

## تحلیل طراحی و تست دینامیکی جاذب-دمپر ارتعاشات آتولین در خطوط انتقال نیرو

علی صیامی  
گروه مکانیک پژوهشگاه نیرو  
تهران - ایران

امیرحسین همدانیان  
گروه مکانیک پژوهشگاه نیرو  
تهران - ایران

مسعود آسایش  
گروه مکانیک پژوهشگاه نیرو  
تهران - ایران

واژه‌های کلیدی: جاذب-دمپر، جاذب دینامیکی، ارتعاشات آتولین، کنترل ارتعاشات

### چکیده

در این مقاله به بررسی تحلیلی و همچنین تست آزمایشگاهی جاذب-دمپر در خطوط انتقال نیرو پرداخته شده است. در ابتدا به روش تحلیل سعی گردیده تا اصول کارکرد جاذب های دینامیکی ارائه و نحوه عملکرد آنها مشخص گردند. سپس نمونه این جاذب ها در خطوط انتقال برای ارزیابی عملکرد آنها تست گردیده و در نهایت نتایج عملکرد آنها بر حسب اصول طراحی و دستورالعمل های استاندارد ارائه شده است. با بررسی نتایج عدم کفایت استاندارد مرتبط و اهمیت استخراج دانش فنی طراحی این جاذبها نشان داده شده است. با توجه به این نتایج مشخص می گردد که علاوه بر پارامترهای متداول ارتعاشی که برخی از آنها در استاندارد ذکر گردیده اند، شکل مدهای ارتعاشی جاذب در فرکانسهای طبیعی آن نیز دارای اهمیت بالایی است که باید در انتخاب و نصب این دمپرها لحاظ و از نظر طراحی نیز باید مسائل مرتبط با آنها لحاظ گردند.

### مقدمه

جاذب های دینامیکی ارتعاشات، اولین بار در سال ۱۹۰۹، اختراع شدند [۱]. کار جدی بر روی این نوع جاذب های ارتعاشی پس از سال ۱۹۶۳ و در پی گسترش کاربرد پره های گردان هلی کوپتر شروع شد [۲] و اخیراً نیز در مکانیزم های دفاعی در مقابل زمین لرزه، پیشرفتهائی در این زمینه بدست آمده است. اما در کاربردهای خطوط انتقال برای کنترل پدیده های ارتعاشات آتولین، گالوپینگ و ارتعاشات ناشی از ویک، نیز انواع مختلفی از دمپرها تولید شده اند که هر یک کاربرد و مشخصات خاص خود را دارا بوده و بر حسب آنها نیز تست و ارزیابی می گردند. برای کنترل گالوپینگ تجهیزات ضد گالوپینگ برای کابلها عبارتند از پاندول های detuning که در کانادا [۳] و GCD که در ژاپن ساخته شده است [۴]. این دو نوع وسیله تنها فرکانس طبیعی پیچشی سیستم را بالا می برند ولی در میرائی آن هیچ تأثیری ندارند. جاذب مدل GCD بدون هیچ تأثیری بر روی سختی پیچشی سیستم، تنها

<sup>1</sup> - galloping Control Devices

## بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

در سالهای اخیر مسائل مرتبط با این دمپرها شامل بهینه سازی تعداد آنها در خطوط [5]، تحلیل اثر آنها بر ارتعاشات خطوط و همچنین مسائل طراحی خود دمپرها متمرکز گشته است [6].

## اصول کارکرد جاذبهای دینامیکی

برای آگاهی از علت استفاده و نحوه عملکرد جاذبهای دینامیکی و پارامترهای موثر در طراحی آنها، روابط پایه ای آنها در این بخش ارائه و سپس اثرات پارامترهای مختلف طراحی بررسی می گردند.

کنترل ارتعاشات در سیستم های مختلف به بطور کلی به سه روش فعال، نیمه فعال و غیر فعال صورت می گیرد. متداولترین روش در حال حاضر در اکثر صنایع روش کنترل غیر فعال می باشد. در روش غیر فعال نیز روشهای مختلفی نظیر ایزولاسیون، کاهش دامنه تحریک و در نهایت روش جاذب دینامیکی استفاده می گردند.

در روش جاذب دینامیکی عملاً جسم دومی بر روی جسم اول که در معرض ارتعاشات ناخواسته است قرار گرفته و با جذب انرژی وارده به جسم اصلی به ارتعاش درآمده و سبب انتقال انرژی و کاهش دامنه ارتعاشات در نقطه مورد نظر بر روی جسم اصلی می گردند.

پس به منظور کنترل ارتعاشات در جسم اصلی، نیاز به طراحی جسم ثانویه ای بوده که بتواند مقدار مشخصی انرژی جذب و در نقطه خاصی دامنه ارتعاشات را به حد قابل قبولی کاهش دهد. از طرفی عدم کارایی این جسم ثانویه به دلایل مختلف نظیر مشکلات طراحی و یا نصب، سبب خواهد گشت تا در محل نصب عمل عکس صورت پذیرد به عبارت دیگر روند انتقال انرژی از جسم ثانویه به اصلی صورت پذیرفته و عملکرد معکوس گردد. همچنین ممکن است در صورت عدم طراحی مناسب در محل اتصال و یا نقاط هدف، به دلیل عملکرد نادرست جاذب، دامنه ارتعاشات افزایش یابد که بر خلاف انتظار از عملکرد دمپر است.

همان اینرسی باندل را افزایش می دهد. جاذب ارتعاشی TDD نیز تجهیز جدیدی بوده که توسط پرفسور جین لوئیس لیلیان<sup>۱</sup> و رنوارد کوتگن<sup>۲</sup> طراحی و در شرکت Dulmision ساخته شده است. این نوع جاذب، از نوع جاذبهای دینامیکی دارای میراثی است.

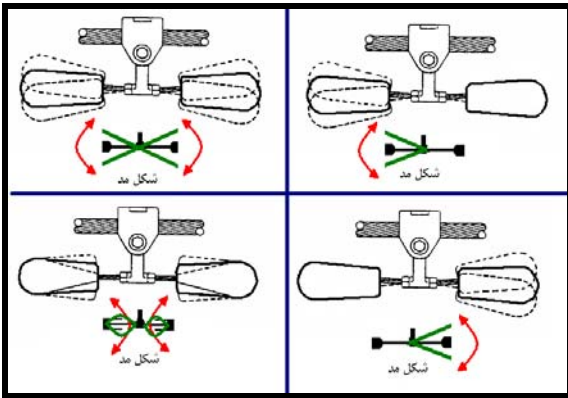
ارتعاشات آئولین در همه انواع خطوط انتقال و کابلها اتفاق می افتد محدوده فرکانسی این نوع ارتعاشات ۳ الی ۱۵۰ هرتز بسته به ابعاد سیم یا کابل متغیر بوده و دامنه ارتعاش در این حالت ۰/۱ تا ۱۰۰ درصد قطر کابل است. سرعت باد موثر در ارتعاشات آئولین در محدوده ۳ الی ۳۰ کیلومتر در ساعت می باشد. به دلیل این گستردگی و فرکانس و دامنه نسبتاً پایین، خستگی و شکست ناشی از این پدیده در خطوط و مناطق مختلف متغیر بوده و ممکن است حتی در بعضی مناطق بدون نصب دمپر مشکل خاصی دی خطوط ایجاد نگردد ولی در مشاهدات عینی در داخل پارگی کامل کابل تنها سه روز پس از نصب در اثر ارتعاش آئولین نیز مشاهده شده است. برای کنترل ارتعاشات ناشی از وزش باد (آئولین)، از جاذبهای مختلفی استفاده گردیده که مشهورترین آنها نوع استاک بریدج می باشد. این نوع جاذب توسط فردی به همین نام ابداع گردید و در طی سالیان متمادی، ساختار و مشخصات آن بهبود یافته است.

بکارگیری دمپر ارتعاشی استاک بریدج بر روی خطوط انتقال نیرو برای جذب و میرا نمودن ارتعاشات در طی سالیان متمادی توسعه یافته ولی همچنان پیچیدگی مسائل مختلف مرتبط با آن بطور کامل مرتفع نگردیده است. این مسئله سبب گشته تا سازندگان آن در دنیا محدود گردند. ولی از طرفی به دلیل عدم اطلاع کافی از ماهیت عملکردی واقعی آنها و عدم کفایت دستورالعمل های استاندارد برای تست و مشکلات متعدد در روند تست و ثبت اطلاعات آنها، در بسیاری از حالتها عدم وجود دمپرها در خطوط بهتر از بکارگیری و نصب خواهد بود.

<sup>۱</sup> - - Jean-Louis Lilien

<sup>۲</sup> - Renoud Keutgen

بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۱: شکل مدهای متداول در انواع استاک بریدج ها

روابط حاکم بر طراحی جاذبهای دینامیکی

در این بخش مدل ساده شده نصب استاک بریدج بر روی کابل با مدل ارتعاشی سیستم یک درجه آزادی ارائه می گردد تا اثرات پارامترهای مختلف طراحی در عملکرد آن مشخص گردد.

در شکل (۲)، مدل سیستم اصلی و ثانویه ارائه گردیده است.

پارامترهای بکاررفته شامل،  $(m_2, m_{abs})$  جرم جاذب،  $(m_1, m_{main})$  جرم سیستم اصلی،  $(u_1)$  جابجایی سیستم اصلی،  $(u_2)$  جابجایی جاذب،  $(C_2)$  میرایی جاذب،  $(C_1)$  میرایی سیستم اصلی،  $(K_2)$  سختی جاذب،  $(K_1)$  سختی سیستم اصلی،  $(P_0)$  نیروی تحریک خارجی،  $(t)$  زمان،  $(\omega)$  فرکانس نیروی تحریک خارجی می باشند.

معادله حرکت مجموعه دو جسم در حالت ارتعاشی به شرح زیر است.

(۱)

$$m_1 \ddot{u}_1 + (c_1 + c_2) \dot{u}_1 - c_2 \dot{u}_2 + (k_1 + k_2) u_1 - k_2 u_2 = P_0 \cos(\omega t)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 - c_2 \dot{u}_1 + k_2 u_2 - k_2 u_1 = 0 \quad (۲)$$

پس از حل معادلات فوق نسبت دامنه جابجایی در حالت دینامیکی به حالت تعادل استاتیکی مجموعه جرمهای فوق به شرح زیر خواهد بود:

پارامترهای موثر در طراحی جاذبهای ارتعاشی

در طراحی جاذبهای ارتعاشی پارامترهای مختلفی دخالت دارند. مهمترین این پارامترها عبارت اند از:

فرکانس کارکرد: فرکانس عملکرد دمپرها یا جاذبها مهمترین پارامتر در طراحی آنها می باشند. زیرا این فرکانسها محدوده عملکرد را مشخص نموده و در استقرار بر روی سیستم اصلی دامنه همان فرکانسها از سیستم اصلی کنترل می گردند.

محدوده عملکرد: علاوه بر فرکانس، پهنای باند عملکرد دمپرها نیز بسیار مهم است. در طراحی پایه و اولیه، دمپرها برای یک یا چند فرکانس مشخص بکار گرفته می شوند. در صورتی که در سیستم اصلی فرکانس تحریک تغییر کند، ارتعاشات در فرکانسهای قبلی منتقل شده به سیستم جاذب به سیستم اصلی منتقل شده و خود سبب تحریک سیستم اصلی خواهد شد و از طرفی در فرکانسهای خارج از فرکانسهای مشخص، این دمپرها عملکردی از خود نشان نخواهند داد.

میرایی: به منظور افزایش محدوده عملکرد دمپرها و همچنین مستهلک نمودن انرژی جذب شده از سیستم اصلی، میرایی در دمپرها یا جاذبهای ارتعاشی نقش اساسی دارد. کارایی دمپرها یا توجه به میرایی تعیین می گردند.

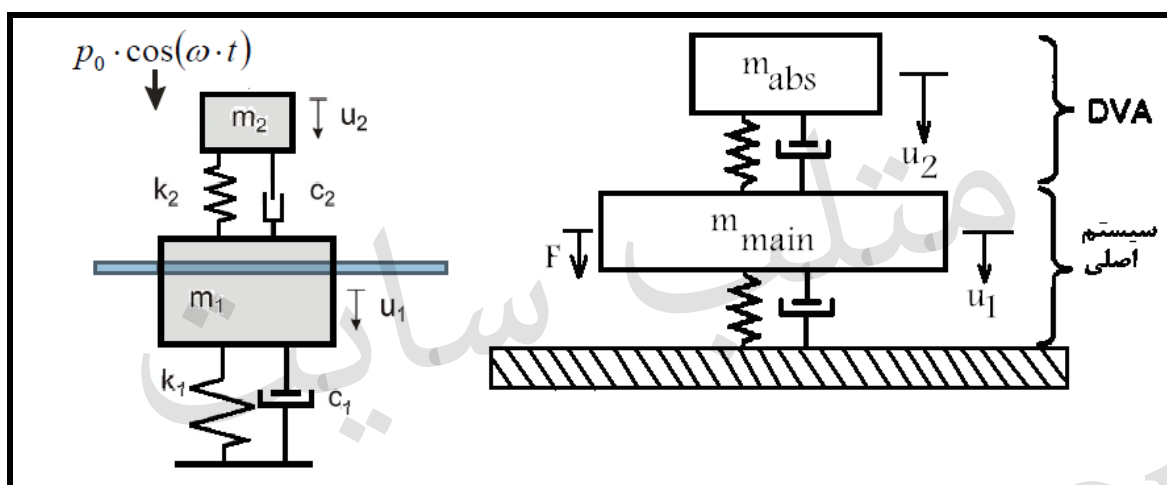
شکل مد: شکل مد در واقع نحوه تغییر شکل دمپر در فرکانسهای عملکردی است. شکل مد متشکل از نقاط مهمی بنام گره و شکم و یا node و Anti-node می باشد. در بکارگیری دمپرها می بایست به دلیل عملکرد نقطه ای آنها، در محل اتصال دامنه به حداقل برسد. در نتیجه این دمپرها باید طوری طراحی گردند که نقاط گرهی آنها در محل اتصال واقع شوند تا حداقل جابجایی به وجود آید. در شکل (۱) شکل مدهای متداول در انواع دمپرها استاک بریدج نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می گردد در محل اتصال استاک بریدج به کابل، نقاط گرهی واقع شده اند تا دامنه حرکت کابل به حداقل کاهش یابد.

بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق

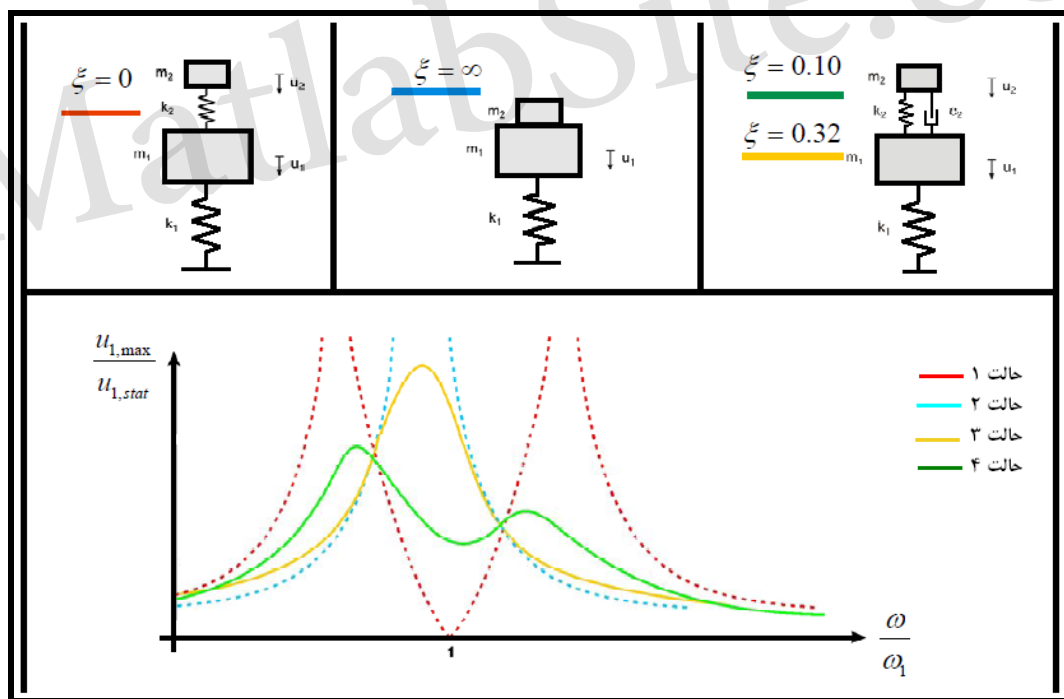
$$\frac{U_1}{(U_1)_{static}} = \sqrt{\left\{ \frac{(2\xi_a g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{[2\xi_a g(1 - g^2 - \mu g^2) + 2\xi_p \mu g(f^2 - g^2)]^2 + [\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)]^2} \right\}} \quad (3)$$

پارامترهای بکار رفته در رابطه فوق بشرح زیر می باشند:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \quad (U_1)_{static} = \frac{P_0}{k_1}, \quad \mu = \frac{m_2}{m_1}, \quad g = \frac{\omega}{\omega_1}, \quad f = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad \xi_a = \frac{C_2}{2m_1\omega_1}, \quad \xi_p = \frac{C_1}{2m_1\omega_1}$$

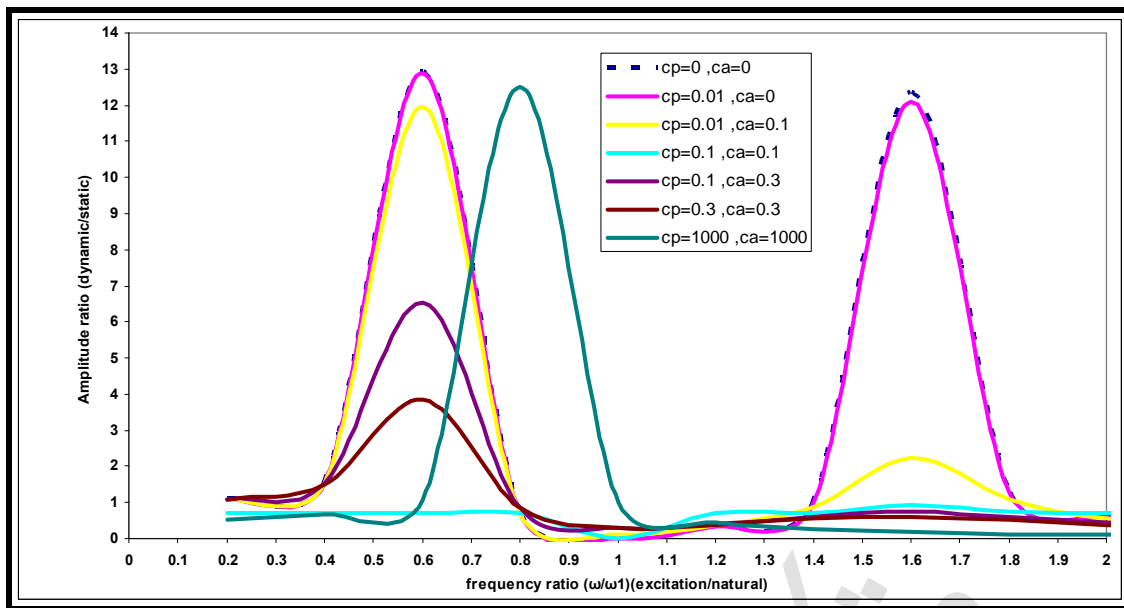


شکل ۲: مدلسازی سیستم یک درجه آزادی جاذب دینامیک بر روی سیستم اصلی



شکل ۳: حالت‌های مختلف دامنه حرکت جسم اصلی در حضور دمپر با توجه به میزان میرایی در دمپر

### بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۴: بهینه سازی کارایی دمپر بر روی خط با توجه به معیار کاهش دامنه حرکت در فرکانسهای مختلف

#### تست دمپرها طبق استاندارد

در استاندارد تست دمپر آئولین پارامترهای اصلی برای کنترل کارایی دمپر، شامل فرکانسهای کارکرد، میزان انرژی جذب شده، عمر دمپر (تست خستگی) می باشند. نمونه های از نتایج این تست ها بر روی یک نمونه دمپر واقعی انجام شده و در شکل های (۵) و (۶) ارائه می گردند. این تست ها در شرایط مختلف و استفاده از انواع تجهیزات و آنالایزهای ارتعاشی استاندارد در محل آزمایشگاه انجام شده و در حال حاضر نیز آزمایشگاه مذکور، آزمایشگاه مرجع برای این نوع خدمات می باشد. در شکل (۵)، نتایج قبل و بعد از تست خستگی ارائه شده است. نتایج محدوده کارکرد دمپر را در بازه فرکانسی ۷ الی ۶۰ هرتز تایید می کند. همچنین در شکل (۶)، نتایج بالانس انرژی سیستم نشان می دهد که این دمپر بر روی خط کارایی داشته و دامنه ارتعاش را به میزان قابل قبولی کاهش می دهد. به منظور حصول اطمینان از صحت عملکرد دمپر لازم است تا در فرکانس اصلی کارکرد، شکل مد و محل های گره و شکم مشخص گردند. برای این منظور دمپر مورد نظر بر روی شیکر نصب و با استفاده از یک استروسکوپیک در فرکانس مورد نظر حرکت دمپر بررسی گردید.

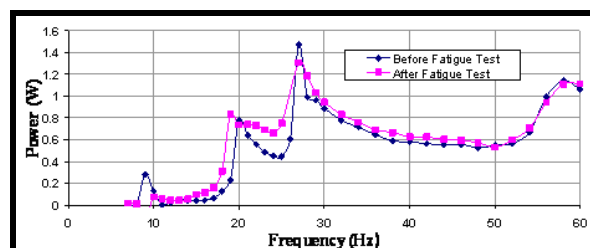
در شکل (۳) چهار حالت متداول برای پاسخ ارائه شده در معادله سوم، نشان داده شده است. در حالت اول میرایی جاذب صفر در نظر گرفته شده و دو فرکانس شدید مجزا در سیستم ظاهر می گردند. دامنه در فرکانس مورد نظر به کمترین ولی در دو فرکانس بالا و پایین به حداکثر میرسند. در حالت دوم، میرایی سیستم اصلی بسیار زیاد شده، عملاً دو سیستم با هم یکسان و سیستم جدید تشکیل و دامنه در فرکانس مورد نظر به حداکثر رسیده است. در حالت سوم، میرایی نسبتاً زیاد بوده و دامنه در فرکانس مورد نظر زیاد ولی تا حدودی کنترل شده است. در حالت چهارم، میرایی بهینه شده و دامنه در فرکانس مورد نظر به حداقل و در سایر فرکانسها نیز کنترل شده است. در تمام حالات فوق از میرایی سیستم اصلی صرف نظر شده بود. در شکل (۴)، نتایج بهینه سازی برای سیستم کامل که میرایی سیستم اصلی را نیز در بر می گیرد ارائه شده است. مشاهده می گردد که با بهینه سازی پارامترهای دمپر نسبت به مشخصات سیستم اصلی می توان دامنه حرکت ارتعاشی را در نقطه مورد نظر نصب دمپر کنترل نمود.

## بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق

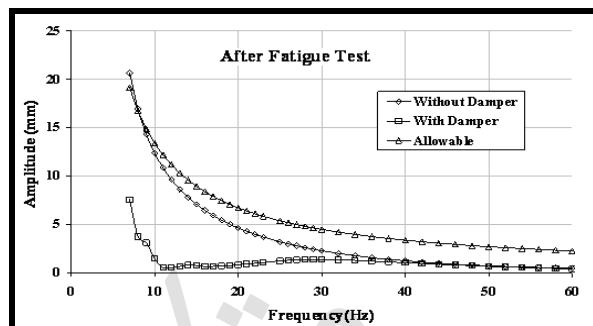
طراحی دمپرها و مشخصات خطوط و اندرکنش آنها نسبت به یکدیگر بررسی و نتایج مربوطه ارائه گردیدند. با بررسی نتایج حاصله مشخص گردید که عدم طراحی مناسب و یا بکارگیری دمپر در نقاط غیر طراحی، علاوه بر عدم کارایی دمپر، ممکن است سبب افزایش دامنه ارتعاشات در نقاط مورد نظر برای کنترل ارتعاش نیز بگردد. در ادامه نتایج تست یک نمونه استاک بریدج بر روی شیکر طبق استاندارد IEC و تایید عملکرد آن نیز ارائه گردید. این مورد بر اساس اصول طراحی و عملکرد جاذبه‌های ارتعاشی مورد ارزیابی قرار گرفت و در حین تست و بخصوص در فرکانس اصلی طراحی دمپر، رفتار دینامیک دمپر ثبت گردید و مشاهده شد که حداکثر جابجایی دمپر، در نقطه اتصال دمپر به خط اتفاق خواهد افتاد که بر خلاف انتظار از عملکرد دمپر در عمل می باشد. در نهایت مشاهده می گردد که استفاده از استانداردها در ارزیابی محصولات لازم ولی کافی نمی باشد و انجام طراحی و استخراج روابط حاکم بر رفتار سیستمها و داشتن علم و آگاهی و دانش فنی مربوطه در نهایت می تواند به عملکرد مناسب تجهیزات منجر گردد.

### مراجع

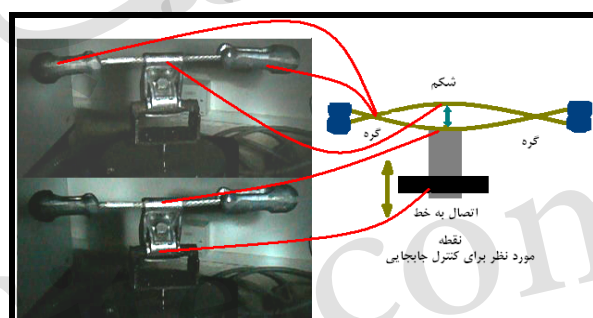
- 1) Den Hartog, J.P, "Mechanical Vibrations (4th edition)", MC Graw-Hill, New York, 1956.
- 2) Flannelly, W.G, "Dynamic Antiresonant Vibration Isolator", Kaman Aircraft Corporation, Bloomfield, Conn., Report RN63-1Nov. , 1963.
- 3) D.G. Havard, J.C. Pohlman, "Field Testing og Detuning Pendulums for Controlling Galloping of Single and Bundle Conductors," IEEE Paper, A79 499-5, Vancouver, Canadam July 1979.
- 4) S. Sasaki, M.Komoda, T. Akiyama, M.Oishi, Y. Kojima, T.Okumura, Y. Maeda, "Developments of galloping control Devices and its Operation Records in Japan," Cigre Report 22-07, 1986.
- 5) Lu, M.L.; Chan, J.K., "An Efficient Algorithm for Aeolian Vibration of Single Conductor With Multiple Dampers, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 22, Issue 3, Page(s):1822 – 1829, July 2007.
- 6) H. Q. Wang, J. C. Miao, J. H. Luo, F. Huang and L. G. Wang, "THE FREE VIBRATION OF LONG-SPAN TRANSMISSION LINE CONDUCTORS WITH DAMPERS, Journal of Sound and Vibration Volume 208, Issue 4, 11 December 1997, Pages 501-516.



شکل ۵: نتایج تست فرکانسی- انرژی جذب قبل و بعد از خستگی دمپر



شکل ۶: محاسبه کارایی دمپر بر خط مورد نظر جهت نصب



شکل ۷: شکل حرکت دمپر در فرکانس اصلی کارکرد.

شکل (۷) نتایج حرکت نقاط مختلف دمپر را نشان می دهد. با توجه به شکل مشاهده می گردد که محل حداکثر شکم دمپر در محل اتصال به خط واقع می گردد که در این حالت دمپر انرژی خط را جذب و به صورت شکل نشان داده شده حرکت خواهد کرد. در این حالت برخلاف نتایج تست استاندارد و محاسبات دمپرها بر روی خط، دامنه ارتعاشات خط در محل اتصال تقویت می گردد که این امر منجر به افزایش روند تخریب خط خواهد گردید

### نتیجه گیری

در این مقاله سعی گردید تا اهمیت شناخت اصول کارکرد و نحوه تاثیر متقابل دمپر بر روی خطوط به روش تحلیلی مدلسازی گردد. با انجام این تحلیل پارامترهای اساسی در