

بررسی آزمایشگاهی اثر عمر دمپر بر عملکرد ارتعاشی آن‌ها در خطوط انتقال نیرو

فرزاد وصالی**

دپارتمان تحلیل ارتعاشات

شرکت مهندسی پراق آوران پویا

تهران، ایران

F.vesali@hotmail.com

هادی‌ها می‌شود که به خاطر پدیده ریش گردابه فون کارمن در محدوده بسامد (Frequency) ۱۵۰-۳ Hz است [۱]. با وجود آنکه ارتعاشات اتولین (Aeolian) به خاطر دامنه بسط و کوچک به سختی قابل مشاهده هستند، اما به دلایلی ایجاد خستگی و خرابی در هادی‌های انتقال برق کنترل این ارتعاشات اهمیت بسط و زیادی دارد. این ارتعاشات سبب ایجاد خمش شدیدی و پیوسته در محل اتصال هادی‌ها به دکل و فک دمپر می‌شود که می‌تواند منجر به خستگی و شکست زود هنگام در این نقاط و همچنین کاهش عمر مفید هادی‌ها و اتصالات آن‌ها شود.

به منظور طراحی خطوط انتقال با ضریب ایمنی بالا، دو دینامیک برای بررسی ارتعاشات اتولین در اواخر دهه ۱۹۸۰ مطرح گردید. در روش اول سطح ارتعاشات اتولین در طول دهانه کانداکتور به روش موازنه انرژی تعیین می‌شود [۲-۵]. در این روش سطح ارتعاشات کابل با استفاده از موازنه مکان انرژی ورودی از طرف باد و انرژی مستهلک شده توسط می‌ای داخلی کابل و همچنین توجهات می‌کننده خارجی (Spacer Damper & Stock Bridge Damper) محاسبه می‌شود. در دینامیک دوم نیوی آی‌و‌دی‌ام‌کی وارد شده از جانب باد با استفاده از نتایج و مدل‌های تجربی تخمین زده شده و پاسخ ارتعاشی با توجه به آن محاسبه می‌گردد. پژوهش‌هایی در این زمینه توسط محققان انجام شده است [۶-۹]. دو ابزار متداول برای میرا کردن انرژی ناشی از وزش باد Spacer Damper و Stock Bridge Damper هستند. این مطالعه روی Stock Bridge Damper ها برای خطوط تک بانند انجام شده است و منظور از دمپر در این گزارش همان Stock Bridge Damper است. این قطعه در واقع یک جاذب ارتعاشی است که

چکیده — خطوط انتقال نیرو همواره در معرض وزش باد هستند و دمپرهای (Stock Bridge Dampers) نصب شده روی آن‌ها وظیفه کاهش دامنه کرنش در مجاری تکیه‌گاه را بر عهده دارد. در این مقاله تلاش شده است که با تکیه بر آزمون‌های ذکر شده در استاندارد یک دمپر تحت بار متناوب خستگی قرار گیرد و میزان تغییرات پاسخ فرکانسی (Frequency Response) آن مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه مدل دینامیکی مناسبی برای ارتعاشات خطوط ارائه شده که قادر است عملکرد دمپر قبل و بعد از آزمون خستگی را مقایسه نماید. همچنین از دمپری که بیش از ۳۰ سال در خطوط بوده‌اند پاسخ فرکانسی گرفته شده و نتایج آن در مدل قرار داده شده است. در نهایت با تکیه بر نتایج به دست آمده توصیه‌هایی برای طراحی و نصب دمپر ارائه شده تا این ابزار بتواند پس از گذشت سال‌ها کماکان ارتعاشات خطوط انتقال نیرو را مهار نماید.

واژه‌های کلیدی — دمپر؛ خستگی؛ دامنه کرنش؛ خطوط انتقال برق؛

۱. مقدمه

در م‌ن پدیده‌های دینامیکی مختلفی که در خطوط انتقال با سطح پتانسیل بالا مطرح هستند موضوع ارتعاشات ایجاد شده توسط جریان باد یکی از مهم‌ترین آن‌ها است. جریان‌های باد با سرعت پایین (۱ m/s تا ۱۰ m/s) سبب ایجاد ارتعاشات اتولین (به طور عمده در جهت عمود) در

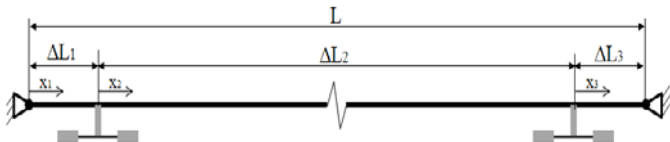
۲. مدل دینامیکی مجموعه

به منظور تحلیل ارتعاشات اتولین در هادی‌های چند باندل به همراه دمپر یک مدل ریاضی با به کار بردن روش موازنه انرژی توسط هاگدورن و همکارانش [۱۲-۱۴] ارائه شده است. در این مدل که بر مبنای روش سختی دینامیکی (Dynamic Stiffness Method) است، هادی‌ها توسط تارهای کشیده شده مدل می‌شوند که با استفاده از معادله موج شبه‌سازی می‌شوند. در این مدل فرض شده است که ارتعاشات هادی هارمونیک است و دمپرها نغی به صورت یک سریستم دینامیکی چاه انرژی در نقطه اتصال به هادی مدل‌سازی می‌شوند.

یکی از مهم‌ترین موضوعات در هنگام نصب خطوط انتقال نیرو تعیین مکان نصب دمپرها در دهانه بین دو دکل است. مکان نصب دمپرها باید به گونه‌ای باشد که در هیچ یک از شکل مودهایی که دهانه در گستره بسامدی تحریک باد ممکن است از خود نشان دهد، دمپر روی گره قرار نگیرد. محل نصب بهینه برای دمپر به خواص دمپر و ویژگی‌های خط مربوط می‌شود.

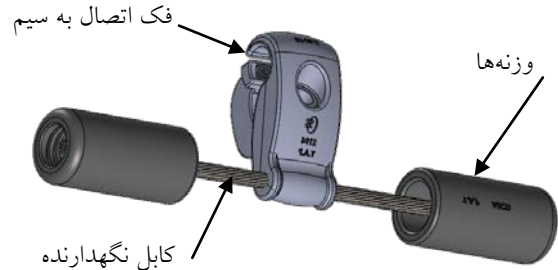
۲.۱. مدل‌سازی هادی

در این تحقیق به تحلیل و مدل‌سازی یک هادی تک باندل پرداخته می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. در این سریستم تعداد n دمپر، به نقاط مختلف هادی متصل شده‌اند. این دمپرها طول دهانه L را به $n+1$ زی دهانه با طول‌های $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_{n+1}$ تقسیم می‌کنند. فرض کنید که هادی دارای قطر D ، سطح مقطع A و ممان انرسی I باشد. چگالی هادی برابر ρ و مدول الاستیسیته آن E است. از آنجایی که به طور معمول اندازه شکم سیم (Sag) کانداکتور در خطوط انتقال نیرو کم است (در حدود ۳ تا ۴ درصد دهانه)، بنابراین می‌توان در ارتعاشات با دامنه کم از شکم اولیه آن صرف‌نظر نمود. شکل ۲ نشان‌دهنده یک نمونه دهانه با دو دمپر است که تشکیل ۳ زیر دهانه می‌دهد.



شکل ۲: نمایی از سیم به همراه دو دمپر

چنانچه بسامد طبیعی آن به درستی طراحی شود، می‌تواند در گستره بسامدی تحریک ناشی از باد به خوبی ارتعاشات خط را مهار نماید. این قطعه معمولاً از یک فک نگهدارنده برای اتصال به سیم، کابل نگهدارنده (Messenger Cable) و وزنه‌ها تشکیل شده است. شکل ۱ نمایی از این قطعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمایی از یک نمونه دمپر مورد بررسی (Stock Bridge Damper)

خطوط انتقال نیرو برای بیش از ۳۰ سال عمر و بدون ایراد طراحی می‌شوند و مهم‌ترین چیزی که عمر این خطوط را تعیین می‌کند دامنه ارتعاشات ناشی از وزش باد است که ممکن است موجب شکست خستگی شود [۱۰]. منظور از شکست خستگی شکستی است که ناشی از بارگذاری متناوب بلندمدت باشد و در آن جوانه زنی و رشد ترک دیده شود. Stock Bridge Damper ها در طول سال‌ها عملکرد خود ممکن است خواص خود را از دست دهند و دیگر قادر به کنترل ارتعاشات خط نباشند. به همین جهت در استاندارد IEC آزمون‌های برای بررسی تأثیر خستگی دمپر بر تغییر خواص ارتعاشی آن‌ها تعریف شده است. در این مطالعه ابتدا یک مدل دینامیکی مناسب برای بررسی ارتعاشات خط و دمپر موجود در آن تشریح داده می‌شود. در ادامه یک دمپر نو روی خط در مدل قرار می‌گیرد و میزان کاهش دامنه ارتعاشات ناشی از حضور دمپر مشاهده می‌شود. سپس دمپر با تکیه بر روش استاندارد IEC 61897 [11] مورد آزمون خستگی قرار می‌گیرد و مجدداً در مدل دینامیکی ارائه شده قرار داده می‌شود. دامنه ارتعاشات در خط قبل و بعد از انجام آزمون خستگی روی دمپر مقایسه می‌شود. در نهایت یک دمپر که به مدت بیش از ۴۰ سال روی خط نصب بوده نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد تا قابلیت آن برای میرایی ارتعاشات خطوط انتقال نیرو سنجیده شود.



ارتعاشات عرضی هادی‌ها توسط معادله موج مدل‌سازی شده که به صورت زیر نشان داده شده است.

$$\rho A \ddot{v}_{j,k}(x_j, t) - T v_{j,k}''(x_j, t) = 0, \quad j = 1 \dots n+1 \quad (1)$$

$$\rho A \ddot{v}_{j,k}(x_j, t) - T v_{j,k}''(x_j, t) = 0, \quad j = 1 \dots n+1 \quad (2)$$

اندیس j نشان‌دهنده شماره زی دهانه و اندیس k نشان‌دهنده شماره هادی مورد نظر است. همچنین T یعنی پهن‌گر میزان کشش در هادی‌ها است. v و w یعنی به ترتیب پهن‌گر میزان حرکت هادی در جهت‌های افقی و عمودی هستند. شرایط مرزی ابتدا و انتهای سیستم به صورت (۲) است.

$$v_{n+1,k}(\Delta \ell_{n+1}, t) = w_{n+1,k}(\Delta \ell_{n+1}, t) = 0 \quad \& \quad v_{1,k}(0, t) = w_{1,k}(0, t) = 0 \quad (2)$$

۲.۲. مدل‌سازی دمپر

مدل دمپر را می‌توان به صورت دو تیر یک سر گویو دار متصل به فک در نظر گرفت. در انتهای هر یک از تیرها یک جرم غیرمتمرکز وجود دارد. بسامدهای طبیعی دمپر و توانی که دمپر در هر بسامد میرا می‌سازد به جرم وزنه‌ها، طول کابل نگهدارنده و ممان اینرسی وزنه‌ها بستگی دارد. به منظور دقت بیشتر در مدل‌سازی دمپر، به جای مدل تحلیلی، پاسخ فرکانسی آن در کد تحلیلی قرار داده می‌شود. منظور از پاسخ فرکانسی منحنی اختلاف فاز بر حسب بسامد امپدانس مکانیکی بر حسب بسامد است. فرایند استخراج پاسخ فرکانسی از دمپر در [۱۱] شرح داده شده است. استخراج پاسخ فرکانسی در آزمایشگاه و با تکیه بر سخت‌افزارها و نرم‌افزارها موجود در این آزمایشگاه انجام شد. شکل ۳ نمایی از دمپر بسته‌شده روی لرزاننده^۲ هنگام استخراج پاسخ فرکانسی را نشان می‌دهد.

شکل ۳: نمایی از فرایند اخذ پاسخ فرکانسی از دمپر در آزمایشگاه هارمونیک با سرعت ثابت ۰/۱ متر بر ثانیه به فک دمپر اعمال می‌شود و نیروی انتقالی به دمپر اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری در بسامدهای مختلف انجام می‌شود تا پاسخ فرکانسی به دست آید. تغییرات بسامد نباید با نرخ بیش از ۰/۵ هرتز بر ثانیه رخ دهد. از تقسیم بیشینه مقدار نیرو در هر دوره تناوب بر بیشینه مقدار سرعت؛ می‌توان امپدانس مکانیکی^۳ را محاسبه نمود.^۴ اختلاف فاز بین نیرو و سرعت نیز از طریق عملیات پردازش سیگنال مقدور است. در نهایت توانی که دمپر در هر بسامد میرا می‌سازد از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۱].

$$P = 0.5 \times F \times V \times \cos(\phi) \quad (1)$$

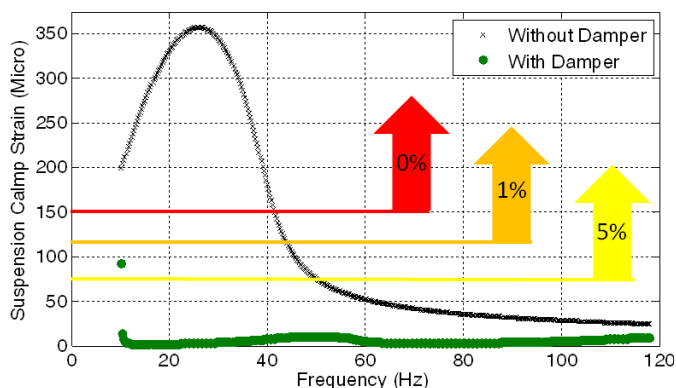
در این رابطه P توان بر حسب وات، F بیشینه مقدار نیرو در یک دوره بر حسب نیوتون، V بیشینه مقدار سرعت بر حسب متر بر ثانیه و ϕ نیز مقدار اختلاف فاز بین سیگنال نیرو و سرعت به دست آمده از آزمایشگاه است. منحنی توان-بسامد از آنجا که هم امپدانس مکانیکی و هم اختلاف فاز را در دل خود دارد و نیز بیانگر مقدار توان قابل جذب توسط دمپر است، به خوبی می‌تواند عملکرد دمپر را توصیف کند. عملیات پردازش سیگنال همزمان با داده برداری در نرم‌افزار لب ویو^۴ انجام می‌شود. نمونه‌ای از پاسخ فرکانسی (از این پس در این گزارش منظور از پاسخ فرکانسی منحنی توان-بسامد است) به دست آمده از دمپر در آزمایشگاه در شکل ۴ نشان داده شده است.

^۲ Mechanical Impedance

^۳ درست مشابه تقسیم کردن ولتاژ بر جریان به منظور محاسبه امپدانس الکتریکی

^۴ LabVIEW

^۱ Shaker

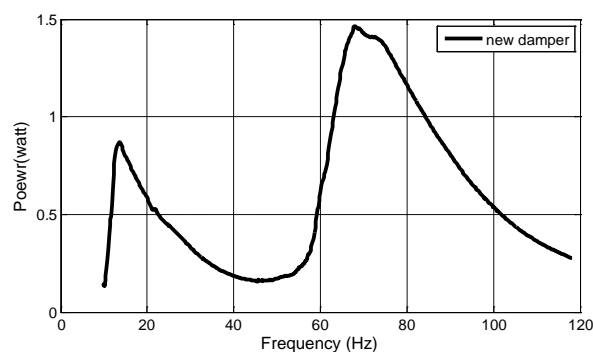


شکل ۵: میزان کاهش دامنه کرنش در تکیه‌گاه پس از گذاشتن دمپر در خط و نمایی از چگونگی عملکرد معیار پذیرش

همان طور که ملاحظه می‌شود اندازه دامنه ارتعاشات در بسامدهایی که دمپر توان کمتری را میرا می‌سازد بیشتر از سایر بسامدها است. از آنجا که وزش باد به گونه‌ای نیست که همه بسامدها را تحریک نماید، برای قضاوت در مورد عملکرد دمپر باید یک سری محاسبات آماری انجام شود. مرج [۱۵] بیان کرده که تنها زمانی عملکرد قطعه در خط مورد تایید است که کمتر از ۵ درصد تمام بسامدهای طبیعی دارای دامنه کرنش بالاتر از حد مجاز باشد. همچنین چنانچه درصد بسامدهای طبیعی دامنه کرنشی بیش از یک و نیم برابر حد مجاز داشته باشند و یا هر کدام از بسامدهای طبیعی دارای دامنه کرنش بیش از دو برابر حد مجاز داشته باشد، عملکرد قطعه مورد تایید نیست. نمایی از چگونگی عملکرد این معیار در شکل ۵ به نمایش گذاشته شده است. حد مجاز کرنش به نوع هادی بستگی دارد اما در اغلب هادی‌ها بین ۷۵ تا ۱۰۰ میکرو استرین (تک قله) است.

۲.۴. آزمون خستگی

همان طور که ذکر شد هدف از این آزمون بررسی تأثیر خستگی دمپرها روی عملکرد ارتعاشی آن‌ها است. به همین منظور باید ابتدا عملکرد یک دمپر در خط موردی مورد بررسی قرار گیرد و سپس همان دمپر خسته شود و مجدداً عملکرد آن در خط مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور تعداد ۳ عدد دمپر انتخاب شده است و از آن‌ها قبل و بعد از آزمون خستگی پاسخ فرکانسی گرفته شده است. در شکل ۶ نمایی از پاسخ‌های فرکانسی این دمپرها قبل و بعد از آزمون خستگی نشان داده شده است.



شکل ۴: نمونه‌ای از پاسخ فرکانسی به دست آمده از آزمایشگاه

بنابراین پاسخ فرکانسی دمپر به عنوان مشخصه دمپر در کد تحلیلی قرار داده می‌شود.

۲.۳. نتایج

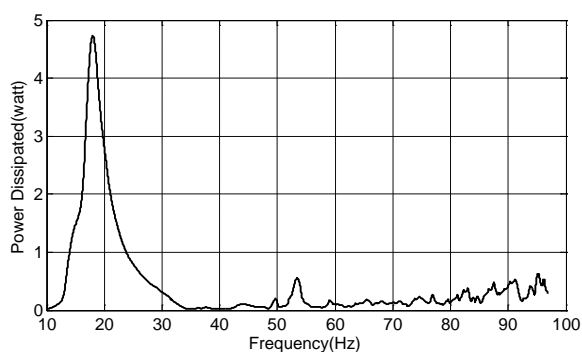
با قرار دادن پاسخ فرکانسی در کد تحلیلی و نوشتن رابطه تعادل انرژی در هر بسامد می‌توان دامنه ارتعاشات در هادی را تخمین زد. در واقع کد با سعی و خطا مقدار دامنه را آنقدر تغییر می‌دهد تا انرژی ناشی از وزش باد با انرژی تلف شده در دمپر و خط برابر باشد. انرژی ناشی از وزش باد به کمک برخی روابط تجربی ذکر شده در [۱۴] محاسبه می‌شود. همچنین انرژی تلف شده در دمپر نیز به کمک روابط آزمایشگاهی [۳] قابل محاسبه است.

در این مطالعه یک دهانه موردی به طول ۴۰۰ متر از سیم OPGW[□] Ø12 انتخاب شده است. سرعت باد ۱ الی ۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و شیب زمین نیز صفر فرض شده. همچنین میزان کشش هادی برابر با ۲۰ درصد حد دوام آن فرض شده است. دامنه ارتعاشات خط در هر بسامد بدون دمپر و با قرار دادن پاسخ فرکانسی دمپر شکل ۴، مطابق شکل ۵ حاصل شده است.

[□] خود میرایی (Self Damping) این سیم نیز با تکیه بر IEEE 661 در آزمایشگاه محاسبه شده

با توجه به دستورالعمل این آزمون، تمام ده میلیون سیکل در یک بسامد اعمال می‌شود اما در حالت واقعی وزش باد در طول سال‌ها در سرعت‌ها مختلف و به تبع آن نوسانات دمپر در بسامدها مختلف خواهد بود. با این وجود از آنجا که دمپر در این بسامد توان زیادی در درون خود میرا می‌سازد و این توان باید به گرما در درون اجزا مپرا ساز دمپر تبدیل شود؛ دمپر اگر در طول ۱۰ میلیون سیکل دچار آسیب نشود احتمال آسیب‌دیدگی دمپر در شرایط واقعی بسیار کم خواهد بود. با تکیه بر اسناد [۱۱] زمانی عملکرد دمپر مورد تایید است که بسامد و توان تلف‌شده توسط دمپر در هر نقطه تشدید بعد از آزمون خستگی کمتر از ۲۰ درصد با بسامد و توان همان دمپر قبل از آزمون خستگی تفاوت داشته باشد. به عبارت دیگر اعمال یک میلیون سیکل نتواند تغییرات زیادی در خواص ارتعاشی دمپر ایجاد نماید. با مقایسه پاسخ فرکانسی قبل و بعد از آزمون خستگی می‌توان دریافت که بعد از انجام این آزمون عموماً توان قابل جذب توسط دمپر را کاهش داده و این کاهش در مجاورت بسامد آزمون بسیار بیشتر بوده است.

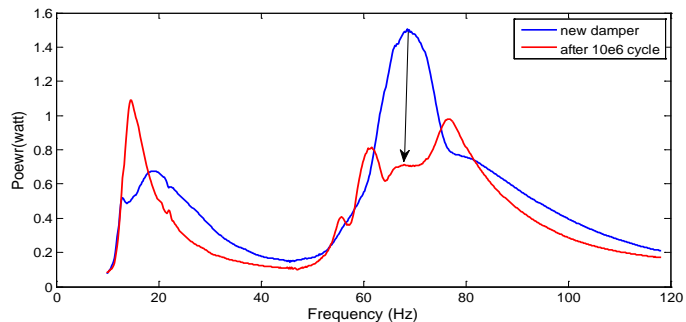
در این مطالعه یک دمپر که بیش از ۴۰ سال روی خط نوسانات هادی را کنترل نموده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. پاسخ فرکانسی این دمپر می‌تواند مثال بسیار خوبی برای روند کلی تأثیر زمان روی پاسخ فرکانسی دمپر‌ها باشد. پاسخ فرکانسی این دمپر در شکل ۷ به نمایش گذاشته شده است.



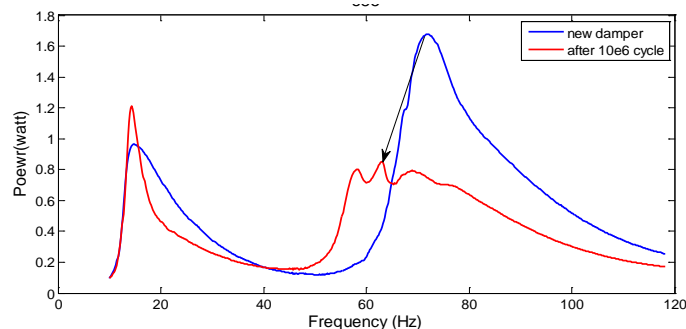
شکل ۷: پاسخ فرکانسی دمپری که بیش از ۴۰ سال کار کرده است

همان طور که در این شکل مشخص است توان قابل جذب توسط دمپر پس از گذشت زمان عموماً کاسته می‌شود و تنها در بسامدهای مجاور نقطه تشدید خود قابلیت میرا سازی توان را دارند.

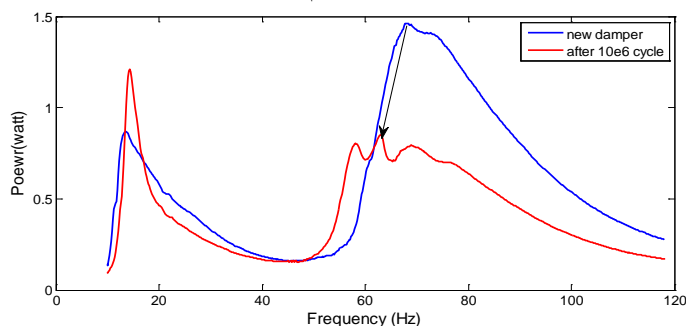
در نهایت جدول ۱ مقایسه‌ای بین عملکرد دمپر قبل و بعد از انجام آزمون خستگی و نیز عملکرد دمپر بعد از سال‌ها حضور روی خط را نشان



نمونه اول



نمونه دوم



نمونه سوم

شکل ۶: پاسخ فرکانسی سه نمونه دمپر قبل و بعد از آزمون خستگی

آزمون خستگی با تکیه بر دستورالعمل [۱۱] انجام گرفته است. در این استاندارد ذکر شده است که به منظور بررسی مقاومت دمپر در مقابل بار نوسانی، باید دمپر تحت ۱۰ میلیون چرخه قرار گیرد. دامنه این بارگذاری باید ۰/۵ میلی‌متر و بسامد آن باید به اندازه بیشینه بسامد تشدید دمپر باشد. بیشینه بسامد تشدید دمپر با تکیه بر پاسخ فرکانسی دمپر استخراج می‌شود. هر کدام از نقاط بیشینه نسبی ملموس در پاسخ فرکانسی یک بسامد طبیعی و یا یک نقطه تشدید را در دمپر نشان می‌دهد. بنابراین بسامد این آزمون باید برابر با بسامد آخرین بیشینه نسبی پاسخ فرکانسی (منحنی توان بسامد) باشد.

همچنین از یک دمپر که بیش از ۴۰ سال روی خط بوده پاسخ فرکانسی گرفته شده و در مدل قرار داده شده است. جدول نتایج بیان می‌دارد که طراحان دمپر در خط باید دمپر خسته شده را نظر بگیرند تا خط پس از گذشت سال‌ها دچار آسیب نشود. همچنین دمپر پس از حدود ۳۰ سال عملکرد روی خط حتماً باید مورد آزمون قرار گیرد و پاسخ فرکانسی آن استخراج شود تا از صحت و سلامت آن اطمینان حاصل گردد و در صورت لزوم با دمپر نو جای‌گزین گردد.

مراجع

- [1] Blevins, R.D., 1990, Flow-Induced Vibrations, 2nd ed, New York: Van Nostrand Reinhold.
- [2] Claren, R. and G. Diana, 1969, Mathematical Analysis of Transmission Line Vibration, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-88(12), pp. 1741-1771.
- [3] Hagedorn, P., 1982, On the Computation of Damped Wind-Excited Vibrations of Overhead Transmission Lines, Journal of Sound and Vibration, 83(2), pp. 253-271.
- [4] Wolf, H., B. Adum, D. Semenski, and D. Pustaic, 2008, Using the Energy Balance Method in Estimation of Overhead Transmission Line Aeolian Vibrations, Strojarstvo, 50(5), pp. 269-276.
- [5] Verma, H. and P. Hagedorn, 2005, Wind Induced Vibrations of Long Electrical Overhead Transmission Line Spans: a Modified Approach, Wind and Structures, 8(2), pp. 89-106.
- [6] Hartlen, R. and I. Currie, 1970, Lift Oscillator Model for Vortex-Induced Vibrations, Journal of the Engineering Mechanics Division, 96(5), pp. 577-591.
- [7] Skop, R.A. and O.M. Griffin, 1975, On a Theory for the Vortex Excited Oscillations of Flexible Cylindrical Structures., Journal of Sound and Vibration, 41, pp. 263-274.
- [8] Iwan, W.D., 1975, The Vortex Induced Oscillations of Elastic Structural Elements, Journal of Engineering for Industry, 97, pp. 1378-1382.
- [9] Farquharson, F.B. and R.E. McHugh, 1956, Wind Tunnel Investigation of Conductor Vibration Using Rigid Models, AIEE Bimonthly Publication, Power Apparatus and Systems, 75, pp. 871-877.
- [10] Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs, 2004, Metal Fatigue in Engineering, 2nd Ed, Wiley
- [11] IEC, 1998, Overhead lines-Requirements and tests for Stockbridge dampers, TC 7- Overhead lines, 61897
- [12] Anderson, K. and P. Hagedorn, 1995, On the Energy Dissipation in Spacer Dampers in Bundled Conductors of Overhead Transmission Lines Journal of Sound and Vibration, 180(4), pp. 539-556.
- [13] Hagedorn, P. and M. Kraus, 1993, On the Performance of Spacer Dampers in Bundled Conductors, European Transactions on Electrical Power, 3(4), pp. 305-311.
- [14] Meynen, S., H. Verma, P. Hagedorn, and M. Schafer, 2005, On the Numerical Simulation of Vortex-Induced Vibrations of Oscillating Conductors, Journal of Fluids and Structures, 21, pp. 41-48.
- [15] CIGRÉ, 2002, State of the Art Survey on Spacers and Spacer Dampers: Part 1 - General Description, Cigré SC 22 - Overhead lines, WG11-TF5.

می‌دهد. این جدول بر اساس معیار ذکر شده در [۱۵] بیان شده است اما از آنجا که سیم مورد بررسی OPGW می‌باشد، حد کرنش مجاز بسیار کم در نظر گرفته شده است. چرا که در این سیم تنها آسیب ندیدن تارهای خارجی ملاک نمی‌باشد و فیبرهای نوری داخلی نیز نباید حد بالایی از کرنش را متحمل شوند. به همین دلیل حد مجاز کرنش برابر با ۱۰ میکرو استرین برای تار خارجی سیم در نظر گرفته شده است.

توضیح نمونه	درصد فرکانس‌های طبیعی بالاتر از 10μs	درصد فرکانس‌های طبیعی بالاتر از 15μs	درصد فرکانس‌های طبیعی بالاتر از 20 μs
بدون دمپر	۴۷/۷	۳۷	۳۲/۸
دمپر ۱	۸/۴	۱/۳	۱/۳
دمپر ۲	۱۵/۳	۱/۳	۱/۳
دمپر ۳	۸/۲	۰/۲	۰/۲
دمپر خسته شده ۱	۲۲/۱	۱/۵	۱/۵
دمپر خسته شده ۲	۲۶/۷	۱/۵	۱/۳
دمپر خسته شده ۳	۱۹/۵	۰/۸	۰/۸
دمپر ۴۰ سال کارکرده	۳۰/۲	۱۸/۷	۱۸/۲

این جدول بیان می‌دارد که عموماً خستگی دمپرها موجب کاهش عملکرد آن‌ها در خط می‌شود. همچنین با توجه به اعداد جدول ۱ و نیز مقایسه نمودارها شکل ۶ و ۷، می‌توان دریافت که آزمون خستگی ارائه شده در استاندارد، به مقدار بسیار کمی قادر به شبیه‌سازی تغییرات در پاسخ فرکانسی دمپر بعد از ۴۰ سال حضور در خط است. همچنین دمپر بعد از ۴۰ سال کار در خط به تنها در بسامدهای محدودی قادر به جذب توان است، و درصد بسامدهای طبیعی بالاتر از حد مجاز کمی کمتر از خط بدون دمپر است.

۲.۵. نتیجه‌گیری

این مطالعه مروری داشت بر تأثیر خستگی دمپر در عملکرد ارتعاشی آن. به همین منظور مدل مناسبی برای ارتعاشات خط و دمپر تحت وزش باد ارائه شده و مشخصات دمپر نو و خسته شده در آن قرار داده شده است.