

Video Measurement Method Development to Modal Identification of 3D Sandwich Panels

Pourya Talebsafa¹, Omid Rezaifar^{2*}, Hossein Naderpour²

1- Civil engineering department, Semnan University, Semnan, Iran

2- Associate Professor, Civil engineering department, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Operational modal analysis typically requires the physical attachment of a sensor to measure the structure vibration. As a non-contact method, digital cameras are relatively inexpensive, fast, and providing high spatial resolution results. The aim of this study is to identify the dynamic parameters of structures (frequency and damping ratio) by using video measurement (output only) based on the phase. For this purpose, it was only used mobile smartphones to identify modal parameters. The accelerometer sensor in the 3 attached smartphones was used to extract vibrational information. Video recorded by another mobile smartphone simultaneously identifies the dynamic parameters. In video measurement, the steerable pyramid transform is applied to frames that were extracted from the video to identify the local phases encoded in the image. After that, blind source separation (complexity pursuit) and single value decomposition techniques were applied to the image phase. Frequencies and damping ratios are extracted by the Fourier transform and logarithmic reduction technique. Thus, to validate the proposed method, two samples of 3D wall sandwiches panel, including a concrete sample and a straw sample that were already loaded and their stiffness was reduced by an average of 90%, were used. The results showed that the proposed method was able to extract the frequencies and damping ratios of the panels with an error of less than 2%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 June 2021

Revise Date: 08 August 2021

Accept Date: 03 September 2021

Keywords: Modal analysis
3D sandwich panel
Blind source separation
Image processing
Video measurement

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.290448.2469

*Corresponding author: Omid rezaifar

Email address: orezayfar@semnan.ac.ir

توسعه روش اندازه‌گیری ویدویی برای تعیین مشخصات دینامیکی پانل‌های ساندویچی

سه بعدی

پوریا طالب‌صفا^۱، امید رضایی‌فر^{۲*}، حسین نادرپور^۲

۱- گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

آنالیز مودال عملیاتی در حالت معمول نیاز به اتصال فیزیکی حس‌گر برای اندازه‌گیری ارتعاش سازه دارد. این حسگرها معمولاً به تعداد محدود در نقاط مختلف به صورت گسسته نسبت به هم روی سطح سازه جایابی می‌شوند که باعث کاهش قدرت تفکیک‌پذیری برای مکان‌یابی خرابی و هم‌بستگی و به‌هنگام‌سازی مدل در مقیاس‌های بزرگ خواهد شد. به‌عنوان یک روش غیر تماسی، دوربین‌های دیجیتال نسبتاً کم‌هزینه، سریع بوده و دارای قابلیت ارائه تفکیک‌پذیری مکانی بالا، اندازه‌گیری و شبیه‌سازی هم‌زمان نیز هستند. هدف این پژوهش شناسایی خواص دینامیکی سازه‌ها (فرکانس و نسبت‌های میرایی) با استفاده از اندازه‌گیری ویدویی و پردازش تصویر (فقط بر اساس خروجی) مبتنی بر فاز تصویر است که بدین منظور در این ایده جدید تماماً از گوشی هوشمند همراه برای شناسایی خواص مودال مورد استفاده قرار گرفته است. از حس‌گر شتاب‌سنج موجود در ۳ گوشی هوشمند برای برداشت اطلاعات ارتعاشی استفاده شده است. ضبط ویدئو توسط گوشی همراه دیگر هم‌زمان با تحریک به‌منظور اندازه‌گیری ویدویی جهت شناسایی خواص مودال انجام شده است. برای اندازه‌گیری ویدویی فیلتر هرمی قابل هدایت بر روی قاب‌های تصویر ویدویی حاصل از ارتعاش سازه اعمال می‌شود تا فازهای محلی پیکسل‌های کدگذاری شده در تصویر استخراج شوند. سپس با اعمال تکنیک جداساز کور منابع روی فاز تصاویر و با استفاده از روش‌های تجزیه مقادیر منفرد و تبدیل فوریه و کاهش لگاریتمی، فرکانس‌های مودال و نسبت‌های میرایی استخراج شده است. بدین ترتیب برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی از ۲ نمونه ساندویچ پانل دیواری شامل یک نمونه بتنی و یک نمونه کاه‌گلی که از قبل تحت بارگذاری قرار گرفته بودند و سختی آن‌ها به‌طور میانگین ۹۰٪ کاهش یافته، استفاده شده است. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی توانسته است فرکانس‌ها و نسبت‌های میرایی پانل‌ها را در ارتعاش آزاد با خطای کمتر از ۲٪ برای هر دو نمونه استخراج نماید. با بهینه‌سازی روش اندازه‌گیری ویدویی می‌توان از این روش برای تعیین مشخصات دینامیکی در سازه‌ها استفاده نمود.

کلمات کلیدی: آنالیز مودال، پانل‌های ساندویچی ۳ بعدی، جداساز کور منابع، پردازش تصویر، اندازه‌گیری ویدویی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.290448.2469	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.290448.2469	۱۴۰۱/۰۲/۳۱	۱۴۰۰/۱۵/۲۴	۱۴۰۰/۰۶/۱۲	۱۴۰۰/۱۵/۱۷	۱۴۰۰/۰۳/۲۳
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				امید رضایی‌فر		
				orezayfar@semnan.ac.ir		

۱- مقدمه

تحلیل دینامیکی، یکی از ضروریات مهم در طراحی، ساخت و نگهداری سازه‌ها است. اما به جهت در دسترس نبودن جواب تحلیلی برای سازه‌های پیچیده، با بارگذاری‌ها و شرایط مرزی مختلف و نیز وجود خطاهایی نظیر خطاهای حاصل از به‌کارگیری فرضیات و تئوری‌های نامناسب، با مشکلاتی مواجه می‌باشند. از این رو آنالیز مودال، به‌عنوان ابزار مناسبی برای دستیابی به خواص دینامیکی سازه‌ها شناخته شده است. آنالیز مودال تجربی و عملیاتی، دوطبقه کلی از روش‌های مورد استفاده برای شناسایی خواص دینامیکی سازه‌ها از داده‌های اندازه‌گیری شده، است [۱].

در روش آنالیز مودال عملیاتی پاسخ ارتعاشی سیستم تحت تأثیر نیروهای محیطی در شرایط کاری عادی اندازه‌گیری شده و به‌منظور استخراج پارامترهای مودال سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد یا به عبارت دیگر آنالیز سیستم فقط بر اساس داده‌های خروجی انجام می‌پذیرد. به‌علاوه در این روش مدل خطی شده حول شرایط نیرویی و مرزی واقعی برای کل سیستم (نه بخش جداشده‌ای از آن) به‌دست می‌آید [۲-۳].

آنالیزهای مودال تجربی و عملیاتی نیازمند اتصال فیزیکی کابل‌ها یا فرستنده‌های بی‌سیم حس‌گرها به سازه است، مانند شتاب‌سنج‌ها که برای اندازه‌گیری‌های ارتعاشی در سازه نصب شده‌اند [۴]. در حالی که این حس‌گرها دقت بالایی دارند اما می‌توانند در بارگذاری جرمی روی سازه‌های سبک و کوچک به دلیل وزن بالای کابل کشی و تجهیزات تأثیرگذار باشند و نصب آن‌ها روی سازه‌های بزرگ‌تر پروسه‌ی هزینه‌بر و زمان‌بر و نیازمند نیروی کار ماهر است. مضافاً این حس‌گرها فقط اندازه‌گیری‌های پراکنده و دارای نقطه عطف گسسته را ارائه می‌کنند که باعث رسیدن به‌وضوح پایین در سنجش مکانی می‌شود که معمولاً برای تشخیص خرابی مبتنی بر مودال، همبستگی مدل و به‌روزرسانی سازه‌ها در مقیاس بزرگ‌تر ناکافی است [۵]. به‌عنوان یک روش غیرتماسی، استفاده از دوربین‌های دیجیتال و ویدیویی نسبتاً کم‌هزینه، سریع‌العمل بوده و اندازه‌گیری هم‌زمان و متوالی با دقت و تفکیک فضایی بالا را ارائه می‌کنند [۵-۶]. ترکیب الگوریتم‌های پردازش تصویر (مانند همبستگی تصویر [۸]، جریان نوری [۹]۲) با اندازه‌گیری‌های مبتنی بر دوربین و ویدیویی، برای اندازه‌گیری ارتعاشی انواع مختلف سازه‌ها با موفقیت استفاده شده است [۱۰]. در دهه اخیر، همبستگی تصویر دیجیتالی (DIC) و تکنیک‌های سه‌بعدی ردیابی نقطه‌ای در تحلیل‌های تجربی مودال معرفی شده‌اند [۱۰-۱۱].

این مطالعه قصد دارد یک الگوریتم جدیدی را که فقط مبتنی بر خروجی (اندازه‌گیری‌های ویدئویی) است تعریف کرده و آن را توسعه دهد که نیازی به آماده‌سازی سطح سازه ندارد و می‌تواند به‌صورت نسبتاً کارآمد و خودکار اجرا شود. با استفاده از یک روش تجزیه و نمایش هرمی چند مقیاسی روش جداسازی کور منابع (BBS) می‌توان مدل و میدان کامل فازهای زودگذر فضایی پیکسلی که ارتعاش‌های محلی سازه در اندازه‌گیری ویدئویی (فقط خروجی) را کدگذاری می‌کنند، استخراج نمود. روش پیشنهادی قادر است کورکورانه فرکانس‌های رزونانس و نسبت‌های میرایی را از منظر اندازه‌گیری‌های ویدیویی ثبت شده از سازه را استخراج کند. روش پیشنهادی نیازمند ورودی‌های کم‌کاربر یا نظارت کمتر برای شناسایی مودها با استفاده از جداساز کور منابع است که قادر بوده مودهای فاصله نزدیک را نیز کنترل کند [۱۳]. آزمایش‌های آزمایشگاهی این روش توسعه‌یافته را اعتبار می‌بخشند.

یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از اندازه‌گیری ویدیویی مبتنی بر بزرگ‌نمایی فازی به شناسایی کور پارامترهای مودال در سازه سه طبقه مقیاس شده از جنس آلومینیوم پرداختند. در این پژوهش برای اعتبارسنجی روش خود از شتاب‌سنج پیزوالکتریک و برای برداشت ویدئو از دوربین سرعت بالا استفاده نمودند. در این تحقیق نشان داده شد که روش پیشنهادی قادر است به‌عنوان یکی از روش‌های آنالیز مودال مورد استفاده قرار گیرد [۱۳]. اسلاویچ و همکاران در سال (۲۰۱۸) در پژوهشی به شناسایی پارامترهای مودال در محیط دارای نویز زیاد و فرکانس‌های بسیار بالا تا ۱۰ کیلوهرتز پرداختند. در این تحقیق نشان داده شده است که با استفاده از ترکیب روش حداقل مربعات

¹ Image Correlation

² Optical Flow

³ Digital Image Correlation

⁴ Steerable Pyramid Multi Scale

⁵ Blind Source Separation

فرکانس مختلط (LSCF) همراه با روش حداقل مربعات دامنه فرکانس (LSFD)، شناسایی فرکانس‌های بالا امکان‌پذیر است. با استفاده از روش ترکیبی بین شتاب‌سنج‌ها و دوربین سرعت بالا می‌توان به شناسایی شکل‌های مود در محیط نوین‌دار پرداختند [۱۴]. ژی و همکاران در سال ۲۰۱۹ از دوربین و حسگرهای شتاب‌سنج موجود در گوشی‌های هوشمند برای ارزیابی و پایش سلامت قاب فولادی در سه بعد تحت نیروی شبیه‌سازی شده زلزله نوتریج روی میز لرزان استفاده نمودند و همچنین اعتبار سنجی این روش با استفاده از جابجایی سنج لیزری و شتاب‌سنج پیزوالکتریک انجام گرفت [۱۵].

در این مقاله برداشت داده‌ها اعم از شتاب سیستم توسط حسگر شتاب‌سنج ۳ گوشی هوشمند مختلف سامسونگ، ضبط ویدیو تحریک سازه تماماً توسط گوشی هوشمند آیفون ۹۱۱ انجام شده است. لازم به ذکر است دقت اندازه‌گیری در تمام روش‌های اندازه‌گیری ویدیویی تا حد بسیار زیادی وابسته به نرخ تصویربرداری (fps) دوربین فیلم‌برداری است. با توجه به استفاده و انجام تمام مراحل با گوشی همراه به عنوان نوآوری روش، لازم بوده است از سازه‌ای استفاده شود که فرکانس طبیعی آن تا حدی نزدیک به نرخ تصویربرداری دوربین استفاده شده باشد. کلیه کدهای مربوطه در نرم‌افزار متلب نوشته شده است و کلیه مراحل پردازش تصویر و اندازه‌گیری ویدیویی در محیط این نرم‌افزار انجام گرفته است. برداشت شتاب سازه توسط گوشی همراه با استفاده از نرم‌افزار phyphox انجام گرفته است و همچنین تحلیل و برای ترسیم مختصات مودال در هر مود به دست آمده از شتاب‌سنج گوشی همراه و اندازه‌گیری ویدیویی به منظور استخراج فرکانس‌ها و نسبت‌های میرایی سازه از نرم‌افزار seismo signal استفاده شده است.

۲- تئوری روش

هر قاب تصویر از ویدیو را می‌توان به صورت شدت تصویر $I(x + \delta(x, t))$ نشان داد که در آن x مختصات پیکسل‌ها، $\delta(x, t)$ مقدار تغییرات شدت روشنایی تبدیل‌یافته‌ی پیکسل‌ها بر اثر حرکت سازه است. قاب تصویر نشان داده شده در واقع تصویر خاکستری شده و تبدیل‌شده‌ی (پیکسل‌ها به صورت ستونی مرتب شده) هر قاب تصویر است.

از بین تکنیک‌های پردازش تصویری که به‌طور گسترده برای تخمین حرکت استفاده می‌شود، روش همبستگی تصویر دیجیتال^{۱۵} و سایر روش‌های مشابه تطبیق الگویی [۸]، مقدار $\delta(x, t)$ را با استفاده از حداکثر همبستگی شدت تصویر بین قاب تصویر فعلی $I(x + \delta(x, t))$ و قاب تصویر مرجع $I(x)$ تخمین می‌زنند، درحالی‌که تکنیک‌های جریان نوری^{۱۶} تنظیم منظم قاب‌های تصویر فعلی و مرجع با استفاده از جریان نوری یا پایداری روشنایی تصاویر، میزان حرکت و جابجایی سازه را تخمین می‌زنند [۱۶]. هر دو روش بر اساس شدت تصویر است، دقیقاً همان‌طور که حرکت نوسانی را می‌توان با استفاده از دامنه، و فاز آن را با استفاده از تبدیل فوریه مشخص کرد؛ حرکت ارتعاشی سازه‌ها را نیز می‌توان با استفاده از دامنه‌های محلی و فازهای محلی رمزگذاری شده در تصاویر اندازه‌گیری شده به دست آورد، که می‌توان توسط فیلترهای محلی و چند مقیاسی به راحتی استخراج شوند. مخصوصاً در مطالعات پیشین نشان داده شده است که اطلاعات حاصل از فاز تقریباً بهتری از حرکت را نسبت به دامنه‌ها (مربوط به مقاومت شدت) ارائه می‌دهد و نسبت به تغییرات نور، چشم‌انداز و زمینه‌ی تصویر و سطح سازه نسبتاً حساس نمی‌باشد [۱۷]. در نتیجه با توجه مزایای استفاده از تصویر نسبت به روش‌های دیگر در این پژوهش نیز از فاز تصاویر یا همان فاز قاب‌های تصویر به دست آمده از ویدیوی ضبط شده استفاده شده است.

به دلیل اینکه $\delta(x, t)$ که در $I(x + \delta(x, t))$ رمزگذاری شده است و همچنین به دلیل اینکه روی موقعیت مکانی هر پیکسل در قاب تصویر عمل می‌کند، در نتیجه تبدیلات در حوزه مکان هستند و هر فیلتر و تبدیلی که برای استخراج فاز تصاویر استفاده می‌شود باید در حوزه مکان بوده و از تبدیلات در حوزه فرکانسی استفاده نمی‌شود. تبدیل هرم قابل هدایت چند مقیاسی بوده و بر خلاف تبدیل ویولت^{۱۷}

^۶ Least-Squares Complex Frequency

^۷ Least-Squares Frequency-Domain

^۸ Samsung

^۹ iPhone 11

^۱ Frame per Second

0

^۱ Matlab

1

^۱ Frame

2

^۱ Image intensity

3

^۱ translated image intensity

4

^۱ Digital Image Correlation

5

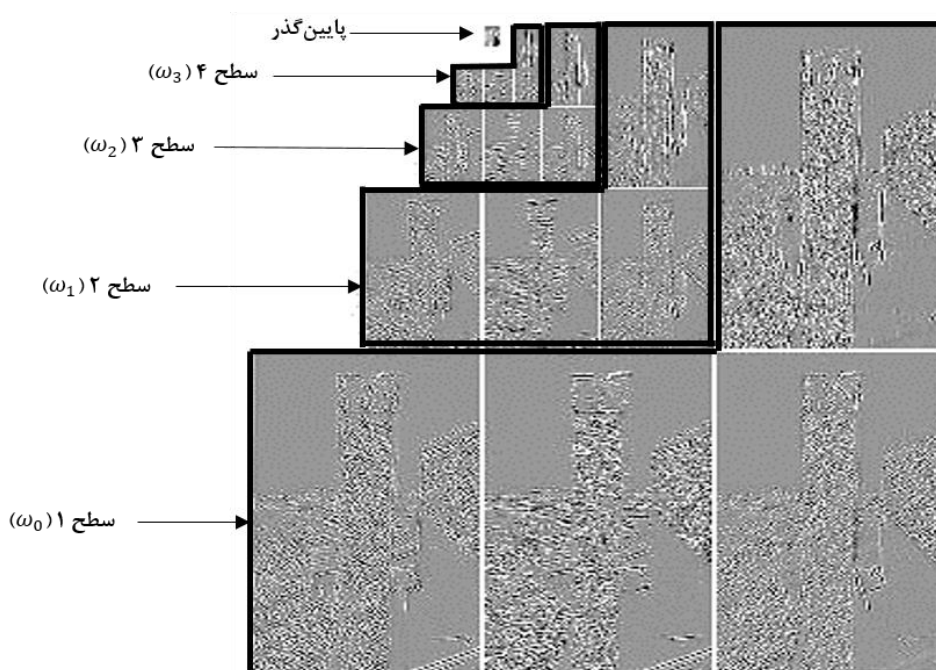
^۱ Optical Flow Techniques

6

^۱ Wavelet transform

7

غیر دگرنامی ابوده و می توان فازهای محلی و دامنه های محلی را به راحتی استخراج نمود [۱۸]. در شکل ۱ تصویر پانل ساندویچی ۳ بعدی کاه گلی استفاده شده در این پژوهش بعد از اعمال تبدیل هرم قابل هدایت نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود تصویر در ۴ سطح به همراه یک فیلتر پایین گذر در ۴ جهت حرکتی (زاویه تغییرات و حرکت سیستم در تصویر) نشان داده شده است.



شکل ۱: هرم ساخته شده از تصویر مرجع در ۴ سطح و ۴ جهت

این تبدیل روی هر قاب تصویر (N پیکسل) از ویدیو (T نمونه های زمانی یا همان تعداد قاب های تصویر که نقش پارامتر زمان را بر عهده دارند) برای ساخت هرم در سطوح مختلف (ω) به مانند رابطه (۱) اعمال شده است [۱۹].

$$I(x + \delta(x, t)) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} R_{\omega}(x, t) = \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} \rho_{\omega}(x, t) e^{j2\pi\omega_0(x + \delta(x, t))} \quad (1)$$

که $R_{\omega}(x, t)$ پاسخ فیلتر بعد از اعمال آن به تصویر (هر قاب تصویر از ویدیو) در سطح ω است. از رابطه (۱) مشاهده می شود که:

$$R_{\omega}(x, t) = \rho_{\omega}(x, t) e^{j2\pi\omega_0(x + \delta(x, t))} \quad (2)$$

که در آن $\rho_{\omega}(x, t)$ دامنه محلی (متناظر با شدت لبه تصویر) است.

بعد از اعمال فیلتر قابل هدایت روی هر کدام از قاب های تصویر استخراج شده از ویدیو و در هر سطح، فاز تصویر $\psi(x, t)$ که شامل حرکت ارتعاشی سازه $\delta(x, t)$ است به دست می آید. فاز محلی از رابطه (۳) به دست می آید:

$$\psi(x, t) = 2\pi\omega_0(x + \delta(x, t)) = 2\pi\omega_0x + 2\pi\omega_0\delta(x, t) \quad (3)$$

که ω_0 نشان دهنده سطح ۱ (بدون کاهش ابعاد تصویر و در مقیاس واقعی) است. با حذف میانگین زمانی $2\pi\omega_0x$ از $\psi(x, t)$ رابطه (۴) حاصل می شود:

$$\delta'(x, t) = 2\pi\omega_0\delta(x, t) \quad (4)$$

1 Non-aliasing	8
1 Local Amplitude	9
2 Local Phase	0

که $\delta'(x, t)$ فاز تصویر اصلاح شده بعد از حذف مقدار میانگین زمانی است. که می توان آن را به عنوان ترکیب خطی از پاسخ مودال به صورت رابطه (۵) نوشت:

$$\delta'(x, t) = \Phi(x)q(t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x)q_i(t) \quad (5)$$

که n تعداد مودها، N در سطح ۱ تعداد پیکسلها که از برداری نمودن تصویر به دست آمده و $\Phi \in \mathbb{R}^{N \times n}$ ماتریس شکل مود است که $\varphi_i(x)$ به عنوان آمین شکل مود است و $q \in \mathbb{R}^{n \times T}$ بردار پاسخ مودال که $q_i(t)$ ، آمین مختصات مودال است. برای شناسایی خواص مودال فقط بر اساس خروجی، هم Φ و هم $q(t)$ از فاز اصلاح شده به دست آمده $\delta'(x, t)$ قابل شناسایی است. به دلیل اینکه بعد مکانی پیکسلها (N) خیلی بیشتر از بعد مودال و تعداد مودهای فعال (n) است ($N \gg n$) رابطه (۵) دارای یک بعد مکانی بالا در مقابل یک بعد مودال کم است که این مسئله به صورت مستقیم قابل حل نیست. بنا به همین دلیل از جداساز کور منابع (BBS) استفاده می شود. روش های جداساز کور منابع دو گام کاهش ابعاد و جداسازی مودال دارند [۲۰].

در آنالیز دینامیکی سازه ها، مودهای فعال سازه تحت تحریک را با استفاده از رتبه ماتریس حرکت یا همان مقادیر منفرد غیر صفر تشخیص داده می شود. عموماً و نه همیشه تعدادی مود فعال غالب در پاسخ ارتعاشی سازه وجود دارد، بنابراین رتبه ماتریس δ' بیانگر تعداد مودهای فعال سازه است. از روش تجزیه مقادیر منفرد (SVD) برای کاهش دادن ابعاد و حجم محاسبات استفاده شده است. بعد از کاهش ابعاد و برای به دست آوردن مختصات مودال، از روش جداساز کور منابع ردگیری پیچیدگی (CP۳) روی پاسخ ارتعاشی سازه استفاده شده است [۲۱]. با به دست آوردن مختصات مودال با استفاده از روش کاهش لگاریتمی [۴] تبدیل فوریه [۵] به ترتیب مقدار نسبت های میرایی و فرکانس استخراج می شود.

۳- مشخصات پانل های دیواری

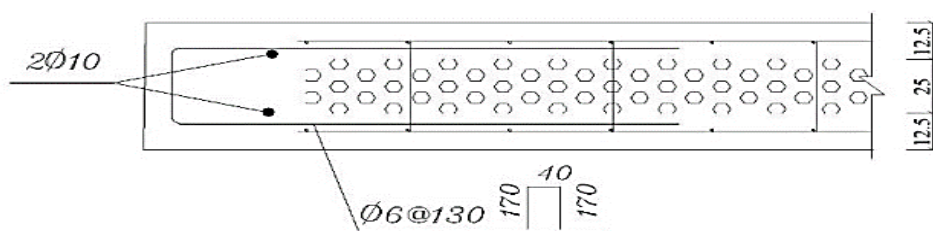
در این تحقیق از ۲ نمونه از نمونه های پانل دیواری مورد استفاده در پایان نامه ای تحت عنوان " بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی پانل های سه بعدی با مصالح شاکریتی منطبق بر الگوهای توسعه پایدار " به نگارش سیده مرضیه قیامی تکلیمی تحت راهنمایی دکتر امید رضایی فر و دکتر مجید قلهکی استفاده شده است [۲۲]. نمونه های سازه ای در دو مقیاس ساخته شده است، با مقیاس ۱:۲/۳۵ و با مقیاس واقعی می باشند. شبکه جوش شده بر روی پانل ها از میلگردهایی با جنس گالوانیزه بوده و در نمونه ها با مقیاس ۱:۲/۳۵ به ابعاد ۲×۲ سانتی متر و در مقیاس واقعی به ابعاد ۸×۸ سانتی متر بر روی پانل هایی از جنس پلی استایرن ساخته شده اند. پانل های با مقیاس ۱:۲/۳۵ دارای ابعاد ۰/۵×۱/۳۵ متر به ضخامت ۵ سانتی متر می باشند. قطر میلگردهای استفاده شده در این پانل های دیواری در حدود ۳/۵ میلی متر می باشد. در این پانل ها برای داشتن عرض یک متری از دو پانل هم زمان در کنار یکدیگر استفاده شده است که روی هر کدام از آن ها از میلگرد حرارتی به قطر ۶ میلی متر به طول ۵۰ سانتی متر، طول مهاری ۲۵ سانتی متر استفاده شده است. در پانل ها با مقیاس واقعی که دارای ابعاد ۱×۱/۲۰ متر بوده نیز از آرماتور حرارتی به قطر ۶ میلی متر استفاده شده است. کلیه این آرماتورها به آرماتورهای انتظاری که در پی بتنی تعبیه شده است متصل می گردند.

جدول ۱: مشخصات پانل های استفاده شده در این پژوهش

نام نمونه	مقیاس	ابعاد (طول×عرض×ارتفاع)	تعداد	مشخصات دیوار
دیوار بتنی	۱:۲/۳۵	۱/۳×۰/۰۹×۱	۱	پانل دیواری بتنی با عیار سیمان ۲۰۰
دیوار کامگلی	۱:۱	۱/۲×۰/۱۶×۱	۱	دیوار کامگلی

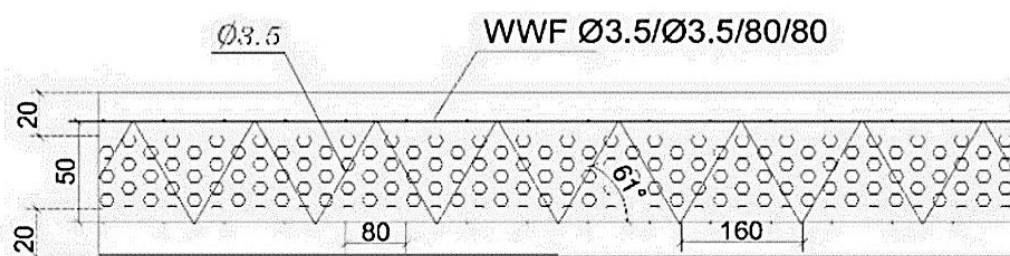
² Rank 1
² Singular Value Decomposition 2
² Complexity Pursuit 3
² Logarithmic Decrement 4
² Fourier Transform 5

همچنین در شکل ۲ نحوه قرارگیری و مشخصات آرماتورهای اتصال نیز ارائه شده است.

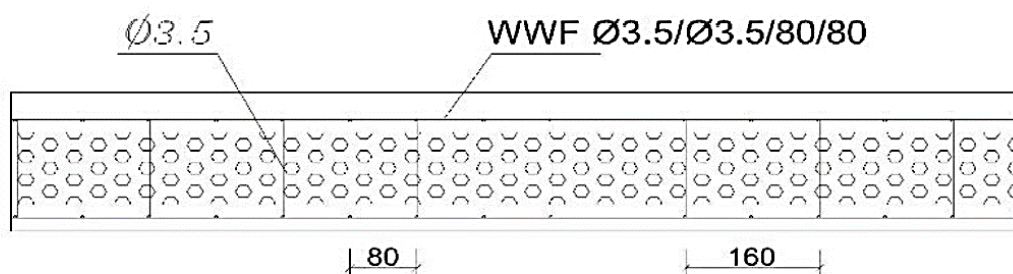


شکل ۲: نحوه اتصال و مشخصات مهار جانبی دیوار (ابعاد به میلی‌متر) [۲۲]

در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب مقطع طولی و عرضی پانل‌های با مقیاس ۱:۲/۳۵ به همراه جزئیات آن‌ها نشان داده شده است.

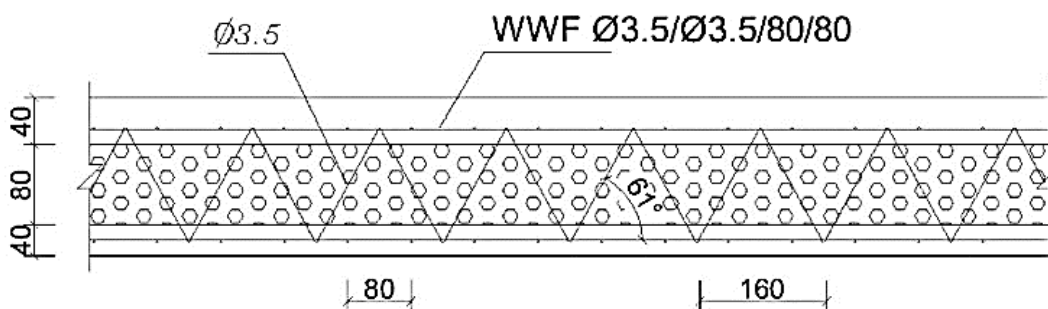


شکل ۳: مقطع طولی پانل‌ها با مقیاس ۱:۲/۳۵ (ابعاد به میلی‌متر) [۲۲]

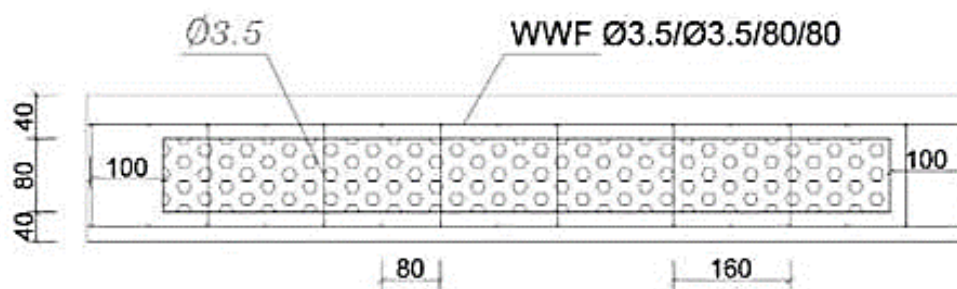


شکل ۴: مقطع عرضی پانل‌ها با مقیاس ۱:۲/۳۵ (ابعاد به میلی‌متر) [۲۲]

در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب مقطع طولی و عرضی پانل‌های با مقیاس واقعی به همراه جزئیات آن‌ها نشان داده شده است.

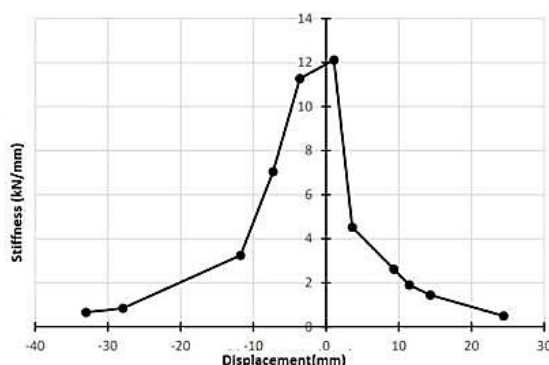


شکل ۵: مقطع طولی پانل‌ها با مقیاس واقعی (ابعاد به میلی‌متر) [۲۲]



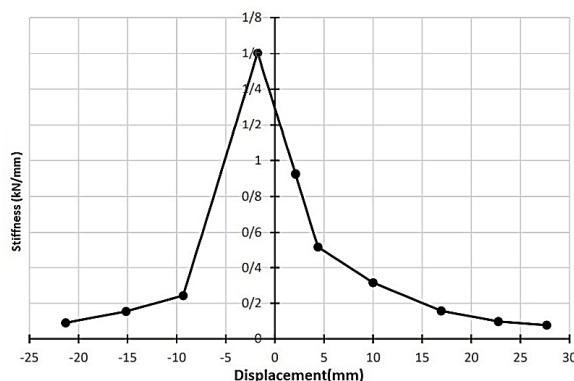
شکل ۶: مقطع عرضی پانل‌ها با مقیاس واقعی (ابعاد به میلی‌متر) [۲۲]

ذکر این نکته حائز اهمیت است که نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش قبلاً مورد آزمایش قرار گرفته و در آن‌ها خرابی‌هایی در اثر بارگذاری ایجاد شده است. علت انتخاب این نمونه‌ها این است که ساندویچ پانل‌ها در حالت سالم و بدون خرابی دارای فرکانس‌های به مراتب بالا می‌باشند به طوری که در تحقیقات گذشته فرکانس مود اول حدود ۱۱۰ هرتز اندازه‌گیری شده است [۲۳]. با خرابی‌های شکل گرفته در آن‌ها بدیهی است که سختی سازه کم شده است و طبیعتاً مقدار فرکانس طبیعی سازه نیز کاهش پیدا کرده است و این امر باعث بالا رفتن دقت در اندازه‌گیری ویدیویی است چراکه نرخ تصویربرداری دوربین استفاده شده در این آزمایش ۲۴۰ تصویر در ثانیه (fps) بوده است. به همین دلیل نمودار سختی‌های مورد استفاده در این پژوهش در ادامه آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود سختی نمونه دیوار بتنی بعد از بارگذاری در حدود ۹۸٪ کاهش یافته است که به تبع فرکانس نمونه به دلیل ایجاد خرابی در آن نیز کاهش یافته است.



شکل ۷: سختی نمونه دیوار بتنی [۲۲]

با توجه به شکل ۸ سختی دیوار کاه‌گلی نیز به میزان ۹۳٪ کاهش یافته است. با توجه به نتایج حاصل از نمودار سختی دیوارها بعد از بارگذاری بدیهی است که فرکانس طبیعی آن‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کند.



شکل ۸: سختی نمونه کاه‌گلی کاه‌گل [۲۲]

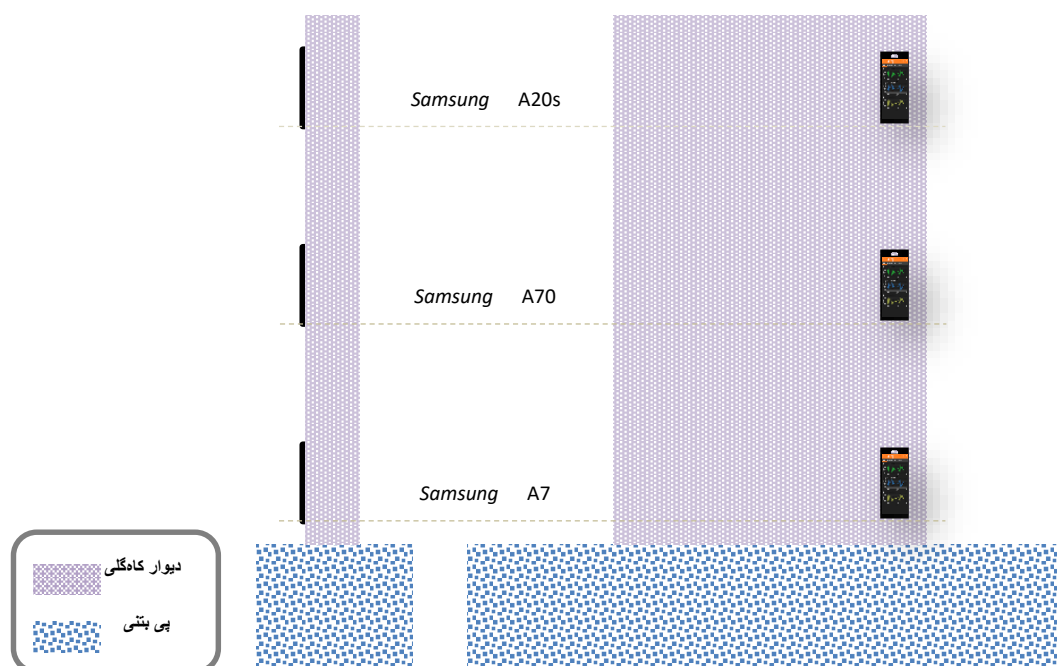
۴- مشخصات دستگاه‌های تلفن همراه مورد استفاده

در این پژوهش جمعاً از ۴ دستگاه تلفن همراه استفاده شده است که ۳ عدد از آن‌ها صرفاً برای اندازه‌گیری شتاب توسط حس‌گرهای شتاب‌سنج تعبیه شده در آن‌ها استفاده شده است که در جدول ۲ مشخصات آن‌ها آورده شده است.

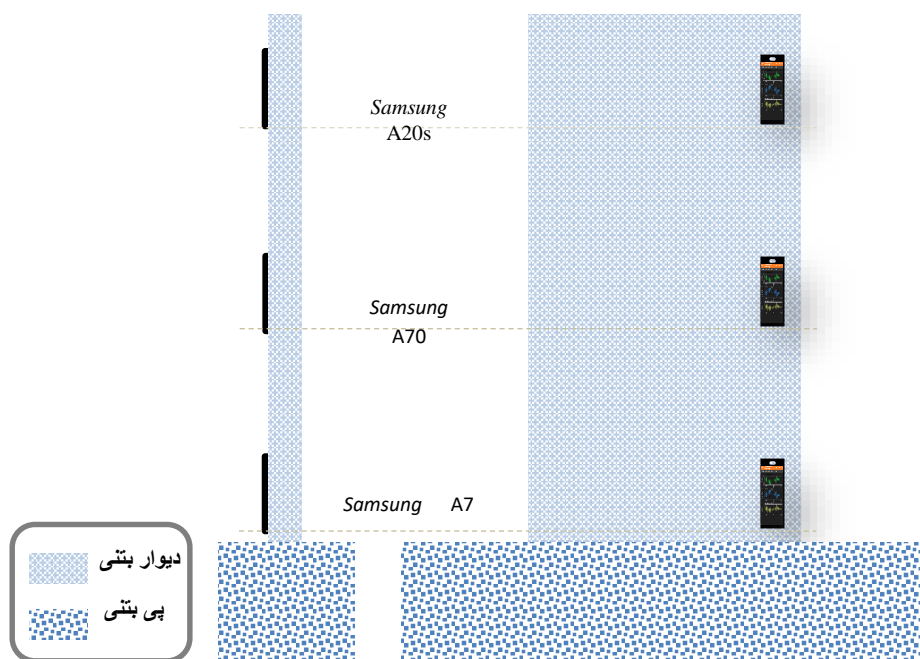
جدول ۲: مشخصات دستگاه‌های تلفن همراه مورد استفاده برای برداشت شتاب توسط حس‌گر شتاب‌سنج

برند/مدل	تعداد	نوع شتاب‌سنج	شرکت سازنده شتاب‌سنج	حداکثر دامنه (m/s^2)	وضوح (m/s^2)
سامسونگ A70	1	Lsm6dsm	STMicro	۱۵۶/۹۹	۰/۰۱
سامسونگ A20s	1	BMI160	Bosch	۷۸/۴۵	۰/۰۰۲۳۹۵
سامسونگ A7	1	Bosch	Bosch	۳۹/۲	۰/۰۰۴۷۸۸

در شکل ۹ و ۱۰ شمای کلی از محل قرارگیری و نصب دستگاه‌های تلفن به ترتیب قرارگیری بر روی دیوار کاه‌گلی و بتنی نشان داده شده است. در شکل ۱۱ نیز محل قرارگیری دستگاه‌های تلفن هوشمند بر روی دیوارهای مورد آزمایش نشان داده شده است. برای تحریک سازه عمود بر محور ضعیف (ضخامت کمتر) ضربه وارد شده است و سپس حرکت آزاد سازه توسط حس‌گر شتاب‌سنج گوشی‌های همراه برداشت شده است و هم‌زمان با استفاده از دوربین گوشی همراه چهارم این حرکت سازه ضبط شده است.



شکل ۹: نمایش تصویری از جانمایی دستگاه‌های تلفن همراه بر روی دیوار کاه‌گلی



شکل ۱۰: نمایش تصویری از جانمایی دستگاه‌های تلفن همراه بر روی دیوار بتنی



شکل ۱۱: محل قرارگیری و نصب گوشی‌های هوشمند جهت برداشت شتاب سازه

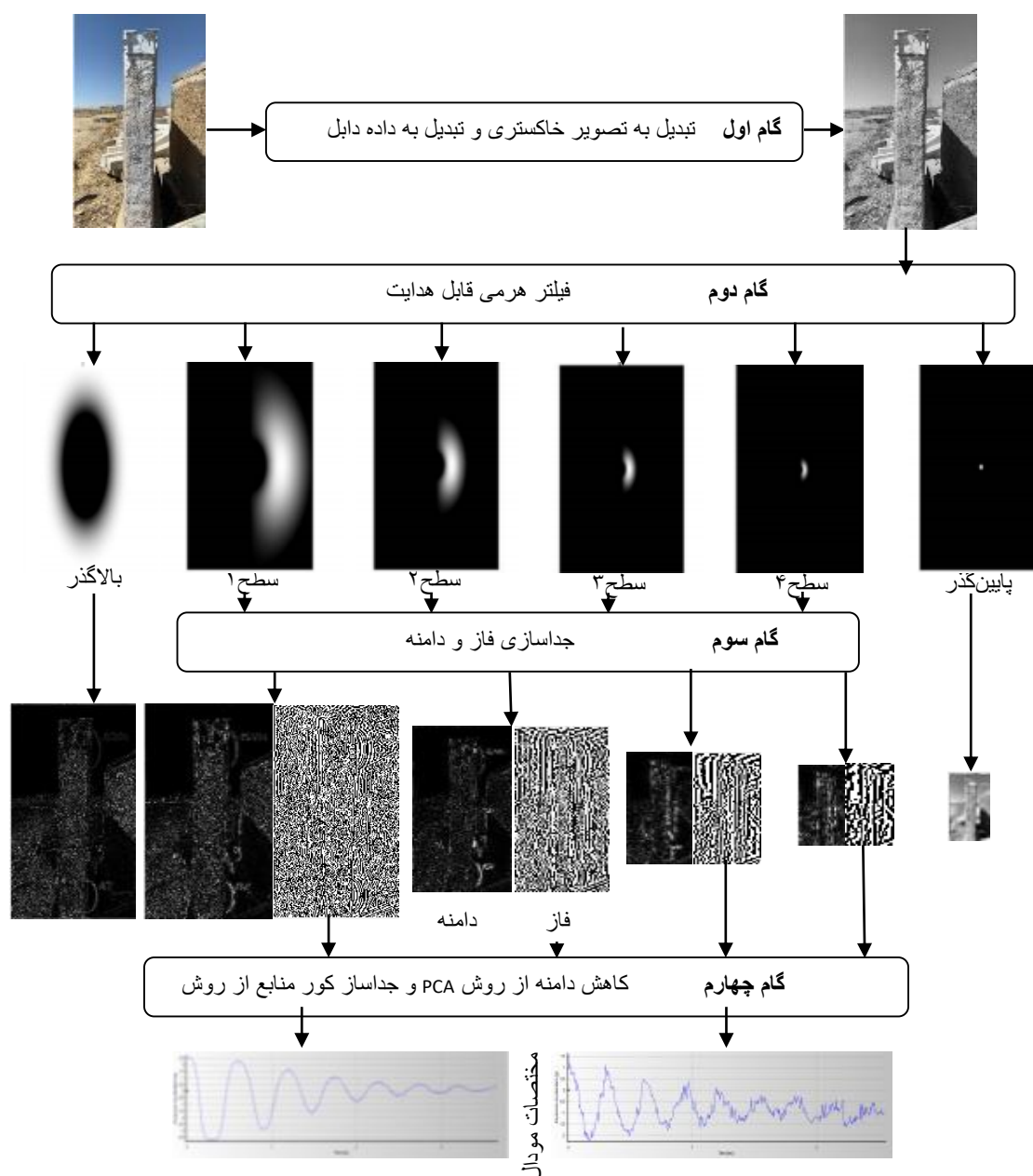
برای ضبط ویدیو سرعت بالا و انجام اندازه‌گیری ویدیویی از گوشی آیفون ۱۱ که در جدول ۳ مشخصات آن نشان داده شده است، استفاده شده است.

جدول ۳: مشخصات گوشی مورد استفاده برای ضبط ویدیو

برند/مدل	تعداد	نوع لنز	حداکثر نرخ تصویربرداری (fps)	ابعاد تصویر	وضوح تصویر
iPhone 11	۱	۱۲ مگاپیکسل	۲۴۰	۱۰۸۰×۱۹۲۰	p1080

۵- چگونگی انجام آزمایش و تحلیل داده‌ها

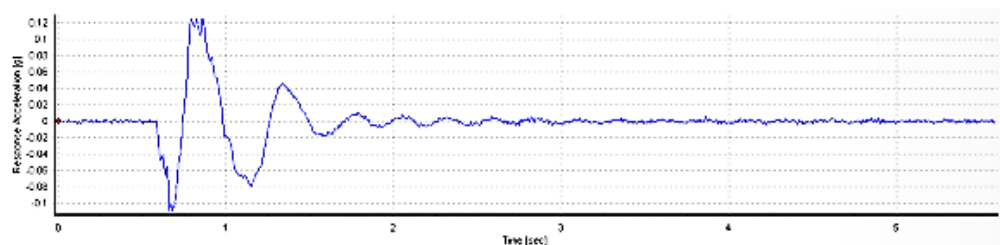
در مطالعات و پژوهش‌های سال‌های اخیر که توسط محققین انجام گرفته است نشان داده شده است که می‌توان از حس‌گرهای شتاب‌سنج دستگاه تلفن همراه برای برداشت مشخصات حرکتی و دینامیکی سازه استفاده نمود [۲۳-۲۴]. به همین جهت در این تحقیق نیز از همین قابلیت نیز استفاده شده است. دستگاه‌های تلفن همراهی که وظیفه برداشت اطلاعات توسط حس‌گر شتاب‌سنج را برعهده دارند به صورت ثابت طوری که هیچ‌گونه حرکت نسبی نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به سازه نداشته باشند، به سازه متصل گردیده است. بعد از تحریک به صورت هم‌زمان برداشت اطلاعات توسط دوربین گوشی و حس‌گر شتاب‌سنج صورت می‌گیرد. بعد از برداشت اطلاعات توسط شتاب‌سنج گوشی مقادیر فرکانس و نسبت‌های میرایی به دست آمده با مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری ویدیویی مقایسه گردیده است. در شکل ۱۲ روندنمایی از مراحل و چگونگی استخراج اطلاعات از روش اندازه‌گیری ویدیویی استفاده شده در این پژوهش آورده شده است.



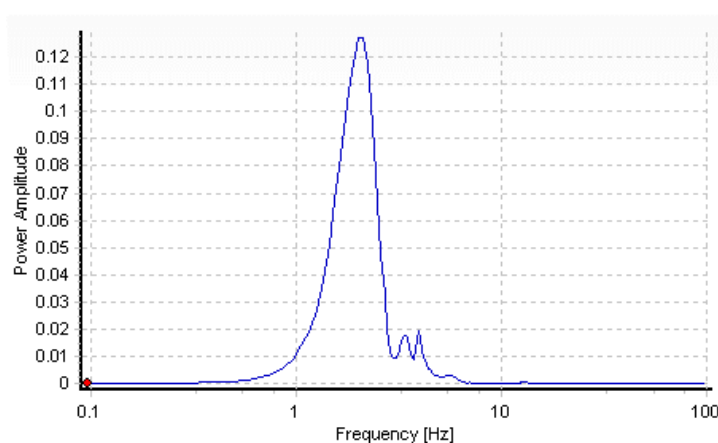
شکل ۱۲: روندنمای روش پیشنهادی اندازه‌گیری ویدیویی بر اساس نتایج آزمایشگاهی

۶- نتایج پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری بتنی

پاسخ شتاب به دست آمده از شتاب‌سنج‌های گوشه‌ی همراه نصب شده روی پانل بتنی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با اعمال تبدیل فوریه روی پاسخ شتاب‌سنج و رسم نمودار طیف فرکانسی که در شکل ۱۴ آورده شده است مشخص می‌گردد که سازه دارای ۳ مود فعال می‌باشد که مود اول در این پاسخ از سازه تقریباً غالب می‌باشد.

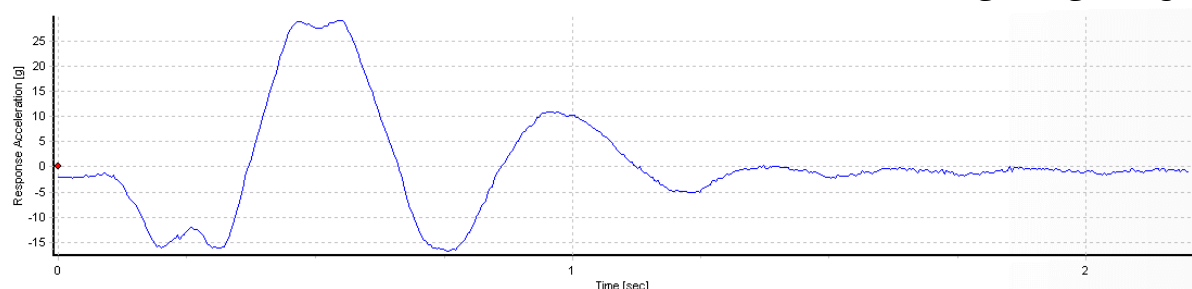


شکل ۱۳: پاسخ شتاب به دست آمده از گوشه‌ی همراه برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری بتنی

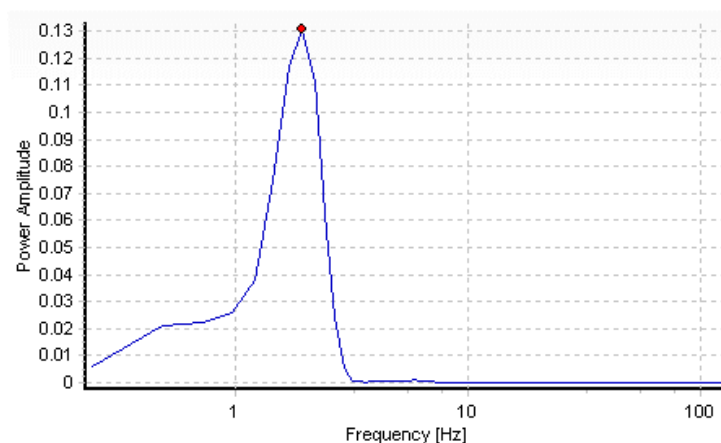


شکل ۱۴: تبدیل فوریه اعمال شده روی پاسخ شتاب به دست آمده از گوشه‌ی همراه برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری بتنی

در شکل ۱۵ مختصات مودال مود اول به دست آمده از اندازه‌گیری ویدیویی بعد از اعمال جداساز کور منابع به روش ردگیری پیچیدگی (CP) روی که $\delta'(x, t)$ فاز تصویر اصلاح شده، نشان داده شده است. در شکل ۱۶ نیز تبدیل فوریه مود اول نیز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی قادر به جداسازی و نشان دادن فرکانس در مود اول و حذف دیگر فرکانس‌ها و همچنین نویز از پاسخ فرکانسی سازه می‌باشد.

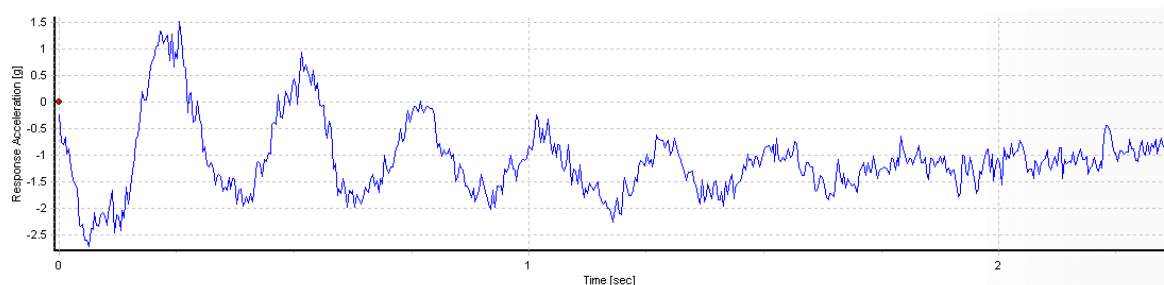


شکل ۱۵: مختصات مودال مود اول حاصل از اندازه‌گیری ویدیویی برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری بتنی

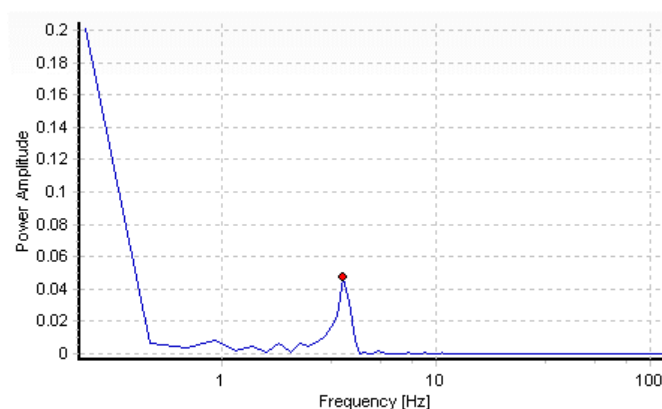


شکل ۱۶: تبدیل فوریه مود اول حاصل از اندازه‌گیری ویدیویی برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری بتنی

در شکل ۱۷ نیز مختصات مودال برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری بتنی در مود دوم نشان داده شده است که با توجه به غالب و فعال بودن مود اول در کل حرکت سازه با مقداری نویز همراه است. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، روش اندازه‌گیری ویدیویی و روش ردگیری پیچیدگی (CP) به خوبی توانسته‌اند فرکانس مود دوم را با توجه به ضعیف بودن این مود در حرکت سازه جداسازی کنند.



شکل ۱۷: مختصات مود اول حاصل از اندازه‌گیری ویدیویی برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری بتنی



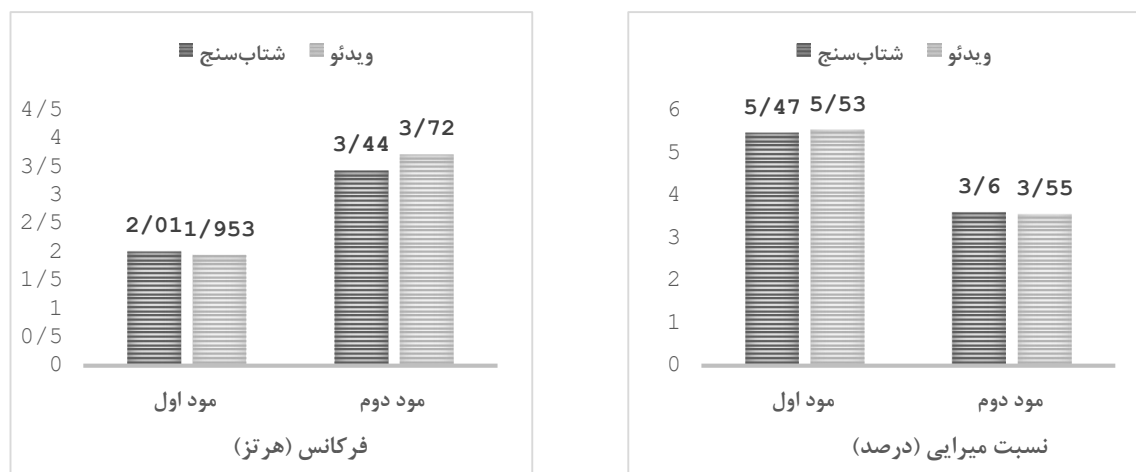
شکل ۱۸: تبدیل فوریه مود اول حاصل از اندازه‌گیری ویدیویی برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری بتنی

در جدول ۴ مقادیر به دست آمده برای فرکانس و نسبت‌های میرایی پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری بتنی از دو روش شتابسنج دستگاه تلفن همراه و اندازه‌گیری ویدیویی نشان داده شده است.

جدول ۴: نتایج به دست آمده از شتابسنج و اندازه گیری ویدیویی برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری بتنی

مود	فرکانس (هرتز)		نسبت میرایی (درصد)	
	شتابسنج	ویدئو	شتابسنج	ویدئو
اول	۲/۰۱	۱/۹۵۳	۵/۴۷	۵/۵۳
دوم	۳/۴۴	۳/۷۲	۳/۶	۳/۵۵

همان طور که در جدول ۴ مشاهده می گردد برای فرکانس مود اول مقدار خطا ۲/۸٪ و برای مود دوم ۸/۱٪ است و برای نسبت میرایی در مود اول خطا ۱٪ و برای مود دوم ۱/۳٪ است. همان طور که در پاسخ سازه برداشت شده توسط شتابسنج دستگاه تلفن همراه مشاهده گردید مود اول در این سازه مود غالب و فعال بوده است و اختلاف ۸/۱٪ در فرکانس مود دوم به این علت می باشد و همچنین با توجه به اینکه شرایط محیطی و سطح رویه ی پانل ها بدون هیچ آماده سازی قبلی بوده و در تصویر خاکستری پس زمینه تصویر با رویه دیوار تقریباً دارای شدت رنگ نزدیک به هم می باشند، مشخصات به دست آمده دارای دقت مناسبی بوده که با بهبود شرایط محیطی اعم از شرایط تصویر و نوع سازه و تحریک می توان به دقت بسیار بالاتری نیز دست پیدا کرد. در شکل ۱۹ نیز فرکانس ها و نسبت های میرایی به دست آمده از دو روش به صورت مقایسه ای نمایش داده شده است.



شکل ۱۹: مقایسه خواص دینامیکی به دست آمده از دو روش اندازه گیری ویدیویی و استفاده از شتابسنج گوشی همراه برای دیوار بتنی

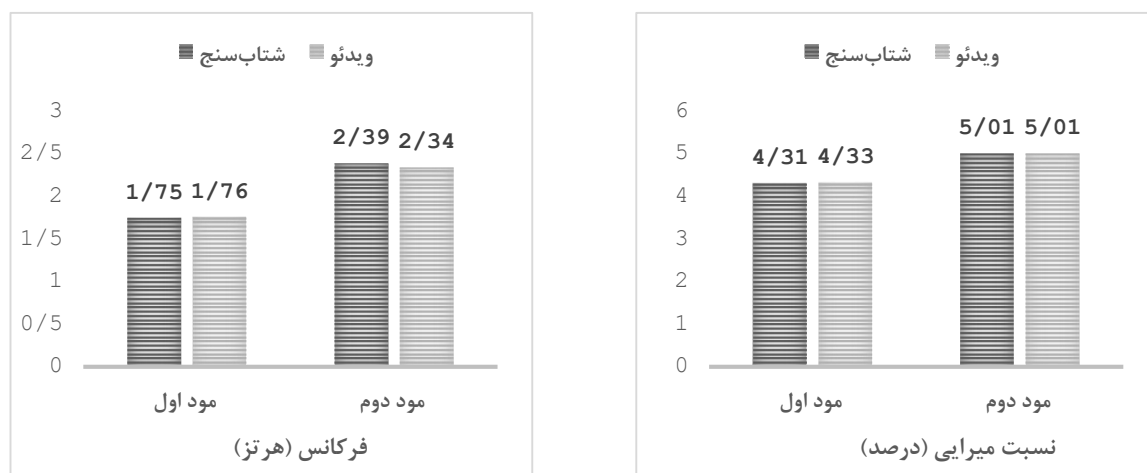
۷- نتایج پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری کاه گلی

نتایج به دست آمده از اعمال تبدیل فوریه به داده های شتابسنج گوشی روی پاسخ پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری کاه گلی بعد از تحریک نشان می دهد که سازه دارای دو مود فعال می باشد. فرکانس ها و نسبت های میرایی به دست آمده از شتابسنج گوشی همراه و اندازه گیری ویدیویی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: نتایج به دست آمده از شتابسنج گوشی های همراه و اندازه گیری ویدیویی برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری کاه گلی

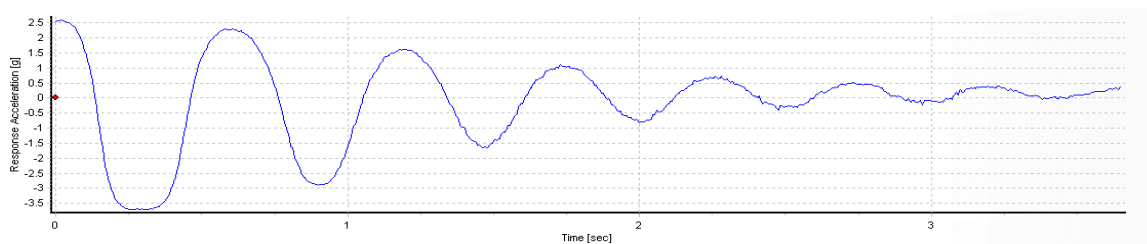
مود	فرکانس (هرتز)		نسبت میرایی (درصد)	
	شتابسنج	ویدئو	شتابسنج	ویدئو
اول	۱/۷۵	۱/۷۶	۴/۳۱	۴/۳۳
دوم	۲/۳۹	۲/۳۴	۵/۰۱	۵/۰۱

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که میزان فرکانس در مود اول ۰/۵٪ خطا دارد و فرکانس در مود دوم نیز ۰/۲٪ خطا نسبت به مقدار به دست آمده از شتابسنج گوشی همراه دارد. در نسبت هایی میرایی نیز برای مود اول ۰/۵٪ خطا و در مود دوم بدون خطا روش اندازه گیری ویدیویی توانسته است خواص دینامیکی پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری کاه گلی را شناسایی کند. در شکل ۲۰ نیز فرکانس ها و نسبت های میرایی به دست آمده از دو روش به صورت مقایسه ای نمایش داده شده است.

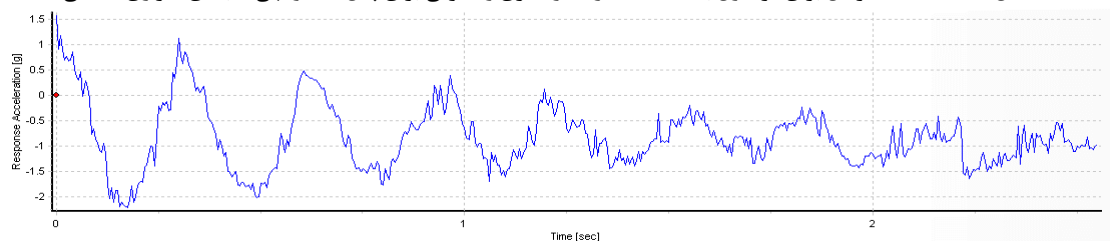


شکل ۲۰: مقایسه خواص دینامیکی به دست آمده از دو روش اندازه گیری ویدیویی و استفاده از شتابسنج گوشی همراه برای دیوار کاه گلی

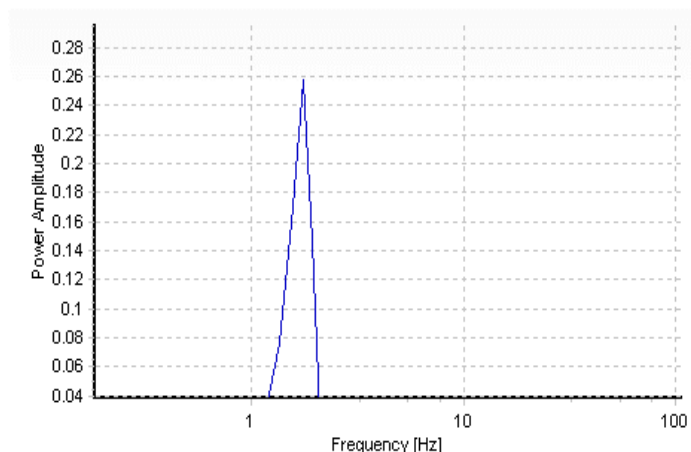
مختصات مودال به دست آمده از اندازه گیری ویدیویی برای مودهای اول و دوم به ترتیب در شکل ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. در پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری کاه گلی نیز غالب بودن مود اول سازه به دلیل وجود خرابی مشهود است ولی با این وجود روش اندازه گیری ویدیویی برای مود دوم نیز توانسته مختصات مودال سازه را استخراج و میزان فرکانس و نسبت میرایی را اندازه گیری کند. همچنین تبدیل فوریه و طیف فرکانسی مودهای اول و دوم نیز به ترتیب در شکل ۲۳ و ۲۴ نشان داده شده است. مشاهده می شود روش اندازه گیری ویدیویی به کمک جداساز کور منابع توانسته فرکانس های هر مود را شناسایی و از یکدیگر جداسازی کند. اندک نویز موجود در پاسخ مود دوم علاوه بر غالب بودن مود اول پانل می تواند به دلیل شرایط پس زمینه تصویر باشد که پس زمینه توسط عوامل خارجی دیگر متأثر شده است.



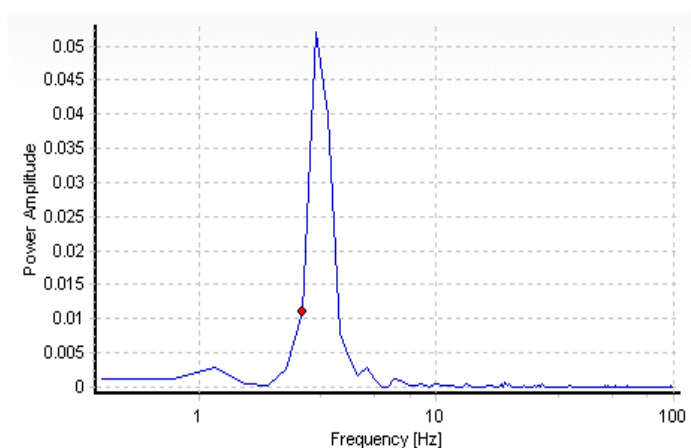
شکل ۲۱: مختصات مودال برای مود اول به دست آمده از اندازه گیری ویدیویی برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری کاه گلی



شکل ۲۲: مختصات مودال برای مود دوم به دست آمده از اندازه گیری ویدیویی برای پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری کاه گلی



شکل ۲۳: تبدیل فوریه برای مود اول به دست آمده از اندازه‌گیری ویدیویی پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری کاه‌گلی



شکل ۲۴: تبدیل فوریه برای مود اول به دست آمده از اندازه‌گیری ویدیویی پانل ساندویچی ۳ بعدی دیواری کاه‌گلی

۸- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری ویدیویی برای مقادیر نسبت میرایی و فرکانس پانل ساندویچی ۳ بعدی بتنی در دو مود فعال اول نشان داد که در مقایسه با مقادیر استخراج شده از شتاب‌سنج گوشی هوشمند خطای نسبی کمتر از ۱٫۳٪ برای نسبت میرایی و خطای کمتر از ۲٫۸٪ برای مود اول و ۰٫۸٪ برای مود دوم در بخش فرکانس دارا است. برای پانل ساندویچی ۳ بعدی کاه‌گلی نتایج نشان داد که میزان فرکانس در مود اول ۰٫۵٪ و در مود دوم نیز ۰٫۲٪ نسبت به مقدار به دست آمده از شتاب‌سنج گوشی همراه خطا دارد. در نسبت‌هایی میرایی نیز برای مود اول ۰٫۵٪ و در مود دوم بدون خطا روش پیشنهادی توانسته است خواص دینامیکی را شناسایی کند. با توجه به انجام آزمایش‌ها و تطبیق پذیری نتایج با نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی می‌توان بیان نمود که روش پیشنهادی قادر است در کنار دیگر روش‌های آنالیز مودال عملیاتی به برداشت و پایش خواص دینامیکی سازه‌ها در محیط آزمایشگاه و خارج از آن بپردازد.

باید در نظر داشت که روش پیشنهادی تماماً از گوشی هوشمند همراه برای آنالیز مودال سازه استفاده می‌نماید. در واقع نوآوری این روش پیشنهادی همین مسئله است که از گوشی هوشمند همراه استفاده شده است و نسبت به روش‌های مرسوم دیگر اعم از نصب حس‌گرهای شتاب‌سنج و غیره در وقت و زمان صرفه‌جویی می‌نماید چرا که نیاز به تهیه و نصب ابزار و تجهیزات نمی‌باشد و همچنین از لحاظ هزینه مقرون به صرفه است. حتی در سازه‌های سبک غیر عمرانی و سازه‌های در صنایع دیگر مانند خودرو سازی و هوافضا قابلیت استفاده و به کارگیری دارد چراکه نصب حس‌گرهای متعارف می‌تواند از لحاظ جرمی تاثیر سویی در مقادیر دینامیکی داشته باشد. با وجود جدید بودن این ایده، این روش ضعف‌هایی را دارا است که عمده‌ترین ضعف آن می‌توان به پایین بودن نرخ تصویربرداری (fps) دوربین‌های دستگاه‌های

تلفن هوشمند همراه اشاره کرد که باعث ایجاد محدودیت در شناسایی فرکانس‌ها و نسبت‌های میرایی با دقت بالا می‌شود. البته با توجه به سرعت چشمگیر پیشرفت دستگاه‌های تلفن همراه هوشمند این ضعف در آینده نه چندان دور برطرف خواهد گردید. در شرایط حال گوشی هوشمندی از برند هووای عکارای نرخ تصویربرداری ۹۰۰۰ می‌باشد که می‌توان با استفاده از همین گوشی فرکانس‌های به مراتب بالاتری را شناسایی و استخراج کرد. همچنین این روش نیاز به هیچگونه آماده‌سازی سطح سازه از قبیل نشان‌گذاری روی سطح سازه ندارد و از آن مهم‌تر نیاز به فراهم آوردن شرایط نوری خاص ندارد زیرا حساسیت بسیار کمی به تغییرات میزان نور از خود نشان می‌دهد که در مقابل دیگر روش‌های اندازه‌گیری ویدیویی برتری خاص روش پیشنهادی می‌باشد.

در پژوهش‌های آتی نیز می‌توان با بهینه‌سازی این روش و مطالعه موردی پارامترهای تاثیرگذار به دقت بسیار بالاتری دست یافت. چرا که این روش در زمینه‌ی بینایی ماشینی می‌تواند در صنایع مختلف به کمک جامعه مهندسی بیاید.

مراجع

- [1] Au, S.-K. (2017). *Operational Modal Analysis*. Singapore: Springer Singapore, 152.
- [2] Brincker, R. and Ventura, C. E. (2015). *Introduction to Operational Modal Analysis*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 360.
- [3] Dehaghi, M. A. Amiri, G. G. Hosseinzadeh, A. Z. and Razzaghi, S. A. S. (2020). Damage identification in cable-stayed bridges using modal data. *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 24–45. doi: 10.22065/jsce.2018.127340.1523.
- [4] Kaveh, A. Hosseini, S. Vaez, R. Hosseini, P. and Fathali, M. A. (2019). A New Two-Phase Method for Damage Detection in Skeletal Structures. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, vol. 43, no. S1, pp. 49–65. doi: 10.1007/s40996-018-0190-4.
- [5] Wei Fan. and Pizhong Qiao. (2011). Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study. *Structural Health Monitoring*, vol. 10, no. 1, pp. 83–111. doi: 10.1177/1475921710365419.
- [6] Yap, K. C. (2014). *Topics in Modal Analysis I, Volume 7*, vol. 45, no. 7. Cham: Springer International Publishing.
- [7] Chen, J.G. Wadhwa, N. Cha, Durand, Y.-J. F. Freeman, W. T. and Buyukozturk, O. (2015). Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 345, pp. 58–71. doi: 10.1016/j.jsv.2015.01.024.
- [8] Schreier, H. Orteu, J. J. and Sutton, M. A. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications*. Boston, MA: Springer US.
- [9] Dérian, P. (2013). Wavelets and Optical Flow Motion Estimation. *Numerical Mathematics: Theory, Methods and Applications*, vol. 6, no. 1, pp. 116–137. doi: 10.4208/nmtma.2013.mssvm07.
- [10] Feng, M. Q. Fukuda, Y. Feng, D. and Mizuta, M. (2015). Nontarget Vision Sensor for Remote Measurement of Bridge Dynamic Response. *Journal of Bridge Engineering*, vol. 20, no. 12, p. 4015023. doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000747.
- [11] Helfrick, M. N. Niezrecki, C. Avitabile, P. and Schmidt, T. (2011). 3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no. 3, pp. 917–927. doi: 10.1016/j.ymsp.2010.08.013.
- [12] Wang, W. Mottershead, J. E. Siebert, T. and Pipino, A. (2012). Frequency response functions of shape features from full-field vibration measurements using digital image correlation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 28, pp. 333–347. doi: 10.1016/j.ymsp.2011.11.023.
- [13] Yang, Y. et al. (2017). Blind identification of full-field vibration modes from video measurements with phase-based

- video motion magnification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 85, pp. 567–590. doi: 10.1016/j.ymssp.2016.08.041.
- [14] Javh, J. Slavič, J. and Boltežar, M. (2018). High frequency modal identification on noisy high-speed camera data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 98, pp. 344–351. doi: 10.1016/j.ymssp.2017.05.008.
- [15] Xie, B. Li, J. and Zhao, X. (2019). Research on damage detection of a 3D steel frame model using smartphones," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 3, pp. 1–17. doi: 10.3390/s19030745.
- [16] Liu, K. Du, Q. Yang, H. and Ma, B. (2010). Optical Flow and Principal Component Analysis-Based Motion Detection in Outdoor Videos," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2010, no. 1, p. 680623. doi: 10.1155/2010/680623.
- [17] Yang, Y. et al. (2017). Blind identification of full-field vibration modes of output-only structures from uniformly-sampled, possibly temporally-aliased (sub-Nyquist), video measurements," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 390, pp. 232–256. doi: 10.1016/j.jsv.2016.11.034.
- [18] Simoncelli, E. P. and Freeman, W. T. (1995). The steerable pyramid: a flexible architecture for multi-scale derivative computation. *Proceedings., International Conference on Image Processing*, vol. 3, pp. 444–447. doi: 10.1109/ICIP.1995.537667.
- [19] Chen, J. G. Wadhwa, N. Cha, Y. J. Durand, F. Freeman, W. T. and Buyukozturk, O. (2015). Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification," *Journal of Sound and Vibration*. doi: 10.1016/j.jsv.2015.01.024.
- [20] LTD, D. E.-R. S. P. Baldock, U. Hertfordshire, U. (2000). Modal testing: theory, practice and application. *Mechanical engineering research studies. Research Studies Press*, vol. 171, pp. 415–437.
- [21] Talebsafa, P. Rezaifar, O. and Naderpour, H. (2021). Modal identification in order to bridges health monitoring in time domain based on complexity pursuit method. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*. doi: 10.22075/jtie.2021.21421.1485.
- [22] Qiyami Taklymi, S. M. (2018). *Experimental and Analytical Study of 3D panels with shotcrete materials consistent with sustainable development patterns*. Master of science. Semnan University.
- [23] Khanahmadi, M. Rezayfar, O. and Gholhaki. M. (2019). Damage Detection Of Prefabricated Walls (Panel 3D Plates) Based On Wavelet Transform Detection Algorithm. *Journal of Structural and Construction Engineering*, doi: 10.22065/jsce.2019.197470.1923.
- [24] Kong, Q. Kwon, Y.-W. Schreierz, L. Allen, S. Allen, R. and Strauss, J. (2015). Smartphone-based networks for earthquake detection. in: *2015 15th International Conference on Innovations for Community Services (IACS)*. pp. 1–8, doi: 10.1109/IACS.2015.7294490.
- [25] Kong, Q. Allen, R. M. Kohler, M. D. Heaton, T. H. and Bunn, J. (2018). Structural Health Monitoring of Buildings Using Smartphone Sensors. *Seismological Research Letters*, vol. 89, no. 2A, pp. 594–602, Mar. doi: 10.1785/0220170111.