

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

پروفیسر رفیقار دینامیکی چاڈپ ارتعاشی

در

خطوط انتقال نیرو

عن سررشته نوری

بیان آئینہ جہت دریافت درجہ کارشناسی

دررشته مہتممی مکانیک

استادِ راهنما : دکتر حیدر احمد خان



بررسی رفتار دینامیکی جاذب ارتعاش
در
خطوط انتقال نیرو

علی سرزشته داری

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی
در رشته مهندسی مکانیک

استاد راهنما: دکتر حمید احمدیان

خرداد ۱۳۷۹

بررسی رفتار دینامیکی جاذب ارتعاش در خطوط انتقال نیرو

چکیده:

در کابل‌های خطوط انتقال فشار قوی که تحت ارتعاش گردابه ای قرار می‌گیرند در محل اتصال به نگهدارنده تنش زیاد و پدیده خستگی روی می‌دهد، لذا برای اجتناب از این آسیب از نوعی مستهلک کننده حرکت نوسانی استفاده می‌شود.

انرژی اعمال شده از طرف باد با دو عامل استهلاک درونی و قسمت عمده آن به وسیله مستهلک کننده مورد نظر مستهلک می‌گردد و این موضوع اساس گزینش و تنظیم مستهلک کننده، محل نصب و نیز تعداد آن می‌باشد.

به منظور انتخاب مناسب مستهلک کننده و یا ساخت آن نیاز به بررسی رفتاری این ابزار داشته، به کمک این تحلیل مشخصات مورد نظر برای مستهلک کننده مورد نیاز را می‌یابیم.

در این پروژه سعی بر آن بوده است تا با انجام مطالعاتی راجع به نحوه عملکرد جاذبهای حرکت ارتعاشی، نوعی از این جاذبها که در خطوط انتقال نیرو به کار می‌روند مورد بررسی دینامیکی قرار گیرد و سپس روشهای تست و آزمایش، همچنین بخشی از استانداردهای این نوع وسایل ارائه شود تا به منظور انجام تستهای لازم برای این نوع مستهلک کننده‌ها و همچنین ساخت آنها زمینه شناخت علمی و اصولی اولیه ای فراهم گردد.

تقدیم به خانواده ام

که همواره مشوق و راهنمایم بوده اند.

تشکر و قدردانی :

با توجه به گستردگی و تنوع مطالب و اطلاعات اولیه مورد لزوم ، برای تهیه این پروژه مراجعات زیادی انجام گرفته ، که در اینجا لازم است از کمک و راهنمایی های آقای دکتر احمدیان (استاد راهنمای این پروژه) ، آقای مهندس نیک پیکران و خانم مهندس فاخری همچنین آقای مهندس نورپور و دیگر دوستانی که در خارج از محیط دانشگاه در مراحل مختلف با دید گاههای علمی ، عملی و کاربردی خود و نیز اطلاع رسانی یاریمان دادند . از جمله کارکنان موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران ، شرکت مشانیر ، شرکت تهران نیرو و سازمان هواشناسی . همچنین کلیه عزیزانی که در هر یک از مراحل کاری این پروژه همکاری نمودند ، تشکر و قدردانی نمایم .

علی سررشته داری

بهار ۱۳۷۹

فهرست عناوین :

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۳	۱ انواع شیوه های کنترلی
۳-۵	۱-۱ کنترل غیر فعال
۵-۶	۱-۲ کنترل نیمه فعال
۶-۸	۱-۳ کنترل به شیوه فعال
۹	۲ اصول تئوری جاذبه های غیر فعال
۱۳	۳ ارتعاشات در خطوط انتقال نیرو
۱۳-۱۵	۳-۱ ارتعاشات شلاقی
۱۵-۲۰	۳-۲ ارتعاشات عمودی منتج از پدیده گردابه ای
۲۱	۴ بررسی و تحلیل دینامیکی مستهلک کننده استاک بریج
۲۴-۲۵	۴-۱ فرکانسهای طبیعی نامیرا
۲۵-۲۸	۴-۲ ارتعاش اجباری
۲۹-۳۱	۴-۳ انتقال نیروی مستهلک کننده
۳۱-۳۳	۴-۴ استهلاک انرژی در مستهلک کننده
۳۳-۳۵	۴-۵ تنشهای دینامیکی
۳۶	۵ آزمایشات مستهلک کننده استک بریج
۳۷-۳۸	۵-۱ روش پاسخ اجباری
۳۹	۶ استانداردهای دمپر استاک بریج
۴۱	نتیجه گیری
۴۲	ضمیمه ها

فهرست علائم و اختصارات :

m : جرم

L : طول کابل متصل شده به وزنه ها

l : فاصله بین نقطه اتصال کابل به وزنه ها تا مرکز جرم

J : ممان اینرسی حول محوری که از نقطه اتصال به جرم می گذرد

J_c : ممان اینرسی حول مرکز جرم

k : ضریب سختی

c : ضریب میرایی

x و y : تغییر مکان

EI : مقاومت خمشی معادل

θ : زاویه پیچشی جرم

α : مربع نسبت فرکانس طبیعی اول به دوم

δ : کاهش لگاریتمی

η : نسبت فرکانس تحریک به اولین فرکانس طبیعی

μ : ثابت میرایی هیستریزیس

ω : فرکانس طبیعی

Ω : فرکانس تحریک

"... طبیعت ، زمان نوسان هر آونگ را آنچنان مشخص و قطعی در آن به ودیعت نهاده است که هرگز نمی توان آن را به نوسان با آونگی غیر واداشت ، حال آنکه می توان ، با دمیدن مکرر بر آونگی هر چند وزین ، و هر چند به آرامی ، لیکن با آونگ ویژه آن ، حرکت پر دامنه ای را در آونگ به وجود آورد ."

"کاپلر ۱۶۳۸ میلادی"

مقدمه :

در بسیاری از دستگاهها پدیده ارتعاشات امری نامطلوب است که پیامدهایی نظیر خستگی زودرس قطعات ، تخریب سریع و احتمالا آسیبهای جانی و در نتیجه صرف هزینه های اضافی را به همراه دارد . بنابر این روشهای زیادی جهت کنترل و محدود کردن این پدیده در موارد مختلف ابداع شده ، به کار می رود .

از درس ارتعاشات به خاطر داریم که هر گاه به یک سیستم جرم و فنر (سیستم اولیه یا اصلی) ، جرم و فنر دیگری بیافزاییم ، با اعمال شرایط خاصی می توان دامنه حرکتی سیستم اصلی را محدود و حتی در فرکانس تشدید آنرا به صفر رسانید ، با توجه به اینکه این سیستم (سیستم ثانویه یا فرعی) با تغییر عامل ورودی ارتعاش - مثل نیرو یا جابجایی - نمی تواند هیچ تغییری داشته باشد ، می توان دریافت که از نوع سیستم کنترل ارتعاشات به شیوه غیر فعال می باشد .

در خطوط انتقال نیرو به علت وجود جریان هوا و وزش بادهای ، به صورت عمده با دو پدیده مختلف ارتعاشی سروکار داریم که عبارتند از :

۱. ارتعاش و حرکت شلاقی یا همان galloping

۲. ارتعاش و حرکت نوسانی عمودی یا پدیده گردابی

که پدیده اول سبب برخورد خطوط با ولتاژهای مختلف به یکدیگر و در نتیجه اختلال در شبکه خواهد شد و پدیده دوم - که مورد توجه این پروژه قرار می گیرد - منجر به ایجاد پدیده خستگی در خطوط (کابلها) و در نهایت قطع خط نیرو می شود .

به منظور جلوگیری از قطع خطوط از نوعی سیستم جاذب ارتعاش به نام دمپر (damper) (میرا کننده حرکت نوسانی) استاک بریج (stockbridge) استفاده می شود ، که با نصب بر روی خطوط یا کابلها از حرکت نوسانی آنها جلوگیری و یا دامنه حرکت نوسانی آنها کاهش می یابد .

در این پروژه هدف بررسی رفتار دینامیکی ، مستهلک کننده های (دمپرها)ی جاذب دینامیکی ارتعاش خطوط انتقال برق فشار قوی و در نتیجه تعیین مشخصات و پارامترهای موثر در این رفتار و نیز تبیین آزمایشهای کنترل کیفی این دمپرها بر اساس استانداردها می باشد . امید است با انجام این پروژه بستر و زمینه مناسبی جهت شناخت علمی و اصولی این تجهیزات ، ساخت و نیز انجام آزمایشهای کنترل کیفی این مستهلک کننده ها فراهم شود .

علی سررشته داری

بهار ۱۳۷۹

۱. انواع شیوه های کنترلی :

در زمینه کنترل ارتعاشات از روشها و ابزار بسیار متنوعی استفاده می شود که به نوع ارتعاش ، دامنه ، فرکانس و بسیاری پارامترهای دیگر نظیر ابعاد و اندازه دستگاه یا سیستمی که جهت کنترل ارتعاش انتخاب می شود بستگی دارد . اما با تمام این تنوع می توان تمامی این روشها و وسایل کنترلی را در سه گروه زیر که در واقع دسته بندی اساسی هر نوع کنترلی می باشد دسته بندی کرد ، که این روشها عبارتند از :

۱. روش کنترل ارتعاشات به شیوه غیر فعال

۲. روش کنترل ارتعاشات به شیوه نیمه فعال

۳. روش کنترل ارتعاشات به شیوه فعال

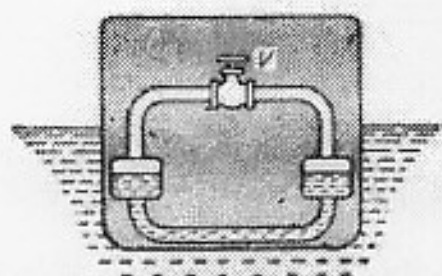
که تفاوتهای این روشها در استفاده از ابزارهای کنترلی - جهت کنترل ارتعاش موجود در سیستم مورد مطالعه - می باشد .

۱-۱. کنترل غیر فعال :

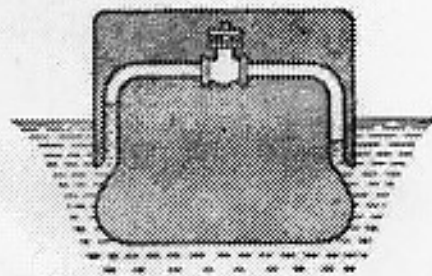
در کنترل به شیوه غیر فعال چنانچه از نام آن بر می آید از ابزار یا وسایلی استفاده می گردد که ثابت بوده در شرایط مختلف تغییری ندارند، دامنه کاری آنها محدود ولی از نظر قیمتی و نیاز به تجهیزات اضافی همچنین سرویس در پایینترین حد - در مقایسه با شیوه های دیگر - قرار دارند این وسایل معمولاً پس از ساخت و اطمینان از کارایی لازم در جای خود نصب شده مورد استفاده قرار میگیرند .

اصول علمی این شیوه کنترل ارتعاشات را فرام (Frahm) در سال ۱۹۰۲ بیان نموده [۲] ، به عنوان اولین بار آنرا برای محدود کردن نوسانات کشتیها در سال ۱۹۰۹ به صورت شکل ۱-۱ استفاده نمود . این طرح به صورت عملی در دو شرکت کشتیرانی آلمانی استفاده گردید . در ابتدا این طرح به صورت دو مخزن متصل به هم از طریق یک لوله و یک شیر در وسط آنها یک سیستم ارتعاشی ثانویه را تشکیل می داد ، با ایجاد حرکت نوسانی در کشتی ، آب یا سیال درون محفظه پیش بینی شده شروع به نوسان نموده دامنه نوسان سیستم اولیه یا خود کشتی را محدود می نمود

بعدها این سیستم به صورت شکل ۱-۲ تکامل یافته و مورد استفاده قرار گرفت، که در این نوع، لوله ها به جای مخازن، مستقیماً در مقابل آب قرار می گیرند [۲].

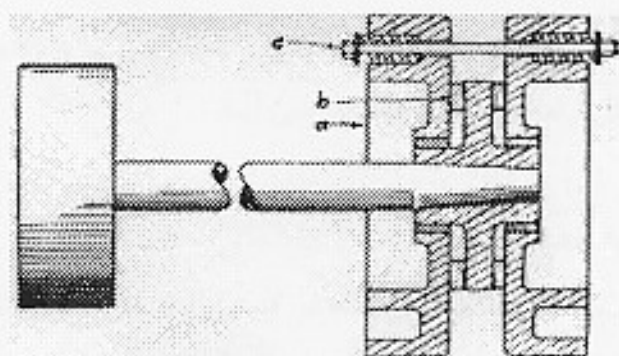


شکل ۱-۱

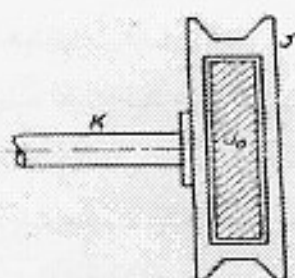


شکل ۱-۲

به عنوان نمونه دیگری از ابزار کنترل ارتعاشات با این شیوه کنترلی می توان به میراساز ارتعاشات پیچشی [۳] که به دو صورت خشک و ویسکوز می باشد اشاره کرد، چنانچه در شکل ۱-۳ مشاهده میشود این میرا کننده از چرخ لنگرهای *a* که تنها از طریق رینگهای اصطکاکی *b* به شفت مقید است تشکیل می شود. نیروی عمودی روی سطوح *c* و به وسیله پیچ *c* و فنر تامین می شود. در حالتی که این وسیله به صورت دقیقی تنظیم شده باشد در ارتعاشات کم دامنه چرخهای لنگر با شافت می گردد اما وقتی دامنه ارتعاشات شافت زیاد می شود دیگر حرکت آنرا دنبال نکرده انرژی به صورت گرما مستهلک شده در نتیجه دامنه ارتعاش کاهش می یابد، نوع ویسکوز این نوع جاذب (شکل ۱-۴) که در سیستمهای گردان با فرکانس متغیر- نظیر موتورهای احتراق داخلی - استفاده می شود از یک جرم دوار که درون سیلندر پر از مایعی قرار گرفته، تشکیل شده است (دمپر هودل 'Houdaille damper'). ویژگی بسیار مهم این نوع جاذب دو درجه آزادی آن است که در محدوده فرکانس وسیعی قابل استفاده است [۳].

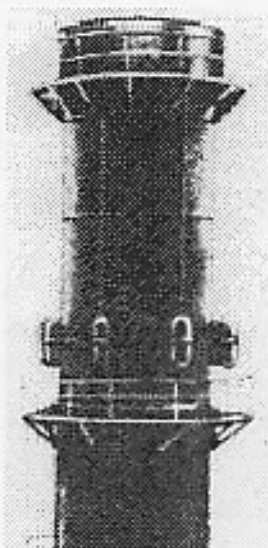


شکل ۱-۳. میراکننده ارتعاشات پیچشی از نوع خشک



شکل ۴-۱. میرا کننده ارتعاشات پیچشی از نوع ویسکوز

مثال دیگر از این نوع جاذبها را می توان در برج یا ساختارهای بلند نظیر برجهای تلویزیونی ، مخابراتی مشاهده نمود که به منظور کاهش دامنه ارتعاشات در این مجموعه ها به کار می آید همچنین از این نوع کنترل ارتعاشات (شیوه غیرفعال) در دودکشهای بزرگ صنعتی که در اثر وزش باد و توفان شروع به نوسان می کنند ، استفاده می شود (شکل ۵-۱) .



شکل ۵-۱. استفاده از جاذب ارتعاشات غیر فعال هر یک دودکش صنعتی

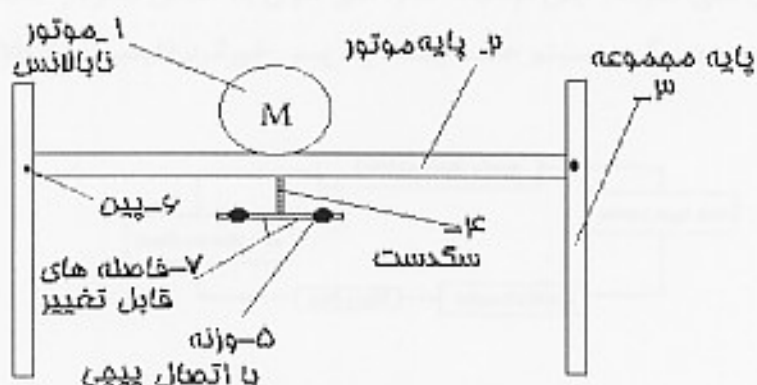
لازم به ذکر است که جاذب دینامیکی ارتعاشاتی که در این پروژه مورد بررسی قرار می گیرد نیز در گروه جاذبهای غیر فعال ارتعاشات به حساب می آید .

۱-۲. کنترل نیمه فعال :

اگر هر یک از سیستمهای مورد استفاده در کنترل ارتعاش ، قابلیت تغییر پارامترهای موثر در شرایط کاری داشته باشد این ابزار یا وسیله را یک سیستم با قابلیت کنترل نیمه فعال می

خوانیم، اهمیت استفاده از این وسایل نیز در همین قابلیت نهفته است. تجربه های عملی نشان می دهد که این نوع جاذب برای کنترل پاسخهای ضربه ساختارها مناسب می باشند [۱۱].

به عنوان مثالی از این نوع جاذب ارتعاشی می توان به دستگای اشاره کرد که به منظور محدود کردن دامنه ارتعاش در پایه یک موتور الکتریکی به کار می رود در این دستگاه در زیر پایه ای که برای نگهداری موتور استفاده می شود مجموعه ای به صورت یک سگدست قرار دارد (شکل ۶-۱) که دو وزنه در فاصله ای مساوی از وسط سگدست قرار دارند. با راه اندازی موتور به علت عدم بالانس آن پایه شروع به نوسان مینماید، که می توان با تغییر مکان وزنه ها در روی محور متصل به سگدست دامنه ارتعاشی را محدود نمود. این وسیله و وسایلی نظیر آن را به خاطر قابلیت تنظیم مجدد آنها می توان در فرکانسهای مختلفی به کار برد.



شکل ۶-۱. وسیله ای که با شیوه کنترلی نیمه فعال در هر فرکانسی بسته به دور موتور میتواند حرکت ارتعاشی پایه موتور را محدود کند.

لازم به ذکر است که با توجه به آنچه گفته شد هر جاذب نیمه فعالی را می توان به جای جاذب غیرفعال از همان نوع به کار برد، اما در دامنه فرکانسی ثابت که در دراز مدت این فرکانس یکسان بوده یا تغییرات آن کم است این شیوه توجیه عملی ندارد.

نمونه دیگر این نوع از جاذبها مطالعاتی است که بر روی المانهای ویسکوالاستیک انجام می شود که قابلیت جذب ارتعاش را به صورت شبه فعال دارند، در این نوع وسایل عمدتاً پارامتر زمان و دما از عوامل مهم در کنترل ارتعاشات می باشند [۱۴].

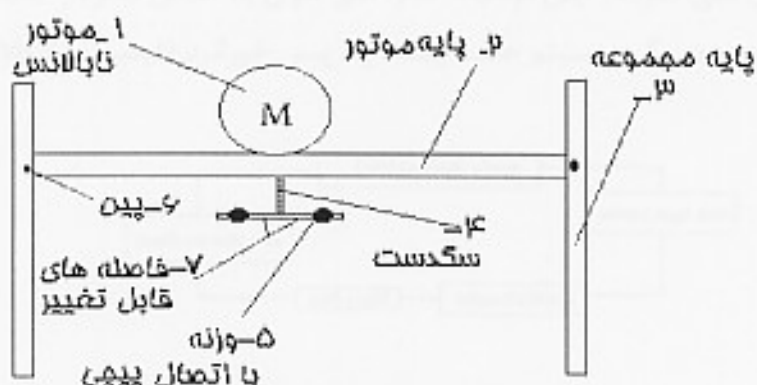
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{mL^3}}$$

این مقدار فاصله وزنه ها از وسط سگدست افقی با فرکانس تریپل موتور رابطه:

برقرار است که: f : فرکانس طبیعی سیستم، m : جرم هر یک از وزنه ها، EI : مشخصات مکانیکی دو پایه می باشد. لذا با دانستن فرکانس موتور نا بالانس می توان وزنه ها را طوری قرار داد که پایه ثابت مانده و تنها جاذب نوسان نماید.

خوانیم ، اهمیت استفاده از این وسایل نیز در همین قابلیت نهفته است . تجربه های عملی نشان می دهد که این نوع جاذب برای کنترل پاسخهای ضربه ساختارها مناسب می باشند [۱۱].

به عنوان مثالی از این نوع جاذب ارتعاشی می توان به دستگاهی اشاره کرد که به منظور محدود کردن دامنه ارتعاش در پایه یک موتور الکتریکی به کار می رود در این دستگاه در زیر پایه ای که برای نگهداری موتور استفاده می شود مجموعه ای به صورت یک سگدست قرار دارد (شکل ۶-۱) که دو وزنه در فاصله ای مساوی از وسط سگدست قرار دارند . با راه اندازی موتور به علت عدم بالانس آن پایه شروع به نوسان مینماید ، که می توان با تغییر مکان وزنه ها در روی محور متصل به سگدست دامنه ارتعاشی را محدود نمود . این وسیله و وسایلی نظیر آن را به خاطر قابلیت تنظیم مجدد آنها می توان در فرکانسهای مختلفی به کار برد .



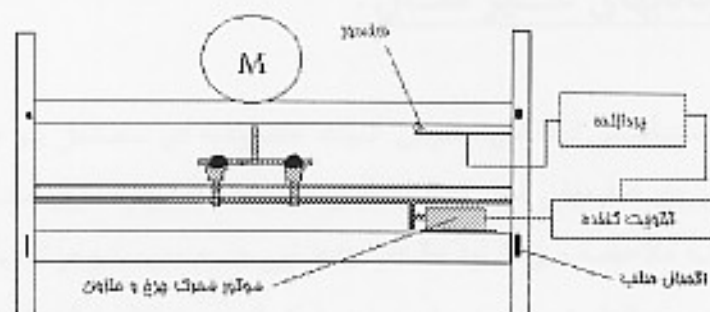
شکل ۶-۱. وسیله ای که با شیوه کنترلی نیمه فعال در هر فرکانسی بسته به دور موتور میتواند حرکت ارتعاشی پایه موتور را محدود کند .^۱

لازم به ذکر است که با توجه به آنچه گفته شد هر جاذب نیمه فعالی را می توان به جای جاذب غیرفعال از همان نوع به کار برد ، اما در دامنه فرکانسی ثابت که در دراز مدت این فرکانس یکسان بوده یا تغییرات آن کم است این شیوه توجیه عملی ندارد .

نمونه دیگر این نوع از جاذبها مطالعاتی است که بر روی المانهای ویسکوالاستیک انجام می شود که قابلیت جذب ارتعاش را به صورت شبه فعال دارند ، در این نوع وسایل عمدتاً پارامتر زمان و دما از عوامل مهم در کنترل ارتعاشات می باشند [۱۴] .

$$^1 \text{ این مقدار فاصله وزنه ها از وسط سگدست افقی با فرکانس تریپل موتور رابطه: } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{mL^3}}$$

برقرار است که : f : فرکانس طبیعی سیستم ، m : جرم هر یک از وزنه ها ، EI : مشخصات مکانیکی دو پایه می باشد . لذا با دانستن فرکانس موتور نا بالانس می توان وزنه ها را طوری قرار داد که پایه ثابت مانده و تنها جاذب نوسان نماید .

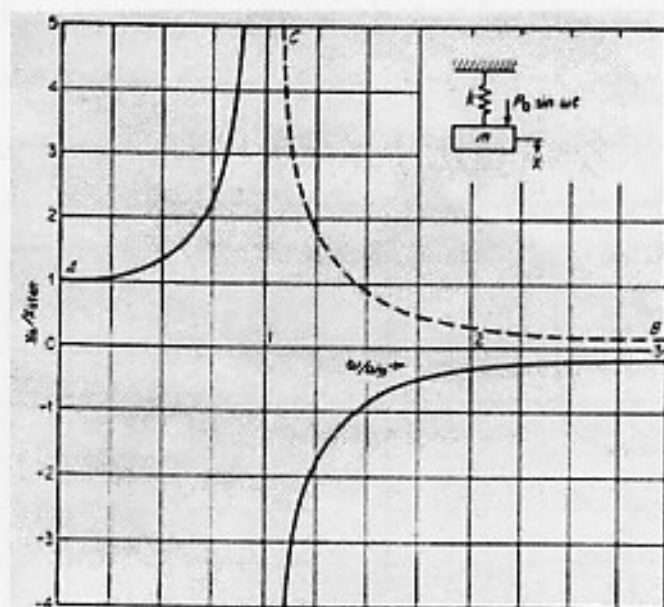


شکل ۸-۱. طرح جواره دستگاه جاذب ارتعاش به صورت فعال

نمونه های دیگر این نوع جاذب در ساختمانها، لرزه گیرها و ... [۹] به کار می رود و درباره نحوه عملکرد [۷] و همچنین ویژگیهای این نوع جاذب در مقایسه با دو روش دیگر مطالعات زیادی انجام گرفته است [۸]. در ضمن از لحاظ قیمت و هزینه نگهداری این نوع جاذب از انواع دیگر پرهزینه تر می باشد.

۲. اصول تئوری جاذبهای غیر فعال :

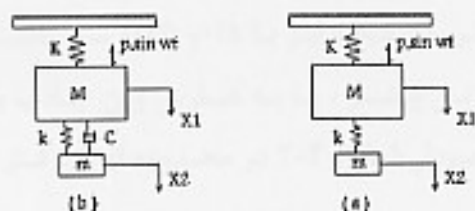
برای بیان اصول تئوری جاذب دینامیکی ارتعاش ، فرض کنید مجموعه ای مشتمل بر جرم و ضریب فنریت معینی را تحت یک نیروی هارمونی قرار دهیم ، این مجموعه دارای رفتاری مشابه نمودار* شکل ۲-۱ خواهد بود ، چنانچه ملاحظه می شود مقدار جابجایی جرم سیستم در نزدیکی فرکانس طبیعی سیستم $(\sqrt{\frac{k}{m}})$ به تدریج افزایش می یابد ، و در فرکانس معادل با فرکانس طبیعی سیستم پدیده تشدید روی می دهد و این دامنه به بینهایت میل می کند ، در این حالت چنانچه مقدار انرژی ورودی به سیستم - از طریق نیروی هارمونیک - به وسیله استهلاک داخلی سیستم از بین نرود این انرژی به صورت مداوم صرف افزایش دامنه شده ، این مساله در نهایت سبب انهدام و تخریب سیستم مورد نظر می گردد . البته باید توجه داشت که با افزایش دامنه حرکتی عوامل مستهلک کننده هم به طور قابل توجهی افزایش یافته در اکثر موارد سیستم به نوعی تعادل می رسد [۱] ، اما این احتمال هم وجود دارد که قبل از رسیدن به این حالت تعادل سیستم تخریب گردد و یا اینکه در اثر مداومت این نوع بارگذاری سیستم تحت شرایط موجود به حالت خستگی رسیده و تخریب گردد .



شکل ۲-۱. رفتار یک سیستم یک درجه آزادی تحت نیروی هارمونی ساده

* از آنجا که مساله مهم در مطالعه سیستمهای ارتعاشی اندازه دامنه سیستم است نه جهت آن ، لذا در نمودارهای ترسیم شده خطوط ناحیه منفی به صورت متقارن نسبت به محور افقی (به صورت خط چین) ترسیم می گردد .

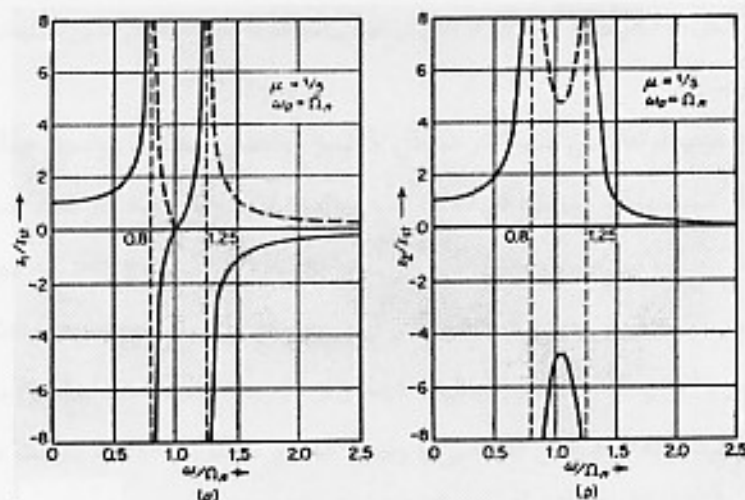
برای جلوگیری از پدیده فوق سه شیوه مختلف را می توان در نظر گرفت اول آنکه بتوانیم خود نیروی تحریک را کنترل کنیم که معمولا غیر ممکن می باشد، روش دیگر تغییر مقدار جرم یا ضریب فنریت سیستم است تا با اینکار فرکانس طبیعی سیستم از فرکانس تحریک دور گردد، که این روش نیز در حالت کلی غیر عملی است، اگر نتوانیم از این دو شیوه جهت اجتناب از حالت تشدید استفاده نماییم، می توانیم یک جاذب ارتعاشات نامیرا و یا میرا (شکل ۲-۲) به کار ببریم.



شکل ۲-۲. (a) جاذب ارتعاشات نامیرا (b) جاذب ارتعاشات میرا

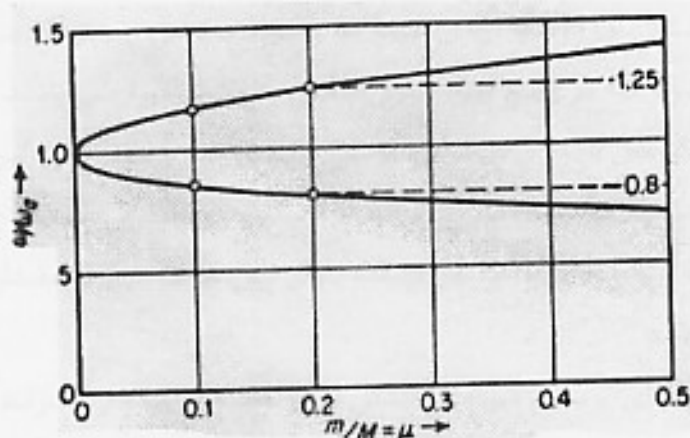
که با توجه به شکل می توان معادلات نیوتن مربوط به حرکت این سیستمها را بنویسیم [۲]، و سپس به منظور دریافت نتایج کاربردی بهتر معادلات را ساده سازی کرده آنها را بی بعد نماییم.

با انجام اعمال فوق برای حالت نامیرا نمودارهای رفتاری مشابه شکل ۳-۲ به دست می آید، که در آنها دامنه حرکت دو جرم اولیه (سیستم اصلی) و ثانویه (جاذب) بر حسب تغییرات نسبت فرکانس (نسبت فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی) برای سیستمی که جرم جاذب آن 0.12 جرم اصلی است و فرکانس طبیعی جاذب با سیستم اولیه برابر می باشد، ترسیم شده است.



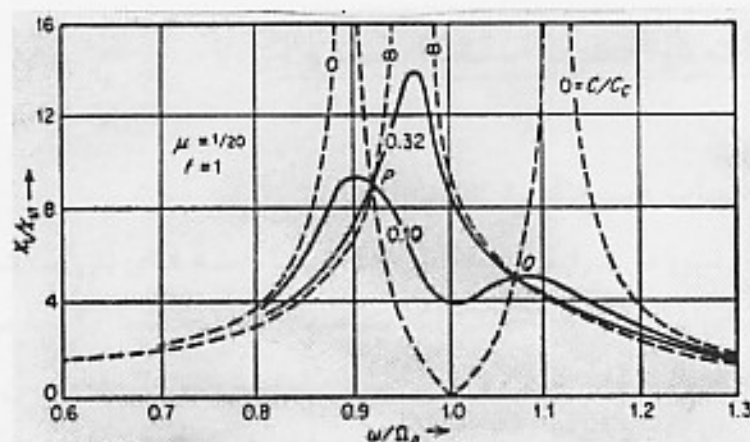
شکل ۲-۲. رفتار (a) سیستم اصلی (b) جاذب در تغییرات فرکانس تحریک سیستم

همان طور که از شکل پیداست در نسبت فرکانس معادل یک مقدار جابجایی سیستم اصلی برابر صفر بوده و دامنه حرکتی جاذب - با توجه به روابط - برابر با P/k می باشد. همچنین از شکل پیداست که با دور شدن از حالت مذکور در هر دو جهت کاهش و یا افزایش نسبت فرکانس به حالت تشدید می رسیم ، که این فرکانسهای تشدید جدید در سیستم دو درجه آزادی (پس از نصب جاذب) به وجود می آید و با توجه به نسبت وزنی (نسبت وزن جاذب به وزن جرم اصلی) از طریق رابطه ویا نمودار حاصل از آن (شکل ۲-۴) محاسبه می گردند که به عنوان مثال برای نسبت وزنی برابر 0.12 ، این دو فرکانس تشدید برابر با 0.18 و 1.25 می باشند. ناگفته پیداست که با توجه به شکل ۲-۴ هر چه نسبت وزنی بیشتر ، یا به عبارتی وزن جاذب بیشتر باشد فاصله این دو فرکانس از یکدیگر بیشتر بوده در نمودار شکل ۲-۳ در محدوده ای بزرگتر (بین دو حالت تشدید) حالت امنی وجود خواهد داشت .



شکل ۲-۴. اثر نسبت جرم روی فرکانسهای طبیعی سیستم یا جانب دینامیکی بدون مستهلک کننده

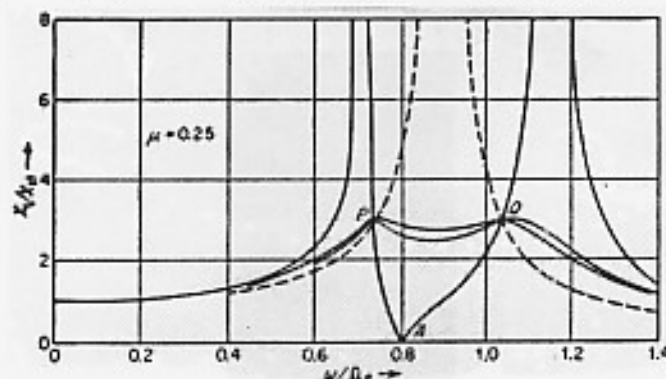
برای حالت جاذب ارتعاشی میرا در شکل ۹ نیز روابطی مشابه روابط حالت فوق می توان نوشت که تنها ، عامل مستهلک کننده در معادلات نیوتنی مربوط ، به حرکت اضافه می گردد . با ساده کردن روابط به معادلاتی می رسیم که در آنها نحوه حرکت و دامنه دو جرم بر اساس پارامترهای مشخصه سیستم بیان می گردد . اگر این روابط را برای چند حالت میرایی مختلف (ضرایب استهلاک 0 و 0.10 و 0.32 و بی نهایت) برای دامنه سیستم اصلی بر حسب نسبت فرکانس (فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی) رسم کنیم شکل ۲-۵ به دست می آید . دو نکته قابل توجه در این نمودار (شکل ۲-۵) آنست که :



شکل ۲-۵. رفتار سیستم تحت کنترل به کمک چندجاذب میرا کننده غیرفعال بر حسب تغییرات فرکانس

۱. در دو ضریب استهلاک صفر و بینهایت چنانچه ملاحظه می گردد دامنه حرکت به سمت بینهایت میل می کند. این به آن دلیل است که: در حالت ضریب استهلاک صفر - از آنجا که دامنه تشدید سیستم یک درجه آزادی تنها به وسیله میرایی مستهک می شود - کار نیروی میرایی برابر صفر میشود که در واقع این شکل همان حالت نامیرا می باشد. و در حالت میرایی بینهایت دو جرم به یکدیگر قفل شده، جابجایی نسبی بین دو جرم صفر می گردد لذا باز هم کاری در جهت میراسازی و استهلاک دامنه سیستم انجام نمیگیرد و تمایل دامنه حرکتی سیستم به سمت بینهایت ملاحظه میگردد، لذا مقدار بهینه برای ضریب استهلاک مقداری بین این دو حد (صفر و بینهایت) می باشد.

۲. همه منحنی های ترسیم شده در شکل از دو نقطه ثابت می گذرند (شکل ۲-۶) که این امر غیر اتفاقی است، لذا اگر بتوانیم مشخصات این نقاط را به دست آوریم از آنجا که بهترین دامنه قابل حصول هم اندازه و در حدود این نقاط می باشد مشکل، بهینه سازی پارامترهای سیستم با توجه به رفتار هندسی منحنی از روی روابط موجود در این بحث حل خواهد شد [۲].



شکل ۲-۶. نمایش نقاطی که در تمامی جاذبها با تغییر خواص میرا سازی آنها، منحنی رفتارسیستم از این نقاط می گذرد

۳. ارتعاشات در خطوط انتقال نیرو:

۳-۱. ارتعاشات شلاقی (galloping):

خطوط انتقال نیرو در شرایط آب و هوایی خاصی با دامنه های بزرگ (که به چندین متر می رسد) و فرکانسهای پایین (۲-۱ هرتز) در سرعتهای بادی حدود ۲۰-۸ متر بر ثانیه - که به صورت مستقیم با اندکی زاویه به سیم بر می خورد - مرتعش می گردند. این پدیده در اثر عدم تعادل آیرودینامیکی سیم (به خاطر پوشیده شدن سیم از برف و یخ) اتفاق می افتد و اغلب اوقات بیش از یک یا دو نیم موج در طول بازه (span) سیم روی نمی دهد. احتمال این پدیده و دامنه بیشتر در آن برای سیمهای با قطر بیشتر مثل دسته ای از سیمها نظیر کابلها از سیمهای با قطر کمتر، بیشتر می باشد. اثر مخرب این پدیده آن است که به علت بزرگی دامنه نوسان آن، احتمال برخورد فازهای مختلف کابلها به وجود آمده، موجب اختلال در انتقال برق خواهد شد. به طور مثال، خطی با سطح مقطعی کمابیش دایره ای که بین دو برج با فاصله ای حدود ۱۰۰ متر می باشد را در نظر بگیرید، این پدیده می تواند در یک بازه (span) این خط با یک یا دو نیم موج، ارتعاشی با دامنه ای به اندازه ۳ متر با فرکانس ۱ سیکل بر ثانیه در وسط خط ایجاد نماید. این پدیده هرگز در کشورهایی که دارای آب و هوایی گرم می باشند مشاهده نمی شود اما تقریباً سالی یکبار در هر زمستان در ایالات شمالی آمریکا، کانادا و شمال ژاپن هنگامی که دما حدود صفر درجه سلسیوس ثابت می ماند در هنگام وزش بادی نسبتاً قوی روی می دهد، شکل سیم در چنین مواردی پوشیده از برف و یخ و به صورت شکل ۷-۲ می باشد. آنچه از محاسبه های اجمالی به دست می آید آنست که فرکانس طبیعی بازه از همان مرتبه و در حدود فرکانس تحریک می باشد و گاهی با یک شروع، اغتشاش بسیار پایا بوده در بعضی مواقع تا ۲۴ ساعت ادامه می یابد.



شکل ۷-۲. یخ و برفی که پیرامون کابل انتقال نیرو را در بر گرفته سبب تغییر شکل سطح مقطع آن شده است

با توجه به تعریف در این مورد ارتعاشی با نوعی ارتعاش تحریک خودی (یا خود القاء) مواجهیم که در اثر بادی که با سیم برخورد می کند ایجاد می گردد . این مساله دارای توضیحی است که مشتمل بر چند دلیل آیرودینامیکی می باشد ، هنگامی که باد بر روی یک سیلندر استوانه ای بوزد (شکل ۳-۱a) ، نیرویی در همان جهت بر سیلندر اعمال می کند که این مساله از تقارن به خوبی درک می شود .



شکل ۳-۱. جهت باد و نیروی اعمال شده از طریق آن بر سطوح مقاطع مختلف

برای یک سطح مقطع غیر دایره ای (شکل ۳-۱b) این مساله روی می دهد که بین جهت وزش باد و نیروی وارد بر آن زاویه ای به وجود آمده ، جهت این دو دیگر همراستا نمی باشند . مثال خوبی از غیر همراستا بودن جهت باد و نیروی اعمال شده ، برگه هواپر (ایرفویل) می باشد (شکل ۳-۱c) که نیروی وارد بر آن تقریباً عمود بر راستای وزش باد می باشد .

در بررسی پدیده ارتعاش حرکت شلاقی (galloping) در خطوط انتقال نیرو ، نکته اصلی که سبب پیدایش این امر می گردد آنست که به علت تغییر شکل سطح مقطع کابل از حالت تقریباً متقارن به حالتی غیر متقارن ، در اثر یک نوسان اولیه که به علت وزش باد ایجاد می گردد ، از طرف باد - به خاطر جهت نیرو ، که با راستای بادی که از آن منتج شده است زاویه غیر صفری می سازد - نیرویی بر کابل وارد میشود که نوعی میرایی منفی در آن ایجاد می گردد یعنی در واقع نوعی تقویت نیرو در هر بار نوسان بر کابل اعمال شده با حالتی که از نظر دینامیکی ناپایدار است مواجه می شویم . در حالت خاصی که تگرگ (یا برف یخ زده) موجود بر سیم به شکلی باشد که رابطه بین باد و جهت نیروی اعمال شده ای مشابه شکل ۳-۱b ایجاد شود ، حالت دینامیکی ناپایدار به وجود آمده ، اگر به صورت اتفاقی سیم اندکی سرعت اولیه به سمت بالا پیدا کند وزش باد آنرا تقویت کرده ، تا هنگامیکه خاصیت فنری یا الاستیکی سیم این حرکت را متوقف نماید همچنان به سمت بالا می رود . سپس این نیروی الاستیکی سیم را به سمت پایین حرکت داده ، در این مرحله باد به این حرکت مجدداً کمک کرده ، بنابراین ، یک حرکت اولیه کم سرعت به حرکتی سریع تبدیل می گردد .

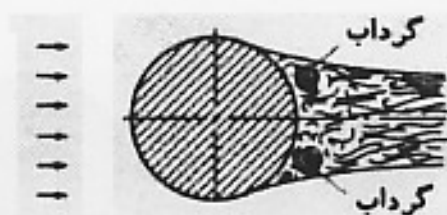
از لحاظ تئوری و همچنین با استفاده از آزمایشهای مختلفی برای سطوح گوناگون در تونل باد یا آب ، تحقیقات زیادی راجع به چگونگی رفتار این سطوح ، نیروهای آیرودینامیکی وارد بر آنها ، همچنین نحوه توزیع جریان و فشار بر این نمونه ها انجام گرفته است [۱۶و۲]، اما در نهایت راجع به شرایط پایداری یک مقطع می توان گفت : اگر شیب منفی منحنی برای (lift) یک مقطع بزرگتر از طول منحنی پسای (drag) آن باشد از نظر دینامیکی ناپایدار است [۲] .

روشهای مختلفی برای حل این مشکل پیشنهاد گردیده است ، که یکی از آنها اجتناب از یخ زدگی سیم با استفاده از یک جریان داخلی در آن می باشد [۱] ، راه دیگری نیز برای حل این مشکل ، همان استفاده از جاذبههای دینامیکی ارتعاش است که می توان با استفاده از یک ابزار کمکی (سیستم ثانویه) حرکت نوسانی را در خط محدود نمود [۲و۱] همچنین جهت بهبود پارامترهای موجود در دمپره های مکانیکی این نوع ارتعاشات تحقیقاتی در مرجع [۶] انجام شده است .

۲-۳. ارتعاشات عمودی منتج از پدیده گردابه ای (Karman) :

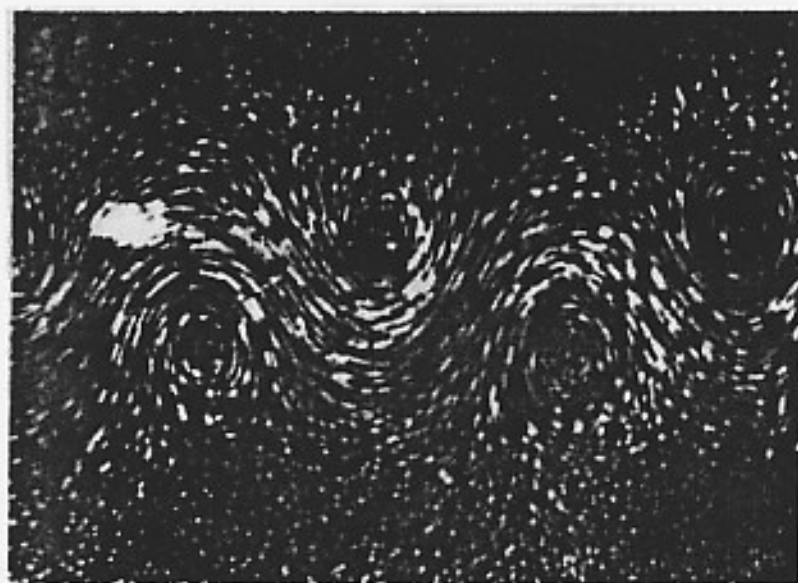
ارتعاشات دیگری که در کابلها در اثر وزش باد مشاهده می شود نوعی ، حرکت نوسانی در راستای عمودی (قائم) می باشد که به مراتب از پدیده حرکت شلاقی بیشتر روی داده ، به کرات در خطوط انتقال نیرو مشاهده می شود . این نوع ارتعاشات در اثر پدیده ای معروف به کارمن یا پدیده گردابه ای (Vortex shedding) روی داده به علت نوسان زیاد موجب خستگی و شکست در محل اتصال کابل می گردد . چنین ارتعاشاتی در بادی با سرعت ۱۴ - ۰/۵ متر بر ثانیه [۱] و در محدوده فرکانسهای بالا (۵۰ - ۱۰ هرتز) روی می دهد ، در چنین بازه ای از فرکانس معمولاً یکصدمین الی پانصدمین مد ارتعاشی قرار می گیرند لذا برای یک بررسی و تحلیل خوب علمی تعداد زیادی مد را باید در نظر گرفت [۱۹] .

برای شناخت بهتر این نوع ارتعاشات بهتر است ، تا کمی با علت واقعی این پدیده آشنا گردیم . از مباحث سیالات به خاطر داریم [۱۰] ، وقتی که جریان سیالی از روی یک استوانه با سطح مقطع دایره ای می گذرد با توجه به شرایط سطح و سیال در ناحیه ای از پشت سطح خطوط جریانی از انحناء مسیر پیروی نکرده در اثر گرادیان مثبت فشار ، پدیده جدایش روی می دهد و در ناحیه پشت استوانه گردابه هایی (Wake) ایجاد می شود . در ابتدا ، یک جفت گرداب در ناحیه جدا شده به صورتی که در شکل ۲-۳ مشاهده می شود تشکیل میگردد .



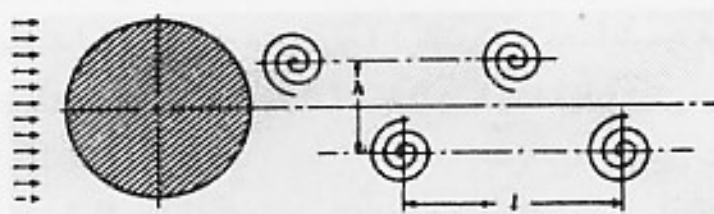
شکل ۲-۳. گردابه های تشکیل شده در پشت استوانه

این گردابه ها مانند غلطکهای آبرودینامیکی ، که جریانهای اصلی روی آنها جریان دارند عمل می کنند . همیشه اول یکی از آنها از بین می رود و در فرودست در اثر عبور محو می شود ، پس از آن گرداب دیگری در جای آن شروع به رشد می کند . آنگاه ، گرداب رشد کرده بعدی از بین می رود ، بنابر این فرایندی شروع می شود که به موجب آن گردابه ها از استوانه به طور متناوب جدا می شوند و در فرودست حرکت می کنند ، به صورتی که در شکل ۳-۳ برای جریان واقعی و در شکل ۳-۴ به طور شمایی نشان داده شده است .



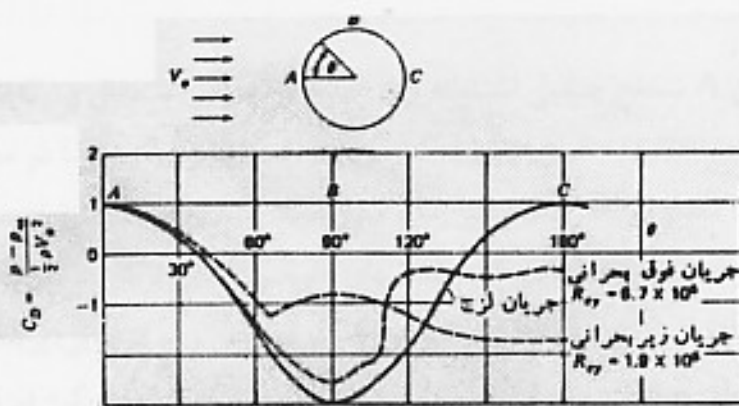
شکل ۳-۳. نمایش واقعی گردابه هایی که در پشت یک مقطع استوانه ای در حین عبور سیال از روی آن به وجود می آید .

ترتیب این گردابه ها در اثر عبور مسیر گرداب فون کارمن نامیده می شود . فون کارمن توانست نشان دهد که برای پایدار بودن نقش ، وضعیت باید هندسه خاصی داشته باشد ، به طوری که : $h/l=0.281$ که ابعاد h و l در شکل ۳-۴ نشان داده شده است .



شکل ۴-۳. نمایش طرحواره ای گردابه های تشکیل شده در پشت استوانه

مسیر گرداب با سرعت u_v در فرودست حرکت می کند ، که کمتر از سرعت جریان اصلی است . همچنین فون کارمن توانست با استفاده از نظریه سیال کامل ، نشان دهد که مقدار متوسط بازدارندگی برای واحد طول استوانه عبارتست از : $D = \rho V_0^2 h [2.83 \frac{u_v}{V_0} - 1.12 (\frac{u_v}{V_0})^2]$ که در آن h و $\frac{u_v}{V_0}$ از داده های آزمایشی به دست می آیند .



شکل ۵-۳. ضریب نیروی پسا وارد بر سطح مقطع استوانه ای در زوایای مختلف این سطح

واضح است که چنین تناوبی از گردابه ها ، نیرویی بر استوانه وارد میکند که مقدار متوسط فوق را دارد ، اما با فرکانسی که به شرایط جریان بستگی دارد ، به طور چرخه ای تکرار می شود . اگر فرکانس طبیعی استوانه در جهت عرضی به فرکانس تغییر نیروی حاصل از گردابه ها نزدیک باشد ، ارتعاش جانبی به وجود می آید . که سوت زدن (صدا کردن) کابل تلفن و خطوط انتقال برق در سرعت های معین باد ناشی از همین امر است .

همانطور که در بالا گفته شد اثر گردابه ها در پشت مانع منظم نمی باشد ، اما نکته قابل توجه و مورد اهمیت در بحث مربوط به ارتعاشات آن است که این گردابه ها به شکلی مرتب به

صورت تناوبی، با حرکت ساعتگرد و پادساعتگرد بعد از سیلندر قرار می‌گیرند. که این ویژگی بارها به وسیله آزمایش، به دست آمده است. نکته قابل توجه حاصل از آزمایشهای تجربی نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی بین فرکانس این تناوب (f)، سرعت جریان (V) و قطر سیلندر (D) وجود دارد، که به صورت زیر بیان می‌گردد:

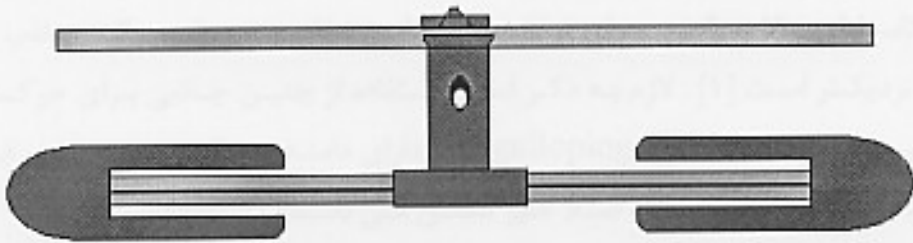
$$\frac{f \cdot D}{V} = 0.22 \quad (3-1)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود این نسبت بدون بعد می‌باشد، لذا عدد ۰/۲۲ به واحدهای انتخابی بستگی ندارد و این مقدار عدد استروهل ($strouhal$) خوانده می‌شود. مقدار نیروی متناوب ایجاد شده نیز از رابطه (۳-۲) به دست می‌آید:

$$F = (C_x \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A) \cdot \sin \omega t \quad (3-2)$$

که در رابطه فوق A سطح جانبی استوانه، ρ جرم مخصوص سیال و C_x ضریب نیروی کارمن (بی بعد) می‌باشد، مقدار دقیق ضریب کارمن مشخص نمی‌باشد اما در محدوده وسیعی از جریانها ($10^2 < Re < 10^7$) مقدار این ضریب برابر یک می‌باشد. که Re عدد رینولدز می‌باشد. حال اگر فرکانس این نیرو با یکی از فرکانسهای طبیعی کابل برابر باشد تشدید روی می‌دهد. علاوه بر کابل‌های انتقال برق در موارد دیگری، نظیر دوربین زیر دریایی (پریسکوپ)، کوره های بلند صنعتی، پلهای معلق و مخازن نفت نیز این پدیده ملاحظه می‌شود، که در هر یک از این موارد این پدیده قابل مطالعه و پیشگیری است. علاوه بر آن در رفتار حرکتی قطرات باران نیز این پدیده موثر می‌باشد.

به منظور حفاظت و نگهداری از خطوط نیرو در برابر این پدیده، و در واقع برای از بین بردن انرژی در خطوط و استهلاک آنها وسایل مختلفی تهیه شده است که از معروفترین ابزارهای میرا کننده که در بازه وسیعی مورد استفاده قرار گرفته، دمپری است که جرج اچ. استاک بریج (George H. Stockbridge) در سال ۱۹۲۵ میلادی تهیه نمود (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶. مستهلک کننده حرکت نوسانی در خطوط انتقال نیرو (دمپر استاک بروج)

این نوع دمپرها برای سیمهای آلومینیم-فولاد با سطح مقطع ۹۵ میلیمتر مربع یا بیشتر و سیمهای مسی یا فولادی با سطح مقطع ۵۰ میلیمتر مربع یا بیشتر به کار میروند [۱] ، و همانطور که در شکل دیده می شود از دو وزنه تشکیل شده که در دو سر یک سیم به صورت اتصال صلب متصل شده است و این سیم در میانه (وسط) به وسیله نوعی اتصال به کمک پیچ و مهره به کابل متصل می گردد . در هنگام نوسان کابل این دامنه حرکتی به این جاذب منتقل شده ، در اثر این دامنه ارتعاشی ورودی وزنه های جاذب شروع به حرکت می کنند و انرژی در اثر استهلاک درونی سیم اتصال مستهلک شده ، به گرما تبدیل می گردد و از طرف جاذب به کابل نیرویی وارد می شود که در برابر نوسان آن مقاومت می کند . هر یک از وزنه ها دارای دو مد ارتعاشی می باشند که مد اول به صورت حرکت جابجایی عمودی ومد دوم به صورت حرکت پیچشی (خمشی) نسبت به مرکز جرم، وزنه ها می باشد که فرکانس طبیعی مربوط به این مدها به وسیله قطر ، اندازه و مشخصات ساختاری سیم اتصال ، ممان اینرسی و جرم وزنه ها به دست می آیند (در مبحث بعدی به این موضوع می پردازیم) . موقعیت قرار گیری جاذبها بر روی خطوط و نیز تعداد لازم در هر بازه کابل ، بر اساس قطر ، وزن ، کشش سیم و فرکانسهای طبیعی محتمل انتخاب می شود . نکته اساسی در نصب این نوع دمپرها بر روی خط آنست که بر روی نقاط گره موج یا نود قرار نگیرد ، ولی عموماً جاذبها در فاصله ای حدود ۲ - ۰/۵ متری از هر نگهدارنده نصب می شوند [۱] و یا به عبارتی دیگر وقتی طول نیم موج سینوسی بین ۲/۵ تا ۶ متر تغییر کند موقعیت اتصال حدود ۲ متر از محل اتصال خط با برج می باشد ، که جهت عمده فرکانسها وطول موجها مناسب است [۲] . بیشینه مقدار میرایی مؤثر در فرکانسی است که جاذب در آن تنظیم شده است . با افزایش فرکانسهای تحریک تاثیرگذاری ، و اهمیت جاذب کاهش می یابد . در حالتی که ارتعاشات در دامنه فرکانسهای عریضی باشند (یعنی تعداد فرکانسهای احتمالی که روی می دهد زیاد باشد) از دو یا تعداد بیشتری جاذب در کنار هر نگهدارنده استفاده می شود که مثلاً اگر دو جاذب استفاده گردد ،

یکی برای فرکانسهای بالا و دیگری برای فرکانسهای پایین تنظیم می شوند که جاذب فرکانس بالا به نگهدارنده نزدیکتر است [۱]. لازم به ذکر است استفاده از چنین جاذبی برای حرکت نوسانی به منظور جلوگیری از حرکت شلاقی (galloping) که دارای دامنه نوسانی حدود صد برابر بیشتر و فرکانسی حدود صد برابر کمتر است، عملاً غیر ممکن می باشد [۱].



شکل ۱-۱: نمای مقطعی از یک برج انتقال

در صورت این دو شکل بر افتاد از کششهای طبیعی آن است. که در حالت متشکل میوهده دارای دو فرکانس ارتعاشی و در حالت غیر متشکل، با وجود دو فرکانس میوهده هستند. در حالت غیر متشکل دو فرکانس ارتعاشی وجود دارد که فرکانس اول آن فرکانس طبیعی است و فرکانس دوم آن فرکانس طبیعی است که بر افتاد از کششهای طبیعی است. در حالت متشکل دو فرکانس طبیعی وجود دارد که فرکانس اول آن فرکانس طبیعی است و فرکانس دوم آن فرکانس طبیعی است که بر افتاد از کششهای طبیعی است.

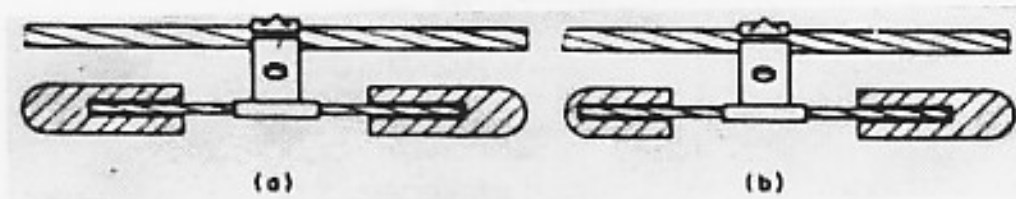
برای بررسی رفتار دینامیکی این نوع تورها، تیمه ای از این تصویر را به عنوان یک سیستم قطعی در نظر می گیریم که مطابق شکل ۱-۲ دارای دو فرکانس ارتعاشی می باشد. یکی از این فرکانسها به صورت جاذبی درجه یک درجه اول غیر و دیگری حرکتی درجه اول درجه اول می باشد.



شکل ۱-۲: مدل دینامیکی یک تور انتقال

۴. بررسی و تحلیل دینامیکی دمپر stockbridge :

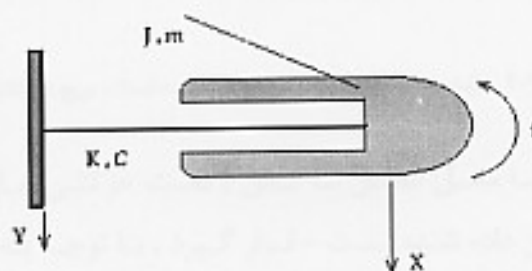
همان طور که در بخش قبلی اشاره شد ، یکی از مرسومترین روشهای محدود کردن ارتعاشات با دامنه کم و فرکانس زیاد ، استفاده از جاذبههای دینامیکی ارتعاشات یا دمپرهاست که بریج می باشد ، این دمپرها به دو شکل معمول زیر (به صورت متقارن یا غیر متقارن) ساخته می شود (شکل ۴-۱) .



شکل ۴-۱. دمپر استاک بریج (a) متقارن ، (b) غیر متقارن

تفاوت این دو شکل در تعداد فرکانسهای طبیعی آن است ، که در حالت متقارن مجموعه دارای دو درجه آزادی و در حالت غیر متقارن ، با چهار درجه آزادی مواجه هستیم . در حقیقت هر نیمه از دمپر (چنانچه از وسط گیره اتصال به کابل ، آنرا به دو نیم نماییم) در هر حال ، دو فرکانس طبیعی دارد (که با روابطی که در ادامه می آید ، به دست خواهیم آورد) ، شکل مد این فرکانسهای طبیعی به صورت شماتیک در شکل ۴-۲ ترسیم شده است .

برای بررسی رفتاری این نوع دمپرها ، نیمه ای از این دمپر را به عنوان یک سیستم خطی در نظر می گیریم که مطابق شکل ۴-۲ دارای دو درجه آزادی حرکتی می باشد ، یکی از این راسها به صورت جابجایی عمودی وزنه یا جرمهای دمپر و دیگری حرکت چرخشی این جرمها می باشد .



شکل ۴-۲. دمپر استاک بریج با فرض دو درجه آزادی

"Half-frequency" Stockbridge dampen

1st Freedom Degree

مستهلك کننده استاك بريج
با ۴ درجه آزادي

First mode or first freedom degree
of the big weight



مد اول يا اولين درجه آزادي

وزنه بزرگتر

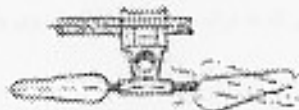
Second mode or first freedom degree
of the small weight



مد دوم يا اولين درجه آزادي

وزنه کوچکتر

Third mode or second freedom degree
of the big weight



مد سوم يا دومين درجه آزادي

وزنه بزرگتر

Fourth mode or second freedom degree
of the small weight



مد چهارم يا دومين درجه آزادي

وزنه کوچکتر

شکل ۳-۴. نمایش مدهای ارتعاشی مستهلك کننده استاك بريج نامتقارن

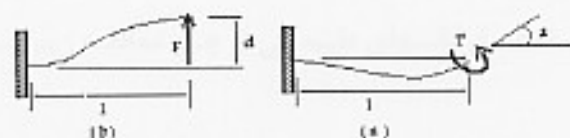
حال فرض کنید که پایه این دمپر (یا محل اتصال با کابل) تحت حرکتی هارمونیک در جهت عمود بر کابل - همانطور که در شکل نشان داده شده است - قرار گیرد ، با توجه به شکل روابط حرکت را می توان به صورت معادله ماتریسی زیر نوشت :

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = C \cdot \dot{y} + k \cdot y \quad (4-1)$$

با توجه به آنکه سیستم مورد مطالعه یک سیستم دو درجه آزادی است ، لذا واضح است که پارامترهای سیستم غیر از یک عدد بوده ، در واقع به ازاء هر یک از پارامترها با یک ماتریس روبرویم ، که با توجه به فرض سیستم دو درجه آزادی این ماتریسها دو در دو می باشند . به دست آوردن این ماتریسها به طریقه زیر عمل می نماییم :

از مباحث ارتعاشات ماتریس جرمی به صورت زیر به دست می آید^{۱۰} :

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & m.l \\ m.l & J \end{bmatrix} \quad (4-2)$$



شکل ۴-۴. تیر ساده ای که به ترتیب تحت خمش و نیروی واحد قرار گرفته است^{۱۰}.

با توجه به دو شکل فوق (شکل ۴-۴) و با استفاده از اصول تئوری تیرهای ساده ماتریس سختی نیز به شکل زیر به حاصل می شود :

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12.E.I}{L^3} & \frac{6.E.I}{L^2} \\ \frac{6.E.I}{L^2} & \frac{4.E.I}{L} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$\Rightarrow K = \frac{3.E.I}{L^3} \cdot \begin{bmatrix} 4 & 2.L \\ 2.L & \frac{4}{3}.L^2 \end{bmatrix}$$

^{۱۰} فهرست نامگذاری پارامترهای مورداستفاده در ابتدای پروژه آمده است .

^{**} با استفاده از این روش ، یعنی قرار دادن نیروی عمودی و گشتاور واحد و استخراج میزان جانبی و انحاء تیر از جداول موجود در کتابهای مقاومت مصالح و نوشتن روابط ماتریسی مربوط به جرم ، سختی و نیروهای واحد فوق و حل آن روابط مقادیر ماتریس سختی به عنوان مجهول این روابط به دست میآیند .

همچنین اطلاعات آزمایشگاهی برای کابلهای سیمی فولادی نشان می دهد که در گستره وسیعی از کاربرد، ضرایب میرایی با ضرایب سختی آنها متناسبند، و این نسبت تناسب به ساختار و چگونگی کابل بستگی دارد. لذا با تعریف ضریبی مثل μ (که در واقع میرایی سیستم را به صورت متناسب با سختی آن تعریف کرده ایم، (Proportional damping)) ضرایب ماتریس میرایی نیز به دست می آید یا به عبارتی خواهیم داشت :

$$\begin{aligned} \omega \cdot c_{ij} &= \mu \cdot k_{ij} \\ \omega \cdot C &= \mu \cdot K \end{aligned} \quad (4-4)$$

۴-۱. فرکانسهای طبیعی نامیرای (undamped) مجموعه :

با توجه به معادله ماتریسی ۴-۱، فرکانسهای طبیعی از حل معادله زیر به دست می آیند :

$$\det(K - M \cdot \omega^2) = 0 \quad (4-5)$$

بنابر این با جایگذاری مقادیر هر یک از ماتریسها در رابطه ۴-۵ خواهیم داشت :

$$K - M \cdot \omega^2 = \frac{1}{L^3} \begin{bmatrix} 12EI - mL^3\omega^2 & 6EIL - mL^3\omega^2 \\ 6EIL - mL^3\omega^2 & 4EIL^2 - JL^3\omega^2 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

که با جایگزینی در رابطه ۴-۵ داریم :

$$\det \begin{bmatrix} 12EI - mL^3\omega^2 & 6EIL - mL^3\omega^2 \\ 6EIL - mL^3\omega^2 & 4EIL^2 - JL^3\omega^2 \end{bmatrix} = 0 \quad (4-7)$$

بنابر این :

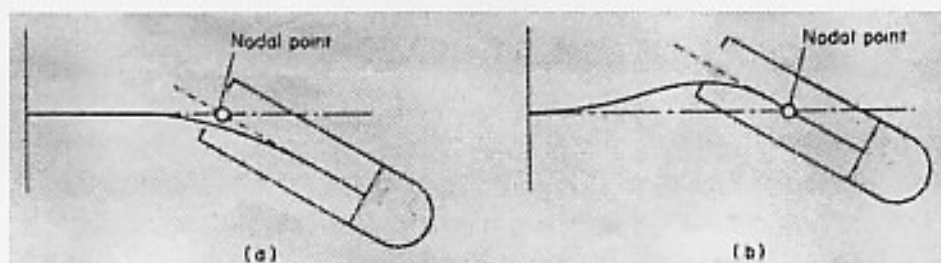
$$mL^6 (J - mL^2) \cdot \omega^4 + 2EIL^3 (6mL - 6J - 2mL^2) \cdot \omega^2 + 12E^2 I^2 L^2 = 0 \quad (4-8)$$

که با حل معادله ۴-۸ فرکانسهای طبیعی سیستم به دست می آید، یعنی:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{EI}{mL^3(J - ml^2)} (6J + 2mL^2 - 6mlL + \sqrt{(6mlL - 6J - 2mL^2)^2 - 12mL^2(J - ml^2)})} \quad (4-9)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{EI}{mL^3(J - ml^2)} (6J + 2mL^2 - 6mlL - \sqrt{(6mlL - 6J - 2mL^2)^2 - 12mL^2(J - ml^2)})} \quad (4-10)$$

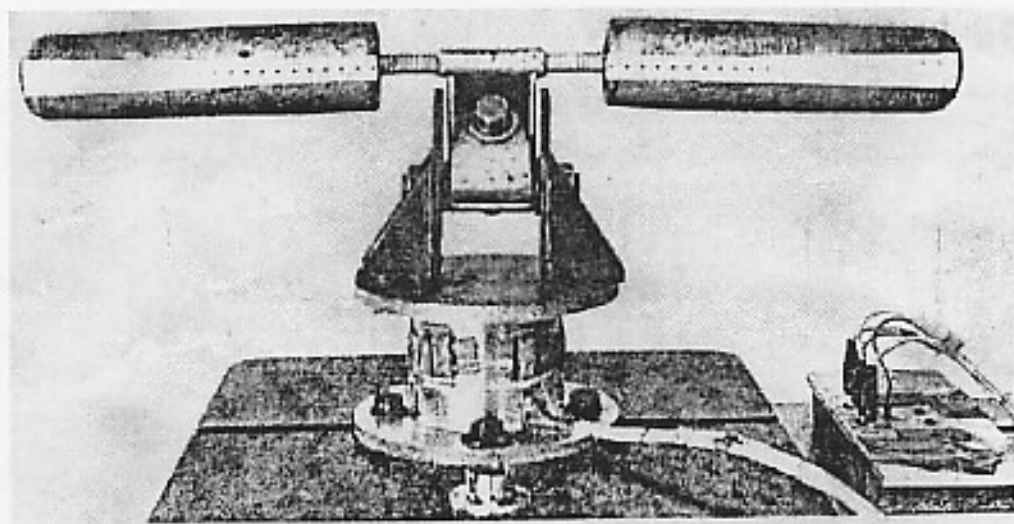
مقادیر عددی حاصل از این روش حل، با مقادیر حقیقی در عمل هماهنگی بسیار بالایی دارند، و همانطور که پیشتر گفته شد، دو شکل مد به دست می آیند - که به طور شماتیک در شکل ۴-۵ نمایان می باشند - ملاحظه می شود که مد اول، حرکت جابجایی غالب را توصیف می کند در حالیکه مد دوم حرکت خمشی غالب را بیان می دارد که یافته های حاصل از نتایج آزمایشی این اشکال را تایید می کنند. همچنین اشکال ۴-۶ و ۴-۷ ملاحظه گردد.



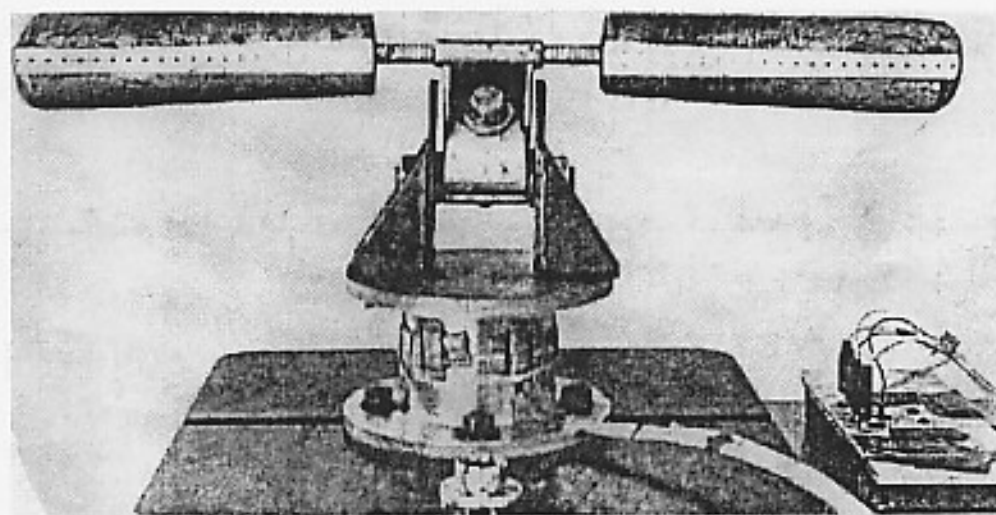
شکل ۴-۵. دو مد حرکتی هر نیمه از مستهلک کننده اسنک بریج دو تریج آزادی (a) مد اول (b) مد دوم

۴-۲. ارتعاش اجباری:

اکنون فرض می کنیم که گیره دمپر که به صورت صلب به کابل انتقال متصل گردیده، تحت یک جابجایی هارمونیک عمودی قرار گیرد (شکل ۴-۲):



شکل ۴-۶. نقاط گره (nodal points) مد اول ارتعاشی مستهلک کننده متقارن .



شکل ۴-۷. نقاط گره (nodal points) مد دوم ارتعاشی مستهلک کننده متقارن .

$$Y = \bar{y} \cdot e^{i\omega t}$$

(۴-۱۰)

طبیعی است که به علت نوع اتصالات این حرکت به طور مستقیم به وزنه ها انتقال می یابد. لذا واضح است که پاسخ مجموعه به این نوع تحریک نیز به صورت هارمونیک می باشد، در اینجا باید توجه نمود که در کل مباحث مربوط به رفتار این نوع جاذب، از آنجا که اهمیت مساله

* خط تیره ای که بالای پارامترها آمده به معنای دامنه مختلط (کمپلکس) یا فازور بردار مورد نظر می باشد به طور مثال:

$$\bar{F} = Fe^{i\omega t}$$

که نشان دهنده فازور نیرو می باشد .

بررسی ویژگیها در دراز مدت می باشد لذا حالات گذرا مورد بررسی قرار نمی گیرد. حال با یادآوری مجدد معادله ۴-۱، که در آن دو جمله سمت راست معادله در واقع همان نیروی هارمونی اعمال شده بر دمپر می باشد، با استفاده از بیان معادله به صورت مختلط، رابطه مذکور به شکل زیر در می آید :

$$\left[-\omega^2 \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F} \\ \bar{M} \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

که با جایگذاری مقادیر آرایه های ماتریس جرم و ماتریس شامل جملات میرایی - بر حسب ضرایب متناسب سختی - و انجام اعمال ساده سازی به شکل زیر دست می یابیم :

$$\begin{bmatrix} -m\omega^2 + k_{11}(1+i\mu) & -ml\omega^2 + k_{12}(1+i\mu) \\ -ml\omega^2 + k_{21}(1+i\mu) & -J\omega^2 + k_{22}(1+i\mu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F} \\ \bar{M} \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

که سمت راست معادله به صورت زیر بر اساس بیان معادله ۴-۱ به صورت ماتریسی به دست می آید : (۴-۱۳)

$$[F] = [k]\{y\} + [c]\{\dot{y}\} \\ \Rightarrow \begin{bmatrix} \bar{F} \\ \bar{M} \end{bmatrix} = (1+i\mu) \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{y} \\ \bar{\dot{y}} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \bar{F} \\ 0 \end{bmatrix} = (1+i\mu) \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{y} \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \bar{F} \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{y}(1+i\mu) \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{21} \end{bmatrix}$$

که علت صفر قرار دادن دو آرایه مربوط به گشتاور و زاویه اعمالی به دمپر از شکل ۴-۲ نمایان می باشد (در واقع همانطور که از شکل ۴-۲ معلوم است تنها به مجموعه دمپر تغییر مکان اولیه اعمال می گردد) .

برای حل معادله ۴-۱۲ از روابط ماتریسی مجحت (Forced vibration ; harmonic excitation) در می یابیم که اگر :

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F} \\ \bar{M} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \bar{X} = \frac{z_{22} \bar{F} - z_{12} \bar{M}}{z_{11} z_{22} - z_{12} z_{21}} \\ \bar{\theta} = \frac{z_{11} \bar{M} - z_{21} \bar{F}}{z_{11} z_{22} - z_{12} z_{21}} \end{cases}$$

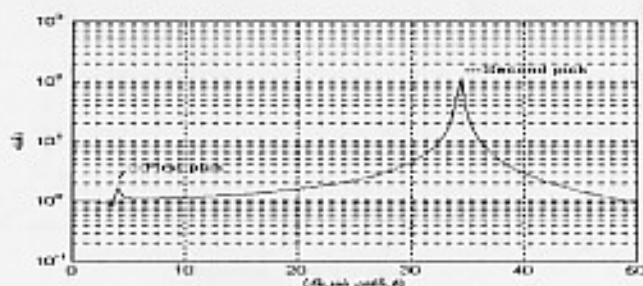
لذا با جایگذاری رابطه ۴-۱۳ در ۴-۱۲ و همچنین انجام ساده سازی ، با استفاده از رابطه فوق معادله ۳ را برای پارامترهای حرکتی دمپر (جابجایی و خمش) بر حسب پارامترهای مؤثر هندسی و فیزیکی حل می نماییم ، که خواهیم داشت :

$$\frac{\bar{X}}{\bar{y}} = \frac{(-J\omega^2 + k_{22}(1+i\mu))(k_{11}(1+i\mu)) - (ml\omega^2 + k_{12}(1+i\mu))(k_{21}(1+i\mu))}{(-m\omega^2 + k_{11}(1+i\mu))(-J\omega^2 + k_{22}(1+i\mu)) - (-ml\omega^2 + k_{21}(1+i\mu))(-ml\omega^2 + k_{12}(1+i\mu))} \quad (4-14)$$

و همچنین :

$$\frac{\bar{\theta}}{\bar{y}} = \frac{-(-ml\omega^2 + k_{21}(1+i\mu))(k_{11}(1+i\mu)) - (m\omega^2 + k_{11}(1+i\mu))(k_{21}(1+i\mu))}{(-m\omega^2 + k_{11}(1+i\mu))(-J\omega^2 + k_{22}(1+i\mu)) - (-ml\omega^2 + k_{21}(1+i\mu))(-ml\omega^2 + k_{12}(1+i\mu))} \quad (4-15)$$

با داشتن روابط فوق می توان رفتار مربوط به دمپر را به صورت بی بعد بررسی نمود همانطور که در شکل ۴-۸ که از ترسیم همین روابط به ازاء مقادیر موجود برای یک نمونه خاص دمپر استاک بریج بر اساس فرکانسهای مختلف تحریک به دست آمده است - مشاهده می گردد میزان دامنه نوسانی دمپر تنها در دو فرکانس به شدت رشد می نماید ، که با توجه به روابطی که برای فرکانسهای طبیعی استخراج نمودیم این نقاط اوج همان فرکانسهای طبیعی می باشند .



شکل ۴-۸. تغییرات دامنه بر حسب فرکانس تحریک برای دمپر استاک بریج *

* برنامه ای که این نمودار از آن به دست آمده در بخش برنامه های قسمت ضمیمه موجود می باشد ، لازم به ذکر است این برنامه در فضای نرم افزاری matlab نوشته شده ، اجرا گشته است .

۳-۴. انتقال نیروی مستهلک کننده تحریک شده:

کل نیرویی که به خط انتقال منتقل می شود، ناشی از ارتجاع و نیروهای میرایی مستهلک کننده استاک بریج عبارت است از:

$$F = -2.m.(\ddot{X} + l.\ddot{\theta}) \quad (4-16)$$

که ضریب ۲ به منظور لحاظ کردن دو نیمه مستهلک کننده می باشد. با جایگذاری مقادیر پارامترهای طرف دوم از روابط قبلی نیروی هارمونیک به دست می آید. (۴-۱۷)

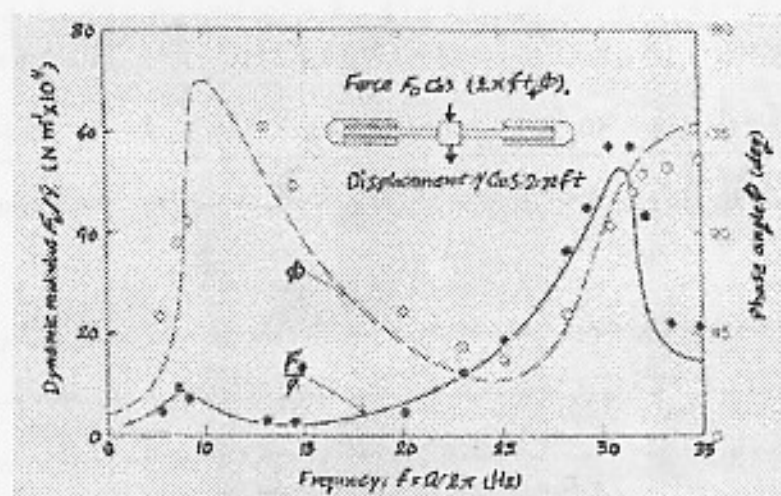
$$F = \bar{F}_0 . e^{i\omega t}$$

$$\bar{F}_0 = 2.m.\omega^2 (\bar{X} + l.\bar{\theta})$$

$$\Rightarrow \frac{\bar{F}_0}{\bar{y}} = 2.m.\omega^2 . A . B$$

$$A = (1 + \mu . i)$$

$$B = \left[\frac{k_{11}(-J\omega^2 + k_{22}A + ml^2\omega^2 + lk_{21}A) - lk_{21}(ml\omega^2 + k_{12}A + m\omega^2 - k_{11}A)}{(-m\omega^2 + k_{11}A) \cdot (-J\omega^2 + k_{22}A) - (-ml\omega^2 + k_{21}A) \cdot (-ml\omega^2 + k_{12}A)} \right]$$



شکل ۹-۴. رفتار دینامیکی و زاویه فاز مستهلک کننده استاک بریج (نقاط توپر و تو خالی نشان دهنده مقادیر آزمایشی اندازه گیری شده، می باشند و خطوط پیوسته از روابط موجود ترسیم شده است.

که مقدار قدر مطلق نیرو بردارنده اولیه، همچنین زاویه بین نیروی خروجی و جابجایی بر اساس فرکانس تحریک برای یک نمونه مستهلک کننده استاک بریج -از رابطه فوق ترسیم گردیده [۴]، به صورت یکجا با مقادیر تجربی حاصل از آزمایش بر روی یک نمودار نمایش داده شده است (شکل ۹-۴)، لذا همانطور که در شکل ملاحظه می شود روابط ریاضی با نتایج تجربی هماهنگی خوبی داشته، به صورت قابل توجهی با آنها همخوانی دارند. مشخصات دمپر استاک بریج مورد نظر در این شکل عبارت است از:

(manufactured by Crompton Engineering Co. Ltd., Madras):

$$m = 2.74 \text{ kg}; J = 0.01714 \text{ Nm}^2; L = 0.23 \text{ m}; I = 0.048 \text{ m}; \mu = 0.16; k_{11} = 4k = 314 \text{ kNm}^{-1}$$

حال اگر بخواهیم این رفتار را برای یک مستهلک کننده غیر متقارن که طول دو نیمه کابل - که وزنه ها بر روی آن نصب شده است - با هم برابر نیست*، بررسی نماییم طبیعی است که در روابط فوق باید اندکی تغییرات ایجاد نمود لذا برای بیان نیروی وارد بر کابل خواهیم داشت:

(۴-۱۸)

$$\dot{F}_0 = m \cdot \omega^2 [(X_1 + l \cdot \theta_1) + (X_2 + l \cdot \theta_2)]$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{F}_0}{\dot{y}} = m \cdot \omega^2 \cdot A \cdot (B + C)$$

$$A = (1 + \mu \cdot l)$$

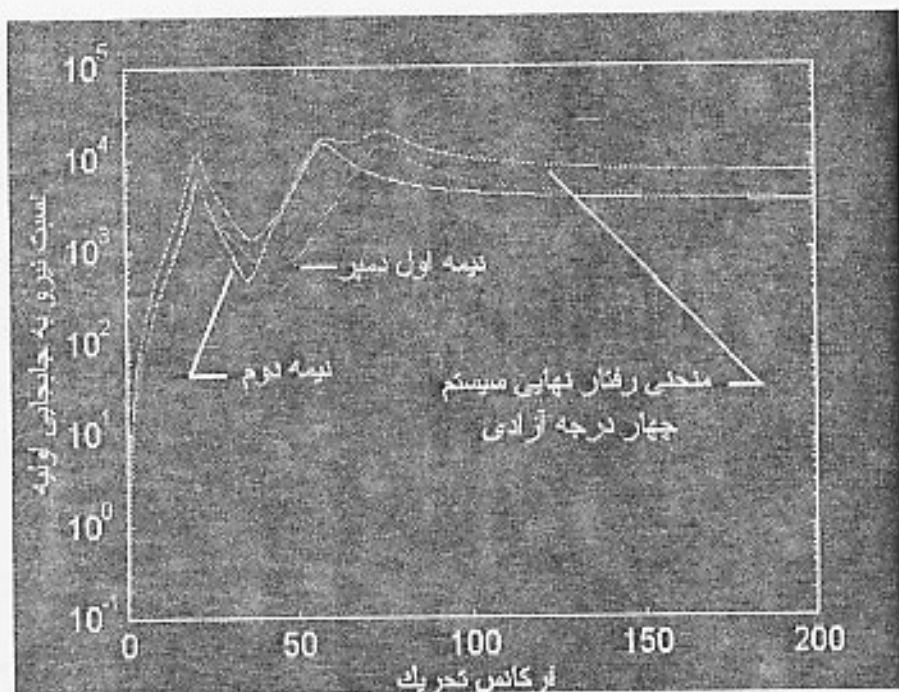
$$B = \left[\frac{k_{11}(-J\omega^2 + k_{22}A) - k_{21}(ml_1\omega^2 + k_{12}A) + l_1k_{11}(ml_1\omega^2 + k_{21}A) + k_{21}(-m\omega^2 + k_{11}A)}{(-m\omega^2 + k_{11}A) \cdot (-J\omega^2 + k_{22}A) - (-ml_1\omega^2 + k_{21}A) \cdot (-ml_1\omega^2 + k_{12}A)} \right]$$

$$C = \left[\frac{k'_{11}(-J\omega^2 + k'_{22}A) - k'_{21}(ml_2\omega^2 + k'_{12}A) + l_2k'_{11}(ml_2\omega^2 + k'_{21}A) + k'_{21}(-m\omega^2 + k'_{11}A)}{(-m\omega^2 + k'_{11}A) \cdot (-J\omega^2 + k'_{22}A) - (-ml_2\omega^2 + k'_{21}A) \cdot (-ml_2\omega^2 + k'_{12}A)} \right]$$

که مقادیر ضرایب سختی مورد استفاده در رابطه آخر بر اساس همان تعریف ماتریس ضرایب سختی است، با توجه به این تفاوت که مقادیر طول (L) مورد استفاده برای نیمه دوم مستهلک کننده با نیمه اول - به علت عدم تقارن - اختلاف دارد، لذا این امر سبب تغییر این ضرایب می گردد. چنانچه بر اساس معادلات فوق نسبت نیرو به جابجایی اولیه بر حسب فرکانس را ترسیم نماییم نموداری همانند شکل ۱۰-۴ به دست می آید (این نمودار بر حسب مشخصات دمپری ترسیم شده که پیشتر به آن اشاره شد).

* این شکل مستهلک کننده در عمل استفاده زیادتری دارد.

همان طور که ملاحظه می شود به علت عدم تقارن در مستهلک کننده به جای دو درجه آزادی یا چهار درجه آزادی مواجهیم که این امر سبب ایجاد بیش از دو نقطه اوج در منحنی نسبت نیرو به جابجایی اولیه (پایه) می گردد ، که در واقع این نقاط اوج یا پیک همان فرکانسهای تشدید یا فرکانسهای طبیعی سیستم می باشند.



شکل ۱۱-۴. رفتار مستهلک کننده یا چهار درجه آزادی (دو درجه آزادی برای هر نیمه دمپر) .

۴-۴. استهلاک انرژی در مستهلک کننده استاک بریج :

قدرت واقعی مستهلک شده در یک دمپر استاک بریج شامل دو بخش است . یک بخش شامل انرژی یا قدرت استهلاکی ناشی از نیرو و بخش دیگر منتج از ممان است (حول مرکز جرم) که طبق روابط زیر به دست می آیند :

$$F(t) = 2.m.(\ddot{X} + l\dot{\theta}) \quad (۴-۱۹)$$

$$M_c(t) = -2.J_c.\ddot{\theta}$$

که کل انرژی مستهلک شده عبارت است از :

$$D(t) = F(\dot{X} - \dot{y}) + M_c \dot{\theta} \quad (4-20)$$

که با بازنویسی معادلات مربوط به نیرو و ممان که در بالا به آن اشاره شد، به صورت معادلات جابجایی - از روابط ماتریسی گذشته - داریم :

$$F(t) = 2k_{11} \left[\frac{\mu}{\omega} (\dot{X} - \dot{y}) + (X - y) \right] + 2k_{12} \left[\frac{\mu}{\omega} \dot{\theta} + \theta \right] \quad (4-21) \text{ و } (4-22)$$

$$M_c(t) = 2k_{22} \left[\frac{\mu}{\omega} \dot{\theta} + \theta \right] + 2k_{12} \left[\frac{\mu}{\omega} (\dot{X} - \dot{y}) + (X - y) \right]$$

با در نظر گرفتن جملاتی از معادلات فوق که در قدرت یا استهلاک انرژی سهمند، یعنی جایی که نیرو (یا ممان) با سرعت \dot{x} - (یا $\dot{\theta}$) هم فاز هستند، و جایگذاری این جملات از روابط فوق در معادله مربوط به کل انرژی مستهلک شده، این معادله به شکل زیر درخواهد آمد :

$$D(t) = 2 \frac{\mu}{\omega} [k_{11} (\dot{X} - \dot{y})^2 + 2k_{12} \dot{\theta} (\dot{X} - \dot{y}) + k_{22} \dot{\theta}^2] \quad (4-23)$$

همچنین می توان این رابطه را به صورت ماتریسی به دست آورد و همانطور که ملاحظه میشود انرژی یا قدرت مستهلک شده تنها به وسیله جمله میرایی به دست می آید، که در این حالت خواهیم داشت :

$$D(t) = 2(\dot{x} - \dot{y})^T C(\dot{x} - \dot{y}) \quad (4-24)$$

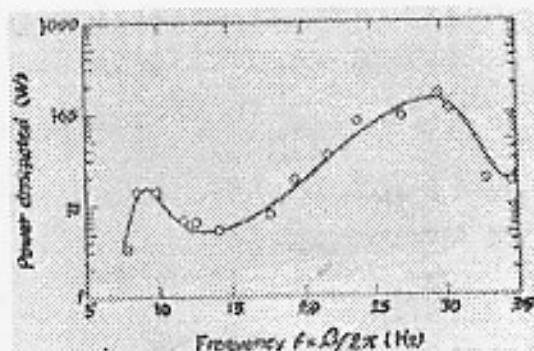
که ضریب ۲ مجدداً برای در نظر گرفتن دو نیمه دمپر بوده، ضریب T به معنای ترانسپوز (ترانهاده) ماتریسی است که این حرف به صورت بالانویس آن درج شده است. با اعمال خاصیت Proportional damper از روابط قبلی و اعمال در رابطه بالا داریم :

$$D(t) = 2 \frac{\mu}{\omega} (\dot{x} - \dot{y})^T K(\dot{x} - \dot{y}) \quad (4-25)$$

که بنابر این انرژی استهلاکی در هر سیکل ارتعاشی عبارت است از :

$$P(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T D(t) dt \quad (4-26)$$

که $\omega = \frac{2\pi}{T}$. این تابع برای یک نمونه دمپر استاک بریج که قبلا پارامترهای آن مطرح گردید، بر حسب تغییرات فرکانس در شکل ۴-۱۲ ترسیم ، و مقادیر حاصل از این رابطه با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است . به وضوح هماهنگی بین نتایج حاصل از رابطه ریاضی و نتایج آزمایشی نمایان می باشد .

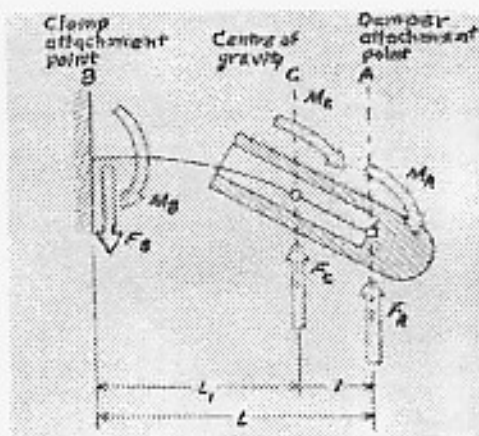


شکل ۴-۱۲. قدرت مستهلک شده به وسیله مستهلک کننده استاک بریج در هر سیکل

۴-۵. تنشهای دینامیکی :

شکل ۴-۱۳ نیروها و ممانهایی که بر مستهلک کننده - بر کابل سیمی اتصال وزنه ها - اعمال می شوند را در هر دو محل اتصال A , B نشان می دهد . از نیرویی که در مرکز جرم به نیمه ای از مستهلک کننده وارد می شود نیرویی برشی در محل اتصال A کابل به وجود می آید که با فرض $\cos(\theta) = 1$ خواهیم داشت :

$$S_A = F_A(t) = F_C(t) = -m(\ddot{X} + l\ddot{\theta}) = F_{o_A} e^{i\omega t} \quad (4-27)$$



شکل ۴-۱۳. نیروها و ممانهایی که بر مستهلک کننده استاک بریج اعمال می شوند .

که دامنه نیروی برشی بوده F_C بدون در نظر گرفتن ضریب ۲ (برای منظور کردن دو نیمه دمپر) از رابطه ۴-۱۶ به دست می آید. همچنین از ممان M_C که بر وزنه های جرمی دمپر در مرکز جرم آن اثر می کند ممان خمشی در نقطه اتصال A به دست می آید :

$$M_A(t) = M_C(t) + lF_C(t) = J_c \ddot{\theta} + lF_A(t) = M_{o_A} e^{i\omega t} \quad (4-28)$$

که $M_C(t)$, M_{o_A} به ترتیب دامنه ممان خمشی و میزان خمش می باشند که دومین عامل از رابطه ۴-۱۹ به دست می آید (البته بدون در نظر گرفتن ضریب ۲). بنابر آنچه گذشت نیروی برشی و ممان خمشی در نقطه اتصال B برابر خواهد بود با :

$$F_B(t) = F_A(t) = F_{o_A} e^{i\omega t} \quad (4-29, 4-30)$$

$$M_B(t) = M_C(t) - L_1 F_A(t) = M_{o_B} e^{i\omega t}$$

که M_{o_B} دامنه ممان مورد نظر می باشد (شکل ۴-۱۳).

دامنه های نیروی برشی و ممان خمشی حاصل از معادلات ۴-۲۵ تا ۴-۲۸ را می توان به سادگی در جملاتی با استفاده از پارامترهای مشخصه مستهلک کننده و فرکانس تحریک بیان نمود. که این کار با استفاده از معادله های ۴-۱۱ و ۴-۱۵ انجام می شود.

لذا مقدار دامنه تنش دینامیکی را می توان به صورت تابعی از فرکانس تحریک پیدا کرد :

(۱) تنش خمشی :

$$\sigma_{A,B}(\omega) = \frac{|M_{o_{A,B}}|}{W_o} \quad (4-31)$$

(۲) تنش برشی :

$$\tau_A(\omega) = \tau_B(\omega) = \frac{|F_{o_A}|}{A_o} \quad (4-32)$$

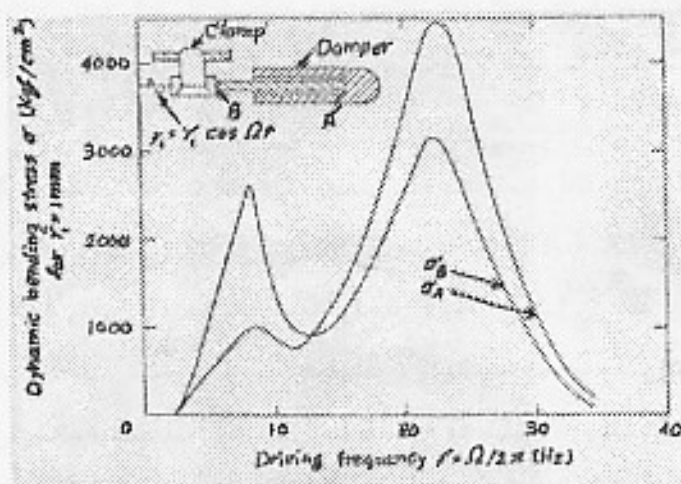
که :

$$W_o = \frac{k_1 \pi d_n^3}{32} \quad (4-33, 4-34)$$

$$A = \frac{k_2 \pi d_n^2}{4}$$

که دو مقدار پارامتری فوق عبارتند از: اندازه سطح مقطع معادل کابل اتصال برای خمش و مساحت سطح مقطع واقعی آن در برابر برش و $d_0 < 1$, $k_1 < 1$, $k_2 < 1$ به ترتیب عبارتند از قطر نامی کابل اتصال دهنده وزنه ها و دو ضریب شکل که به منظور اصلاح سطح مقطع به کار می رود (از آنجا که سطح مقطع کابل کاملاً گرد نبوده ولی در محاسبات آنرا گرد فرض می کنیم، لذا برای اصلاح این فرض از این دو ضریب استفاده می کنیم). برای یک کابل با شش سیم معادل که به دور هسته ای پیچیده شده اند مقداری که برای این ضرایب شکل به دست می آید به ترتیب $2/3$ و $7/9$ می باشد.

در شکل ۴-۱۴ برای مستهلک کننده ای با مشخصاتی که قبلاً ذکر شد، دامنه تنشهای دینامیکی برحسب فرکانس تحریک (به ازای جابجایی واحد یک میلیمتر) رسم شده است. تناسب بین دامنه جابجایی اولیه و تنشها از روابط ۴-۲۵ و ۴-۲۶ به وضوح آشکار است.



شکل ۴-۱۴. تنش خمشی دینامیکی مستهلک کننده استاک برج

همانطور که انتظار می رود از روابط می توان دریافت، که تنشهای خمشی نسبت به تنشهای برشی غالبند و در تمامی فرکانسها مقداری، در حدود کمتر از ده درصد تنشهای خمشی دارند.

بنابر این در این حالت تنش برشی و تنش خمشی معادل ترسیم نشده است. لذا در اولین فرکانس طبیعی، تنش بیشینه در مکان اتصال B و بیشترین تنش در مد دوم در نقطه A روی می دهد.

۵. آزمایشات مستهلک کننده استاک بریج :

از آنجا که مدل سازی تئوریهی ارائه شده کاملاً با شرایط واقعی تطبیق ندارد همچنین به منظور بررسی ویژگیهای مستهلک کننده هایی که ساخته شده اند جهت اطمینان از کارایی آنها انجام آزمایشها امری اجتناب ناپذیر است. هدف از این آزمایشها تعیین بعضی پارامترهای دمپر به صورت تابعی از فرکانس، میرایی سیستم، موقعیت نقطه گره ها برای مدهای مختلف ارتعاش، فرکانسهای تشدید، و مهمتر از همه انرژی مستهلک شده در دمپر در هر دوره نوسانی (سیکل) و بعضی از مشخصات خستگی می باشد.

روشهای مختلفی برای ارزیابی تجربی اتلاف انرژی در کابلهای تکی ارائه شده است [۱۹]، از آن جمله می توان به روشهای $ISWR^1$ ، قدرت (Power)، افت (Decay) و پاسخ اجباری (Forced Response) اشاره کرد. در سه روش نخست از یک کابل به طول دلخواه استفاده می شود، که دمپر روی آن نصب می گردد. در حالیکه در روش پاسخ اجباری دمپر مستقیماً روی مولد ارتعاش (shaker) نصب می شود.

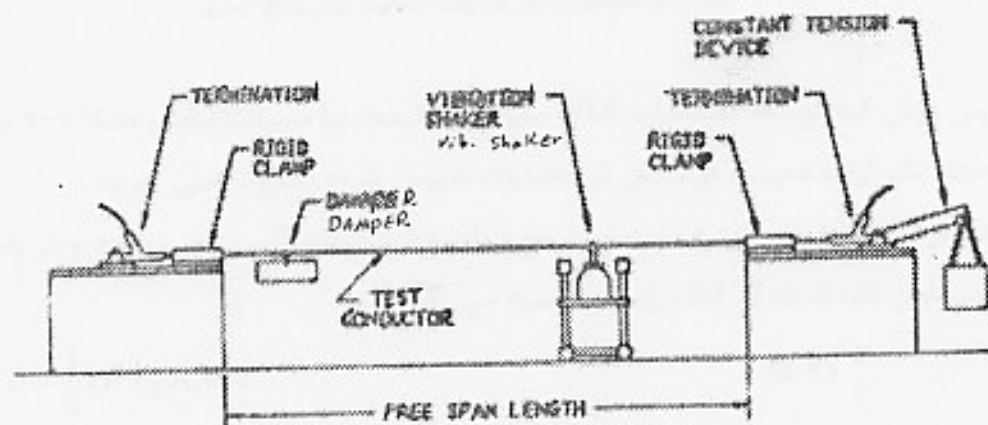
در مواردی که در آزمایش از کابل استفاده می شود، توصیه شده: تا طول کابل به کار رفته در آزمایش به اندازه ای باشد که حداقل دو حلقه (Loop) در فرکانس مورد نظر را در بر گیرد. دستگاه بایستی بتواند نیروی کشش ثابتی را روی کابل اعمال نماید، (شکل ۱-۵)، تغییرات دمای محیط آزمایش بایستی حداکثر یک درجه سانتیگراد باشد تا نیروی کشش بتواند پایدار بماند. دامنه ورودی توسط مولد ارتعاش بایستی با دقت دو درصد قابل کنترل باشد و همچنین فرکانس نیز در محدوده $\pm 0.1\%$ باید پایدار بماند. دمپر مورد آزمایش در طرف دیگری از کابل که مولد ارتعاش بسته شده است به کابل متصل می گردد. در این مورد میزان کشش لازم روی کابل بایستی مقداری باشد که معادل بارگذاری معمول آن باشد، در این نوع آزمایش برای تعیین انرژی تلف شده دمپر بایستی انرژی استهلاکی خود کابل از مقدار کل انرژی اندازه گیری شده کسر گردد. فرکانسهایی که در آن آزمایش انجام می شود بایستی شامل طیف مربوط به سرعت باد در محدوده ۱ تا ۷ متر

¹Inverse Standing Wave Ratio

برنایه باشد^۲. مگر اینکه دستورالعمل دیگری ارائه شده باشد. فرکانسهای طبیعی سیستم را می توان به کمک رابطه زیر حدس زد:

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (5-1)$$

که f فرکانس طبیعی، n تعداد حلقه (شکم) در طول کابل، L طول آزاد دهانه، T کشش کابل و m جرم واحد طول کابل (بدون دمپر) می باشد.



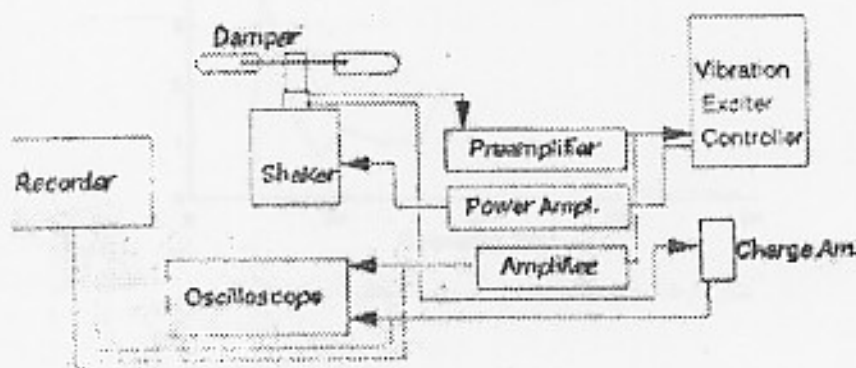
شکل ۵-۱. دستگاه آزمایش مشتعل کننده در روش موج ساکن.

بدیهی است با اتصال مولد ارتعاش و دمپر به کابل مودهای ارتعاش آن تغییر خواهد کرد. در محل اتصال مولد ارتعاش بایستی امکانات اندازه گیری نیرو و سرعت پیش بینی شود. در عمل ممکن است سیگنال نیرو مغشوش گردد که با فیلتر کردن آن، ویا استفاده از دستگاه تحلیل سیگنال می توان مقدار دامنه و زاویه فاز سیگنال نیرو را به خوبی اندازه گیری نمود.

۵-۱. روش پاسخ اجباری:

در این روش که آزمایش مشخصات دینامیکی نیز نامیده می شود. دمپر را مستقیم روی مولد ارتعاش نصب می نمایند و دیگر از کابل استفاده نمی شود^۱ (شکل ۵-۲).

^۲ از فصول قبل به یاد داریم که رابطه کارمن به صورت تقریبی ارتباط بین سرعت باد و فرکانس آن را بیان می نماید لذا می توان با داشتن سرعت باد مورد نظر فرکانس آن را به سهولت تعیین نمود.

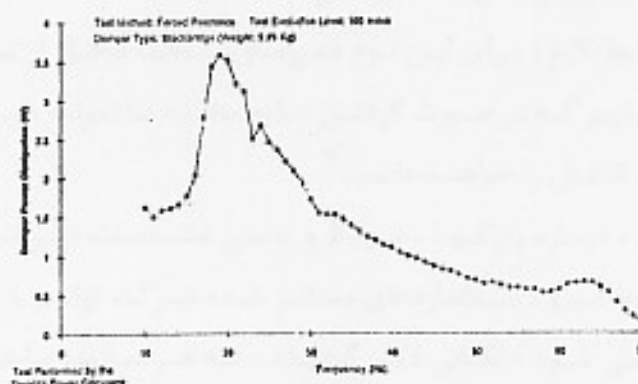


شکل ۵-۲. سیستم آزمایش مستهلک کننده در روش پاسخ اجباری

در این روش که توسط استاندارد VDI نیز ارائه شده، با سرعت ثابتی مثلاً ۱۰۰ میلیمتر بر ثانیه، در محل نگهدارنده دمپر، فرکانس در محدوده تعیین شده جاروب می‌گردد. در هر فرکانس مقدار دامنه سرعت، نیرو و زاویه فاز اندازه‌گیری می‌شود و در پایان به ازای هر فرکانس توان تلف شده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

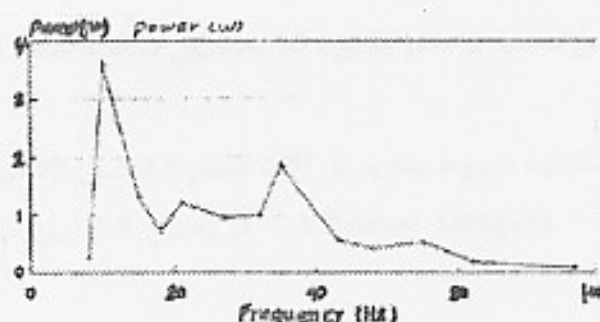
$$P = \frac{1}{2} (F \cdot V_s) \cos \theta \quad (5-2)$$

که P قدرت تلف شده دمپر، F نیروی اندازه‌گیری شده مولد ارتعاش و V_s به ترتیب سرعت محل اتصال مولد ارتعاش به دمپر و اختلاف زاویه فاز بین نیرو و سرعت می‌باشد. نمونه‌ای از این نوع نتایج در شکل‌های ۵-۳ و ۵-۴ رسم گردیده است.



شکل ۵-۳. نمونه‌ای از نتیجه آزمایش پاسخ اجباری

به علت استفاده زیاد و مرسوم بودن این شیوه در تست مستهلک کننده‌های استاک بریج مراحل انجام این شیوه اندازه‌گیری به صورت طر حواره شامل چارت مراحل و دستگاه‌های مورد استفاده در بخش نقشه‌ها و جارت‌های قسمت ضمیمه آمده است. استاندارد مذکور در قسمت ضمیمه ۱۵ در بخش استانداردها آمده است.



شکل ۴-۵. نمایش پاسخ اجباری بر روی یک مستهلک کننده آزمایشی

۶. استانداردهای دمپر استاک بریج :

علاوه بر تستهایی که به صورت مرسوم و عمومی برای کلیه مستهلک کننده های استاک بریج وجود دارد^۳، شرایط و شیوه های تست مختلفی نیز از سوی سازندگان این قطعات اعلام می گردد که با انجام این گونه تستها، دمپره های ساخته شده از نظر سازنده تضمین لازم برای کارایی را خواهد داشت. از آن جمله می توان به تستهایی که شرکت های AEOLIAN و DAMP برای آزمودن دمپره های ساخت خود پیشنهاد می کنند، اشاره کرد.

با توجه به اینکه از دمپره های استاک بریج شرکت های مذکور تا کنون در خطوط انتقال زیادی در کشور استفاده شده، همچنین نمونه ای که به صورت مهندسی معکوس در شرکت تهران نیرو ساخته می شود شباهت ساختاری زیادی به دمپره های ساخت شرکت DAMP دارد، لذا طبیعی است که به منظور آزمایش شرایط لازم، برای این نوع دمپره های ساخت داخل از تستهایی که این شرکت ارائه نموده، استفاده نماییم که در صورت گرفتن نتایج مشابه با نمونه خارجی، قطعات داخلی قابلیت استفاده در خطوط انتقال را خواهند داشت^۴.

علاوه بر آنچه گفته شد، درباره ویژگیها، شرایط و بعضی مشخصات دمپره های استاک بریج در استانداردهای یراق آلات خطوط نیرو (استانداردهای منتشر شده شرکت توانیر) - برای خطوطی که در آنها از این دمپرها استفاده می شود - نکاتی ذکر گردیده، که هر سازنده باید این نکات را در

^۳ مانند تست مربوط به استاندارد VDI.

^۴ بخشی از تستهای مربوط به دمپره های شرکت DAMP نیز در بخش استانداردهای ضمیمه ها آورده شده است.

مراحل طراحی و ساخت همچنین نصب در نظر بگیرد تا محصول ساخته شده قابل استفاده در خط مورد نظر باشد.

به عنوان نمونه در استاندارد مربوط به یراق آلات خطوط انتقال ۶۳ کیلو وات نکات قابل توجه، راجع به ارتعاش گیرها "Vibration Dampers" در بخش ۹-۳ این استاندارد به شرح زیر آمده است:

ارتعاش گیرها باید مستقیماً روی سیم محافظ هوایی، و سیم هادی به طریقی نصب شود که از صدمه دیدن آن جلوگیری کند.

گیره اتصال آن باید از جنس آلیاژ آلومینیوم و سطح نشیمنگاه سیم هادی باید صاف و بدون ناهمواری باشد.

فروشنده باید اطلاعات ذیل را تهیه و به خریدار بدهد:

- فاصله لازم برای نصب این گونه ارتعاش گیرها، به اضافه نقشه های لازم برای تسهیل در نصب ارتعاش گیرهای پیشنهادی*.

- منحنی تائید شده برای هر یک از انواع ارتعاش گیرهای پیشنهادی که پاسخ فرکانسی هر یک از این ارتعاش گیرها را نسبت به دامنه (موج) حلقوی آزاد، بر روی کاغذ گراف نیمه لگاریتمی و با استفاده از فرکانس به عنوان پارامتر، نشان دهد.

- طول دهانه هایی "Span" که بیشتر از آنها نصب ارتعاش گیر بر روی آنها توصیه شده است و دهانه هایی که به بیش از یک ارتعاش گیر نیاز دارند.

- فروشنده باید اعلام دارد که فواصل مورد نیاز برای نصب ارتعاش گیرهای پیشنهادی را محاسبه کرده و طول حلقه ها و فرکانسهای احتمالی را بررسی نموده است.

- فروشنده باید گشتاور دورانی لازم را برای نصب ارتعاش گیرها به سیم هادی و محافظ مشخص سازد. این گشتاور دورانی باید مانع لغزیدن ارتعاش گیرها و صدمه دیدن سیم هادی و محافظ باشد.

- ارتعاش گیرها باید چنان ساخته شوند که رطوبت نتواند در هیچ نقطه ای از آنها انباشته شود.

* نمونه ای از این نوع اطلاعات در بخش نقشه های قسمت ضمیمه ها آمده است.

مثالی از این مساله که در آن به طول دهانه و تعداد دمیر (ارتعاش گیر) مورد نیاز اشاره شده از شرکت DAMP در بخش نقشه های قسمت ضمیمه ها آمده است.

- فروشنده در صورت امکان، اطلاعات مربوط به طول عمر خستگی ارتعاش گیرها را در حالتی که نیروی وارده بر گیره آن به طور سینوسی و در فرکانس ناشی از بیشترین انرژی جذب شده می باشد، در اختیار خریدار قرار می دهد. این اطلاعات باید طول عمر خستگی بر حسب سیکل را برای جابجایی های پیک به پیک سینوسی ۰.۵، ۱.۰، ۱.۵، ۲.۰، ۳.۰، ۴.۰، ۴.۵ و ۵.۰ میلیمتری نشان دهد. اطلاعات مشابه که نشان دهنده طول عمر خستگی پیش بینی شده برای ارتعاش گیرها باشد پذیرفته خواهد شد.

مستهلك کننده مورد قبول در این خط انتقال نیرو به صورت شکل ارائه شده در این استاندارد (شکل ۱-۶) می باشد.

نتیجه گیری :

از مطالبی که مطرح گردید، می توان دریافت که با شناخت اصول اولیه حاکم بر جاذبههای دینامیکی ارتعاشات (مستهلك کننده ها) در بسیاری موارد می توان از این ابزار به سهولت و با هزینه ای اندک در موارد مختلف استفاده کرد، و عامل نامطلوب ارتعاش را حداقل محدود نمود. با توجه به دقت قابل توجه مدل سازی ریاضی در مقایسه با نتایج آزمایشات انجام شده قبلی، می توانیم با استفاده از روابطی که در این پروژه ارائه گردیده است، به بررسی نکات مورد توجه در مورد مستهلك کننده استاک بریج، نظیر پارامترهای مهم در طراحی، بهینه سازی، همچنین تفسیر علمی نتایج حاصل از آزمایشها و یا ساخت به شیوه مهندسی معکوس، پرداخت. همچنین می توان قبل از انجام آزمایش برای مستهلك کننده ها رفتار مورد انتظار را شبیه سازی نمود. در ادامه این پروژه می توان فعالیتهایی جهت انجام آزمایشهای تعریف شده برای این قطعات را انجام داد، نتایج حاصل از آزمون قطعه ساخت داخل را با روابط موجود مقایسه، و در صورت نیاز به بهبود تئوری استفاده شده، یا تصحیح طراحی قطعه پرداخت.