

Evaluation of the effect of ambient temperature on the natural frequency of bridge structures (Case study: Tehran)

Hadiseh khooyeh¹, Mussa Mahmoudi^{2*}, Amir Zayeri Baghlani Nejad³

1- M.A student, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

ABSTRACT

In many bridge health monitoring systems, the change in natural frequency is considered as an important warning for the existence or initiation of damage in the structure. Meanwhile, the ambient temperature can have a significant effect on the natural frequency of the bridge. If the investigated bridge is located in an area with extreme temperature changes, the measured natural frequency may show different values at different times and thus cause errors in the damage detection system. This issue reveals the necessity of studying and investigating the effect of temperature on the natural frequency of bridges in different geographical regions with different climates. This article studies the effect of temperature on the natural frequency of bridges in Tehran metropolis. In this regard, the natural frequency of three steel bridges in the city and one concrete bridge located on highway Road in the outskirts of the city was measured during one year and at different hours of the day and night. To do this, the sensors embedded in smartphone and a sensitive accelerometer were used. In the next step, the frequencies obtained from the experiments were analyzed and studied statistically. Examining the results showed that the environmental temperature changes in Tehran can cause frequency changes of about 12% for steel bridges and frequency changes of about 0.5% for concrete bridges. The results of this research show that considering the effect of temperature in health monitoring systems based on modal information for bridges with steel materials is much more important than existing concrete bridges in Tehran.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 December 2023

Revise Date: 11 March 2024

Accept Date: 18 April 2024

Keywords:

Modal analysis
Natural frequency
Bridge vibration
Temperature
Accelerometer

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.433105.3316>

*Corresponding author: Mussa Mahmoudi Sahebi
Email address: m.mahmoudi@sru.ac.ir

ارزیابی تاثیر دمای محیط بر فرکانس طبیعی سازه پل‌ها (مطالعه موردی: شهر تهران)

حدیثه خویه^۱، موسی محمودی صاحبی^{۲*}، امیر زایری بغلانی نژاد^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- استاد گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۳- استادیار گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

چکیده

در بسیاری از سیستم‌های پایش سلامت پل‌ها، تغییر در فرکانس طبیعی به عنوان یک هشدار مهم برای وجود و یا شروع آسیب در سازه تلقی می‌شود. این در حالی است که دمای محیط می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر فرکانس طبیعی پل داشته باشد. اگر پل مورد بررسی در یک منطقه با تغییرات شدید دمایی قرار داشته باشد، ممکن است فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده مقادیر متفاوتی را در زمان‌های مختلف نشان داده و در نتیجه باعث بروز خطا در سیستم شناسایی آسیب گردد. این موضوع ضرورت مطالعه و بررسی اثر دما بر فرکانس طبیعی پل‌ها در مناطق مختلف جغرافیایی با اقلیم متفاوت را آشکار می‌سازد. این مقاله مسئله تاثیر دما بر فرکانس طبیعی پل‌ها در کلان شهر تهران را مورد مطالعه و تحقیق قرار می‌دهد. در این راستا، فرکانس طبیعی سه پل فلزی درون شهری و یک پل بتنی واقع در آزاد راه حومه شهر در طول یکسال و در ساعات مختلفی از شبانه روز اندازه‌گیری شد. برای انجام اینکار از سنسورهای موجود در گوشی تلفن همراه و نیز از شتاب سنج صنعتی فوق حساس کمک گرفته شد. در مرحله بعد، فرکانسهای بدست آمده از آزمایشها مورد بررسی و مطالعه آماری قرار گرفت. بررسی نتایج نشان داد که تغییرات دمای محیطی شهر تهران، می‌تواند باعث بروز تغییرات فرکانسی در حدود ۱۲ درصد برای پل‌های فلزی و تغییرات فرکانسی در حدود ۰/۵ درصد برای پل‌های بتنی گردد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که لحاظ اثر دما در سیستم‌های پایش سلامت مبتنی بر اطلاعات مودال برای پل‌های با مصالح فولادی از اهمیت بسیار بالاتری نسبت به پل‌های بتنی موجود در شهر تهران برخوردار است.

کلمات کلیدی: آنالیز مودال، فرکانس طبیعی، ارتعاش پل، دما، شتاب سنج

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.433105.3316	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.433105.3316	۱۴۰۳/۱۰/۳۰	۱۴۰۳/۰۱/۳۰	۱۴۰۳/۰۱/۳۰	۱۴۰۲/۱۲/۲۱	۱۴۰۲/۱۰/۰۹
				*نویسنده مسئول:		
				موسی محمودی صاحبی		
				m.mahmoudi@sru.ac.ir		پست الکترونیکی:

۱- مقدمه

پل‌ها یکی از زیرساخت‌های مهم در شبکه حمل و نقل شهری هستند که پایش سلامت آنها به منظور تصمیم‌گیری برای تعمیر و نگهداری به موقع سازه از اهمیت بسزایی برخوردار است. روش‌های مختلفی برای پایش سلامت پل‌ها و شناسایی آسیب در آنها توسط محققین پیشنهاد شده است [۱]. یکی از این تکنیک‌ها که بطور وسیعی مورد علاقه مهندسان پایش سلامت است، روش‌های متکی بر اطلاعات مودال سازه به ویژه روش استفاده از فرکانس‌های طبیعی پل می‌باشد [۲]. فرکانس‌های طبیعی پل‌ها به آسانی قابل اندازه‌گیری بوده و جزء مشخصات ذاتی این نوع سازه‌ها به شمار می‌روند. هر نوع تغییری در وضعیت سلامت پل می‌تواند باعث وجود آمدن تغییرات در فرکانس‌های طبیعی به ویژه فرکانس اصلی پل شود. بنابراین می‌توان از این خصوصیت به عنوان هشدار برای احتمال وقوع و یا شروع آسیب در سازه پل بهره جست. علیرغم مزیت‌های استفاده از فرکانس طبیعی در پایش سلامت سازه پل‌ها، روش مذکور نیز با دشواریها و محدودیت‌هایی همراه است. یکی از این محدودیت‌ها، حساسیت فرکانس‌های طبیعی پل به دمای محیط است. به بیان دیگر، تغییرات دما باعث تغییر در فرکانس‌های اصلی سازه می‌شود که این امر می‌تواند تشخیص نادرست آسیب را در فرایند پایش سلامت سازه پل به همراه داشته باشد. به دلیل اهمیت موضوع، تحقیقات مختلفی توسط پژوهشگران در این زمینه انجام شده است که در ادامه به مرور آنها پرداخته می‌شود.

بر اساس یک آزمایش میدانی، مورتی و رودر ارتعاش عرشه یک پل را در شرایط دمایی مختلف مورد بررسی قرار دادند [۳]. این محققین با استفاده از مدل تحلیلی و مقادیر اندازه‌گیری شده، نشان دادند که عرشه پل مورد مطالعه به دلیل تغییرات دمایی، دچار انبساط و انقباض قابل توجهی می‌شود و این تغییرات هندسی تاثیر چشمگیری بر اطلاعات مودال اندازه‌گیری شده در شرایط دمایی مختلف دارد. دوبلینگ و فرار گزارش نمودند که اولین فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده پل کانیون در طول یک شبانه روز دارای تغییراتی در حدود ۵ درصد است [۴]. آسکه‌گارد و موسینگ، فرکانس‌های طبیعی یک پل عابر پیاده بتن مسلح با سه دهانه را در یک دوره ۳ ساله مورد بررسی قرار دادند [۵]. در این آزمایش، تغییراتی در حدود ۱۰ درصد بطور متناوب در هر سال مشاهده شد. ساون در یک آزمایش میدانی بر پل دره آلاموسا، تغییرات سه فرکانس طبیعی اول سازه را در طول یک شبانه روز با ۲۲ درجه تغییرات دمایی، به ترتیب ۴.۷، ۶.۶ و ۵ درصد برآورد نمود [۶]. محقق مذکور آزمایش مشابهی را برای فرکانس‌های طبیعی پل I-40 انجام داد و تغییرات بسیار کمتری را مشاهده کرد.

تجربیات بدست آمده از تحقیقات، پژوهشگران را برای پیدا کردن راهکارهایی جهت ارتباط اطلاعات مودال سازه با دمای محیط تشویق نمود. نی و همکاران، یک شبکه عصبی مصنوعی را جهت ارتباط دادن فرکانس‌های طبیعی پل کابلی تینگ کاو در هنگ کنگ با دمای محیط آموزش دادند [۷]. پیترز به کمک اطلاعات بدست آمده از پایش سلامت پل Z24-Bridge در طول مدت یکسال و بهره‌گیری از روش رگرسیون خطی، معیاری برای شناسایی شروع آسیب در پل مذکور با توجه به تغییرات فرکانس ارائه نمود [۸]. پیترز و دی روک اطلاعات مودال یک پل در سوئیس را به مدت ۱۰ ماه مورد بررسی قرار دادند و با ایجاد آسیب‌های مصنوعی در زمانهای مختلف، دریافتند که تغییرات بیش از ۱۰ درصد برای پل مذکور به معنی شروع آسیب در سازه می‌باشد [۹]. منسون از واریانس داده‌های بدست آمده از پایش سلامت یک پل استفاده نمود و با استفاده از الگوریتم تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA) آسیب‌های پل مورد مطالعه در حالت‌های مختلف دمایی را طبقه بندی نمود [۱۰]. کولا تلاش نمود تا از روش تحلیل عاملی (factor analysis) برای وابسته نمودن چهار فرکانس طبیعی یک پل بتنی به دمای محیط بهره گیرد [۱۱]. وایت و همکاران، با پایش یک پل مرکب بتنی- فولادی در لوکزامبورگ به مدت ۴ سال اثر همزمان دو عامل دما و سالخوردگی سازه پل را بر فرکانس‌های طبیعی آن مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. لیانگ و همکاران، تلاش نمودند که با ادغام فرکانس‌های بدست آمده در شرایط دمایی مختلف، به شناسایی آسیب در پل بپردازند. آنها از الگوریتم هم‌انباشتگی برای ترکیب خطی فرکانس‌های بدست آمده در شرایط دمایی متفاوت استفاده نمودند و نشان دادند که دنباله ثابت بدست آمده نسبت به تغییرات دمای محیط حساس نبوده و می‌توان از آن برای تشخیص آسیب در پل بهره جست. این محققین رابطه پیشنهادی را بر اساس یک مدل عددی پل خرابی فولادی ارائه نمودند و با شبیه‌سازی عددی نشان دادند که رابطه آنها بطور مستقل از دما قادر به شناسایی آسیب در پل مذکور می‌باشد [۱۳]. اخیراً ژنگ و همکاران در یک پژوهش تلاش نمودند که اثر تغییرات دمایی بر اطلاعات مودال بکار رفته در شناسایی آسیب در پایه‌های یک پل را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و تکنیک آماری بیزین کاهش دهند [۱۴]. با توجه به اهمیت موضوع اثر تغییرات

دما بر اطلاعات مودال سازه پل‌ها، مرور منابع کاملی توسط بوراح و همکاران در سال ۲۰۲۱ در این زمینه صورت پذیرفته است [۱۵]. بطور کلی، مرور منابع انجام شده در مقاله حاضر نشان می‌دهد که علیرغم تحقیقات انجام شده در زمینه ارتباطات تاثیرات دما بر فرکانس‌های طبیعی پل، هنوز رابطه عمومی و جامعی در این خصوص ارائه نشده است. به نظر می‌رسد که علاوه بر شکل هندسی و نوع مصالح بکار رفته در پلها، شرایط اقلیمی و محیطی ساختگاه سازه مورد مطالعه از عوامل مهم بر رابطه بین دمای محیط و فرکانس اصلی پل‌ها باشد. با توجه به این موضوع، ضرورت دارد برای هر منطقه جغرافیایی با اقلیم مشخص، تحقیقاتی در این زمینه صورت پذیرد و اطلاعات فنی در خصوص رابطه بین دما و فرکانس غالب پل‌های منطقه مورد نظر در قالب فعالیت‌های پژوهشی جمع‌آوری شود تا در پروژه‌های پایش سلامت مربوط به آن منطقه قابل استفاده باشد. پژوهش حاضر در این راستا و با هدف بررسی اثر دمای محیطی شهر تهران بر فرکانس طبیعی پل‌های این شهر صورت گرفته است که در بخش‌های بعدی مقاله به شرح آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل از آنها پرداخته می‌شود. یکی از موضوعات مهم در انجام تست‌های ارتعاشی، استفاده از تکنولوژی‌های نوظهور به منظور کاهش هزینه‌های آزمایش می‌باشد. استفاده از حسگرهای موجود در گوشی‌های تلفن همراه جهت ثبت و شناسایی اطلاعات دینامیکی سازه‌ها به عنوان یک روش نوین در این زمینه شناخته می‌شود. در سالهای اخیر، تحقیقات متنوعی توسط پژوهشگران در زمینه استفاده از گوشی‌های تلفن همراه جهت شناسایی اطلاعات مودال سازه‌ها انجام شده است. یان یو و همکاران از جمله اولین محققینی بودند که شناسایی اطلاعات دینامیکی یک پل کابلی را با استفاده از حسگرهای تلفن همراه مورد مطالعه قرار دادند [۱۶]. کونگ و همکاران مساله استفاده از این نوع حسگرها را برای ثبت ارتعاشات سازه‌های ساختمانی مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. الحاتب و همکاران در سال ۲۰۱۹ روشی ارائه نمودند که به کمک آن بتوان فرکانسهای طبیعی پل‌ها را از داده‌های ارتعاشی ثبت شده توسط حسگرهای موجود در گوشی‌های همراه استخراج نمود [۱۸]. مرور کاملی از تحقیقات انجام شده در این زمینه را می‌توان در مراجع [۱۹، ۲۰] یافت. در این مقاله به عنوان یکی دیگر از اهداف پژوهش، تلاش گردید که موضوع اندازه‌گیری فرکانس‌های پل‌های مورد مطالعه با استفاده از حسگرهای تلفن همراه نیز مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا، ارتعاشات سازه‌های مذکور به دو روش حسگر تلفن همراه و سنسورهای صنعتی فوق حساس اندازه‌گیری و دقت نتایج بایکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت که در بخش‌های بعدی مقاله به آنها پرداخته خواهد شد. بطور کلی، این مقاله در شش بخش تنظیم و نگارش شده است: بخش اول مربوط به مقدمه مقاله می‌باشد. در بخش دوم به معرفی روش‌های آنالیز مودال مورد استفاده در تحقیق پرداخته می‌شود. در بخش سوم تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌های میدانی و مشخصات پل‌های مورد مطالعه تشریح می‌گردد. در بخش چهارم، نحوه انجام آزمایش‌ها بیان خواهد شد. داده‌های بدست آمده از آزمایش‌ها در بخش پنجم مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت و در بخش ششم به جمع بندی نتایج بدست آمده از این تحقیق پرداخته می‌شود.

۲- روش‌های آنالیز مودال مورد استفاده در تحقیق

هدف از پژوهش حاضر، مطالعه اثر دما بر فرکانس‌های طبیعی مستخرج از داده‌های ارتعاشی بدست آمده از آزمایش‌های میدانی برخی پل‌های واقع در تهران می‌باشد. برای این منظور بایستی به کمک آزمایش‌های ارتعاشی پاسخ شتاب سازه را اندازه‌گیری نموده و با استفاده از روش‌های رایج آنالیز مودال، فرکانس‌های پل مورد مطالعه را استخراج نمود. در این بخش بطور خلاصه به معرفی روش‌های آنالیز مودال مورد استفاده در تحقیق پرداخته می‌شود. برای استخراج اطلاعات مودال سازه پل‌ها از پاسخ‌های ارتعاشی آنها می‌توان از آزمایش بار ضربه‌ای و یا ارتعاش محیطی بهره جست [۲۱]. در روش بار ضربه‌ای، یک جرم از ارتفاع مشخصی رها می‌شود تا بر روی عرشه پل سقوط کرده و باعث ایجاد ارتعاش آزاد در آن شود. جرم مورد استفاده بایستی به اندازه‌ای باشد که به سادگی بتواند در پل لرزش محسوسی را ایجاد کند، بنابراین استفاده از روش مذکور تنها برای پل‌های کوچک و سبک مناسب است. مزیت مهم روش بار ضربه‌ای، بزرگ بودن دامنه سیگنال‌های پاسخ بدست آمده نسبت به دامنه نویز موجود در این سیگنال‌هاست. این موضوع بطور قابل توجهی باعث کاهش خطا در نتایج بدست آمده از آنالیز مودال می‌شود. مزیت مهم دیگر روش بار ضربه‌ای این است که برای انجام آن نیازی به تجهیزات گران قیمت نظیر سنسورهای فوق حساس نمی‌باشد و به کمک شتاب سنج‌های موجود در گوشی‌های تلفن همراه نیز می‌توان ارتعاش سازه را اندازه‌گیری نمود [۲۰]. از آنجایی که بخشی از پل‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر پل‌های عابر پیاده فلزی بودند، برای تحریک و استخراج اطلاعات مودال آنها از روش بار ضربه‌ای استفاده شد. همچنین برای ثبت ارتعاش آزاد پل‌های مذکور، از شتابسنج‌های موجود در گوشی

تلفن همراه بهره گرفته شد. در صورتیکه ابعاد و جرم پل مورد مطالعه نسبتاً بزرگ باشد، به سادگی نمی‌توان روش بار ضربه‌ای را بکار گرفت و در چنین مواردی استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی توصیه می‌شود [۲۲]. در این روش تعدادی سنسور فوق حساس را بر روی نقاط مناسبی از سازه پل نصب می‌کنند و پاسخ سازه به ارتعاشات ناشی از عوامل مختلف محیطی مانند باد و تردد وسائط نقلیه را اندازه‌گیری می‌نمایند. یکی از پل‌های مورد مطالعه در این تحقیق، پل بتنی سه دهانه واقع در بزرگراه تهران شمال است که به دلیل ابعاد بزرگ پل، از روش ارتعاش محیطی و نصب سنسورهای فوق حساس برای استخراج فرکانس‌های طبیعی آن استفاده شد. پس از اندازه‌گیری و ثبت سیگنال‌های پاسخ سازه، فرکانس‌های طبیعی پل را بایستی به کمک یکی از روش‌های آنالیز مودال بدست آورد. در دو دهه اخیر، تکنیک‌های آنالیز مودال متنوعی توسط محققین پیشنهاد و ارتقاء یافته‌اند که بطور کلی می‌توان آنها را به دو دسته روش‌های حوزه زمانی و حوزه فرکانسی تقسیم بندی نمود. در روش‌های حوزه زمانی، عملیات تجزیه و تحلیل مستقیماً بر روی سیگنال‌های شتاب انجام می‌گیرد، اما برای استفاده از روش‌های حوزه فرکانسی ابتدا پاسخ‌های ارتعاشی بدست آمده از آزمایش‌های میدانی با استفاده از تبدیل فوریه به فضای فرکانسی انتقال داده می‌شوند. معمولاً در مسائل عملی حداقل از دو روش ویا بیشتر برای استخراج اطلاعات مودال استفاده می‌شود تا با مقایسه نتایج بدست آمده بتوان از صحت آنها اطمینان حاصل نمود. در مقاله حاضر از روش جستار قله به عنوان یک روش مبتنی بر حوزه فرکانسی برای تعیین فرکانس‌های طبیعی پل‌های مورد مطالعه بهره گرفته شد. در روش مذکور چگالی طیف توان سیگنال زمانی پاسخ شتاب محاسبه می‌شود، سپس فرکانس‌های اصلی سازه به کمک قله‌های ظاهر شده در نمودارهای مربوطه شناسایی می‌شوند. در این تحقیق برای اطمینان از فرکانس‌های شناسایی شده به روش جستار قله، از دو روش متداول تجزیه دامنه فرکانسی توسعه یافته^۱ (EFDD) و شناسایی زیرفضای تصادفی^۲ (SSI) استفاده شد. روش‌های مذکور به ترتیب در گروه تکنیک‌های حوزه فرکانسی و حوزه زمانی قرار می‌گیرند که مبانی تئوریک آنها به تفصیل در مراجع [۲۳، ۲۴] تشریح شده است. برنامه ARTEMIS، یک نرم افزار تجاری ساخت گروه^۳ SVIBS است که قادر به انجام آنالیز مودال سیگنال‌های پاسخ ارتعاشی سازه‌ها به روش‌های مختلف می‌باشد [۲۵]. در این تحقیق به منظور شناسایی فرکانس‌های اصلی پل‌های مورد مطالعه به روش‌های EFDD و SSI، از نرم افزار مذکور بهره گرفته شد.

۳- معرفی پل‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری ارتعاش

هدف از این تحقیق، بررسی اثر تغییرات دمای محیطی تهران بر فرکانس‌های طبیعی پل‌های این شهر می‌باشد. برای این منظور سه پل فلزی و یک پل بتنی در نظر گرفته شدند و اطلاعات مودال آنها به مدت یکسال در فصول و دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. در این بخش به شرح مشخصات پل‌های مذکور و نیز دستگاه‌های مورد استفاده جهت اندازه‌گیری ارتعاش آنها پرداخته می‌شود.

۳-۱- مشخصات پل‌های فلزی مورد مطالعه

پل‌های فلزی مورد آزمایش در این تحقیق، سه پل عابر پیاده هستند که از نقاط مختلف سطح شهر تهران انتخاب شده‌اند. شکل ۱ تصویری از پل‌های مذکور را نشان می‌دهد. مطابق شکل، سازه تشکیل دهنده این پل‌ها خرابایی شکل بوده و کلیه المان‌های تشکیل دهنده آنها پروفیل‌های لوله‌ای هستند. اتصالات اعضای این پل‌ها بصورت جوش مستقیم اجرا شده است. از آنجایی که در مراحل بعدی نیاز بود که سازه این پل‌ها توسط نرم افزار SAP2000 مدل‌سازی گردد، لذا ابعاد آنها اندازه‌گیری شد.

¹ Enhanced Frequency Domain Decomposition

² Stochastic Subspace Identification

³ Structural Vibration Solutions



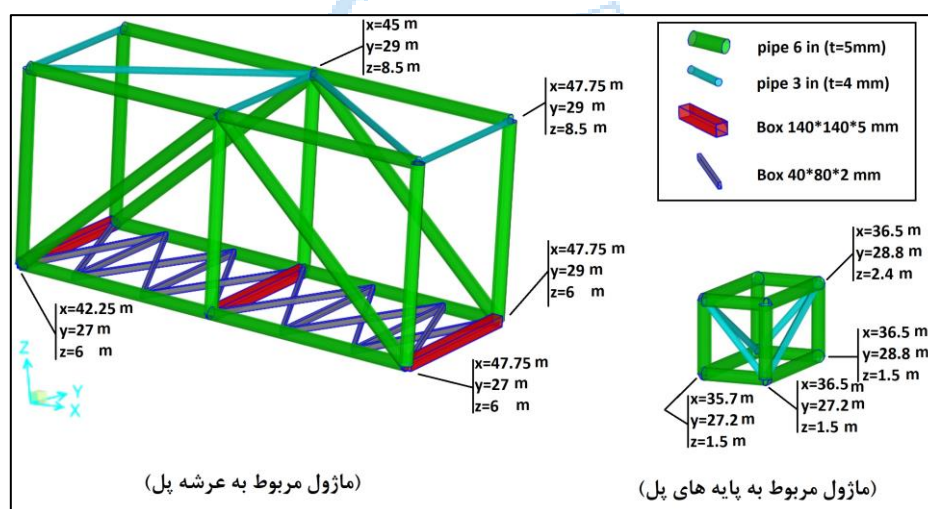
(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱: پل های فلزی مورد مطالعه

شکل ۱-الف پل عابر پیاده اول را نشان می‌دهد. طول کل این پل ۹۰ متر و دارای سه دهانه به طول‌های تقریبی دهانه اول ۳۵ متر دهانه دوم ۳۵ متر و دهانه سوم ۲۰ متر می‌باشد. عرض مفید عرشه برابر ۱.۸ متر و ارتفاع آن از کف تمام شده عرشه پل تا سطح زیرین پایینترین المان پوشش سقف ۲.۵ متر است. لوله‌های استفاده شده با قطر ۶ اینچ و عرض پلکان آن ۱.۸ متر می‌باشد. تصویر پل عابر دوم در شکل ۱-ب نمایش داده شده است. طول کلی این پل ۵۰ متر با سه دهانه به طول‌های حدوداً ۱۵، ۲۰ و ۱۵ متر می‌باشد. عرض مفید عرشه پل عابر پیاده دوم برابر ۱.۸ متر ارتفاع آن از کف تمام شده عرشه پل تا سطح زیرین پایینترین المان پوشش سقف ۲.۵ متر است. لوله‌های استفاده شده در این پل نیز دارای قطر ۶ اینچ هستند و ارتفاع ستون‌های پل از روی پی تا زیر خرپای عرشه برابر با ۶ متر می‌باشد. شکل ۱-ج پل عابر پیاده سوم را نمایش می‌دهد. طول کل پل ۵۰ متر می‌باشد که از سه دهانه ۲۰ و ۲۵ و ۵ متری تشکیل شده است. عرض عرشه پل ۲ متر و ارتفاع کف عرشه تا سقف خرپای فلزی ۲.۵ متر در نظر گرفته شده است. ارتفاع ستون‌ها از روی پی تا زیر خرپا مجموعاً ۶.۵ متر می‌باشد. بیشترین ارتفاع سقف سازه از سطح تراز کف به ۹ متر می‌رسد. در این پل نیز از پروفیل‌های لوله‌ای به قطر ۶ اینچ استفاده شده است. پل‌های فلزی مورد مطالعه در این تحقیق به صورت مدولار اجرا شده‌اند. به این معنی که عرشه و پایه‌های هر پل از اتصال ماژول‌های مشابه ساخته شده‌اند. شکل ۲ مشخصات هندسی ماژول‌های بکار رفته در عرشه و پایه‌های پل‌های مورد مطالعه در تحقیق را نشان می‌دهد.



(ماژول مربوط به عرشه پل)

(ماژول مربوط به پایه های پل)

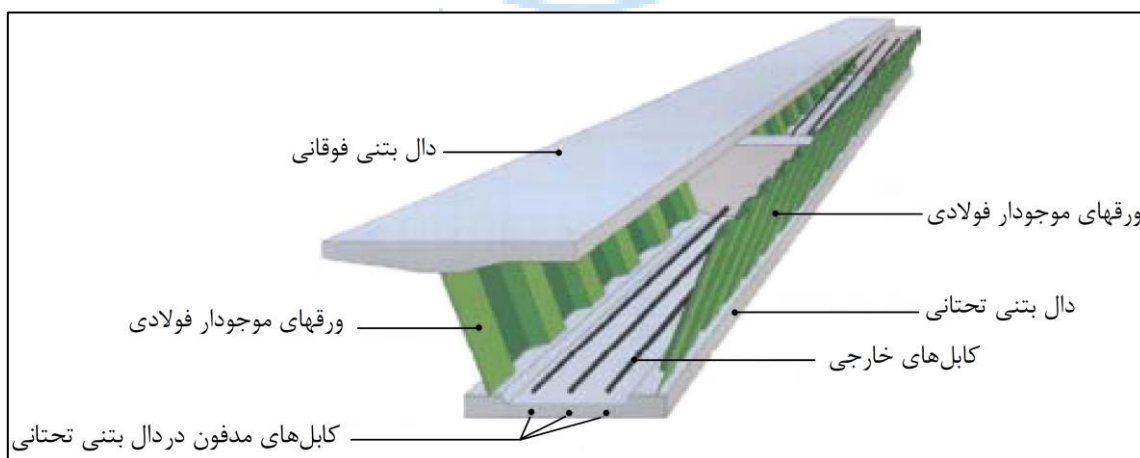
شکل ۲: مشخصات هندسی ماژول های بکار رفته در پل های فلزی مورد مطالعه

۳-۲- مشخصات پل بتنی مورد مطالعه

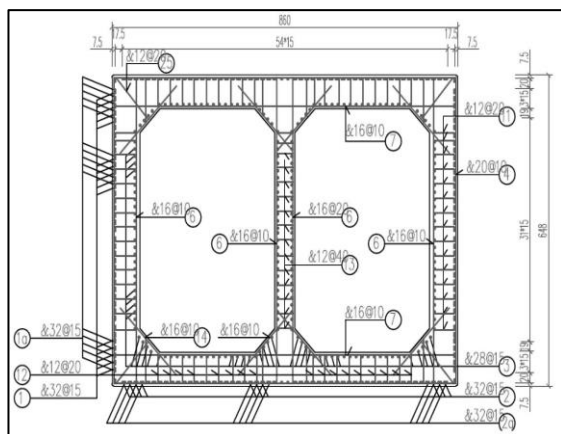
پل بتنی مورد مطالعه در این تحقیق، یکی از پل‌های آزاد راه تهران-شمال است که تصویر آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که از تصویر مشخص است، پل مذکور بصورت یک سازه دوقلو (پل رفت و برگشت) است که هر کدام با طول ۳۱۹ متر و عرض ۱۳/۱ متر دو خط عبوری را در خود جای می‌دهند. این پل‌ها در سه دهانه به طول‌های ۸۳، ۱۵۳ و ۸۳ متر با تعداد دو عدد پایه میانی مطابق شکل اجرا شده‌اند. دو پایه پل به دلیل شرایط توپوگرافی منطقه از نظر ارتفاع با یک دیگر متفاوت هستند که ارتفاع پایه کوتاهتر به ۲۸ متر و ارتفاع پایه بلند تر به ۶۵/۵ متر می‌رسد. عرشه این پل از نوع باکس بتنی مختلط با ورق‌های فولادی با ارتفاع متغیر می‌باشد. دو نوع کابل پیش‌تنیده اولی بصورت مدفون در بتن و دیگری بصورت آزاد در فضای داخلی باکس برای نگهداری عرشه این پل مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۴ نمایی شماتیک از جزئیات عرشه پل آزادراه تهران-شمال را نشان می‌دهد. سطح مقطع مربوط به عرشه و پایه‌های پل متغیر می‌باشد. در شکل ۵ به ترتیب مشخصات هندسی سطح مقطع عرشه در محل پایه‌های پل و سطح مقطع پایه کوتاهتر در وسط ارتفاع آن نشان داده شده است.



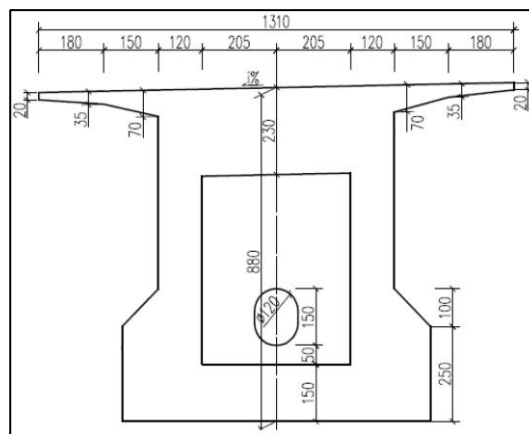
شکل ۳: نمایی از پل بتنی مورد مطالعه در تحقیق



شکل ۴: نمای شماتیک از جزئیات باکس عرشه پل آزادراه تهران-شمال



ب- مقطع پایه کوتاهتر پل در وسط ارتفاع آن



الف- مقطع عرشه پل در محل پایه ها

شکل ۵: ابعاد هندسی مربوط به مقاطع عرشه و پایه پل آزاد راه تهران-شمال

۳-۳- تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری ارتعاش

در این پژوهش برای برداشت داده‌های ارتعاشی به منظور تعیین فرکانس‌های اصلی سازه پل‌های مورد مطالعه، از دو روش استفاده شد. در روش اول از سنسورهای موجود در گوشی‌های تلفن همراه و در روش دوم از شتاب‌سنج‌های دیجیتال فوق حساس ساخت شرکت لرزه نگار پارسیان استفاده گردید. شکل ۶ نمایی از تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



ب) شتاب سنج سه محوره فوق حساس



الف) سنسور موجود در گوشی تلفن همراه

شکل ۶: تجهیزات مورد استفاده در تحقیق جهت اندازه‌گیری و ثبت سیگنال‌های شتاب سازه

شتاب سنج‌های موجود در گوشی‌های تلفن همراه به دلیل ارزان و در دسترس بودن، ابزار بسیار مناسبی برای اندازه‌گیری و ثبت پاسخ‌های ارتعاشی سازه‌ها می‌باشند بطوریکه در سالهای اخیر و با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از این ابزار توجه محققین را به خود جلب نموده است [۲۰]. در تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری و ثبت پاسخ ارتعاشی پل‌های فلزی مورد مطالعه، از حسگر شتاب‌سنج موجود در گوشی سامسونگ مدل A32 استفاده شد. حسگر موجود در این نوع گوشی دارای حساسیتی در حدود $2.4 \times 10^{-3} m/s^2$ می‌باشد. با توجه به بزرگی دامنه ارتعاش پل‌های فلزی عابر پیاده، این مقدار از دقت برای ثبت سیگنال‌های پاسخ شتاب این نوع سازه‌ها کافی است. نرخ نمونه برداری سیگنال شتاب در این نوع گوشی برابر با $100 Hz$ بوده و بنابراین طبق قضیه نایکوئیست، فرکانس‌های کمتر از $50 Hz$ به سادگی

توسط آن قابل شناسایی خواهند بود [۲۶]. لازم به ذکر است که برای استفاده از حسگرهای موجود در گوشی مذکور، از برنامه Accelerometer ساخت گروه نرم‌افزاری Keuwlsoft استفاده شد [۲۷]. شکل ۳-الف نمایی از نرم افزار مذکور را نشان می‌دهد.

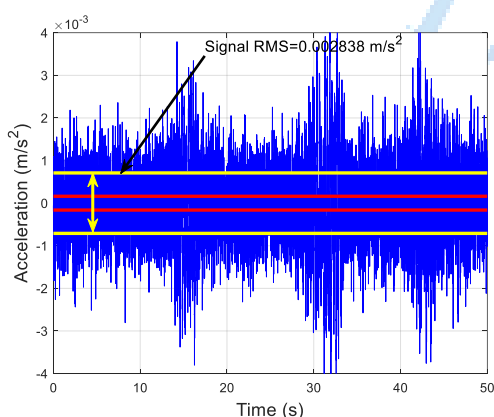
در این پژوهش برای ثبت اطلاعات ارتعاشی پل بتنی آزاد راه تهران-شمال، از شتاب‌سنج دیجیتال سه محوره تولید شرکت لرزه نگار پارسیان استفاده شد. شکل ۳-ب نمایی از شتاب‌سنج مذکور به همراه متعلقات آن را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری دستگاه مذکور کانت بوده که هر 254000 کانت معادل یک g شتاب می‌باشد و بنابراین حساسیت شتاب‌سنج مذکور در حدود $3.86 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ است. نرخ نمونه برداری این دستگاه برابر با 200 Hz است بنابراین به کمک آن می‌توان فرکانس‌های کمتر از 100 Hz را از سیگنال‌های ارتعاشات محیطی پل بتنی آزادراه تهران شمال استخراج نمود [۲۸].

۳-۴- بررسی دقت نتایج ثبت شده توسط حسگر گوشی تلفن همراه

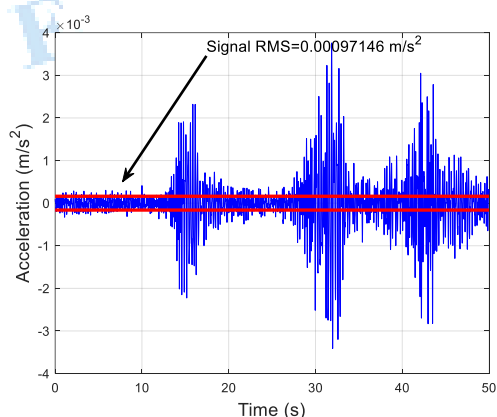
در این تحقیق پیش از آغاز تست‌های ارتعاشی بر روی پل‌های مورد مطالعه، نیاز بود که از دقت پاسخ‌های شتاب ثبت شده توسط حسگر تلفن همراه اطمینان حاصل شود. در این راستا به منظور اطمینان از نتایج بدست آمده از خروجی‌های تلفن همراه، آزمایش ثبت ارتعاش محیطی یک پل با استفاده از سنسور دیجیتال فوق حساس و نیز گوشی تلفن همراه انجام شد و نتایج دو روش با یکدیگر مقایسه گردید. شکل ۷ محل قرارگیری گوشی تلفن همراه و سنسور دیجیتال سه محوره فوق حساس را در کنار هم نشان می‌دهد.



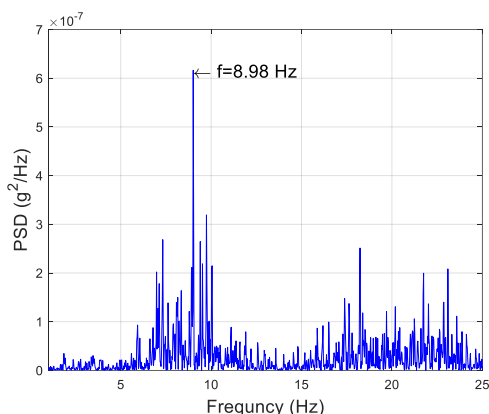
شکل ۷: آزمایش بررسی دقت نتایج حاصل از حسگر گوشی تلفن همراه



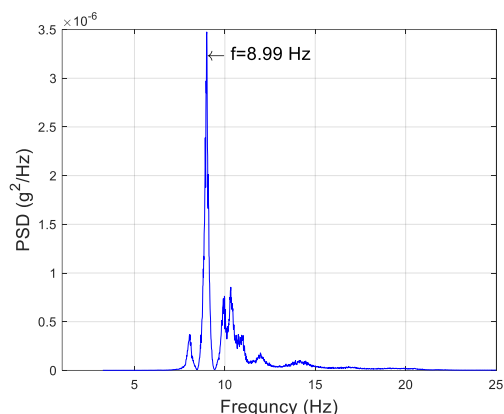
ب) پاسخ شتاب ثبت شده توسط حسگر گوشی



الف) پاسخ شتاب ثبت شده توسط شتاب‌سنج فوق حساس



د) چگالی طیف توان پاسخ ثبت شده توسط حسگر گوشی



ج) چگالی طیف توان پاسخ ثبت شده توسط شتابسنج فوق حساس

شکل ۸: نتایج آزمایش بررسی دقت حسگر گوشی در مقایسه با شتابسنج فوق حساس

پل مورد بررسی یکی از پلهای بتنی موجود در شهر تهران است (پل تقاطع بزرگراه کردستان-بلوار آزادگان) که هنگام عبور خودروها از روی آن، ارتعاشات محیطی پل توسط عابرین پیاده محسوس می‌باشد. برای انجام این مطالعه، پاسخ شتاب سازه پل به ارتعاش محیطی آن توسط هر دو دستگاه ثبت شد. شکل ۸ سیگنال‌های پاسخ شتاب ثبت شده توسط گوشی تلفن همراه و شتابسنج دیجیتال را در حوزه زمان و فرکانس نشان می‌دهد. به منظور مقایسه سیگنال‌ها در حوزه زمان، ریشه میانگین مربعات^۴ (RMS) داده‌ها روی نمودارها بصورت خطوط قرمز و زرد رنگ ترسیم شد. خطوط زرد رنگ مربوط به RMS داده‌های ثبت شده توسط شتابسنج فوق حساس می‌باشند. به منظور مقایسه بهتر، خطوط قرمز رنگ در هر دو نمودار سیگنال زمانی ترسیم شده‌اند. همانطور که انتظار می‌رود، میزان نویز موجود در سیگنال ثبت شده توسط حسگر گوشی خیلی بیشتر از نویز مربوط به داده‌های ثبت شده توسط شتابسنج فوق حساس می‌باشد. با این وجود پس از انجام عملیات اصلاحی بر روی داده‌های بدست آمده از حسگر گوشی و انتقال داده‌ها به حوزه فرکانس، مقدار فرکانس طبیعی پل مورد بررسی با دقت قابل قبولی منطبق بر نتایج حاصل از شتابسنج صنعتی بدست آمده است. بر اساس نتایج این مطالعه اطمینان حاصل شد که در محدوده ارتعاشات محسوس توسط انسان، با اطمینان کافی می‌توان از نتایج بدست آمده از سنسورهای بکار رفته در گوشی‌های تلفن همراه برای استخراج فرکانس‌های طبیعی استفاده نموده و در نتیجه هزینه آزمایش‌ها را بطور موثری کاهش داد.

۴- انجام آزمایش‌های میدانی

در این بخش آزمایش‌های ارتعاشی پل‌های مورد مطالعه تشریح می‌گردد. برای شناسایی فرکانس‌های طبیعی یک پل، می‌توان سازه آن را به روش طبیعی یا مصنوعی تحریک نموده و پاسخ شتاب ارتعاشی آنرا اندازه‌گیری و ثبت نمود. سپس با استفاده از روش‌های آنالیز مودال، فرکانس‌های طبیعی پل را از سیگنال‌های پاسخ شتاب سازه استخراج کرد. در این تحقیق برای شناسایی فرکانس‌های طبیعی اصلی پل‌های فلزی مورد مطالعه، از روش بار ضربه‌ای نامشخص استفاده شد. در روش مذکور یک جرم نسبتاً سنگین از ارتفاع مشخص رها شده و در اثر برخورد با عرشه پل باعث ایجاد ارتعاش آزاد در آن می‌گردد. با توجه به ابعاد و وزن پل‌های مذکور، دامنه ارتعاشی ایجاد شده در پل‌های فلزی مورد مطالعه نسبتاً بزرگ بوده و لذا برای ثبت پاسخ شتاب می‌توان از حسگرهای موجود در گوشی تلفن همراه استفاده نمود. محل نصب سنسور، محل اعمال بار ضربه‌ای و شدت ضربه وارده، سه نکته حائز اهمیت در آزمایش بار ضربه‌ای هستند. انتخاب محل مناسب برای قرار دادن حسگر تلفن همراه اولین موضوع مهم در این نوع آزمایش می‌باشد. از آنجایی که هدف این پژوهش، شناسایی فرکانس متناظر با مود طبیعی اول پل است، لذا بایستی حسگر در نقطه‌ای از سازه قرار داده شود که آن نقطه بیشترین مشارکت را در مود اول سازه پل داشته باشد. برای پیدا کردن چنین نقطه‌ای، مدل اجزاء محدود سازه پل‌های مورد مطالعه توسط نرم افزار SAP2000 ایجاد شد و با بررسی شکل مودهای طبیعی، مناسبترین نقطه برای ثبت ارتعاشات هر پل

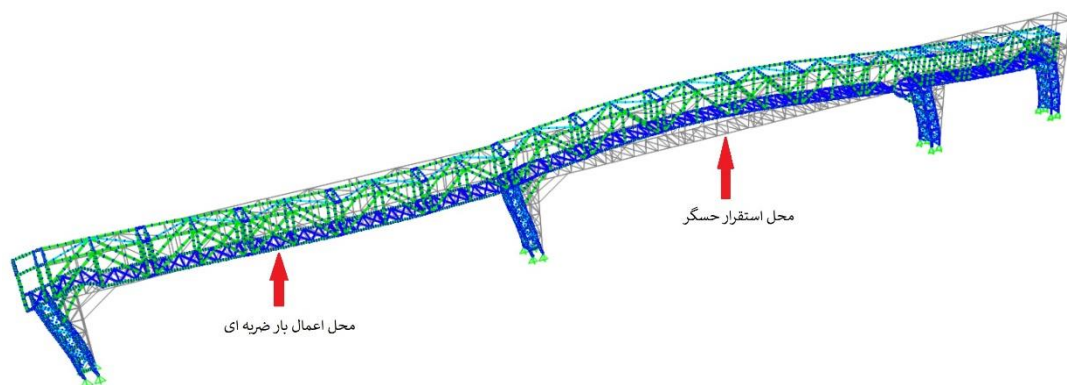
⁴ Root of the Mean Square

انتخاب گردید. نکته مهم دیگر در آزمایش بار ضربه‌ای، محل مناسب اعمال ضربه است. مکان ایجاد ضربه رابطه مستقیمی با پاسخ‌های بدست آمده از آزمایش بار ضربه‌ای دارد. به بیان دیگر، اعمال بار ضربه‌ای به نقاط مختلف پل باعث تحریک موده‌های متفاوتی از آن می‌شود. از آنجایی که هدف این پژوهش تعیین اولین فرکانس غالب پل در جهت قائم بود، بنابراین بایستی بار ضربه‌ای به نقطه‌ای از سازه اعمال می‌شد که مود ارتعاشی مذکور دچار بیشترین تحریک گردد. در این راستا، به منظور پیدا کردن محل مناسب اعمال ضربه‌ای از مدل اجزاء محدود پل‌های مربوطه استفاده شد. به این ترتیب با وارد نمودن بار ضربه‌ای به نقاط مختلف سازه، مناسبترین محل بارگذاری جهت تحریک حداکثر مود مذکور تعیین گردید. در خصوص رابطه بین شدت بار ضربه‌ای و فرکانس سازه نیز می‌توان گفت که در صورت اعمال بار ضربه‌ای شدیدتر، دامنه پاسخ ارتعاشی سازه افزایش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش دامنه نمودار پاسخ فرکانسی در مود غالب سازه شده و در نتیجه شناسایی آن مود را آسانتر می‌نماید.

در خصوص پل بتنی آزادراه تهران- شمال به دلیل ابعاد بزرگ و جرم بسیار بالا، امکان تحریک سازه توسط بار ضربه ای میسر نیست. بنابراین برای شناسایی فرکانسهای طبیعی این پل از پاسخ سازه به ارتعاشات محیطی بهره گرفته شد. از آنجایی که دامنه پاسخ شتاب پل مذکور به ارتعاشات محیطی بسیار کوچک است، برای ثبت سیگنالهای پاسخ از شتابسنج های فوق حساس معرفی شده در بخش سوم استفاده گردید. در ادامه به شرح کاملتر آزمایش‌های میدانی و نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود.

۴-۱- آزمایش ارتعاشی پل عابر پیاده اول

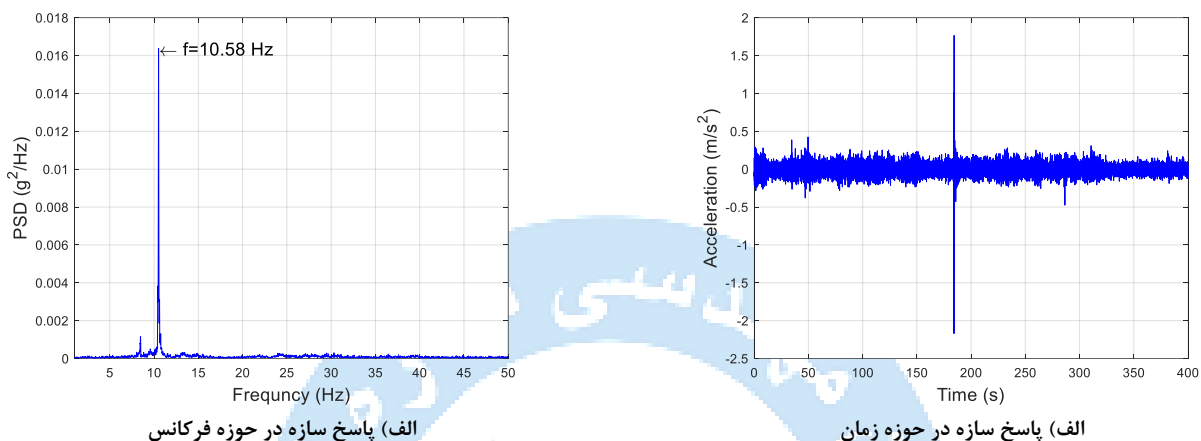
برای شناسایی فرکانس طبیعی پل عابر پیاده اول با استفاده از روش بار ضربه‌ای، ابتدا بایستی محل اعمال ضربه و ثبت پاسخ ارتعاش آزاد ناشی از آن مشخص شود. بنابراین پس از اندازه گیری ابعاد پل مذکور، مدل اجزاء محدود آن توسط نرم افزار SAP2000 ساخته شد و پس از بررسی شکل موده‌های سازه نقاط مورد نظر انتخاب شدند. نکته قابل توجه برای انتخاب نقاط مورد نظر این است که محل استقرار سنسور در نقطه‌ای با بیشترین دامنه ارتعاشی انتخاب می‌گردد. همچنین محل اعمال بار ضربه‌ای در نقطه‌ای انتخاب می‌شود که به اندازه کافی از محل استقرار حسگر گوشه دور باشد تا باعث جابجایی موضعی آن نشود.



شکل ۹: مدل اجزاء محدود پل فلزی اول و محل های اعمال بار ضربه ای و ثبت پاسخ ارتعاشی سازه

شکل ۹ نمایی از اولین مود خمشی در راستای قائم پل را به همراه نقاط انتخابی برای اعمال بار ضربه‌ای و ثبت پاسخ سازه نشان می‌دهد. پس از مشخص شدن نقاط مربوطه، آزمایش ارتعاشی در روزهای مختلفی از سال و در دماهای مختلف انجام شد و سیگنالهای پاسخ شتاب توسط حسگر گوشه به مدت ۴۰۰ ثانیه ثبت گردید. لازم به ذکر است که برای اطمینان از نتایج بدست آمده، آزمایش ضربه در هر نوبت چندین بار تکرار شد تا پس از انجام آنالیز مودال، میانگین فرکانس‌های بدست آمده در آن نوبت ملاک عمل قرار گیرد. پس از ثبت سیگنال‌های پاسخ شتاب، بایستی فرکانس‌های اصلی پل را با استفاده از روشهای آنالیز مودال بدست آورد. پیش از شروع آنالیز، لازم است که اصلاحاتی روی سیگنالهای ثبت شده انجام شود. اولین مورد، حذف میانگین داده‌ها به منظور اصلاح خط مبنای سیگنال می‌باشد. این کار با میانگین‌گیری از سیگنال و کم کردن میانگین بدست آمده از تک تک درایه‌های بردار زمانی انجام می‌شود. نتیجه این کار باعث

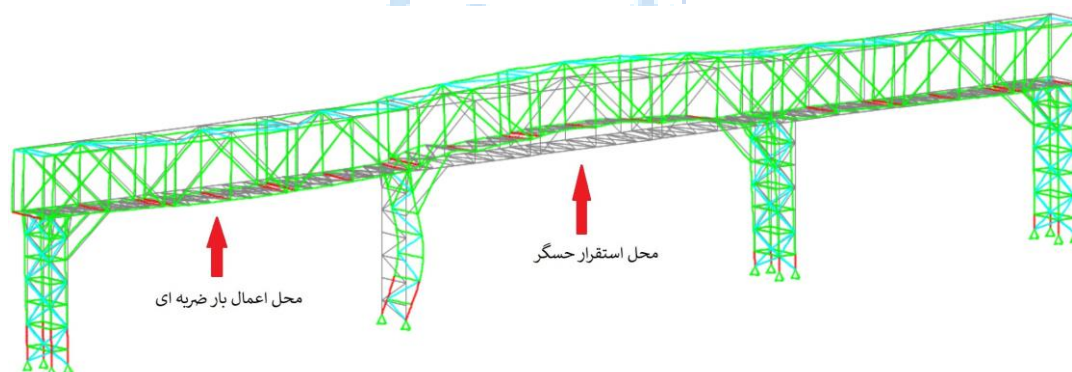
می‌شود که سیگنال اصلاح شده حول صفر نوسان کند. نویز موجود در پاسخ شتاب اندازه‌گیری شده باعث ورود فرکانس‌های ناخواسته در سیگنال می‌شود. این فرکانس‌ها معمولاً باعث ایجاد اعجاج در شکل سیگنال می‌گردند. برای حذف این فرکانس‌های مزاحم، پاسخ‌های شتاب اندازه‌گیری شده از یک فیلتر میانگذر باترورث با فرکانس‌های قطع ۰.۱ و ۵۰ هرتز عبور داده شدند. در نهایت فرکانس‌های طبیعی پل با استفاده از روش جستار قله تعیین شد و صحت مودهای شناسایی شده به دو روش EFDD و SSI در نرم افزار تجاری ARTeMIS مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۰ نمایی از نمودار پاسخ شتاب سازه را در حوزه زمان و فرکانس نشان می‌دهد. همانطور که در شکل می‌توان ملاحظه نمود، فرکانس غالب سازه در حدود ۱۰.۵۸ هرتز شناسایی شده است.



شکل ۱۰: یکی از سیگنال‌های پاسخ شتاب ارتعاش آزاد پل فلزی اول ثبت شده توسط حسگر گوشی تلفن همراه

۴-۲- آزمایش ارتعاشی پل عابر پیاده دوم

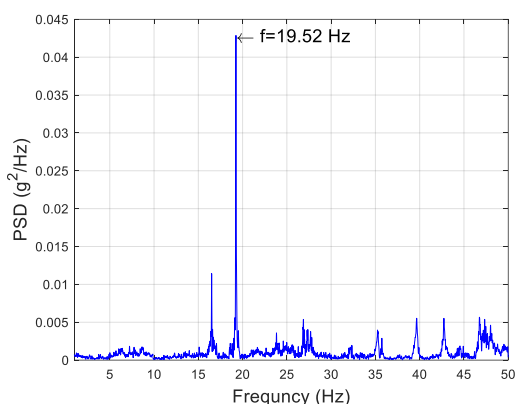
بطور مشابه، ابعاد پل عابر پیاده دوم اندازه‌گیری و مدل اجزاء محدود آن توسط نرم افزار SAP2000 ساخته شد تا با بررسی شکل مودهای آن، محل اعمال بار ضربه‌ای و محل برداشت داده‌های شتاب مشخص گردد. شکل ۱۱ نمایی از اولین مود خمشی در راستای قائم پل را به همراه نقاط انتخابی برای اعمال بار ضربه‌ای و ثبت پاسخ سازه نشان می‌دهد.



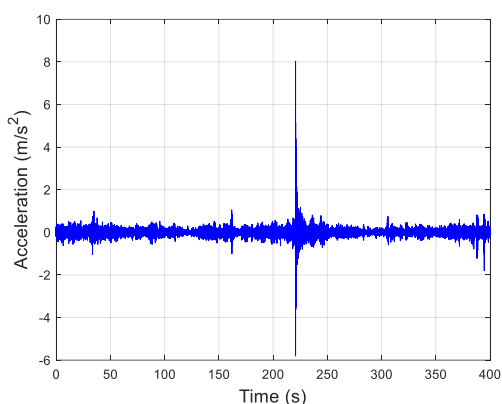
شکل ۱۱: مدل اجزاء محدود پل فلزی دوم و محل های اعمال بار ضربه ای و ثبت پاسخ ارتعاشی سازه

پس از انجام آزمایش در نوبت‌های مختلف، سیگنال‌های شتاب ناشی از ارتعاش آزاد پل به طول ۴۰۰ ثانیه ثبت شد. سپس عملیات اصلاح خط مبنا و فیلترینگ روی سیگنال‌های بدست آمده انجام گردید و در نهایت فرکانس‌های طبیعی سازه به روش جستار قله شناسایی شد و نتایج با استفاده از نرم افزار ARTeMIS به دو روش EFDD و SSI نیز مورد صحت سنجی قرار گرفت. در شکل ۱۲-الف نمایی از یک

سیگنال خام (سیگنال قبل از انجام اصلاحات) مربوط به پاسخ ارتعاش آزاد پل فلزی دوم نشان داده شده است. همچنین شکل ۱۲-ب سیگنال مذکور را در حوزه فرکانس نشان می‌دهد. مطابق شکل، فرکانس اصلی پل در حدود ۱۹.۵۲ هرتز شناسایی شده است.



الف) پاسخ سازه در حوزه فرکانس



الف) پاسخ سازه در حوزه زمان

شکل ۱۲: یکی از سیگنال‌های پاسخ شتاب ارتعاش آزاد پل فلزی دوم ثبت شده توسط حسگر گوشی تلفن همراه

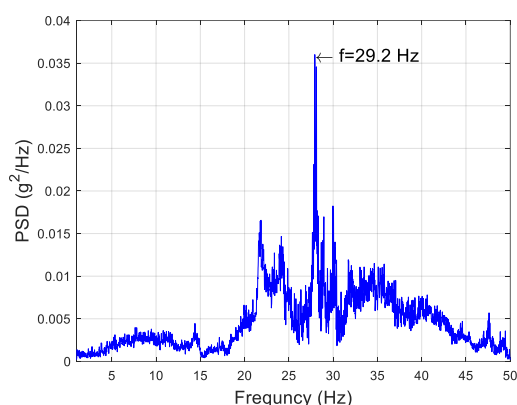
۳-۴- آزمایش ارتعاشی پل عابر پیاده سوم

به منظور تعیین محل‌های اعمال بار ضربه‌ای و ثبت پاسخ ارتعاشی سازه، مدل اجزاء محدود پل عابر پیاده سوم نیز در نرم افزار SAP2000 ایجاد گردید. این مدل به همراه نقاط کلیدی مربوطه در شکل شماره ۱۳ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، پل مذکور دارای فرمی بصورت L شکل می‌باشد. با این وجود بیشترین تغییر شکل مربوط به اولین مود خمشی راستای قائم، در دهانه وسط رخ داده است. بر این اساس محل ثبت پاسخ ارتعاشی، وسط دهانه میانی و محل اعمال بار ضربه‌ای در میانه دهانه سمت چپ در نظر گرفته شد.

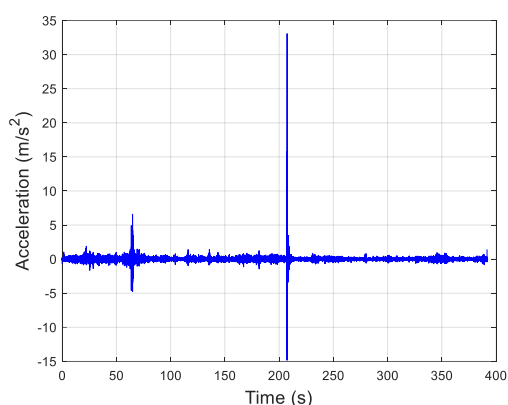


شکل ۱۳: مدل اجزاء محدود پل فلزی سوم و محل‌های اعمال بار ضربه‌ای و ثبت پاسخ ارتعاشی سازه

مشابه با مطالعات موردی اول و دوم، آزمایش بار ضربه‌ای در دماهای مختلف تکرار شد و پاسخ‌های ارتعاشی سازه پل به طول ۴۰۰ ثانیه ثبت گردید. شکل ۱۴ نتایج حاصل از یکی از آزمایش‌ها را برای مطالعه موردی سوم نشان می‌دهد. فرکانس طبیعی برای این سازه در حدود ۲۹.۲ هرتز است.



الف) پاسخ سازه در حوزه فرکانس

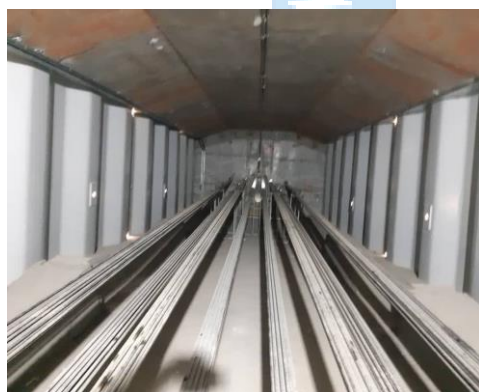


الف) پاسخ سازه در حوزه زمان

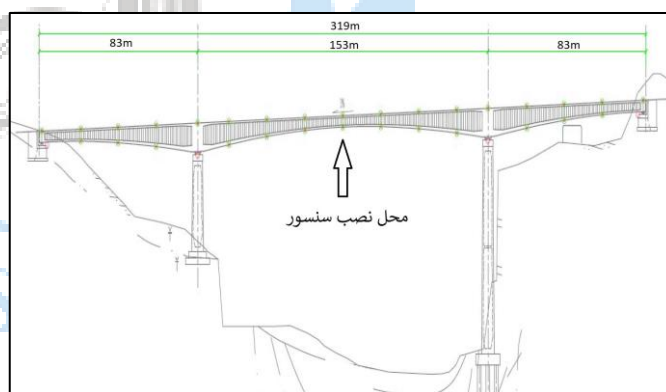
شکل ۱۴: یکی از سیگنال‌های پاسخ شتاب ارتعاش آزاد پل فلزی سوم ثبت شده توسط حسگر گوشی تلفن همراه

۴-۴- آزمایش ارتعاشی پل بتنی آزاد راه تهران-شمال

همانطور که پیش از این نیز ذکر شد با توجه به بزرگی ابعاد و جرم، برای شناسایی فرکانس‌های طبیعی این پل از پاسخ ارتعاش محیطی استفاده شد. برای این منظور سنسور سه محوره فوق حساس مورد استفاده در درون باکس عرشه قرار داده شد تا پاسخ ارتعاش محیطی پل در راستای قائم را ثبت نماید. شکل ۱۵-الف موقعیت نصب سنسور را روی نقشه سازه پل نشان می‌دهد که این موقعیت تقریباً در وسط دهانه بزرگ‌تر و در درون باکس عرشه می‌باشد. در شکل ۱۵-ب نیز نمایی از فضای داخل باکس عرشه پل آزادراه نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱۵: الف- محل نصب سنسور، ب- فضای درون باکس عرشه میانی پل آزادراه تهران-شمال

پس از ثبت پاسخ ارتعاش محیطی پل در هر نوبت از آزمایش، بایستی سیگنال‌های بدست آمده را پردازش کرد تا بتوان فرکانس‌های طبیعی سازه را از آنها استخراج نمود. از آنجایی که در آزمایش‌های ارتعاش محیطی، نسبت دامنه نویز به دامنه سیگنال قابل توجه می‌باشد، لذا یکی از پردازش‌های مهم برای کاهش خطای شناسایی اطلاعات مودال حذف اثرات نویز است. روشهای مختلفی در علم پردازش سیگنال^۵ برای اینکار وجود دارد که یکی از آنها تقسیم سیگنال پاسخ به قطعات کوچکتر و میانگین‌گیری از آنها است [۲۹]. در این روش، قطعه‌بندی سیگنال به کمک یک تابع پنجره‌ای^۶ مناسب انجام می‌شود. در علم پردازش سیگنال، تابع پنجره‌ای یک تابع ریاضی است که در یک بازه

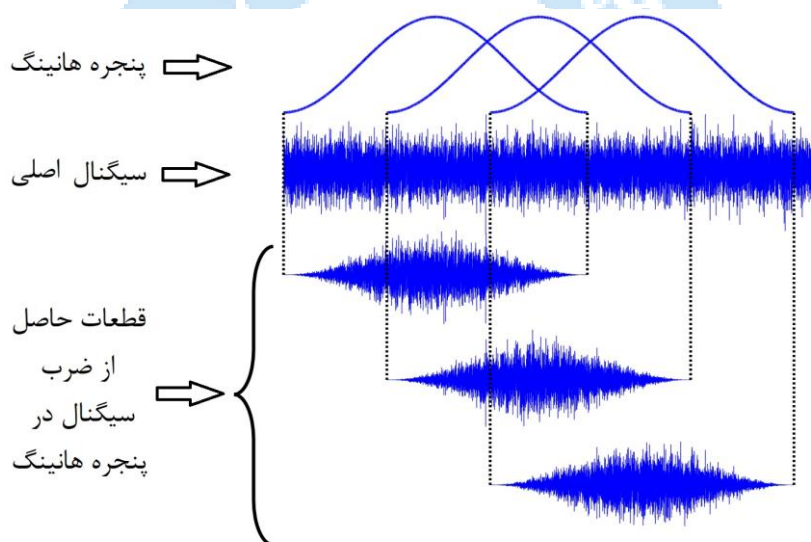
^۵ Signal Processing

^۶ Window Function

انتخابی مقدار آن عددی بین ۰ تا ۱ و در جاهای دیگر مقدار آن برابر با صفر می‌باشد. برای جدا کردن قطعات مختلف از یک سیگنال، بخش‌های مورد نظر سیگنال را در تابع پنجره‌ای ضرب می‌کنند تا آن قطعه از سیگنال دارای مقدار و مابقی برابر با صفر شود. معمولاً قطعه بندی سیگنال به گونه‌ای انجام می‌شود که قطعات مختلف بدست آمده، به مقدار مشخصی با یکدیگر همپوشانی داشته باشند. در نهایت از قطعات بدست آمده میانگین‌گیری به عمل آمده و از سیگنال میانگین برای انجام آنالیز مودال استفاده می‌شود. توابع پنجره‌ای مختلفی با هدف کاهش نویز از سیگنال‌های زمانی استفاده می‌شوند که یکی از پرکاربردترین آنها تابع پنجره‌ای هانینگ^۷ است. پنجره هانینگ دارای شکل زنگوله‌ای بوده که با رابطه زیر تعریف می‌شود [۳۰]:

$$w(n) = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

در این رابطه، N تعداد کل نمونه‌های موجود در آن قطعه از سیگنال است که قرار است در پنجره هانینگ ضرب شوند. $w(n)$ نیز ضریب متناظر با نمونه n ام قطعه سیگنال است. خاصیت پنجره هانینگ، کاهش خطای نشت طیفی^۸ هنگام انجام تحلیل فوریه بر روی بخش مورد نظر از سیگنال است. این تابع به دلیل شکل خاصی که دارد، دامنه قطعات سیگنال را در مرزهای آن قطعه کاهش می‌دهد. با قطعه بندی سیگنال از طریق پنجره هانینگ قبل از اعمال تبدیل فوریه سریع (FFT)، نتایج واقعی‌تری می‌توان به دست آورد. شکل ۱۶ نمای شماتیکی از قطعه‌بندی یک سیگنال زمانی را به کمک پنجره هانینگ نشان می‌دهد.



شکل ۱۶: تقسیم سیگنال پاسخ ارتعاش محیطی پل آزادراه تهران شمال با استفاده از پنجره هانینگ به منظور کاهش اثرات نویز

در این تحقیق مدت زمان برداشت پاسخ ارتعاش محیطی پل آزاد راه در هر نوبت از آزمایش در حدود ۵۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. سپس سیگنال مربوطه به کمک پنجره هانینگ با طول ۱۰۲۴ نمونه و همپوشانی ۶۶ درصد به قطعات کوچکتر تقسیم شد و در نهایت از میانگین قطعات برای انجام آنالیز مودال استفاده گردید. لازم به ذکر است که علاوه حذف نویز از سیگنال‌های ثبت شده، پیش پردازش‌های دیگری مانند اصلاح خط مبنا^۹ و عبور سیگنالها از فیلتر میانگذر باترورث^{۱۰} با فرکانسهای قطع ۰.۱ و ۲۵ هرتز نیز انجام شد. شکل ۱۷ نمودارهای

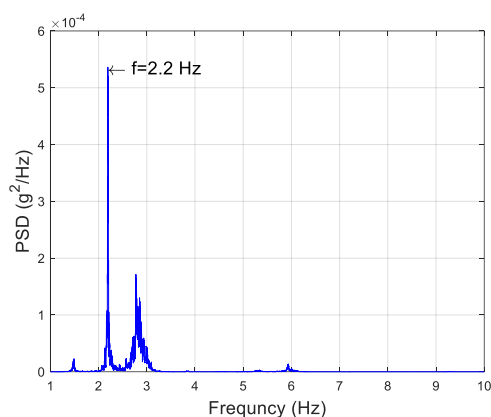
⁷ Hanning Window

⁸ Spectral Leakage Error

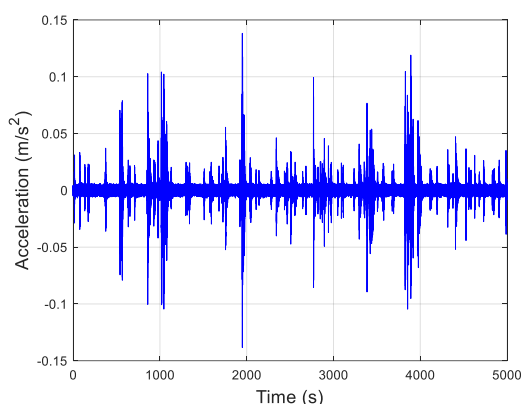
⁹ Baseline Correction

¹⁰ Butterworth Bandpass filter

پاسخ‌های ارتعاش محیطی و چگالی طیف توان پل آزادراه تهران- شمال را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل فرکانس غالب پل ۲.۲ هرتز شناسایی شده است.



الف) پاسخ سازه در حوزه فرکانس



الف) پاسخ سازه در حوزه زمان

شکل ۱۷: یکی از سیگنال‌های پاسخ شتاب ارتعاش محیطی پل بزرگراه تهران-شمال ثبت شده توسط شتابسنج فوق حساس

۵- بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های میدانی

پل‌های مورد مطالعه در این تحقیق در ساعات مختلفی از شبانه روز و به مدت یکسال از خرداد ۱۴۰۱ تا اردیبهشت ۱۴۰۲، مورد آزمایش ارتعاشی قرار گرفتند تا بتوان فرکانس طبیعی آنها را در دماهای مختلف محیطی شناسایی نمود. در این بخش به بررسی نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود.

۵-۱- نتایج مربوط به پل فلزی اول

برای بدست آمدن نتایج قابل اعتماد، هر آزمایش در دماهای مختلف چندین بار تکرار شده و سپس میانگین مقادیر بدست آمده محاسبه گردیده است. جدول (۱) نتایج حاصل از شناسایی فرکانس‌های طبیعی پل فلزی اول را در دماهای مختلف نشان می‌دهد که هر یک از اعداد این جدول نشان دهنده مقدار میانگین فرکانس‌های شناسایی شده در یک دمای خاص هستند. بررسی اعداد جدول (۱) نشان می‌دهد که با افزایش دمای محیط، فرکانس طبیعی پل کاهش پیدا می‌کند که میزان این کاهش در حدود ۸.۵ درصد است.

جدول ۱: نتایج شناسایی فرکانس طبیعی پل فلزی اول در دماهای مختلف

دمای محیط (C°)	۸	۱۴	۱۶	۲۱	۲۳	۲۶	۲۷	۳۵	۳۷	۳۹
فرکانس طبیعی پل فلزی اول (Hz)	۱۱/۴۲	۱۰/۵۲۸	۱۰/۵۱۵	۱۰/۵۰۹	۱۰/۵۰۶	۱۰/۵۰۲	۱۰/۴۹۸	۱۰/۴۹۱	۱۰/۴۸۶	۱۰/۴۴۶

۵-۲- نتایج مربوط به پل فلزی دوم

جدول (۲) مقادیر میانگین فرکانس‌های طبیعی شناسایی شده در دماهای مختلف را برای پل فلزی دوم نشان می‌دهد. مشابه با پل فلزی اول در اینجا نیز با افزایش دما فرکانس طبیعی پل هوایی کاهش پیدا می‌کند. این میزان کاهش در حدود ۳/۶ درصد است که خیلی کمتر از میزان کاهش فرکانس در پل فلزی اول می‌باشد. اگرچه مصالح تشکیل دهنده اعضای سازه‌ای هر دو پل مشابه است، دلیل اختلاف میزان تغییرات فرکانس طبیعی این پل‌ها نسب به دما را می‌توان به تفاوت در شکل هندسی آنها نسبت داد.

جدول ۲: نتایج شناسایی فرکانس طبیعی پل فلزی دوم در دماهای مختلف

دمای محیط ($^{\circ}\text{C}$)	۸	۱۴	۱۶	۲۰	۲۳	۲۵	۲۹	۳۰	۳۵	۳۸
فرکانس طبیعی پل فلزی دوم (Hz)	۱۹/۸۲۴	۱۹/۵۲۱	۱۹/۴۱۸	۱۹/۳۰۷	۱۹/۲۶۶	۱۹/۲۶۱	۱۹/۲۴۲	۱۹/۲۳۱	۱۹/۱۸۳	۱۹/۱۳۹

۵-۳- نتایج مربوط به پل فلزی سوم

با مقایسه نتایج بدست آمده از نرم افزار ARTEMIS و مدل اجزاء محدود در SAP2000 مشخص شد که محدوده ۲۸ هرتز مربوط به فرکانس طبیعی پل فلزی سوم می‌باشد. پس از انجام آزمایشهای ارتعاشی برای این پل، از فرکانسهای شناسایی شده در دماهای مختلف میانگین‌گیری شد که این نتایج در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. از اعداد این جدول ملاحظه می‌شود که مشابه با دو مورد قبلی با افزایش دما، میزان فرکانس طبیعی اول کاهش می‌یابد که این میزان برای پل فلزی سوم در حدود ۱۲ درصد است.

جدول ۳: نتایج شناسایی فرکانس طبیعی پل فلزی سوم در دماهای مختلف

دمای محیط ($^{\circ}\text{C}$)	۸	۱۴	۱۶	۲۱	۲۵	۲۶	۲۷	۳۰	۳۵	۳۷	۳۸
فرکانس طبیعی پل فلزی سوم (Hz)	۳۰/۸۲۴	۳۰/۱۵۵	۲۹/۴۰۹	۲۹/۲۳۹	۲۹/۲۳۵	۲۸/۸۹۷	۲۸/۷۰۲	۲۸/۴۶۷	۲۸/۰۵۳	۲۷/۷۹	۲۷/۴۸۶

۵-۴- نتایج مربوط به پل بتنی آزادراه تهران-شمال

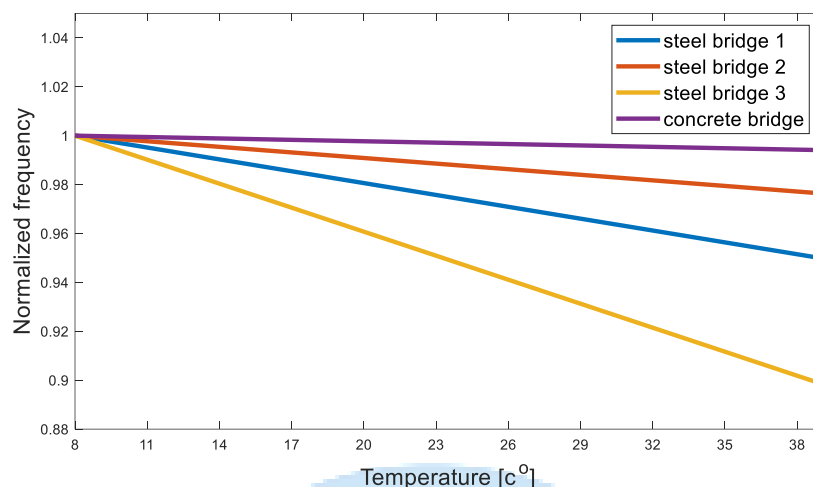
به دلیل محدودیت‌های موجود، آزمایش ارتعاش محیطی پل بتنی آزادراه تهران-شمال تنها دو بار در سال و در ماه‌های دی و مرداد انجام شد. جدول (۴) نتایج حاصل از آزمایش‌های مذکور را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اعداد بدست آمده در این جدول با چندین بار تکرار آزمایش و حذف داده‌های پرت و سپس میانگین‌گیری از نتایج بدست آمده‌اند. نکته قابل توجه در این مطالعه، تفاوت قابل توجه در تغییرات فرکانس نسبت به دما برای این پل نسبت به پل‌های فلزی است. طبق اعداد جدول (۴) با افزایش دما فرکانس طبیعی پل کاهش پیدا می‌کند اما میزان این کاهش تنها در حدود ۰/۵ درصد می‌باشد که بسیار کمتر از تغییرات فرکانسی در پل‌های فلزی است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر هندسه، جنس مصالح سازه پل در تغییرات فرکانس طبیعی آن نسبت به دما تاثیر بسزایی دارد.

جدول ۴: نتایج شناسایی فرکانس طبیعی پل بتنی در دماهای مختلف

تاریخ (دمای محیط $^{\circ}\text{C}$)	دی (۸ درجه)	مرداد (۳۹ درجه)
فرکانس طبیعی پل بتنی (Hz)	۲/۲۰۱	۲/۱۸۸

۵-۵- مقایسه نتایج شناسایی فرکانس طبیعی پل‌های مورد مطالعه در دماهای مختلف

در انتهای این تحقیق برای مقایسه روند تغییرات فرکانس طبیعی پل‌های مورد مطالعه با دمای محیط، میزان تغییرات فرکانسی بصورت نمودارهایی مطابق با شکل ۱۸ در کنار هم ترسیم شد. برای تهیه این نمودارها، با توجه به تفاوت فرکانس‌های اصلی پلها باهم و برای رسیدن به شکل‌های مطلوب و قابل مقایسه، ابتدا مقادیر فرکانس طبیعی هر پل با استفاده از رگرسیون‌گیری با خط مستقیم تقریب زده شد. سپس مقادیر هر نمودار در دماهای مختلف به مقدار متناظر آن در دمای ۸ درجه نرمال گردید. شکل ۱۸ نتیجه محاسبات مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸ - مقایسه روند تغییرات فرکانس طبیعی پل های مورد مطالعه در دماهای مختلف

نمودارهای شکل ۱۸ نشان می‌دهند که روند تغییرات فرکانسی پل‌های فلزی نسبت به پل بتنی بسیار بیشتر می‌باشد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که به هنگام استفاده از فرکانس طبیعی در پایش سلامت پل‌ها، در نظر گرفتن اثر دما برای پل‌های با مصالح فولادی از حساسیت بیشتری نسبت به پل‌های بتنی برخوردار است. علاوه بر این، بررسی شکل ۱۸ نشان می‌دهد که شیب نمودارهای مربوط به پل‌های فلزی نزدیک به هم نمی‌باشد. این مقدار برای سه پل فلزی اول، دوم و سوم به ترتیب ۰/۱۵٪، ۰/۰۷۵٪ و ۰/۳۳٪ بدست آمده است که این تفاوت به دلیل شکل هندسی متفاوت و در نتیجه اختلاف در سختی و توزیع جرم سازه پل‌های فلزی مورد مطالعه است.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر دمای محیطی شهر تهران برای تعدادی از پل‌های آن مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور سه پل عابر پیاده فلزی در سه نقطه مختلف از شهر و یک پل بتنی در حومه شهر انتخاب شدند. فرکانس‌های طبیعی پل‌های مذکور به مدت یکسال در ساعات مختلفی از شبانه روز و در شرایط دمایی مختلف اندازه‌گیری شد. برای ثبت پاسخ‌های شتاب ایجاد شده توسط آزمایش‌های ارتعاشی پل‌ها، از حسگرهای موجود در گوشی تلفن همراه و نیز سنسور شتابسنج فوق حساس استفاده شد. خلاصه نتایج بدست آمده از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- ۱- مقایسه نتایج بدست آمده از حسگر گوشی تلفن همراه با شتابسنج فوق حساس نشان داد که، برای ثبت پاسخ ارتعاشی پل‌هایی که دامنه ارتعاشی آنها بالاست و به راحتی توسط انسان حس می‌شود، با دقت قابل قبولی می‌توان از حسگرهای ارزان قیمت موجود در گوشی‌های تلفن همراه بهره جست و اطلاعات مودال را شناسایی نمود.
- ۲- بررسی فرکانس طبیعی پل‌های مورد مطالعه در طول یکسال نشان داد که دما و فرکانس این پل‌ها با یکدیگر رابطه معکوس داشته و با کاهش دما از تابستان به سمت زمستان، فرکانس‌های طبیعی پل افزایش می‌یابد.
- ۳- نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که تأثیر دمای محیطی بر فرکانس‌های طبیعی پل‌های فلزی تنها به نوع مصالح محدود نمی‌شود، بلکه به عوامل دیگری مانند شکل هندسی پل نیز بستگی دارد. در نتیجه، برای پایش دقیق سلامت یک پل فلزی، لازم است ابتدا تغییرات فرکانسی ناشی از دمای محیط به عنوان یک داده قابل دسترس ثبت شود. سپس، این تغییرات باید با

تغییرات فرکانسی ناشی از آسیب در همان پل مقایسه گردد تا احتمال خطا در تشخیص آسیب‌ها کاهش یابد. این رویکرد به افزایش دقت در شناسایی آسیب‌های احتمالی در پل‌های فلزی کمک می‌کند.

۴- با مقایسه میزان تغییر سالیانه فرکانس پل‌های فلزی با درصد‌های ۸/۵ برای پل اول، ۳/۶ برای پل دوم و ۱۲ درصد برای پل سوم با ۰/۵ درصد برای پل بتنی نتیجه می‌شود که تغییرات فرکانس بر اثر دما برای پل‌های فلزی بیشتر از پل بتنی است. بنابراین در صورت استفاده از فرکانس طبیعی در پایش سلامت پل‌ها، در نظر گرفتن اثر دما برای پل‌های با مصالح فولادی از حساسیت بیشتری نسبت به پل‌های بتنی برخوردار است.

با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیق، در بکارگیری روش‌های پایش سلامت مبتنی بر فرکانس‌های طبیعی برای پل‌های فلزی، می‌توان پیشنهاد داد که در ابتدا یک آنالیز دقیق از تاثیر درصد‌های مختلف آسیب بر اطلاعات مودال پل انجام شود. همچنین، میزان تغییرات فرکانسی پل فلزی مورد مطالعه در اثر دمای محیط نیز بایستی به عنوان یک داده مهم در دسترس باشد. این اطلاعات به مهندسی پایش سلامت پل کمک خواهد کرد که با اطمینان بیشتری در خصوص وضعیت سلامت ویا انجام عملیات تعمیر و نگهداری سازه پل تصمیم‌گیری نمایند.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق ابلاغ گزنت شماره ۴۹۴۹ مورخ ۱۴۰۲/۰۳/۰۶ انجام گردیده است

مراجع

- [1] Basten, T. G. H., & Schiphorst, F. B. A. (2012). Structural health monitoring with a wireless vibration sensor network. In: *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering*, ISMA (pp. 17-19).
- [2] Liang, Y., Li, D., Song, G., & Feng, Q. (2018). Frequency Co-integration-based damage detection for bridges under the influence of environmental temperature variation. *Measurement*, 125, 163-175.
- [3] Moorty, S., & Roeder, C. W. (1992). Temperature-dependent bridge movements. *Journal of Structural Engineering*, 118(4), 1090-1105.
- [4] Doebling, S. W., & Farrar, C. R. (1997). Using statistical analysis to enhance modal-based damage identification. In: *Proc. DAMAS* (Vol. 97, pp. 199-210).
- [5] Askegaard, V., & Mossing, P. (1988). Long term observation of RC-bridge using changes in natural frequency. *nordic concrete research*. publication no 7. Publication of: NORDIC CONCRETE FEDERATION.
- [6] Sohn, H. (2007). Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 539-560.
- [7] Ni, Y. Q., Zhou, H. F., Chan, K. C., & Ko, J. M. (2008). Modal flexibility analysis of cable-stayed Ting Kau Bridge for damage identification. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(3), 223-236.
- [8] PEETERS, B. (2000). System Identification and Damage Detection in Civil Engineering. Ph.D. Dissertation, Katholieke University.

- [9] Peeters, B., & De Roeck, G. (2001). One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(2), 149-171.
- [10] Manson, G. (2002, April). Identifying damage sensitive, environment insensitive features for damage detection. In: *Proceedings of the third international conference on identification in engineering systems* (pp. 187-197).
- [11] Kullaa, J. (2003). Is temperature measurement essential in structural health monitoring?. In: *Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA., September 15-17, 2003 (p. 717724).
- [12] Nguyen, V. H., Mahowald, J., Schommer, S., & Maas, S. (2017). A study of temperature and aging effects on eigenfrequencies of concrete bridges for health monitoring. *Engineering*, 9, 396-411.
- [13] Liang, Y., Li, D., Song, G., & Feng, Q. (2018). Frequency Co-integration-based damage detection for bridges under the influence of environmental temperature variation. *Measurement*, 125, 163-175.
- [14] Zheng, W., Qian, F., Shen, J., & Xiao, F. (2020). Mitigating effects of temperature variations through probabilistic-based machine learning for vibration-based bridge scour detection. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10, 957-972.
- [15] Borah, S., Al-Habaibeh, A., & Kromanis, R. (2021). The Effect of Temperature Variation on Bridges—A Literature Review. *Energy and Sustainable Futures: Proceedings of 2nd ICESF 2020*, 207-212.
- [16] Yu, Y., Han, R., Zhao, X., Mao, X., Hu, W., Jiao, D., & Ou, J. (2015). Initial validation of mobile-structural health monitoring method using smartphones. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(2), 274391.
- [17] Kong, Q., Allen, R. M., Kohler, M. D., Heaton, T. H., & Bunn, J. (2018). Structural health monitoring of buildings using smartphone sensors. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 594-602.
- [18] Elhatab, A., Uddin, N., & O'Brien, E. (2019). Extraction of bridge fundamental frequencies utilizing a smartphone MEMS accelerometer. *Sensors*, 19(14), 3143.
- [19] Sony, S., Laventure, S., & Sadhu, A. (2019). A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2321.
- [20] Sarmadi, H., Entezami, A., Yuen, K. V., & Behkamal, B. (2023). Review on smartphone sensing technology for structural health monitoring. *Measurement*, 223, 113716.
- [21] Halling, M. W., Ball, A., Esplin, R., & Hsieh, K. H. (2004). Modal analysis and modeling of highway bridges. In: *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper (No. 2996).
- [22] Wenzel, H., Pichler, D. (2009). Ambient vibration monitoring. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons.
- [23] Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2001). Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart materials and structures*, 10(3), 441.
- [24] Peeters, B., De Roeck, G., Pollet, T., & Schueremans, L. (1995). Stochastic subspace techniques applied to parameter identification of civil engineering structures. In: *Proceedings of new advances in modal synthesis of large structures: nonlinear, damped and nondeterministic cases* (pp. 151-162).
- [25] ARTeMIS Modal, Structural Vibration Solutions A/S, <http://www.svibs.com>.

- [26] Zayeri Baghlani Nejad, A., & Mahmoudi Sahebi, M. (2020). Determination of the Modal Information of Structures under Impact Loads Using Proper Orthogonal Decomposition. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 7(4), 129-145, (In Persian).
- [27] Accelerometer, Keuwlsoft, <https://keuwl.com/Accelerometer>.
- [28] Zayeri Baghlani Nejad A, Mahmoudi, M. (2020). A new method for determining the natural frequencies of structures from their ambient vibration. *Modares Civil Engineering journal*, 20(5), 89-102, (In Persian).
- [29] Jiang, Q., Chang, F., & Liu, C. (2021). A spectrogram based local fluctuation feature for fault diagnosis with application to rotating machines. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16, 2167-2181.
- [30] Oppenheim, A. V. (1999). Discrete-time signal processing. Prentice Hall google schola, 3, 804-

