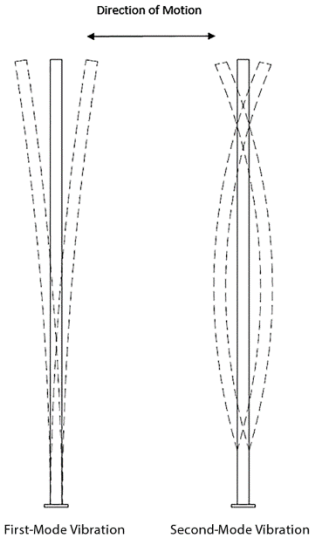
کاهش ارتعاشات ناشی از باد در تیرهای روشنایی کم ارتفاع

ارتعاشات ناشی از باد یک مسئله همیشگی در طراحی تیرهای برق بوده است. این ارتعاشات می‌توانند تیرهای برق را به حرکت درآورند، حتی زمانی که هیچ طوفان یا باد شدیدی وجود ندارد. مهندسین این پدیده را با عنوان رزونانس می‌شناسند. زمانی که مقدار و دامنه تغییرش کلی بزرگی از رزونانس وجود داشته باشد، امکان انهدام سازه بسیار بالا می‌رود.

تیرهای برق معمولی کوتاه‌تر از ۵۰ فوت هستند و قطر آن‌ها بین ۴ تا ۱۲ اینچ متغیر است و ضخامت دیواره آن‌ها بین ۱/۸ تا ۳/۸ اینچ است. این تیرها عموماً از آلومینیوم، فولاد، فایبرگلاس و یا بتن و در شکل‌های متفاوت مانند دایره، مخروطی، مربع، چندضلعی و شیاردار ساخته شده‌اند. توجه این مقاله عمدتاً روی تیرهای آلومینیومی و فولادی است.

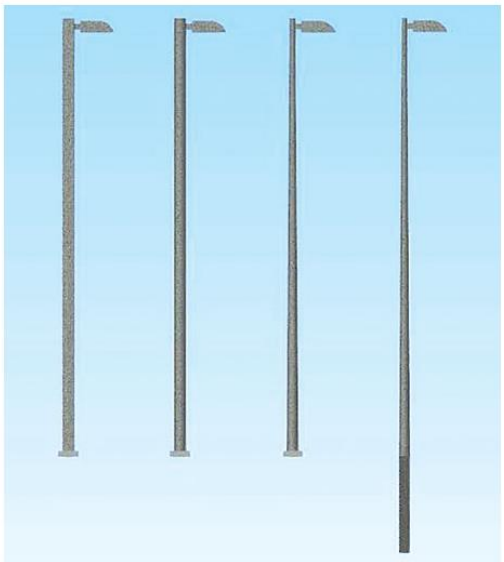
رایج‌ترین منبع برای طراحی تیرهای برق، ضوابط استاندارد برای تکیه گاه‌های سازه‌ای در علائم راهنمایی رانندگی، لامپ‌ها و چراغ‌های راهنمایی رانندگی (که عموماً با نام LTS شناخته می‌شود) است. این استاندارد توسط انجمن بزرگراه‌های ایالتی و مقامات سازمان حمل و نقل آمریکا (AASHTO) منتشر شده است. این استاندارد از آنالیز سازه‌ای مرسوم و مفاهیم طراحی تیرهای برق استفاده کرده و یک بخش در ارتباط با خستگی نیز ارائه می‌دهد. AASHTO LTS از نقشه باد، معادلات عمومی فشار باد و متغیرهای مربوط به بارهای طراحی باد استاندارد ASCE ۷ بهره می‌گیرد. در AASHTO LTS، متغیرهای فشار باد مانند ضریب درگ و ضریب تند باد به صورت اختصاصی برای سازه‌های لاغر و انعطاف پذیری مانند تیر و علائم تعبیه شده‌اند. این در حالی است که چنین سازه‌هایی از حوزه مباحث ASCE ۷ خارج است. هرچند، LTS راهنمایی‌های کمی در ارتباط با استفاده از میراگر به عنوان یک وسیله مؤثر در کاهش لرزش ارائه کرده است. به طور کلی، معیارهای خستگی در LTS برای بررسی مقاومت در برابر خستگی جنبه‌های مختلف تیر با مقایسه تنش‌های ایجاد شده توسط انواع مختلفی از لرزش‌های تولید شده توسط باد (تندبادهای طبیعی، گردابه، سرعت‌های بالا و غیره) با دامنه ثابتی از حد خستگی (CAFL) استفاده می‌شوند. در LTS لزومی به استفاده از معیارهای خستگی برای تیرهای روشنایی کوتاه و علائم نیست، هرچند تدوین ضوابطی برای در برگیری تمامی تیرها صرف‌نظر از اندازه آن‌ها، اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. اعتقاد بر این است که با استفاده از میراگر مناسب، اکثر مسائل حرکتی در تیرهای کوتاه قابل حل هستند. یک راه حل مرسوم برای طرحی که دران خستگی لحاظ نشده است، افزایش اندازه و سختی تیر برای برآورده نمودن ضوابط مورد نیاز می‌باشد. این راه برای ارضای ضوابط خستگی، تیرهایی فوق‌العاده محافظه کارانه از منظر مقاومتی ایجاد می‌کند. افزایش سختی موجب حل مشکلات تغییر شکل در یک مود لرزشی خاص می‌شود. هرچند با افزایش فرکانس‌های طبیعی تیر، مود نوسان دیگری ممکن است با انرژی باد کافی تحریک شده و موجب تخریب گردد، در حالی که قبلاً انرژی باد در این مود حداقل بود.

لرزش ناشی از باد معمولاً پدیده‌ای مختص هر منطقه بوده که به سختی قابل پیش بینی است. هر دو بادهای ثابت و تندبادهای دوره‌ای می‌توانند موجب تشدید مودهای مختلف ارتعاش گردد. شکل ۱ شایع‌ترین مودهای ارتعاش در تیرهای برق کوتاه با لامپ در بالای آن‌ها را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که وقوع مودهای ارتعاش بالاتر نیز اتفاق افتاده است.



شکل ۱. شکل تقریبی مودهای اول و دوم

ارتعاش مود اول معمولاً با حرکت جانبی تیر و حداکثر تغییر شکل در بالای تیر تعریف می‌گردد، در حالی که ارتعاش مود دوم با عنوان شکل S شناخته می‌شود که حداکثر تغییر شکل آن در محل تقریبی ۲/۳ ارتفاع سازه رخ می‌دهد. با ایجاد سیکل‌های کافی و مناسب بودن دامنه که منجر به ایجاد تنش کافی برای خستگی فلز و یا جوش‌ها گردد، ایجاد خسارت در اثر هر دو مود ممکن بوده؛ این در حالی است که سازه از نظر طراحی مقاومتی مناسب است. شرایط متفاوتی این مودهای مختلف را تحریک می‌نمایند. نوسان مود اول با تندبادهایی که موجب قفل شدن حرکت تیر در تندبادها می‌گردد تحریک می‌شود. مود دوم نوسان توسط بادهای ثابت و پایدار که گرداب‌هایی را در راستای جهت باد ایجاد می‌کنند، شکل می‌گیرد که به علت جریان گردابی باعث حرکت در راستای عمود بر جهت باد می‌گردد. جریان‌های گردابی نیز می‌توانند در تیرهایی که فرکانس طبیعی آن‌ها بسیار بالا می‌باشد، موجب ایجاد نوسان مود اول شوند. تجربه نشان داده است که برخی از انواع تیرها بیشتر از دیگر انواع آن مستعد نوسانات ایجاد شده توسط باد می‌باشند. این تیرها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

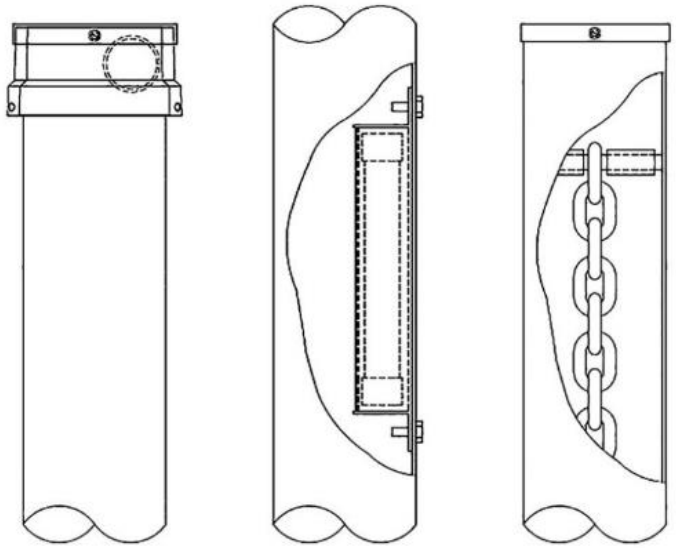


شکل ۲. تمایل به نوسان از بیشترین به کمترین: مربعی با سطح مقطع ثابت، دایروی با سطح مقطع ثابت، دایروی با سطح مقطع متغیر و دایروی با سطح مقطع متغیر مدفون.

به طور معمول، تیرها با سطح مقطع ثابت دایروی یا مربعی، به دلیل توانایی کمتر در به هم ریختن گرداب‌های ایجاد شده توسط بادهای پیوسته، بیشترین گرایش به تحریک پذیری و نوسان توسط باد را دارند. تیرهایی با سطح مقطع متغیر به دلیل تغییر قطر در ارتفاع، شانس تداخل آن‌ها با گرداب‌ها را کمتر می‌نماید. تشدید ایجاد شده توسط گرداب‌های تناوبی در اکثر انواع تیرها رخ می‌دهد که در شکل ۲ نشان داده شده است. پایه‌های مدفون میرایی زیادی به واسطه زمینی که در آن مدفون شده‌اند، دارند؛ لذا مشکل کمی با نوسان دارند. علاوه بر ابعاد و شکل تیر، شکل و ابعاد روشنایی نقش اساسی در تعیین امکان تشدید یک تیر دارند. یافته‌ها نشان می‌دهد که تیری که روشنایی ندارد، شانس بیشتری برای تشدید دارد.

در سال‌های اخیر، گزارش‌هایی از سازه تیرهایی که مطابق ضوابط خستگی LTS طراحی شده‌اند و تشدیدهای خسارت برانگیزی را تجربه نموده‌اند، ثبت شده است. این امر نشان دهنده آن است که صرفاً افزایش سختی برای خارج شدن از یک رنج تشدید راه حل خوبی برای حل یک مسئله حرکتی محتمل نیست. روش دیگر و یک روش تجربه شده صحیح، میرایی ضربه‌ای است.

میراگرهای ضربه‌ای عموماً از یک جرم تشکیل شده‌اند که به صورت فیزیکی و مکرراً با یک سطح برخورد می‌کند تا حرکت را کاهش دهند. مقدار جرم قابل تغییر بوده (عموماً اضافه می‌گردد) تا نیاز میرایی سازه را تأمین کنند. بعضی از میراگرهای ضربه‌ای مرسوم و مود میرایی مؤثر آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. شکل نمادین میراگر، از چپ به راست: میراگر مود اول، میراگر مود دوم و میراگر مود سوم.

اشکال مختلف از دستگاه‌های شکل ۳ برای چند دهه موجود بوده است. اولین دستگاه در اصل یک توپ در یک جعبه بوده و نوسانات مود اول را میرا می‌کند، دستگاه دوم یک تیر در یک جعبه بوده و مود دوم را میرا می‌کند و سومین دستگاه یک زنجیر آویزان است که مود سوم را میرا می‌کند. این دستگاه‌ها در محلی که انتظار می‌رود بیشترین دامنه حرکت در اثر مود هدف رخ دهد، قرار می‌گیرند. زمانی که جرم با دیواره مخزن برخورد می‌کند، چه خود تیر و چه دستگاه دیگری، این ضربه، موجب اخلال در تشدید سازه شده و کمک به گرفتن مقداری از انرژی حرکتی می‌کند. با برخوردهای کافی، سازه به صورت مؤثری به سطح قابل قبولی از میرایی می‌رسد. برای میراگر مود دوم، تیر در نزدیکی زیاد به سازه دربرگیرنده‌اش قرار گرفته-این امر به علت دامنه کوتاه و فرکانس‌های بالاتر ضروری است (به معنای تغییر تنش‌های سریع‌تر). این موارد در اثر نوسانات این مود بوده است.

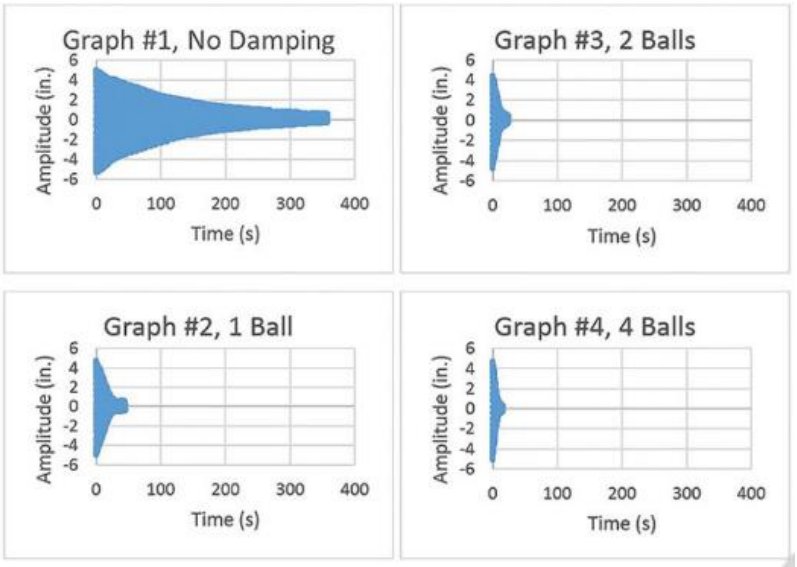
فاصله زیاد بین جرم و دیواره (مانند این فاصله در میراگر مود اول) برای میراگر مود دوم نا مؤثر می‌باشد، زیرا جرم به ندرت با دیواره برخورد خواهد کرد.

میراگر زنجیره‌ای از بالا درون تیر قرار می‌گیرد و با استفاده از پیچ و یا با آویزان شدن از دریچه تیر متصل می‌گردد. این میراگرها درون یک شلنگ از جنس PVC قرار می‌گیرند و آسیبی به پیوستگی سازه تیر نمی‌زنند. هرچند این نوع نباید در مواردی که در بالای تیر سیم‌کشی وجود دارد استفاده شود، زیرا زنجیر می‌تواند سیم‌کشی را مختل کند. میراگر توپ سربی در بالای تیر به وسیله پیچ نصب شده است. این توپ با چسب اپوکسی روکش شده و سرب به کمک تغییر شکل‌های محلی مقداری از انرژی تشدید را می‌گیرد. این تغییر شکل‌ها کوچک بوده و باور بر این است که عملکرد میراگر را در طولانی مدت تضعیف نمی‌کنند، هرچند هیچ‌گونه مطالعات درازمدتی در این زمینه انجام نگرفته است. میراگر مود دوم درون تیر قرار گرفته و با ۲ پیچ و مهره که از تیر بیرون زده شناسایی می‌شود. بیشتر میراگرهایی که اینجا معرفی شدند، می‌توانند در تیرهای موجود افزوده شوند. بسته به ابعاد میله، هزینه دستگاه‌های معرفی شده بین ۱ تا ۱۵ درصد هزینه تیر می‌باشد. بازرسی عناصر یک سیستم میراگر باید به بخشی از برنامه تعمیر و نگهداری تیر تبدیل شود تا از عملکرد مناسب تیر اطمینان حاصل گردد. تصویری از این دستگاه‌ها در شکل ۴ آمده است.

شکل ۴. میراگرها، از چپ به راست: میراگر زنجیر آویزان-میراگر مود اول، میراگر توپ سربی- میراگر مود دوم، میراگر تیر در قوطی- میراگر مود سوم.

یک مثال از میزان میرایی که یک جرم کوچک تأمین می‌کند، در شکل ۵ ارائه شده است. در تمام نمودارها دامنه در مقابل زمان نشان داده شده است. این نمودارها از آزمایش‌های تمام مقیاس بر روی یک تیر روشنایی که در یک آزمایش انقباض در یک جریانی که متناسب با نوسان مود اول بوده و تیر تحت ارتعاش آزاد قرار گرفته استخراج شده است. تیر مورد نظر داری ۲۳ فوت ارتفاع، ۶ اینچ قطر با ۵/۳۲ اینچ دیواره آلومینیومی و ۵۰ پوند جرم که در بالای آن قرار دارد، می‌باشد. زمانی که دامنه کمتر از ۱/۲ اینچ می‌شود، نمودارها کوتاه می‌شوند. در نمودار شماره ۱، تیر پیش از آنکه به دامنه کمتر از ۱/۲ اینچ در انتهای نمودار برسد، تقریباً تحت ۵۰۰ نوسان قرار گرفته است. نمودارهای شماره ۲ تا ۴ همان تیرهای قبلی هستند که همان میزان حداکثر دامنه به آن‌ها اعمال شده است.

میزان میرایی در این تیرها متفاوت می‌باشد. وزن توپ‌های سربی مضربی از ۵ پوند است. برای این تیر خاص، مقدار جرم کم در یک میراگر ضربه‌ای باعث می‌شود تا میزان نوسان‌ها از ۵۰۰ به ۶۰ برای یک توپ و حدود ۲۰ نوسان برای ۴ توپ برسد (جعبه‌های میراگرها می‌توانند روی هم قرار گیرند). در این وضعیت با افزایش جرم میراگر، نوسانات بعدی کمتر و محدودتر می‌شوند. تغییر ناگهانی در شیب نمودارهای ۲ تا ۴ نمایانگر این امر است که دامنه حرکت تیر به قدری کوچک شده بود که توپ دیگر با دیواره جعبه برخورد نداشت. همان‌طور که قابل مشاهده است، میراگر ضربه‌ای تعداد نوساناتی که یک سازه متحمل می‌شود را به طرز قابل توجهی کاهش می‌دهد و پس از نصب می‌تواند به سرعت دامنه را کاهش و درنتیجه بازه تنشی که تیر تحمل می‌نماید را نیز کاهش دهد.



شکل ۵. دامنه در مقابل زمان برای یک سیستم میراگر مود اول.

درک رفتار باد بر سازه می‌تواند مشکل باشد – این موضوع وقتی شدت می‌یابد که یک تغییر هندسی کم و یا تغییر در فرکانس‌های طبیعی می‌تواند تفاوت بین یک سازه تیر روشنایی تحت تشدید مخرب و یا بدون هیچ حرکتی باشد. به جای طراحی دست بالای سازه برای افزایش سختی، یک روش مقرون به صرفه برای کاهش نوسان استفاده از میراگرهای جرمی یا ضربه‌ای است که دهه‌هاست به صورت مؤثر استفاده شده و می‌تواند مطابق با شرایط خاص هر ساختگاه تنظیم شده و به جرم آن افزوده شود. میراگرها گزینه صد در صد کاملی نیستند، اما بیشتر مشکلات حرکتی مربوط به روشنایی‌های کوتاه در اثر باد را حل می‌کنند.

مترجم: مریم گلستانی

منبع:

http://www.structuremag.org/?p=۱۱۲۰۳