

ISAV2023

سیزدهمین کنفرانس بین المللی آگوستیک و ارتعاشات

تهران - ایران

۲۹ و ۳۰ آذر ماه ۱۴۰۲



برآورد نیروی کشش کابل در پل های کابلی به روش اندازه گیری ارتعاش با استفاده از حسگرهای هوشمند بی سیم (بررسی میدانی)

علی نیوشا^{۱*}، امیر پیمان زندی^۲

^۱ ایران، تهران، خیابان پاستور کوچه سلامت پلاک ۴، ۱۳۱۷۶۸۴۴۶۱، مشاور حوزه پایش سلامت سازه

^۲ ایران، تهران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۹۱۶۶۴۶۶۶۴، عضو هیئت علمی

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: niousha@nioushatech.ir

چکیده

پل های کابلی سازه های مدرنی هستند که ساخت آن ها در دنیا گسترش زیادی پیدا کرده اند. اجرای دهانه های بلند در اینگونه پل ها همراه با طول عمر بیشتر و صرفه اقتصادی این سازه ها، مهم ترین عامل مقبولیت آنها در بین مهندسان پل می باشد. با گذشت زمان پل ها نیز مانند تمام سازه ها به عمر مفید خود می رسند، ولی به دلیل محدودیت های بودجه ای اغلب باید بیش از طول عمر طراحی خود در خدمت باشند. سازه های عمرانی همچنین به علت وقایع طبیعی مانند زمین لرزه و باد، بارهای مختلف حین بهره برداری و یا فرسودگی اجزا در طول زمان دچار آسیب می شوند. به منظور کاهش خسارات مالی و جانی، روش هایی برای پایش سلامت سازه جهت اطمینان از ایمنی آنها مورد نیاز می باشد. در پل های کابلی، کابل های پل و اتصالات آن ها بدون شک بحرانی ترین المان های سازه ای پل می باشند. از آنجایی که این کابل ها در درون غلاف قرار می گیرند و معمولاً فضای بین کابل و غلاف را با مواد مهارکننده خوردگی همچون ملات سیمان یا گریس پر می کنند، بازرسی چشمی کمک چندانی در شناسایی آسیب این کابل ها نمی کند. در این مقاله نشان داده می شود که با استفاده از حسگر های بی سیم هوشمند و اندازه گیری ارتعاش کابل های پل، می توان به آسانی نسبت به برآورد نیروی کشش کابل ها اقدام نمود. نخست به بررسی اجمالی روش های متداول برآورد نیروی کشش کابل ها پرداخته و در ادامه به معرفی پل کابلی ابریشم تهران، روش انجام آزمون ارتعاش و اندازه گیری های لازم، تحلیل داده ها و استخراج فرکانس های ارتعاشی کابل جهت برآورد نیروی کشش کابل مربوطه پرداخته شده است. در این مقاله نشان داده شده است که نیروی کشش کابل به آسانی با استفاده از اندازه گیری کشش ارتعاش کابل بدون نیاز به مشخصات سختی آن قابل اندازه گیری می باشد. نتایج پایش مستمر نیروهای کشش کابل های پل کابلی به بهره بردار این اطمینان را می دهد تا از شرایط و وضعیت پل قبل از وقوع حادثه ای مطلع شود.

کلمات کلیدی: پایش سلامت سازه؛ پل کابلی؛ کشش کابل؛ حسگر بی سیم.

۱- مقدمه

پل‌های کابلی سازه‌های مدرنی هستند که ساخت آن‌ها در دنیا گسترش زیادی پیدا کرده اند. اجرای دهانه‌های بلند در اینگونه پل‌ها همراه با طول عمر بیشتر و صرفه اقتصادی این سازه‌ها، مهم‌ترین عامل مقبولیت آن‌ها در بین مهندسان پل می‌باشد. با گذشت زمان پل‌ها نیز مانند تمام سازه‌ها به عمر مفید خود می‌رسند، ولی به دلیل محدودیت‌های بودجه‌ای اغلب باید بیش از طول عمر طراحی خود در خدمت باشند. سازه‌های عمرانی همچون به علت وقایع طبیعی مانند زمین لرزه و باد، بارهای مختلف حین بهره‌برداری و یا فرسودگی اجزا در طول زمان دچار آسیب می‌شوند. به منظور کاهش خسارات مالی و جانی، روش‌هایی برای پایش سلامت سازه جهت اطمینان از ایمنی آنها مورد نیاز می‌باشد.

رویکرد بازرسی چشمی معمولی‌ترین و ابتدایی‌ترین روش بازرسی پل‌ها است. به کمک این روش تنها می‌توان خسارت‌های قابل رویت یا بسیار پیشرفته را که معمولاً نیاز به تعمیرات گسترده دارند، تشخیص داد. در پل‌های کابلی، کابل‌های پل و اتصالات آن‌ها بدون شک بحرانی‌ترین المان‌های سازه‌ای پل می‌باشند [1]. از آنجایی که این کابل‌ها در درون غلاف قرار می‌گیرند و معمولاً فضای بین کابل و غلاف را با مواد مهارکننده خوردگی همچون ملات سیمان یا گریس پر می‌کنند، بازرسی چشمی کمک‌چندانی در شناسایی آسیب این کابل‌ها نمی‌کند. به همین دلیل برای بازرسی کابل‌ها باید از روش‌های دیگری که حساس‌تر و مؤثرتر باشند، استفاده کرد. یکی از مشکلات اساسی در کابل‌ها، تغییرات ایجاد شده در نیروی کشش اولیه آن‌ها می‌باشد. با اندازه‌گیری این تغییرات حتی می‌توان آسیب‌های دیگر را شناسایی کرد. به عنوان مثال، کاهش شدید نیروی کشش در یک کابل به همراه افزایش کشش در کابل مجاور آن، نشان از کاهش سطح مقطع و یا لغزش در مهارکننده کابلی که با افت کشش همراه شده است، یا در همان منطقه عرشه پل می‌تواند دچار شکست شده باشد. از آنجایی که کابل‌ها المان‌های ضروری برای سلامت کلی یک سازه کابلی می‌باشند، دقت تخمین نیروی کشش کابل نقش مهمی در مرحله ساخت و نگهداری یک سازه کابلی ایفا می‌کند. در نتیجه در پایش سلامت پل‌های کابلی، پروسه تخمین نیروی کشش کابل تاثیر بسزایی در دقت پایش‌های سازه‌ای دارد. یکی از روش‌های بررسی سلامت کابل‌ها، محاسبه نیروی کشش کابل با استفاده از داده‌های ارتعاشی کابل‌ها می‌باشد. استفاده از حسگرهای مناسب جهت برداشت داده‌های ارتعاشی از کابل و تخمین نیروی کشش کابل با استفاده از ارتعاش، روشی کاربردی برای پایش سلامت یک سازه کابلی می‌باشد.

در این مقاله نشان داده می‌شود که با استفاده از حسگرهای بی‌سیم هوشمند و اندازه‌گیری ارتعاش کابل‌های پل، می‌توان به آسانی نسبت به برآورد نیروی کشش کابل‌ها اقدام نمود. در ادامه نخست به بررسی اجمالی روش‌های متداول برآورد نیروی کشش کابل‌ها پرداخته و در سپس به معرفی پل کابلی ابریشم تهران، روش انجام آزمون ارتعاش و اندازه‌گیری‌های لازم، تحلیل داده‌ها و استخراج فرکانس‌های ارتعاشی کابل جهت برآورد نیروی کشش کابل مربوطه پرداخته می‌شود.

۲- روش برآورد نیروی کشش کابل

روش‌های مختلفی جهت بازرسی پل کابلی وجود دارد که با توجه به محدودیت فضای مقاله، در این قسمت فقط به روش اندازه‌گیری کشش کابل در مرحله ساخت و بهره‌برداری می‌پردازیم و در ادامه برآورد نیروی کشش کابل با استفاده از روش ارتعاشی شرح داده خواهد شد.

از بین روش‌های بازرسی و نگهداری پل‌های کابلی، روش اندازه‌گیری نیروی کشش کابل بیشترین کاربرد را دارد. محاسبه نیروی کشش کابل به محاسبه تغییرات ایجاد شده در سختی کابل‌ها کمک می‌کند، که از این طریق می‌توان شدت و مقدار آسیب ایجاد شده در کابل یا تغییرات ایجاد شده در عرشه پل را شناسایی کرد. روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری نیروی کشش کابل‌ها وجود دارد. در هنگام ساخت، نیروی کشش کابل‌ها توسط سلول‌های بار که در یک انتهای کابل متصل می‌شود، کنترل می‌شود. روش دیگر اندازه‌گیری نیروی کشش کابل توسط اندازه‌گیری فشار سیال در جک‌های هیدرولیکی می‌باشد. پس از ساخت پل‌های کابلی می‌توان از سنسورهای تنش مغناطیسی که روشی مستقیم جهت بدست آوردن نیروی کشش کابل می‌باشد، استفاده کرد. امروزه روش‌های غیر مستقیم جهت اندازه‌گیری نیروی کشش کابل که بر مبنای مشخصات دینامیکی کابل‌ها می‌باشد، به طور گسترده مورد

استفاده قرار می‌گیرند. پیاده‌سازی این روش‌ها بسیار ساده و مقرون به صرفه می‌باشد. این روش‌ها تنها نیازمند شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری ارتعاش کابل تحت بارهای محیطی و یا ضربه ای می‌باشند. پروسه کلی روش‌های ارتعاشی به این گونه است که فرکانس‌های کابل توسط داده‌های ارتعاشی بدست آمده از شتاب‌سنج‌ها استخراج می‌شود، از آنجا که فرکانس کابل با کشش آن در ارتباط می‌باشد این فرکانس‌ها وارد رابطه‌های ریاضی می‌شوند و به این ترتیب نیروی کشش کابل را می‌توان به صورت غیر مستقیم تخمین زد. روش‌های ارتعاشی بسیاری با در نظر گرفتن مشخصات دینامیکی کابل‌ها جهت اندازه‌گیری نیروی کشش در آن‌ها توسعه داده شده‌اند. براساس دو پارامتر سختی خمشی و شکم ایجاد شده در کابل‌ها، از میان روش‌های موجود می‌توان ۶ روش ارتعاشی زیر را نام برد:

۱- **تئوری رشته کشیده شده (flat taut string theory):** که در این روش از شکم و سختی خمشی کابل صرفه نظر شده است. اندازه‌گیری نیروی کشش کابل به کمک رابطه ارائه شده برای این روش بسیار ساده می‌باشد و جهت بدست آوردن تخمین اولیه‌ای از نیروی کشش کابل در تمام شرایط بسیار مفید می‌باشد. از آنجایی که در این تئوری از شکم و سختی خمشی کابل صرفه نظر می‌شود، کاربرد این روش صرفاً برای کابل‌های بلند، باریک و صاف می‌باشد. با وجود اینکه این روش برای کابل‌های با شکم زیاد و سختی خمشی بالا غیرقابل اعتماد است، جهت اولین تخمین کشش کابل مفید خواهد بود.

$$T = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 \quad (1)$$

T : کشش کابل (N)

m : جرم واحد طول کابل (Kg/m)

L : طول کابل (m)

f_n : فرکانس مود n ام کابل (Hz)

۲- **رابطه رشته تیر:** در این روش سختی خمشی کابل در نظر گرفته می‌شود، اما از شکم ایجاد شده در کابل صرفه نظر می‌شود. کاربرد این روش برای کابل‌های کوتاه ضمیم مناسب می‌باشد. استفاده از داده‌های مودهای بالاتر، دقت بیشتری را جهت محاسبه نیروی کشش کابل ارائه می‌دهد، اما مشکل این روش آن است که کابل‌ها به ندرت تحت بارهای محیطی در مودهای بالاتر به ارتعاش در می‌آیند. علیرغم محدودیت‌های این روش، از آن به جهت سادگی و سرعت در بیشتر بررسی‌های عملی استفاده می‌شود [2].

$$T = 4mL^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - \frac{EI\pi^2 n^2}{L^2} \quad (2)$$

و یا

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{T}{4mL^2} + \frac{EI\pi^2}{4mL^4} n^2 \quad (3)$$

EI : سختی خمشی کابل ($N.m^2$) رابطه (۱) تعریف می‌شوند.

با داشتن فرکانس‌های ارتعاشی مودهای مختلف (f_n) و شماره مود مربوطه (n) و با استفاده از روش رگرسیون خطی می‌توان نیروی کشش کابل را به طور مناسبی از رابطه (۳) برآورد نمود. مزیت این روش عدم نیاز به مشخصات مکانیکی کابل (EI) می‌باشد.

در ادامه سایر روش‌های موجود نیز توضیح مختصر داده می‌شود که بعلاوه محدودیت فضای مقاله، خواننده می‌تواند با مراجعه به منابع ارائه شده از جزئیات آنها مطلع شود.

۳- **روابط کاربردی زوئی:** که توسط زوئی و همکاران در سال ۱۹۹۶ ارائه شده و تنها با استفاده از فرکانس مود اول یا دوم کابل و همچنین با در نظر گرفتن سختی خمشی و شکم کابل، کشش ایجاد شده در کابل را به سادگی و با دقت بالایی محاسبه می‌کند. از محدودیت‌های این روش می‌توان به امکان در دسترس نبودن مقادیر سختی خمشی و محوری کابل و یا نسبت شکم ایجاد شده به طول دهانه کابل اشاره کرد. همچنین اندازه‌گیری شکم کابل در حالت استاتیکی می‌تواند هزینه بر باشد [3].

۴- **رابطه راسل و لاردنر:** در این روش از تئوری جدید کابل بهره می‌گیرد که در آن از سختی خمشی کابل صرف نظر شده است، اما شکم کابل در نظر گرفته شده است. رابطه ارائه شده توسط راسل و لاردنر نیاز به داشتن دانش اولیه از سختی محوری و طول کابل قبل از آنکه دچار کرنش شود می‌باشد، که این مقادیر معمولاً جز برای اندازه‌گیری نیروی کشش در زمان اجرا در دسترس نمی‌باشد [4].

۵- **روابط تجربی سین و همکاران:** این روش بیشتر از آنکه حاصل تئوری باشند، به صورت تجربی بدست آمده‌اند. در این روابط نیز سختی خمشی و شکم کابل در نظر گرفته شده است و استفاده از آن‌ها بسیار ساده می‌باشد و مهندسین در عمل می‌توانند نیروی کشش کابل را با سرعت بالایی محاسبه کنند [5].

۶- **رابطه فَنگ:** در سال ۲۰۱۲ ارائه شده که در آن سختی خمشی را در نظر می‌گیرد، اما برای سادگی بیشتر از شکم ایجاد شده در کابل صرفه‌نظر می‌کند [6].

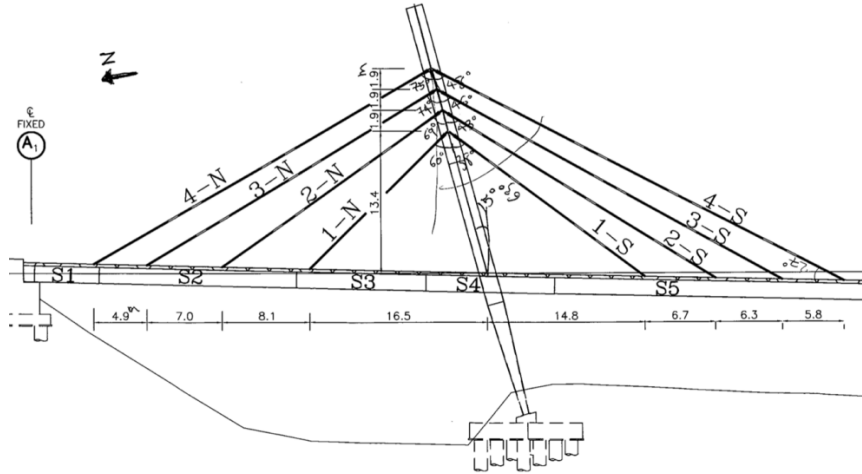
۳- معرفی پل کابلی ابریشم

پل ابریشم در شهر تهران و به موازات بزرگراه مدرس و بر روی بزرگراه همت بنا شده است. طول کلی پل ۱۳۳ متر و عرض آن ۱۰/۵ متر و مشتمل بر سه دهانه ۴۳، ۶۷ و ۲۳ می‌باشد. دهانه بزرگ پل توسط یک پایلون مایل و یک سری کابل متصل به عرشه بنا شده است. عرشه پل به صورت صندوقه فلزی به ارتفاع ۱/۵۰ متر می‌باشد که بر روی آن دال درجاریز اجرا شده است. این پل به منظور استفاده عابر پیاده می‌باشد و وسیله نقلیه از آن عبور نمی‌کند. (عکس ۱)



عکس ۱- نمای کلی پل عابر پیاده ابریشم

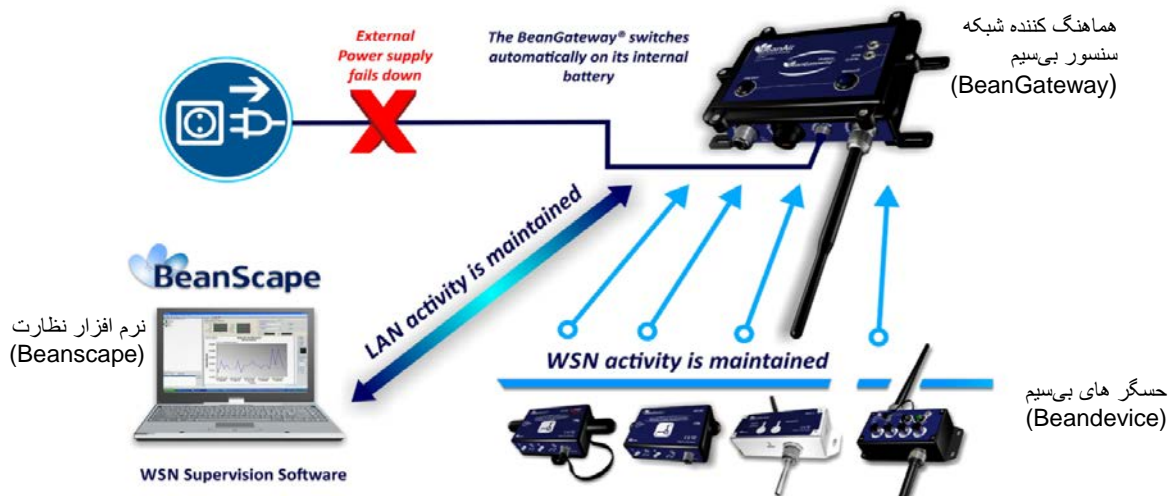
کابل های نگهدارنده عرشه پل شامل ۵ جفت کابل در هر طرف پایلون می باشد. طبق مدارک موجود از طراحی، محاسبات پل برای ۴ جفت کابل در هر طرف پایلون انجام شده است و جفت کابل ۵ ام (کابل های انتهایی بیرونی در دو طرف) در مرحله اجرا اضافه شده اند (شکل ۱). کابل های پل از نوع رشته بافته ۷ سیمی (St ۱۶۷۰/۱۸۶۰) بوده و مقاومت مشخصه گسیختگی آنها ۲۷۹ kN می باشد. قطر اسمی هر رشته بافته ۱۵/۷۵ میلیمتر و سطح مقطع آن ۱۵۰ میلیمتر مربع می باشد. کابل های stay از نوع ۱۲ استرندی می باشد.



شکل ۱- موقعیت قرارگیری کابل ها در دو طرف پایلون براساس مدارک طراحی

۴- سیستم اندازه گیری و روش آزمون

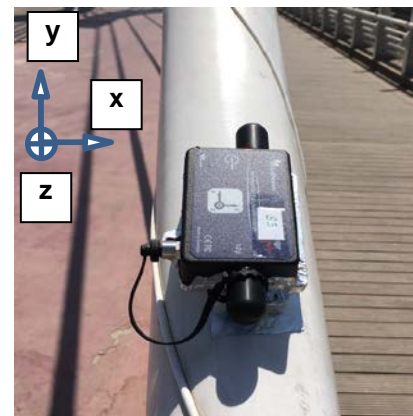
در این بخش نخست سیستم اندازه گیری و حسگر های استفاده شده در آزمون توضیح داده می شود، در ادامه به روش آزمون پرداخته و در خاتمه روش اندازه گیری ارتعاش و روش تجزیه تحلیل داده ها شرح داده می شود. در این اندازه گیری از شبکه سنسور بی سیم شرکت BeanAir آلمان استفاده شده است [7]. این سیستم به طور کلی از سه مدول BeanDevice (حسگر های بی سیم)، BeanGateway (هماهنگ کننده شبکه بی سیم) و BeanScape (نرم افزار تنظیم و نظارت سیستم) که بر روی کامپیوتر نصب می شود، تشکیل شده است (شکل ۲).



شکل ۲- سیستم بی سیم جهت اندازه گیری ارتعاش [7]

در این آزمون از حسگرهای شتاب سنج شرکت مذکور استفاده شده است که بر روی کابل های پل (روی غلاف خارجی) نصب شده است. نحوه کار این شبکه بی‌سیم به این صورت می‌باشد که ابتدا با استفاده از نرم‌افزار، فرکانس و مدت زمان نمونه‌برداری مشخص و تعیین می‌شود. این تنظیمات به هماهنگ کننده منتقل و از هماهنگ کننده توسط آنتن رادیویی به شتاب‌سنج‌ها مخابره می‌شود و شتاب‌سنج‌ها شروع به اندازه‌گیری می‌کنند. شتاب‌سنج‌ها می‌توانند داده‌های دیجیتال شتاب را در ۳ راستای X-Y-Z (تا ۸ میلیون داده) در خود ذخیره یا به صورت برخط به کامپیوتر منتقل کنند. در صورت ثبت اطلاعات در حافظه شتاب‌سنج، می‌توان در صورت نیاز داده‌ها را جهت تحلیل و بررسی به کامپیوتر منتقل و یا از روی حافظه شتاب‌سنج حذف کرد.

برای بررسی نیروی کشش کابل‌ها، حسگرهای شتاب سنج بر روی کابل‌ها نصب می‌شوند (عکس ۲). جهت ارتعاش کابل از دو حالت ارتعاش محیطی و ضربه (توسط چکش لاستیکی) استفاده شده است (عکس ۳). داده‌های شتاب در حوزه زمان با نمونه برداری ۱۰۰ نمونه در ثانیه برای هر سه راستای اندازه‌گیری و برای هر دو حالت ارتعاش محیطی و ضربه تنظیم و برداشت می‌شوند. پس از اندازه‌گیری جهت اصلاح خط مبنا، نخست میانگین داده‌ها حذف و جهت حذف نوفه از فیلتر میانگذر باترورث مرتبه ۸ با محدوده فرکانسی ۰/۴۰ تا ۴۰ هرتز استفاده شده است. به منظور بدست آوردن فرکانس‌های ارتعاشی کابل‌ها، تابع توزیع طیف جهت هر یک از مولفه‌ها محاسبه و رسم می‌شود. برای حذف نوفه‌های تصادفی موجود در داده‌ها و بدست آوردن توابع توزیع طیف توان یکنواخت‌تر، از میانگین‌گیری داده‌های با استفاده از پنجره‌های ۴۰۹۶ نقطه‌ای و همپوشانی ۲۰۴۸ نقطه‌ای استفاده شده است. در خاتمه با روش برگزینش قله (Peak Picking)، فرکانس‌های مودال را از روی قله‌های مربوط به نمودار چگالی طیفی توان بدست آورده و در پایان با استفاده از روابط ۱ و ۳ نیروی کشش کابل‌ها محاسبه می‌گردد.



(b) هماهنگ کننده شبکه و کامپیوتر

(a) حسگر شتاب سنج بی‌سیم

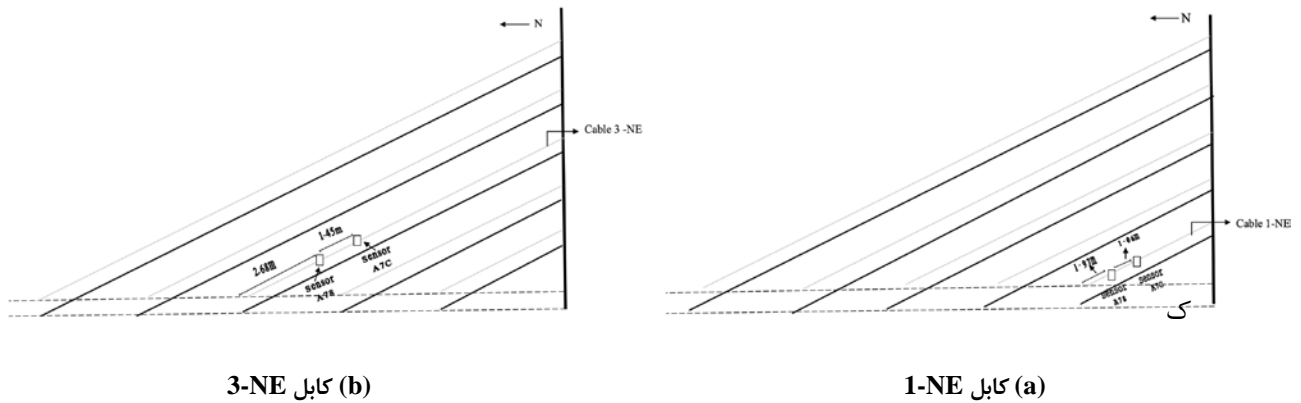
عکس ۲- تجهیزات اندازه‌گیری



عکس ۳- (راست) ارتعاش محیطی و (چپ) ارتعاش توسط ضربه به غلاف کابل به کمک چکش پلاستیکی

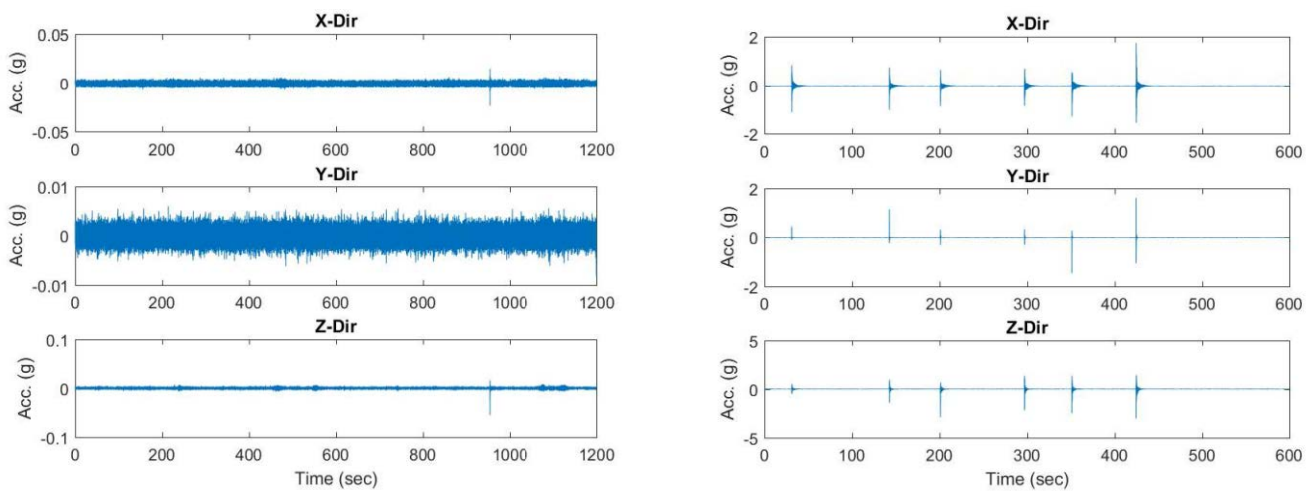
۵- نتایج

در بررسی نیروی کشش کابل پل ابریشم حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده است که در این قسمت فقط نتایج کابل‌های ۱ و ۳ در محدوده شمال-شرق پل (1-NE, 3-NE) نشان داده می‌شود که طول هر یک از کابل‌ها به ترتیب ۱۸,۹۵ و ۳۲,۰۰ متر و جرم واحد طول آنها $14/14 \text{ Kg/m}$ می‌باشد. برای این منظور با قرار دادن دو عدد حسگر (با کد مشخصه A7C و A78) بر روی هر کابل با فاصله معین (شکل ۳) نسبت به برداشت داده‌های شتاب ناشی از ارتعاش محیطی (M) و همچنین ضربه ناشی از چکش (P) اقدام شده است.



شکل ۳- محل قرار گیری حسگرهای شتاب روی کابل‌های (1-NE) و (3-NE)

داده‌های بدست آمده در این مرحله با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبل پردازش شده و داده‌های لازم جهت انجام محاسبات بعدی تهیه شده است. شکل (۴) نمونه داده‌ها پردازش شده شتاب مربوط به کابل 3-NE در دو حالت ارتعاش محیطی و ضربه را نشان می‌دهد.

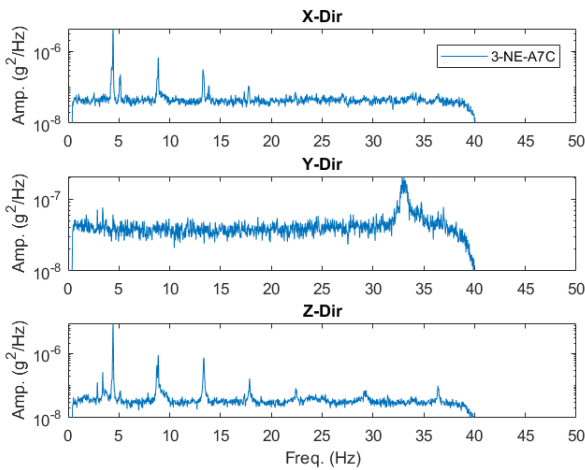


(b) ارتعاش محیطی

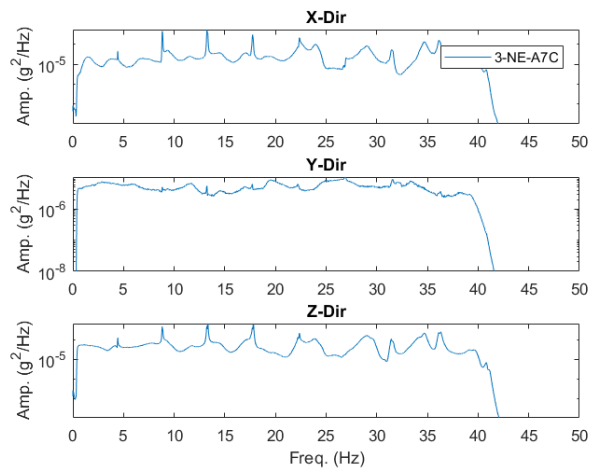
(a) ناشی از ضربه به کابل

شکل ۴- مولفه‌های موج‌های ثبت شده در حسگر A7C کابل 3-NE

در ادامه از امواج پردازش شده نسبت به محاسبه توابع توزیع طیف توان برای هر یک از حالات ارتعاش محیطی و ضربه استفاده کرده و نتایج در اشکال (۵) و (۶) نمایش داده شده است. لازم به توضیح است، از آنجا که داده های حسگر A7C به میانه کابل نزدیک تر است و امکان ثبت بهتر مودها در آن وجود دارد، جهت محاسبه کشش کابل ها استفاده شده است. همچنین جهت محاسبه نیروی کشش کابل ها از مولفه Z داده ها استفاده شده است.

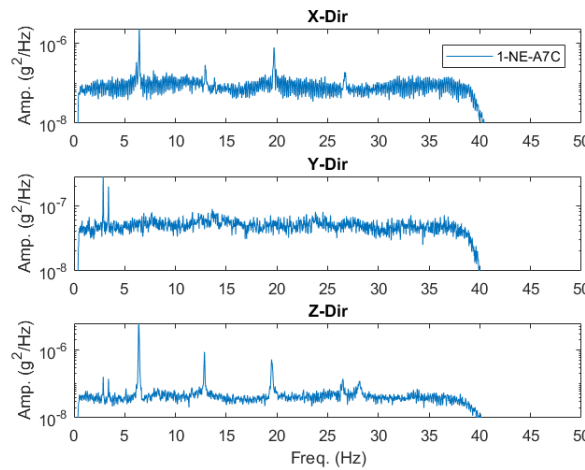


(b) ارتعاش محیطی

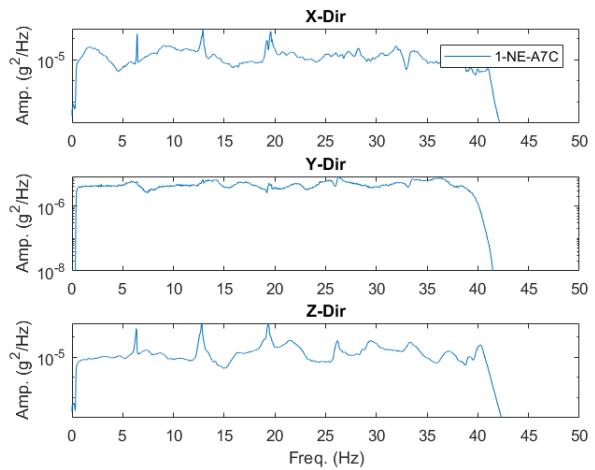


(a) ناشی از ضربه به کابل

شکل ۵- توابع توزیع طیف توان مربوط به A7C کابل 3-NE



(b) ارتعاش محیطی



(a) ناشی از ضربه به کابل

شکل ۶- توابع توزیع طیف توان مربوط به A7C کابل 1-NE

با استفاده از روش برگزینش قله (PP) توابع مربوط به مولفه Z، فرکانس های مودی در کابل های 1-NE و 3-NE برای هر دو حالت ارتعاش بدست آمده که نتایج آن در جدول (۱) نشان داده شده است. در پایان با استفاده از روابط (۱) و (۳) نسبت به محاسبه نیروی کشش کابل ها اقدام و نتایج در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱- فرکانس های مودی استخراج شده از ارتعاش کابل ها (حسگر A7C)

مود اول (Hz)	مود دوم (Hz)	مود سوم (Hz)	مود چهارم (Hz)	مود پنجم (Hz)	
۴/۴۱۹	۸/۸۶۸	۱۳/۳۴	۱۷/۸۵	۲۲/۴۰	ارتعاش محیطی
۴/۴۲۵	۸/۸۱۳	۱۳/۳۲	۱۷/۸۲	۲۲/۳۶	ضربه
۶/۳۸۷	۱۲/۸۶	۱۹/۴۸	-	-	ارتعاش محیطی
۶/۳۴۲	۱۲/۷۸	۱۹/۳۷	۲۶/۱۷	-	ضربه

جدول ۲- نیروی کشش کابل های برآورد شده از مقادیر فرکانس ارتعاشی کابل ها

کشش کابل رابطه (۱) (N)	کشش کابل رابطه (۳) (N)	
۱,۱۳۱,۰۰۰	۱,۱۳۴,۷۰۶	ارتعاش محیطی
۱,۱۳۴,۱۰۰	۱,۱۲۳,۳۴۴	ضربه
۸۲۶,۲۲۰	۸۲۶,۴۵۰	ارتعاش محیطی
۸۱۶,۹۲۰	۸۱۶,۲۷۹	ضربه

۶- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از ارتعاش کابل های پل کابلی ابریشم تحت اثر ارتعاش محیطی و ضربه، نیروی کشش کابل ها بدست آمده است.

۱- نیروی کشش کابل ها به هر دو روش توضیح داده شده در مقاله قابل محاسبه می باشد، ولی از آنجائیکه فرکانس های مود های بالا قابل شناسایی می باشند، می توان اطمینان حاصل کرد که روش رشته تیر [2] تقریب بهتری برای محاسبه نیروی کشش می باشد.

۲- برای کابل هایی که در آنها شکم کابل قابل ملاحظه نمی باشد، هر دو روش کشش کابل را به طور مناسبی می تواند بدست آورد.

۳- استفاده از حسگر های بی سیم امکان انجام و برآورد سریع نیروی کشش کابل را فراهم می کند.

۴- برآورد نیروی کشش کابل پل های کابلی به بهره بردار این اطمینان را می دهد تا از شرایط و وضعیت پل قبل از وقوع حادثه ای مطلع شود.

در خاتمه، نویسندگان از آقای دکتر کامران رحمتی شادباد و سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران و همچنین شرکت نوسازی اراضی عباس‌آباد بابت هماهنگی‌های انجام شده در تهیه اطلاعات پل و فراهم کردن شرایط انجام اندازه‌گیری بر روی پل ابریشم تهران، کمال تشکر را دارد.

مراجع

1. Byeong Hwa Kim, Taehyo Park, Hyunyang Shin and Tae-Yang Yoon, A Comparative Study of the Tension Estimation Methods for Cable Supported Bridges, *Steel Structures* 7 (2007) 77-84.
2. Shimada, T., Kimoto, K. and Narui, S. (1989). Study on estimating tension of tied hanger rope of suspension bridge by vibration method, *Proc. JSCE*, 404(I-11), pp. 455-458.
3. H. Zui, T. Shinke, Y.H. Namita, Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method, *Journal of Structural Engineering*, ASCE 122 (6) (1996) 651-656
4. Russell, J.C. and Lardner, T.J. (1998). Experimental determination of frequencies and tension for elastic cables, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 124(10), pp. 1067-1072.
5. Wei-Xin Ren, Gang Chen, Wei-Hua Hu, Empirical formulas to estimate cable tension by cable fundamental frequency, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 20, No. 3 (2005) 363-380.
6. Zhi Fang and Jian-qun Wang, Practical Formula for Cable Tension Estimation by Vibration Method, *Journal of Bridge Engineering (ASCE)*, Volume 17, Issue 1 (2010)
7. <https://www.beanair.com/index.html>