مطالعه فرکانس ارتعاش سازه پل به کمک دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری

ونداد صانعی‌نژاد
کارشناسی
دانشکده فیزیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
v.saneinejad@gmail.com

پویا گورانی
دانشجو کارشناسی ارشد
پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی
pgourani@gmail.com

امیرحسین براتی سده
دانشجو کارشناسی ارشد
پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی
amirhosseinbarati1996@gmail.com

فاطمه رضائی*
دکترای تخصصی، هیأت علمی
دانشکده فیزیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
fatemehrezaei@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۸

چکیده

در این مقاله، فرکانس ارتعاش سازه عمرانی پل به دو صورت تجربی و شبیه‌سازی با استفاده از مکانیزم ارتعاش‌سنج لیزری مبتنی بر اثر دوپلری (LDV[1]) مورد مطالعه قرار گرفته است. محاسبات با استفاده از شبیه‌سازی سیمیولینک[2] نرم‌افزار متلب[3] و با بهره‌گیری از چیدمان تداخل‌سنجی جهت تجزیه پرتوی لیزر به دو بازوی مرجع و اندازه‌گیری انجام شده است. رفتار زمانی و فرکانسی سیگنال‌های دریافتی برای ارتعاش سازه پل با درنظر گرفتن تمام نوفه‌ها اعم از نوفه‌های اپتیکی، نوفه‌های مدارات الکتریکی و محیط آزمایش محاسبه شده است. همچنین در این مقاله، به منظور ساخت دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری مبتنی بر اثر دوپلر، از چیدمان اپتیکی تداخل‌سنجی استفاده شده است. چیدمان مورد استفاده در این آزمایش از نوع چیدمان همودین تداخل‌سنج مایکلسون[4] است. لازم به ذکر است که در این چیدمان از مدار تفاضلی جهت کاهش نوفه‌ها در بخش الکترونیک دستگاه استفاده شده است. همچنین، با پردازش مناسب سیگنال‌ها و حذف کلیه نوفه‌های اپتیکی، الکتریکی و محیطی، فرکانس جسم مرتعش با دقت بالا بررسی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دهنده هم‌خوانی قابل قبولی بین نتایج حاصل از مطالعات شبیه‌سازی و تجربی است که این موضوع نشان‌دهنده دقت بالای دستگاه در اندازه‌گیری‌ها است.

واژگان کلیدی: سازه پل، اثر دوپلر، ارتعاش‌سنج لیزری، نوفه

۱. مقدمه

امروزه دستگاه سرعت‌سنج لیزری مبتنی بر پدیده دوپلر (LDV) کاربردهای متعددی در محاسبه ارتعاشات و سرعت اجسام، از قبیل نمونه‌های زیستی چون قلب و پرده گوش [۱]، تخمین سرعت شاره‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده آنها [۲]، برآورد ارتعاشات سازه‌های عمرانی [۳-۷]، همچنین بررسی سرعت اجسام چرخان مانند پره‌های هلیکوپتر و هواپیما [۸] و نیز بررسی رسیدگی در میوه‌جات

و سبزیجات دارد [۹]. اندازه‌گیری‌های بیولوژیکی مانند برآورد ضربان قلب، آهنگ تنفس، میزان قند و فشار خون از دیگر کاربردهای این دستگاه هستند. گروه کینان[۵] و همکارانش گروهی از گروه‌های متعددی هستند که بر موضوع اندازه‌گیری سرعت اجسام متحرک و چرخان به کمک دستگاه ارتعاش‌سنج و سرعت‌سنج لیزری دوپلری پرداخته‌اند. این تیم توانسته است با بررسی سرعت حرکت ذرات در شاره‌ها، سایز و قطر ذرات را در نتایج به‌دست آمده بی‌تأثیر اعلام کند این درحالی است که در گزارش ایشان سرعت شاره منجر به افزایش فرکانس اندازه‌گیری شده است [۱۰]. از مهم‌ترین مزایای این دستگاه می‌توان به مواردی از قبیل دقت در اندازه‌گیری ارتعاشات از مرتبه نانومتر و پیکومتر و همچنین، اندازه‌گیری ارتعاشات و سرعت اجسام از فواصل دور به صورت غیرتماسی اشاره کرد.

به‌طورکلی، گروه‌های متعددی به اندازه‌گیری ارتعاشات سازه‌های عمرانی با تکنیک‌های مختلف پرداختند. به عنوان مثال نصیف[۶] و همکارانش با استفاده از دستگاه LDV، ارتعاشات پل را اندازه‌گیری کردند و فرکانس ارتعاشات حاصل از LDV را با نتایج حاصل از سنسورهای تماسی مقایسه کردند. آنها دریافتند که نتایج ناشی از این دستگاه دارای تطابق قابل قبولی با سنسورهای تماسی است. ولی از آنجایی‌که دارای مزایای بیشتر اعم از دقت بالاتر، سرعت داده‌برداری بیشتر و همچنین عدم نیاز به تماس با پل است، روش اندازه‌گیری دستگاه LDV قابل قبول‌تر است [۶].

همچنین در مطالعه‌ای دیگر، میاشیتا[۷] و همکارانش از دستگاه LDV جهت بررسی سلامت پل و همچنین بررسی تغییرات آن زمانی‌که تحت استرس و فشار قرار می‌گیرد، استفاده کرده‌اند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که این روش اندازه‌گیری می‌تواند در کنار سایر روش‌های مرسوم و یا به‌طور مستقل مفید واقع شود [۷].

در این مقاله، حرکت ارتعاشی سازه پل با بهره‌گیری از شبیه‌سازی شماتیک دستگاه در سیمیولینک نرم‌افزار متلب و همچنین به صورت تجربی به کمک ساخت دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج محاسبات شبیه‌سازی و تجربی به صورت سیگنال‌های تداخلی شدت برحسب زمان محاسبه شده است و سپس، با فوریه‌گیری برحسب فرکانس گزارش شده‌اند. هم‌خوانی قابل قبول بین نتایج حاصل از هر دو مطالعه نشان‌دهنده صحت و دقت بررسی‌های انجام شده است.

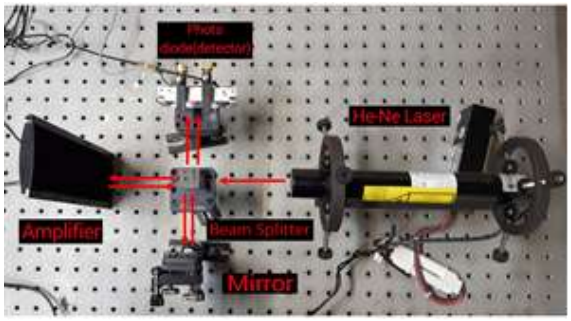
دستگاه ارتعاش‌سنج مطرح شده، به صورت اپتیکی و غیرتماسی عمل می‌کند و برای هرگونه سازه‌ای با ابعاد متفاوت به‌طور دقیقی عمل خواهد کرد و اطلاعات ارتعاشی مربوط به نقطه تحت تابش را بیان می‌کند. همچنین، برای بررسی سلامت سازه به صورت پیوسته می‌توان رفتار ارتعاشی آن را در نقاط حساس به کمک دستگاه بررسی نمود. به این ترتیب اگر در ناحیه مورد بررسی ارتعاشاتی با فرکانس‌های غیرعادی مشاهده گردید، می‌تواند اخطاری زود هنگام برای بررسی و از بین بردن مشکل در آن ناحیه باشد تا از ایجاد خسارت‌های مالی و جانی گسترده جلوگیری شود.

۲. شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری با استفاده از نرم‌افزار متلب و به کمک ماژول سیمیولینک، دو بازوی پرتوی مرجع و اندازه‌گیری مطابق شکل ۱ تعبیه شده است. ابتدا به تشریح هر کدام از بازوها پرداخته می‌شود. در بازوی مربوط به پرتو مرجع از نور لیزر هلیوم-نئون با طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر استفاده شده است. این نور با پهنای فرکانسی ۳۲ مگاهرتز به تقسیم کننده پرتو برخورد می‌کند و در ادامه مسیر از منشور آینه‌ای منعکس می‌شود. مجددا به تقسیم‌کننده دوم اصابت می‌کند و به سمت فوتودیود[۸]

هدایت می‌شود. در داخل فوتودیود به عنوان مرجعی از نور لیزر داخل سیستم تداخلی ثبت می‌شود.

در بازوی دیگر که با نام پرتوی اندازه‌گیری شناخته می‌شود، پرتو تقسیم کننده نور عبور کرده و به جسم مرتعش برخورد می‌کند. نور منعکس شده از هدف مرتعش از تقسیم‌کننده پرتو عبور کرده و وارد آشکارساز می‌شود. سپس، با پرتوی مرجع ثبت شده تداخل می‌کند. سیگنال‌های تداخلی به شکل زنش‌های منظم ساخته می‌شوند. آشکارساز، شدت یا توان دوم میدان‌ها را می‌تواند دریافت کند لذا برای مشاهده سیگنال نهایی ابتدا باید سیگنال‌ها جمع شده و سپس در بلوک تداخلی میدان برایند به توان دوم برسد. در بلوک مشخص شده می‌توان شدت هرکدام از سیگنال‌های مرجع و اندازه‌گیری را جداگانه بررسی کرد. در ادامه مسیر مطالعه محاسبات مربوط به اثرات نوفه‌ها لحاظ شده است و از سیگنال خروجی تداخلی کاسته شده است تا نتیجه سیگنال خروجی دقیق باشد.



شکل ۱. چیدمان همودین تداخل‌سنج مایکلسون در دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری.

شدت سیگنال تداخلی دریافتی توسط آشکارساز از حاصل‌ضرب میدان‌های دو بازوی مرجع و اندازه‌گیری از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۱]:

$$I = \frac{1}{2}\left[I_{01} + I_{02} + 2\sqrt{I_{01}I_{02}}\cos[(k_1 - k_2).r - (\omega_1 - \omega_2).t]\right] \quad (۱)$$

که در رابطه فوق I_{01}، I_{02}، k_1، k_2، ω_1، ω_2 و r به ترتیب نشان‌دهنده شدت سیگنال اول، شدت سیگنال دوم، عدد موج سیگنال اول، عدد موج سیگنال دوم، فرکانس سیگنال اول و فرکانس سیگنال دوم و بردار مکان هستند.

در معادله ۱، شدت سیگنال دریافتی تابعی از زمان است. به منظور محاسبه تحولات فرکانسی آن از تبدیل فوریه این معادله استفاده می‌شود. از آنجایی‌که جمله کسینوسی نشان‌دهنده بخش تداخلی است و حاوی اطلاعات مد نظر مربوط به ارتعاش است از رابطه ۲، تحولات فرکانسی استخراج می‌شود [۸]:

$$\mathrm{FFT}(\cos 2\pi at) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi vt}\cos 2\pi at\ dt = \frac{1}{2}[\delta(v-a) - \delta(v+a)] \quad (۲)$$

که در آن پارامترهای a، ν و δ به ترتیب نشان‌دهنده فرکانس تحولات، فرکانس متعلق به تبدیل فوریه و تابع دلتای دیراک هستند. شایان ذکر است که جزئیات مربوط به شبیه‌سازی به تفصیل در پژوهش قبلی این گروه در مرجع [۸] ارائه شده است.

۳. بلوک دیاگرام سیمیولینک در دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری

سیگنال‌های تداخلی در فوتودیود به عنوان آشکارساز به ولتاژ تبدیل می‌شوند. تغییرات زمانی سیگنال دریافتی به صورت ولتاژ توسط اسیلوسکوپ مشاهده می‌شود و با گرفتن تبدیل فوریه از آن، فرکانس جسم مرتعش محاسبه می‌شود.

لازم به ذکر است که طبق جابه‌جایی دوپلر، فرکانس جسم مرتعش با سرعت خطی آن متناسب است، لذا، با آنالیز فوریه از سیگنال‌های تداخلی، فرکانس ارتعاش سازه مرتعش پل به‌دست می‌آید. شماتیکی از چیدمان بلوک‌ها در شبیه‌سازی سیمیولینک در شکل ۲ نشان داده شده است.

هر یک از این بلوک‌ها نماد پارامترهای زیر هستند:

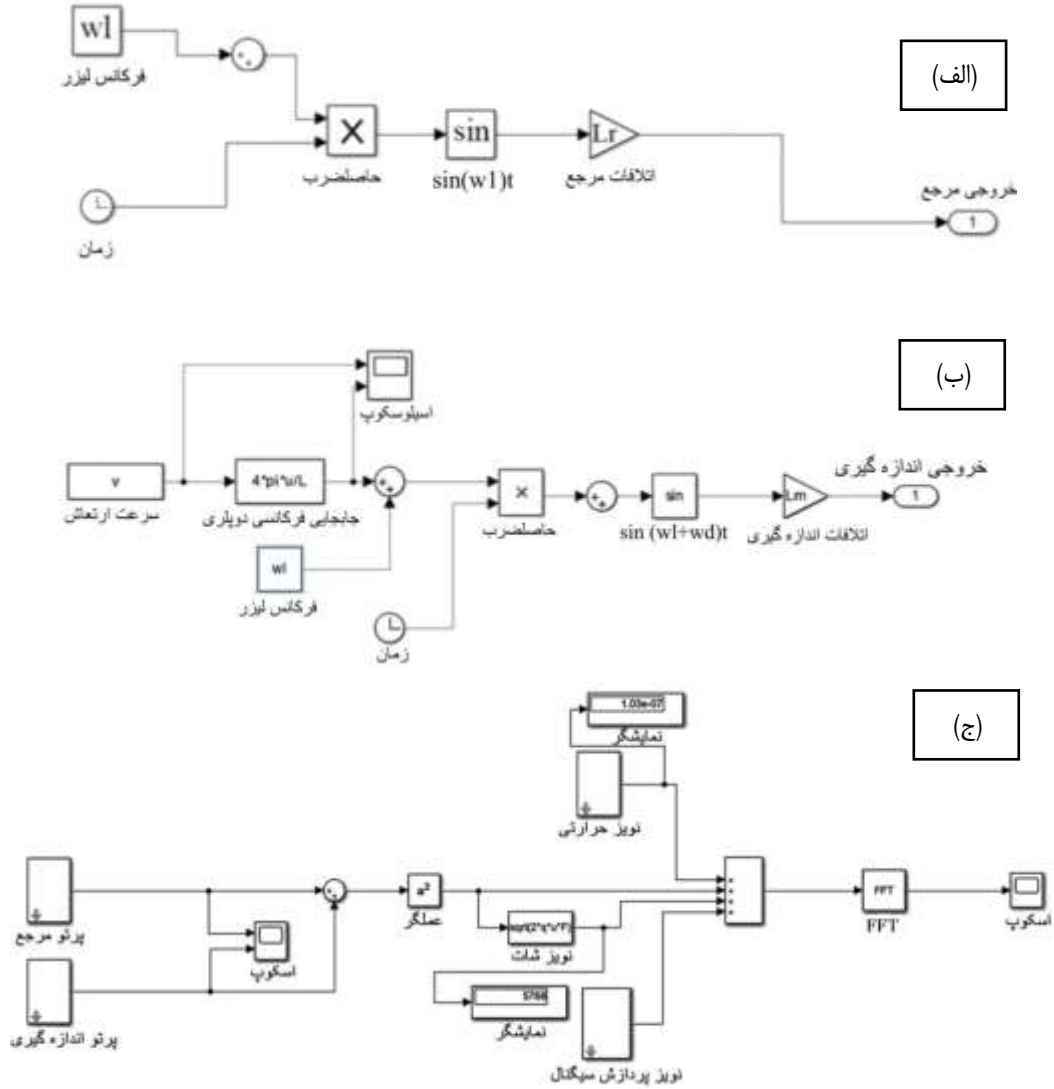
بلوک wl: این بلوک برای دریافت فرکانس لیزر از کاربر تعبیه شده است. با درنظر گرفتن ماسک برای بلوک فرکانس لیزر، کاربر می‌تواند به صورت دستی مقدار آن را وارد نماید.

بلوک time: این بلوک زمان را وارد مسئله می‌کند.

بلوک product: برای ضرب فرکانس در زمان ایجاد شده است. wl×t

بلوک sin: این بلوک سینوس حاصل از ضرب فرکانس‌ها در زمان را می‌دهد که به عنوان سیگنال مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

بلوک L: تمامی اتلافات ناشی از نوفه‌های مدنظر را در سیستم لحاظ می‌کند.



شکل ۲. نمایی از چیدمان بلوک‌ها در شبیه‌سازی سیمیولینک دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری در الف) بازوی مرجع، ب) بازوی اندازه‌گیری و ج) کل دستگاه.

٤. چیدمان آزمایشگاهی

برای ساخت این دستگاه، از چیدمان همومداین تداخل‌سنج مایکلسون جهت براورد ارتعاش و سرعت هدف موردنظر استفاده شده است. همان‌طورکه در شکل ۱ مشاهده می‌شود پرتوی لیزر ابتدا به یک جدا کننده پرتو برخورد می‌کند و سپس، به دو پرتوی مرجع و اندازه‌گیری تجزیه می‌گردد. پرتوی مرجع دارای فرکانس نور لیزر است. در بازوی مرجع نور به آینه برخورد می‌کند و پس از بازتاب با همان فرکانس لیزر به سمت آشکارساز هدایت می‌شود. در بازوی اندازه‌گیری، نور به جسم مرتعش برخورد می‌کند و دچار شیفت فرکانسی دوپلر می‌شود. این دو پرتوی مرجع و اندازه‌گیری در فوتودیودها تداخل کرده و از آنجا که سیگنال تداخلی با تفاضل فرکانسی دو بازو متناسب است، می‌توان از تبدیل فوریه نور تداخلی، فرکانس جسم مرتعش را اندازه‌گیری کرد. لازم به ذکر است که از مدار تفاضلی[۹] جهت کاهش نوفه‌ها در بخش الکترونیک دستگاه استفاده شده است. این مدار، نوسانات تداخلی دو بازو را در فوتودیودها به ولتاژ تبدیل کرده و سپس، آن را به اسیلوسکوپ هدایت می‌کند. در اسیلوسکوپ، رفتار زمانی و فرکانسی جسم متحرک مشاهده می‌شود.

۵. پردازش سیگنال و حذف نوفه

در یک دستگاه LDV، رزولوشن جابه‌جایی و سرعت، نشانگر مینیمم جابه‌جایی و سرعت قابل اندازه‌گیری این سیستم است. به‌طورکلی، معمولاً این رزولوشن به واسطه نوفه سیستم محدود می‌شود. در این مقاله، نوفه‌های اصلی که رزولوشن سیستم ارتعاش‌سنج لیزری را محدود می‌کنند، شامل موارد ذیل است:

الف) نوفه شات[۱۰] که توسط لیزر و مدارهای الکترونیکی ایجاد می‌شود.

ب) نوفه گرمایی آشکارساز و پیش تقویت‌کننده که به نوفه جانسون موسوم است.

ج) نوفه فلیکر[۱۱] که ناشی از قطعات نیمه‌رسانای مدار الکتریکی است.

د) نوفه اسپکل[۱۲] که به تداخل‌های رندوم نور پراشیده شده از سطح هدف مربوط می‌شود.

همچنین، جابه‌جایی فرکانسی دوپلر که ناشی از سرعت هدف متحرک است از رابطه ۳ برحسب سرعت جسم مرتعش به‌دست می‌آید [۱۲]:

$$f_d = 2f\frac{v}{c} = 2\frac{v}{\lambda}. \qquad (۳)$$

در رابطه فوق، f فرکانس باریکه لیزر، c سرعت نور، v سرعت جسم هدف و λ طول موج نور است.

۵-۱. نوفه شات

به‌طورکلی، نور می‌تواند به صورت مجموعه‌ای از فوتون‌های گسیل شده از یک منبع درنظر گرفته شود. در هر منبع واقعی، تعداد فوتون‌ها (بر واحد زمان) ثابت نیست و این تعداد می‌تواند توسط یک افت و خیز آماری توصیف شود. لذا، این نوسانات در تعداد فوتون‌ها که به صورت تغییر در شدت نور اندازه‌گیری شده در آشکارساز ظاهر می‌شود، به نوفه شات موسوم است که با معادله زیر توصیف می‌شود [۱۳].

$$i_{\text{shot}} = \sqrt{2ei_{\text{signal}}B} \qquad (۴)$$

در رابطه فوق، e بار الکترون، i_{signal} جریان سیگنال و B پهنای باند سیگنال هستند.

۵-۲. نوفه گرمایی

نوفه گرمایی اغلب به دلیل حرکت تصادفی الکترون‌ها در یک ماده دارای مقاومت رخ می‌دهد. این امر، منجر به نوسانات کوچکی در ولتاژ ترمینال‌های سیستم V_{thermal} می‌شود که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$V_{\text{thermal}} = \sqrt{4K_BTR_LB} \qquad (۵)$$

در معادله فوق، K_B ثابت بولتزمن، T دمای مطلق، R_L مقاومت و B پهنای باند سیگنال هستنند.
همچنین، با به‌کارگیری معادلات ساده، ولتاژ نوفه گرمایی می‌تواند به جریان نوفه گرمایی نیز تبدیل شود [۱۴]:

$$i_{\text{thermal}} = \sqrt{\frac{4K_BTB}{R_L}} = \sqrt{4K_BTB\frac{R_i + R_d}{R_iR_d}} \quad (۶)$$

در معادله فوق، R_i و R_d به ترتیب مقاومت تقویت‌کننده و آشکارساز هستند.

۵-۳. نوفه فلیکر

نوفه فلیکر در همه ادوات نیمه‌رسانا وجود دارد و به دلیل نوسانات مقاومت در سیلیکون و نقایص کریستالی در دیودها و ترانزیستورها ظاهر می‌شود [۱۵]:

$$i = \sqrt{K\frac{i_{\text{signal}}^{\alpha}}{f^{\beta}}\Delta f}_{\text{flicker}} \quad (۷)$$

در رابطه فوق، K، α و β پارامترهای وابسته به پروسه ساخت هستند. i، i_{signal}، f و Δf به ترتیب جریان مستقیم، جریان سیگنال، فرکانس سیگنال و پهنای باند سیستم هستند.

۵-۴. نوفه اسپکل

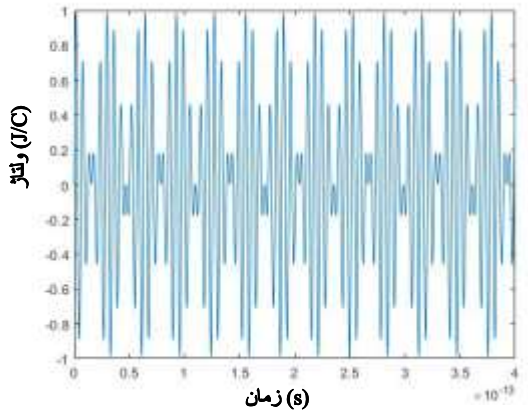
اثر اسپکل نتیجه تداخل بسیاری از امواج با فرکانس‌های مشابه است که دارای فاز و دامنه متفاوت هستند. در محدوده‌ی بسیاری از امواج تداخلی، توزیع شدت (که به صورت مربع طول بردار است) به تابعی توانی تبدیل می‌شود که به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$P(I)dI = \frac{1}{\mu}\exp(-I/\mu)dI \quad (۸)$$

در معادله فوق، $P(I)$ تابع توزیع شدت، μ میانگین شدت و I شدت نور لیزر هستند.

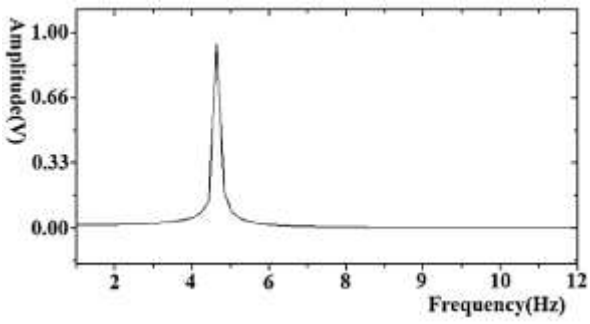
٦. نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایشات تجربی با خروجی داده‌های محاسبه شده در شبیه‌سازی سیمیولینک هم‌خوانی دارند. در این تحقیق، در هر دو حالت تجربی و شبیه‌سازی فرکانس ارتعاش پل ۴/۶ و ۸ هرتز گزارش شده است. شکل ۳ نمونه‌ای از تحولات زمانی ارتعاشات پل در ۴ هرتز را نشان می‌دهد.

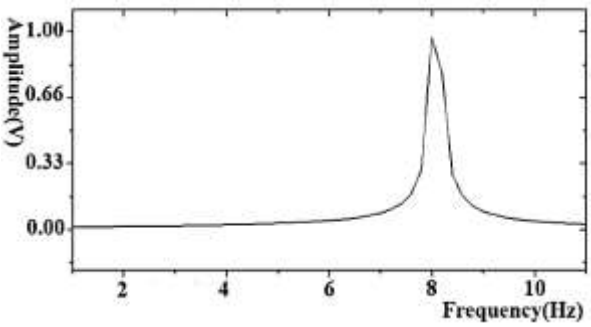


شکل ۳. تحولات زمانی سیگنال شبیه‌سازی شده در فرکانس ۴ هرتز.

تحولات زمانی سیگنال‌های تداخلی برای سازه پل مرتعش به صورت ضرب دو تابع سینوسی برای دو بازوی مرجع و اندازه‌گیری به شکل زنش‌های منظم و پس از فوریه‌گیری در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴. فرکانس ۴/۶ هرتزی محاسبه شده ناشی از تحولات فرکانسی پل مرتعش با انجام محاسبات عددی عملکرد دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری



شکل ۵. فرکانس ۸ هرتزی مشاهده شده ناشی از تحولات فرکانسی پل مرتعش با انجام محاسبات عددی عملکرد دستگاه ارتعاش‌سنج لیزری دوپلری

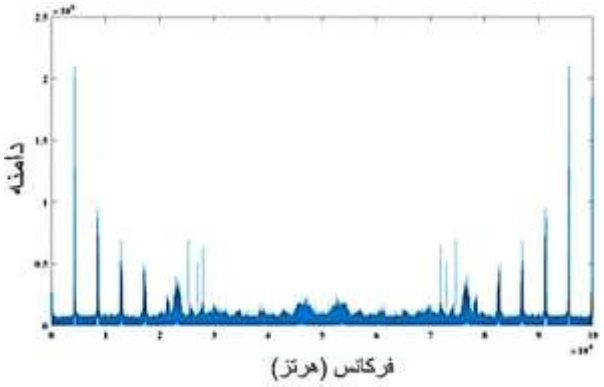
به منظور نشان دادن توانایی‌ها و قابلیت‌های دستگاه ارتعاش‌سنجی لیزری دوپلری در اندازه‌گیری ارتعاشات سازه پل آزمایشی طراحی شده است که در دو حالت متفاوت عبور وسایل نقلیه از روی سازه دو پل نوساز و قدیم‌ساز، اندازه‌گیری ارتعاشات صورت گرفته است. حالت اول حالتی درنظر گرفته شده است که تنها یک ماشین سواری روی سطح پل در حرکت است و در حالت دوم یک ماشین سنگین مانند اتوبوس و یا کامیون که سنگین‌تر از یک ماشین سواری هستند بر روی سطح پل حرکت می‌کنند. اندازه‌گیری ارتعاشات بدین صورت بوده است که در قسمت انتهایی پل مشرف به خیابان، دستگاه ارتعاش‌سنج روبه‌روی پل قرار می‌گرفت و طی زمان عبور وسیله نقلیه، پل تحت تابش لیزر قرار می‌گرفت. زمان هر اندازه‌گیری بسیار کوتاه بود یعنی در حدود یک دقیقه (معادل با زمان عبور وسیله نقلیه).

همان‌طورکه در شکل ۶ نمایش داده شده است، نمونه بررسی شده به عنوان پل قدیمی، پل کریم‌خان زند واقع در تقاطع بلوار کریم‌خان زند و خیابان سپهبد قرنی است. طول این پل ۴۳۰ متر و عرض آن ۱۶ متر است. از آنجا که این پل به عنوان پل موقت پنج ساله تأسیس شده بود عرشه پل و پایه‌های آن فلزی بودند که در راستای تقویت آن و تبدیل این پل موقت به پل دائمی از بتن کمک گرفته شده است. از طرف دیگر، همان‌طورکه در شکل ۷ نمایش داده شده است، پل جوادیه به عنوان پل نوساز با طول ۲۱۰ متر و عرض ۳۰ متر است. این پل دارای سه پایه بتنی نشیمنگاه، دو نشیمنگاه در سمت چپ و یک نشیمنگاه در سمت راست است. پایه‌های فلزی پل از نوع باکس فلزی طراحی شده است. در پل جوادیه ۱۲ کابل به ارتفاع شش متر تا ۳۰ متر به‌کار رفته است. این کابل‌ها، به عرشه ۱۲۶متری پل متصل شده است و ۱۸هزار تن بار را کنترل می‌کند.

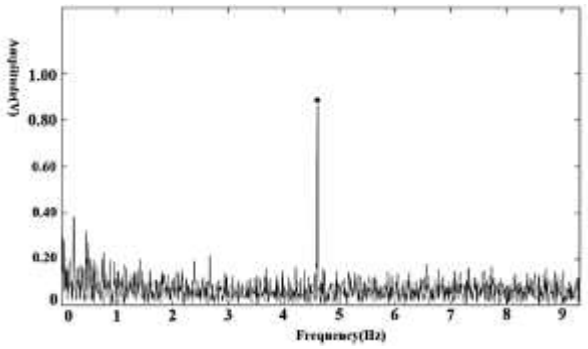
شکل ۶: نمایی از پل کریم‌خان زند به عنوان نمونه آزمایشی قدیمی ساز.

شکل ۷. نمایی از پل جوادیه به عنوان نمونه آزمایشی نوساز.

نتایج تجربی حاصل از اندازه‌گیری قبل از حذف نوفه در شکل ۸ نشان داده شده است.

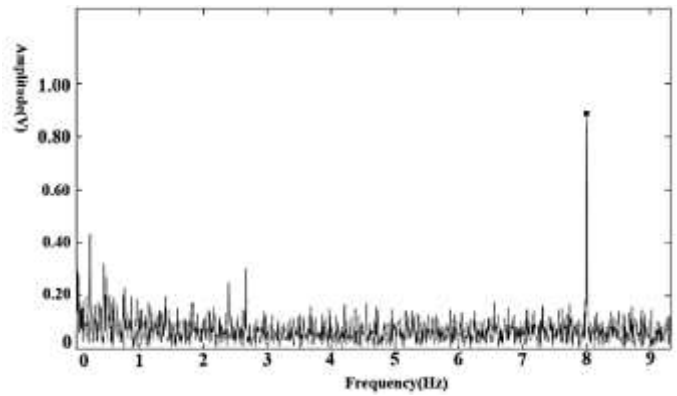


شکل ۸ اندازه‌گیری سیگنال‌های مربوط به پل نوساز قبل از حذف نوفه



شکل ۹. فرکانس ۴/۶ هرتزی مشاهده شده ناشی از عبور وسیله نقلیه سنگین بر روی پل نوساز

نتایج به‌دست آمده از مطالعات تجربی پس از گرفتن تبدیل فوریه و حذف نوفه‌های ذکر شده در بخش‌های بالا به صورت سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰. فرکانس ۸ هرتزی اندازه‌گیری شده ناشی از عبور وسیله نقلیه سبک بر روی پل نوساز.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله پاسخ ارتعاشی سازه پل به انضمام کلیه نوفه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیمیولینک نرم‌افزار متلب و مطالعات تجربی گزارش شده است. چیدمان تداخل سنجی همودین مایکلسون برای پیاده‌سازی آزمایشات تجربی دستگاه ارتعاش‌سنجی لیزری دوپلری استفاده شده است، همین‌طور در مطالعه شبیه‌سازی سیمیولینک بازوهای تداخلی چیدمان مایکلسون در طراحی پیاده شده است.

از تحلیل سیگنال‌های خروجی ناشی از مطالعات دریافت می‌شود که نتایج شبیه‌سازی و تجربی دارای هم‌خوانی دقیق و قابل توجهی هستند که این امر نشان‌دهنده صحت عملکرد دستگاه و همچنین درستی شبیه‌سازی‌های انجام شده است.

۸. مآخذ

[1] Anton, Oana, Ramon Fernandez, Elizabeth Rendon-Morales, Rodrigo Aviles-Espinosa, Harriet Jordan, and Heike Rabe, "Heart rate monitoring in newborn babies: a systematic review", *Neonatology*, 2019, Vol.116, no.3, pp.199-210.

[2] Garg, Aman, Bishakh Bhattacharya, and Devendra Gupta, "Design of a flexible endotracheal tube holder device and study of its effect on cutaneous blood flow in the skin using laser Doppler velocimetry", In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems XIII*, 2019, Vol.10972, p.1097229, International Society for Optics and Photonics.

[3] Garg, Piyush, Fernando Moreu, Ali Ozdagli, Mahmoud Reda Taha, and David Mascareñas, "Noncontact dynamic displacement measurement of structures using a moving laser Doppler vibrometer", *Journal of Bridge Engineering*, 2019, Vol.24, no.9, p.04019089.

[4] Vicente, Miguel Ángel, Dorys Carmen González, and Jesús Mínguez, "Novel Laser and Post-Tensioned Wire-Based System for Short-Term and Long-Term Monitoring Deflections in Bridges", *Structural Engineering International*, 2019, Vol.29, no.3, pp.382-389.

[5] Martinez, Daniel, and Eugene Obrien, "Bridge damage localisation using displacement and velocity measurements", *TRUSS Training in Reducing Uncertainty in Structural Safety: D5. 2 Final Report: WP5*, 2019, p.37.

[6] Nassif, Hani H., Mayrai Gindy, and Joe Davis, "Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration", *Ndt & E International*, 2005, Vol.38, no.3, pp.213-218.

[7] Miyashita, Takeshi, and Masatsugu Nagai, "Vibration-based structural health monitoring for bridges using laser Doppler vibrometers and MEMS-based technologies", *Int. J. Steel Struct*, 2008, Vol.8, no.4, pp.325-331.

[8] Sedeh, Amirhossein Barati, Pouya Gourani, Vandad Saneinejad, and Fatemeh Rezaei, "Helicopter main rotor angular velocity analysis by laser Doppler velocimetry: simulation and experimental results", *Applied optics*, 2019, Vol.58, no.18, pp.5009-5017.

[9] Zhang, Yinghao, Xiaoyan Deng, Zhou Xu, and Peipei Yuan, "Watermelon Ripeness Detection via Extreme Learning Machine with Kernel Principal Component Analysis Based on Acoustic Signals", *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2019, Vol.33, no.08, p.1951002.

[10] Keenan, Lucas, and Katie Osterday Chapin, "Laser Doppler Velocimetry", *Final Report: Physic 173: Biophysic Laboratory*, 2009.

[11] Pedrotti, Frank L., Leno M. Pedrotti, and Leno S. Pedrotti, " *Introduction to optics",* Cambridge University Press, 2017.

[12] Fabiny, Larry, and Alan D. Kersey, "Interferometric fiber-optic Doppler velocimeter with high-dynamic range", *IEEE photonics technology letters*, 1997, Vol.9, no.1, pp.79-81.

[13] Zhang, Zihua, and Jin Wu, "On principal noise of the laser Doppler velocimeter", *Experiments in fluids*, 1987, Vol.5, no.3, pp.193-196.

[14] Albrecht, H-E., Nils Damaschke, Michael Borys, and Cameron Tropea, "*Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques*", Springer Science & Business Media, 2013.

[15] Czarske, Jürgen W., "Statistical frequency measuring error of the quadrature demodulation technique for noisy single-tone pulse signals", *Measurement Science and Technology*, 2001, Vol.12, no.5, p.597.

[16] Rothberg, Steve, "Numerical simulation of speckle noise in laser vibrometry", *Applied Optics*, 2006, Vol.45, no.19, pp.4523-4533.

پی‌نوشت:

1. Laser Doppler Vibrometry
2. Simulink
3. MATLAB
4. Homodyne Michelson Interferometer
5. Keenani & et al.
6. Nassif & et al.
7. Miyashita & et al.
8. Photodiode
9. Differential Circuit
10. Shot Noise
11. Flicker Noise
12. Speckle Noise