایین‌تر از دامنهٔ تحریک بحرانی تحریک نشده و عمل نمی‌کند و همچنین از طرف دیگر، چون ظرفیت آن برای جذب انرژی محدود است، بالاتر از یک محدودهٔ خاص کارایی آن کم می‌شود. در کنار این روش برای حل مشکل دوم می‌توان از کنترل فعال استفاده کرد [۱۰]. انتقال هدفمند انرژی غیرفعال در کل به مفهوم انتقال هدفمند انرژی موجود در سیستم اصلی به‌سوی سیستم متصل شده می‌باشد. چنین پدیده‌ای با بررسی تطابق‌های رزونانسی موجود در دینامیک مجموعه قابل بررسی می‌باشد. فنریت غیرخطی این جاذب‌ها در واقع شرایطی را ایجاد می‌کند تا چاه غیرخطی انرژی بتواند با تمام مدهای ارتعاشی سیستم رزونانس ایجاد کرده و به‌بیان‌دیگر با همه مدها درگیر شود. از طرف دیگر، دمپر وظیفه دارد تا انرژی ارتعاشی منتقل‌شده از سیستم اصلی را در حین درگیری سیستم الحاقی با سیستم اصلی مستهلک نماید [۱۷]. همان‌طور که در شکل ۸ نمایش داده شده سیستم اصلی دارای فرکانس‌های طبیعی مشخص $\omega_{primary}$ می‌باشد و غالباً تحت تأثیر بارهای خارجی مختلفی مانند بارهای ضربه‌ای[۱۸]، تحریکات پریودیک یا تحریکات اتفاقی[۱۹] می‌باشد. حال به‌دنبال حذف اغتشاشات القایی القایی به مجموعه (به‌صورت غیرفعال) توسط یک سیستم غیرخطی الحاقی همانند چاه غیرخطی انرژی می‌باشیم. چون چاه غیرخطی انرژی دارای هیچ فرکانس رزونانسی شاخصی نیست (برخلاف جاذب‌های خطی)، بنابراین قادر خواهد بود تا به تعداد بی‌شمار شرایط رزونانسی غیرخطی، که همان رزونانس‌های داخلی[۲۰] می‌باشد، تولید نماید.

$$m\omega_{primary} \approx n\omega_{nes} \qquad (۱)$$

در این رابطه m و n اعدادی صحیح‌اند. مطلوب‌ترین حالت برای کاهش ارتعاشات، موضعی‌نمودن انرژی القایی اغتشاشات وارده، از سوی سیستم اصلی به‌سوی چاه غیرخطی انرژی می‌باشد؛ به‌نحوی‌که در حین فعل و انفعالات غیرخطی مودال[۲۱] انرژی به‌وسیلهٔ المان مستهلک‌کنندهٔ چاه مستهلک می‌شود. به‌طور کلی سه نوع سازوکار مشخص می‌توان برای انتقال هدفمند انرژی در نظر گرفت که عبارت‌اند از: تطبیق رزونانسی یک‌به‌یک[۲۲]، تطبیق رزونانسی مادون هارمونیک[۲۳] و پدیدهٔ تپش غیرخطی[۲۴] [۱۶].



شکل ۸. شماتیک انتقال هدفمند انرژی [۱۸]

۷-۲. رژیم نوسانات تخفیف‌یافته[۲۵]

مطالعات اخیر نشان داده است که رژیم پاسخ بسیار جالب توجهی در بین پاسخ‌های سیستم وجود دارد. این رژیم پاسخ مدولهٔ بسیار قوی[۲۶] نامیده شده است که به‌طور قابل‌توجهی در کاهش ارتعاشات مؤثر است [۱۹-۲۰]. دینامیک نوسانات تخفیف‌یافته را از طریق یک سیستم مکانیکی ساده به آسانی درک کرد. این سیستم مکانیکی ساده، که در شکل ۹ نشان داده شده است، شامل یک الاکلنگ بوده که یک ذخیره‌گر آب در یک طرف و یک وزنه در طرف دیگر آن می‌باشد. وقتی مقدار

آب از وزن وزنه در طرف دیگر بیشتر شود، طرفی از الاکلنگ که شامل ذخیره‌گر آب است پایین می‌افتد. سپس ذخیره‌گر آب تخلیه شده و به مکان اولیه خود بازمی‌گردد. پریود نوسانات تخفیف‌یافته تابع نرخ آب ورودی و حجم آب در حالت تعادل می‌باشد. برای اسیلاتورهای تقریباً خطی، یک نظریهٔ ریاضی کم و بیش پذیرفته‌شده‌ای وجود دارد. یک سیستم یک درجه آزادی به فرم زیر را در نظر بگیرید:

$$\frac{d^2x}{dt^2}+x=\varepsilon f\left(x,\frac{dx}{dt}\right),\ 0<\varepsilon<<1 \qquad (۲)$$

اگر ε کوچک نباشد، این تئوری نمی‌تواند به‌کار گرفته شود و هیچ حل مجانبی تقریبی برای سیستم فوق نمی‌توان یافت و جواب‌ها باید به‌صورت عددی پیدا شوند. اگرچه یک استثناء برای سیستم‌هایی از نوع زیر وجود دارد:

$$\varepsilon\frac{d^2x}{dt^2}=f\left(x,\frac{dx}{dt}\right),\ 0<\varepsilon<<1 \qquad (۳)$$

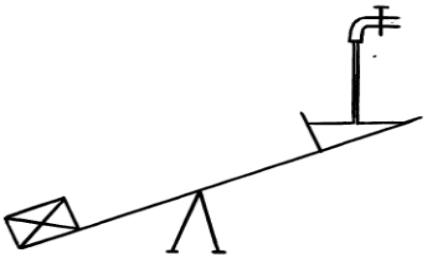
برای این سیستم می‌توان یک حل تقریبی پیدا کرد. با میل دادن ε به‌سمت صفر، معادلهٔ ۴ به‌دست می‌آید:

$$f\left(x,\frac{dx}{dt}\right)=0 \qquad (۴)$$

این معادله به‌خودی خود نمی‌تواند دارای حل‌های پریودیک باشد. اگرچه می‌تواند تقریب خوبی از معادلهٔ ۳ در یک بازهٔ زمانی بزرگ از چرخه باشد. بنابراین اگر به آستانه‌ای برسیم که این تقریب دیگر معتبر نباشد، متغیر x به‌سرعت در یک بازهٔ زمانی کوتاه تغییر می‌کند [۱۵]. در مثال الاکلنگ حالت‌هایی هستند که سیستم به‌سرعت از آنها عبور می‌کند و سپس به حالتی برمی‌گردد که در آن تقریب رابطهٔ ۴ دوباره معتبر است. [۱۷].

۸. نتیجه‌گیری

امروزه با پیشرفت علم، بشریت به‌سمت استفاده از ابزار کاربردی، ساده و کم‌هزینه رفته است تا نیاز به تعمیرات و نگه‌داری به کمترین حد ممکن برسد. از این‌رو استفاده از جاذب‌های غیرفعال در سازه‌های مهندسی به‌صورت چشمگیری روبه گسترش قرار است. یکی از به‌روزترین این نوع جاذب‌ها چاه غیرخطی انرژی می‌باشد که در مقالات اخیر پژوهشگران مورد توجه قرار گرفته است. این جاذب که سیستم بسیار ساده و کم‌هزینه‌ای دارد، به‌راحتی در سیستم‌های مختلف مهندسی مورد بررسی قرار گرفته است. در ساده‌ترین شکل چاه غیرخطی انرژی، دارای یک جرم کوچک (نسبت به جرم سیستم اولیه)، یک فنر کاملاً غیرخطی و یک دمپر ویسکوز می‌باشد. از مهم‌ترین ویژگی‌های چاه غیرخطی انرژی، میراکردن انرژی سیستم اصلی تحت بارگذاری خارجی به‌صورت یک‌طرفه، غیرفعال و در گسترهٔ وسیعی از فرکانس‌های تحریک می‌باشد که همراه با ایجاد ناپایداری‌هایی در سیستم، رژیم‌های مختلف پاسخ مانند رژیم نوسانات تخفیف‌یافته و انتقال هدفمند انرژی برای بهبود کاهش ارتعاشات سیستم اولیه را از خود نشان می‌دهد.



شکل ۹. یک اسیلاتور تخفیف‌یافته شامل یک الاکلنگ با ذخیره آب در یک سمت و یک وزنه در سمت دیگر [۱۰]

۹. مآخذ

[1] L. Meirovitch, *Analytical methods in vibration* vol. 16: Macmillan, New York, 1967.

[2] A. H. Nayfeh, B. Balachandran, *Applied nonlinear dynamics: analytical, computational and experimental methods*: John Wiley & Sons, 2008.

[3] M. Colvin, *Energy sinks with nonlinear stiffness and nonlinear damping*, 2010.

[4] H. Frahm, *Device for damping vibrations of bodies*, Google Patents, 1911.

[5] Z. Ying, W. Zhu, T. Soong, A stochastic optimal semi-active control strategy for ER/MR dampers, *Journal of Sound and Vibration,* Vol. 259, pp. 45-62, 2003.

[6] E. Gourc, G. Michon, S. Seguy, A. Berlioz, Design optimisation of a nonlinear energy sink embedded on a harmonically forced linear oscillator: theoretical and experimental developments, in *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2012, pp. 589-598.

[7] D. Younesian, A. Nankali, M. E. Motieyan, Application of the Nonlinear Energy Sink Systems in Vibration Suppression of Railway Bridges, in *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2010, pp. 227-231.

[8] J. Taghipour, M. Dardel, Steady state dynamics and robustness of a harmonically excited essentially nonlinear oscillator coupled with a two-DOF nonlinear energy sink, *Mechanical Systems and Signal Processing,* Vol. 62, pp. 164-182, 2015.

[9] E. Gourc, G. Michon, S. Seguy, A. Berlioz, Experimental investigation and theoretical analysis of a nonlinear energy sink under harmonic forcing, in *ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2011, pp. 391-397.

[10] A. F. Vakakis, O. V. Gendelman, L. A. Bergman, D. M. McFarland, G. Kerschen, Y. S .Lee, *Nonlinear targeted energy transfer in mechanical and structural systems* vol. 156: Springer Science & Business Media, 2008.

[11] A. T. Savadkoohi, B. Vaurigaud, C.-H. Lamarque, S. Pernot, Targeted energy transfer with parallel nonlinear energy sinks, part II: theory and experiments, *nonlinear dynamics,* vol. 67, pp. 37-46, 2012.

[12] A. Abbasi, S. Khadem, S. Bab, M. Friswell, Vibration control of a rotor supported by journal bearings and an asymmetric high-static low-dynamic stiffness suspension, *Nonlinear Dynamics,* pp. 1-21, 2016.

[13] M. A. Al-Shudeifat, N. Wierschem, D. D. Quinn, A. F. Vakakis, L. A. Bergman, B. F. Spencer, Numerical and experimental investigation of a highly effective single-sided vibro-impact non-linear energy sink for shock mitigation, *International journal of non-linear mechanics,* Vol. 52, pp. 96-109, 2013.

[14] O. Gendelman, L. Manevitch, A. F. Vakakis, R. M'closkey, Energy pumping in nonlinear mechanical oscillators: Part I-Dynamics of the underlying Hamiltonian systems, *Journal of Applied Mechanics,* Vol. 68, pp. 34-41, 2001.

[15] D. M. McFarland, G. Kerschen, J. J. Kowtko, Y. S. Lee, L. A. Bergman, A. F. Vakakis, Experimental investigation of targeted energy transfers in strongly and nonlinearly coupled oscillators, *The Journal of the Acoustical Society of America,* Vol. 118, pp. 791-799, 2005.

[16] X. Jiang, D. M. McFarland, L. A. Bergman, A. F. Vakakis, Steady state passive nonlinear energy pumping in coupled oscillators: theoretical and experimental results, *Nonlinear Dynamics,* Vol. 33, pp. 87-102, 2003.

[17] C.-H. Lamarque, O. V. Gendelman, A. T. Savadkoohi, E. Etcheverria, Targeted energy transfer in mechanical systems by means of non-smooth nonlinear energy sink, *Acta mechanica* ,Vol. 221, pp. 175-200, 2011.

[18] G. B. Whitham, *Linear and nonlinear wave's*, Vol. 42: John Wiley & Sons, 2011.

[19] Y. Starosvetsky, O. Gendelman, Response regimes in forced system with non-linear energy sink: quasi-periodic and random forcing, *Nonlinear Dynamics,* Vol. 64, pp. 177-195, 2011.

[20] M. Parseh, M. Dardel, M. H. Ghasemi, M. H. Pashaei, Steady state dynamics of a non-linear beam coupled to a non-linear energy sink, *International Journal of Non-Linear Mechanics,* Vol. 79, pp. 48-65, 2016.

پی‌نوشت

1. vibration absorber
2. actuator
3. resonance
4. passive
5. semi-active
6. rheological-electro (ER)
7. rheological-magneto (MR)
8. jump phenomenon
9. chaotic response
10. nonlinear energy Sink (NES)
11. duffing
12. high static low dynamic stiffness
13. non-Smoothness
14. vibro impact NES
15. Bouc-Wen Dampers
16. targeted energy transfer (TET)
17. transient resonance capture (TRC)
18. impact loading
19. random exciation
20. self-detuning
21. nonlinear modal interactions
22. 1:1 resonance capture
23. subharmonic resonance capture
24. nonlinear beat phenomena
25. relaxation oscillations
26. strong modulated response