

استفاده از روش میانگین گیری به منظور استخراج ویژگی های دینامیکی سازه ها با پردازش تصویر

امین حواریان^{۱*}، موسی محمودی صاحبی^۲

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

* aminhavarani@sru.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۹۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۳۰

چکیده

ویژگی های دینامیکی سازه ها، مانند فرکانس طبیعی، شکل مودها و نسبت های میرایی، نقش تعیین کننده ای در رفتار سازه در برابر بارهای دینامیکی مانند زمین لرزه ایفا می کنند. یکی از کاربردهای این ویژگی ها تعیین نیروهای زمین لرزه ای است که بر سازه ها اعمال می شود. از کاربردهای دیگر این ویژگی ها می توان به روزرسانی مدل اجزا محدود، تشخیص آسیب در سازه ها و پایش سلامت درازمدت سازه ها نام برد. دقت و کاهش هزینه ارزیابی این خواص، نقش مهمی در افزایش بهره وری و در نتیجه عمر مفید سازه ها ایفا می کند. هدف از این مقاله ارائه یک روش جدید برای افزایش دقت سنجش جابه جایی های از راه دور از طریق پردازش تصویر است. برای این منظور، یک تیر یکسر گیردار آلومینیومی و یک قاب سه طبقه با وزن اضافی در نظر گرفته شده است. در پایه سازه ها با استفاده از چکش ضربه وارد شده و سپس لرزش آن ها با استفاده از پردازش تصویر ضبط شده است. برای استخراج خواص دینامیک روش جستار قله مورد استفاده قرار گرفت و روش میانگین پیشنهادی روی آن ها اعمال شد. دقت روش جدید با مقایسه خواص لرزه ای با نتایج حاصل از مسگرهای شتاب سنج و روش المان محدود مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که این روش می تواند دقت روش پردازش تصویر را بهبود بخشد.

واژگان کلیدی: پردازش تصویر، روش میانگین گیری، خواص دینامیکی، فرکانس طبیعی، شکل مود

۱- مقدمه

در مدل های تحلیلی به آسانی قابل شبیه سازی نیست؛ بنابراین، همیشه بین مدل های تحلیلی و سازه های موجود اختلاف وجود دارد. تنها راه تعیین مستقیم این ویژگی های دینامیکی استفاده از آزمایش در ساختمان های واقعی است. یکی از روش های استخراج خواص دینامیکی سازه ها، اندازه گیری ارتعاشات سازه

به منظور پایش سلامت بلندمدت سازه ها، لازم است که ویژگی های دینامیکی آن ها مانند فرکانس های طبیعی، شکل مودها و نسبت های میرایی را استخراج کنیم. این ویژگی ها به جزئیات زیادی مانند رفتار مواد و ساختار هندسه سازه بستگی دارد که

تحت بارهای مختلف در یک فرکانس مشخص است که بستگی به شرایط سازه‌ها دارد. از آنجایی که حس‌گرهای جاسازی‌شده در سازه دارای مشکلات خاص خود هستند [1] روش جایگزین به منظور کاهش نیاز نصب حس‌گرها و هزینه آن‌ها، استفاده از روش سنجش از راه دور بر اساس پردازش تصویر است. روش‌های مختلف برای پردازش تصویر به منظور شناسایی خواص دینامیکی سازه‌ها پیشنهاد شده است. این روش‌ها شامل ردیابی نقطه، روش همبستگی نقاط در تصاویر دیجیتال و تکنیک‌های ردیابی لبه است [2]. از آنجایی که روش ردیابی نقطه و روش ردیابی لبه به طور گسترده استفاده شده است و به دلیل عدم استفاده از روش همبستگی نقاط در این مقاله، روش همبستگی نقطه نادیده گرفته شده است.

در اوایل، تنها استفاده از دوربین توانایی ضبط جابه‌جایی دوبعدی بود. به عنوان نمونه، یکی از اولین تلاش‌ها برای ثبت حرکات دینامیکی در سال ۱۹۹۹ انجام گرفت [3]. در این پژوهش از سیستم فوتوگرامتری بر مبنای دوربین برای اندازه‌گیری جابه‌جایی نشانگرهای نصب‌شده روی پل تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی استفاده شد. در روش تشخیص لبه، به جای استفاده از نشانگرها، لبه سازه به عنوان مرجع استفاده می‌شود. مزیت این روش در سازه‌ای است که در آن دسترسی به نقاط آزاد سخت و یا درج نشانگرها روی آن پیچیده است. بنابراین، در این روش، رزولوشن تصویر باید زیاد باشد و همچنین رنگ پس‌زمینه تصویر باید به اندازه کافی سفید باشد. روش تشخیص لبه یک روش بسیار مناسب برای مطالعه نوسان سازه‌های باریک مانند کابل است. در سال ۲۰۰۰ مطالعه اولیه‌ای توسط ونگ^۱ و همکاران انجام شد. آن‌ها از یک شبکه عصبی آموزش‌دیده برای شناسایی لبه تصاویر استفاده کردند [4]. برای ضبط نوسانات برخی سازه‌ها مانند کابل‌ها الگوریتم تشخیص لبه قادر به پوشش کل تصویر کابل است، درحالی‌که استفاده از نشانگر در کل کابل غیرممکن است [2]. یک روش

برای تشخیص لبه کابل بر اساس تبدیل موجک بر روی تصاویر توسط پاتسیاس^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۲ ارائه شده است. آن‌ها توانستند محل خرابی کابل را شناسایی کنند. برای بررسی الگوریتم، ابتدا کابل را نوسان دادند و فرکانس‌های طبیعی کابل را که از پردازش تصویر و اندازه‌گیری لیزر به دست می‌آمد مقایسه نمودند [5]. از الگوریتم تشخیص لبه برای ثبت ارتعاش یک تیر دو قوسی ساده به منظور استخراج ویژگی‌های دینامیکی آن در دو حالت سالم و آسیب‌دیده توسط پودل^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۵ انجام پذیرفت. آن‌ها همچنین از نرم‌افزار آباکوس^۴ برای مقایسه نتایج استفاده کردند [6]. از دیگر پژوهش‌ها در زمینه تشخیص لبه برای تشخیص شکل تیر می‌توان مطالعات توسط ماتسوزوکی^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۶ را نام برد [7]. آن‌ها همچنین یک روش دیگر تشخیص لبه را برای ضبط ارتعاشات کابل پل و به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی ارائه نمودند [8 و 9]. در سال ۲۰۱۳ کیم^۶ و همکاران از پردازش تصویر دیجیتال دوبعدی در نقاط متعددی از کابل‌کشی پل معلق گوانگنگ^۷ در کره به منظور بهبود دقت و کاهش خطا در ضبط نوسانات آن استفاده نمودند [10]. فرکانس‌های طبیعی، نسبت میرایی و شکل مودهای، چراغ راهنمایی و رانندگی با استفاده از پردازش تصویر و تکنیک‌های ردیابی لبه بدون استفاده از نشانگرها، در محدوده بارگذاری نوسانات محیطی، توسط بارتیلسون^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۵ استخراج شد [11]. پای^۹ و همکاران پاسخ دینامیکی سازه را توسط روش سریع برای کالیبراسیون دوربین به دست آوردند. آن‌ها یک تیر L شکل را با فرکانس طبیعی خود نوسان دادند و لرزش دینامیکی آن را ثبت کردند [12].

علاوه بر این، روش‌هایی برای محاسبه دقیق‌تر شکل مود سازه در سازه‌های با ارتعاش سریع مانند ارتعاش عرضی لوله‌ها ارائه شد. برای این منظور دوربین‌های با سرعت بالا مورد استفاده قرار گرفتند [13]. با این حال، لازم است که روش‌های سنجش

6. Kim

7. Gwangan

8. Bartilson.

9. Pai

1. WANG

2. Patsias

3. Poudel

4. Abaqus

5. Matsuzaki

به عنوان لبه یا شکل دیده شود؛ بنابراین در دو یا چند بعد، مفهوم تصویر باید مورد توجه قرار گیرد [14].

نظریه اساسی در بیشتر روش های تشخیص لبه محاسبه یک اپراتور مشتق محلی است. در نقطه بررسی شده لبه (انتقال تاریکی به روشنایی) به عنوان یک سطح خاکستری با تغییر آهسته، به جای سریع، مدل سازی می شود. این مدل نشان می دهد که لبه های تصاویر دیجیتال معمولاً کدر هستند. اولین مشتق خاکستری در لبه جلو مثبت و در لبه عقب منفی است و انتظار می رود که در مناطق خاکستری پایدار، صفر باشد؛ بنابراین، اولین مشتق می تواند برای تعیین اینکه آیا پیکسل خاص روی لبه نشسته یا نه استفاده شود. مشتق دوم نیز دارای یک عبور از عدد صفر در وسط هر سطح خاکستری است. عبور صفر یک راه قدرتمند برای تشخیص لبه های تصویر فراهم می کند. اولین مشتق از تصویر در هر نقطه برابر با مقدار گرادیان است. مشتق دوم نیز با استفاده از لاپلاس به دست می آید. الگوریتم تشخیص لبه به طور کلی از این تغییر در شدت روشنایی بهره می برد [16 و 15].

در نهایت لبه به عنوان یک تغییر در شدت نور دیده می شود که می تواند بیش از چند پیکسل را شامل شود. در پردازش تصویر، عکس ها از فیلم استخراج می شوند. برای تشخیص لبه های سازه، در گام نخست هر تصویر به مقیاس خاکستری تغییر می کند، سپس الگوریتم تشخیص لبه به تصاویر اعمال می شود، بنابراین عکس ها به تصاویر سیاه و سفید تغییر می کنند و در نهایت، برای تشخیص بهتر لبه شیء، عکس با خطوط سفید و پس زمینه سیاه و سفید به عکس با خطوط سیاه و پس زمینه سفید تبدیل می شود. به منظور استخراج مقدار جابجایی سازه، نقاط مورد نظر در سازه با ردیابی پیکسل ها در لبه سازه و یا نشانگرهای در عکس های پی در پی دنبال می شوند. سپس مختصات پیکسل های مورد نظر ثبت می شود. خلاصه روش فوق در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۲- پردازش سیگنال

در بخش دوم، جابه جایی سازه (که در بخش اول پردازش تصویر استخراج شده است) باید به سیگنال شتاب برای شناخت خواص

تصویر از راه دور توسعه پیدا کنند، زیرا این تکنیک در رابطه با وضوح، محدوده و دقت هنوز محدود است. مقاله حاضر تلاش می کند تا با به کارگیری روش میانگین گیری دقت را در پردازش تصویر به عنوان یک روش ارزان تر در به دست آوردن خواص دینامیکی سازه ها و نیز کاربرد آن ها در پایش سلامت سازه ها بهبود بخشد. برای این منظور، ارتعاشات سازه ها ضبط شده است و جابه جایی های استخراج شده از هر سه نقطه در لبه نمونه به عنوان سیگنال ورودی سیستم ثبت می شود؛ با دو بار مشتق عددی از این جابه جایی ها، شتاب سازه به دست می آید. با پردازش شتاب ها، فرکانس های طبیعی، نسبت های میرایی و شکل مودهای هر نقطه استخراج می شود. سپس روش میانگین گیری برای محاسبه خواص دینامیکی سازه استفاده شده است. در نهایت نتایج با مقادیر به دست آمده از حس گرهای شتاب در سازه و المان محدود مقایسه می شود و دقت و خطای الگوریتم مورد ارزیابی قرار می گیرد. در نهایت این نتایج می تواند به عنوان اطلاعات ورودی در پایش سلامت سازه ها استفاده شود.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش سعی شده است خواص دینامیکی سازه ها با استفاده از پردازش تصویر به دست آید. برای این منظور، از نمونه ها فیلم برداری می شوند و جابه جایی ثبت شده به عنوان سیگنال ورودی سیستم استفاده می شود. روش تحقیق شامل دو بخش اساسی است: ۱- پردازش تصویر ۲- پردازش سیگنال که به طور جداگانه در زیر شرح داده شده است.

۲-۱- پردازش تصویر

روش تشخیص لبه یکی از روش های پردازش تصویر است. هدف روش تشخیص لبه، علامت گذاری نقاطی در تصویر است که در آن شدت نور به شدت تغییر می کند. تغییرات سریع در ویژگی های تصویر معمولاً حوادث مهمی را در خصوص ویژگی های محیطی نشان می دهد. لبه ها ممکن است به نمای دید بستگی داشته باشد، به این معنی که لبه های یک شیء ممکن است با تغییر جهت دید و هندسه صحنه تغییر کند. اشیایی که یکدیگر را قطع می کنند یا ربطی به شیء اصلی نداشته باشند می تواند

هستند تعریف می‌شود. با این وجود فرض می‌شود که سازه دارای مدهای نزدیک نیست، به طوری که آن‌ها به خوبی از هم جدا شده‌اند و میرایی سازه نه خیلی کوچک و نه بیش از حد بزرگ است؛ بنابراین هر فرکانس تشدید درگیر فقط یک مود اصلی نوسان سازه است. توابع پاسخ فرکانسی که از تقسیم پاسخ خروجی سازه به نوسان ورودی به سازه در دامنه فرکانس به دست می‌آیند، اعداد مختلط هستند؛ بنابراین شناسایی خواص مودال در این روش ممکن است روی قسمت موهومی و یا حقیقی این توابع صورت پذیرد. اگر پاسخ خروجی سازه شتاب یا جابه‌جایی باشد، شناسایی مودال می‌تواند روی بخش موهومی و یا اندازه مطلق این توابع انجام شود [18-20].

رابطه بین تابع پاسخ فرکانسی برای سازه چند درجه آزادی در زیر آمده است:

$$H_{ik}(j\omega) = \sum_{m=1}^p \frac{-(\varphi_i \varphi_k)_m \omega^2}{\omega_m^2 - \omega^2 + 2j\zeta_m \omega_m \omega} \quad (1)$$

که در آن $H_{ik}(j\omega)$ رابطه اصلی در تحلیل مودال، تجربی است و رابطه بین شتاب خروجی در درجه آزادی i ام و تحریک در درجه آزادی k ام در حوزه فرکانس نوسان سازه را توصیف می‌کند. این رابطه می‌تواند برای استخراج پارامترهای مودال سازه استفاده شود. ω_m فرکانس طبیعی سازه در حالت تشدید است، ζ_m نشان‌دهنده میرایی مودی سازه و $(\varphi_i \varphi_k)_m$ نشان‌دهنده ضرب شکل مود عضو i ام در عضو k ام مربوط به شکل مود m ام است. در رابطه فوق p تعداد کل شکل مودهاست [21].

معادله بالا به روش جستار قله به فرض یک مود واحد به معادله زیر تبدیل می‌شود:

$$H_{ik}(j\omega) = \frac{-(\varphi_i \varphi_k)_m \omega^2}{\omega_m^2 - \omega^2 + 2j\zeta_m \omega_m \omega} \quad (2)$$

با ترسیم نمودار مقدار مطلق این تابع در مقابل فرکانس، فرکانس‌های طبیعی سازه به صورت قله‌هایی بر روی آن ظاهر می‌شوند. با شناسایی این قله‌ها، فرکانس طبیعی سازه به دست می‌آید و اگر مقدار موهومی تابع را در مقابل فرکانس رسم نماییم، فرکانس طبیعی سازه بیشینه یا کمینه در نمودار خواهد بود. اگر این قله‌ها در فرکانس تشدید سازه با مقدار

دینامیکی سازه تبدیل شود. برای این منظور لازم است شتاب را با استفاده از مشتق دوم عددی از جابه‌جایی‌ها به دست آورد. از آنجایی که تصاویر یا فیلم‌ها اغلب در شرایط غیرایده‌آل ثبت می‌شوند [17]، پاسخ حاصل از تحریک سازه به طور طبیعی دارای نویز و اغتشاش است که باید اصلاح شود؛ بنابراین، از روش کاهش نویز مانند تبدیل موجک استفاده می‌شود. در این مقاله برای محاسبه پاسخ مودال، فرکانس‌های طبیعی و ضریب میرایی، روش تبدیل فوریه سریع (FFT) و روش جستار قله با استفاده از پاسخ ارتعاش آزاد استفاده شده است.

شکل ۱. روند پردازش تصویر در این مقاله

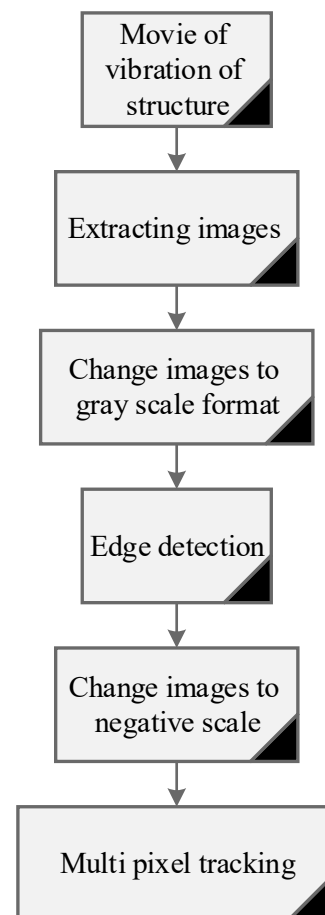


Fig. 1. Process of image processing in this study

در روش جستار قله به منظور پردازش سیگنال از ماتریس FRF برای استخراج ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها استفاده می‌شود. این روش بر اساس مفهوم یک تک مود تعریف شده است. در واقع، پاسخ سازه در هر حالت تشدید، نتیجه ارتباط مدهای مختلف ارتعاشی که نزدیک به فرکانس‌های تشدید سازه

که برای محاسبه نسبت میرایی، از میانگین توابع پاسخ فرکانسی همه نقاط استفاده شده است. خلاصه روش به دست آوردن ویژگی‌های دینامیکی سازه در این مقاله در شکل (۳) توضیح داده شده است.

شکل ۲. (الف) نقاط مورد استفاده در روش معمول، (ب) روش میانگین‌گیری

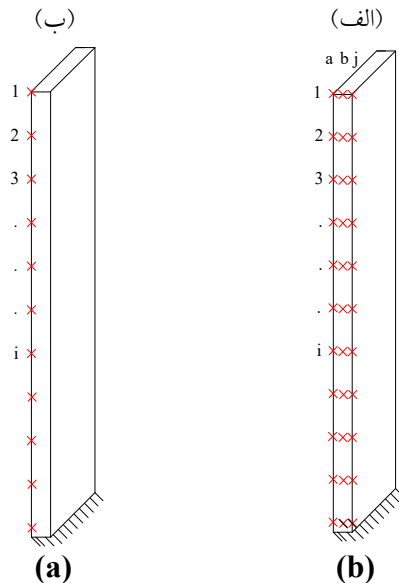


Fig. 2. (a) The points used in the common method, (b) average method

شکل ۳. خلاصه روش مورد استفاده برای شناسایی خواص دینامیکی در این مقاله

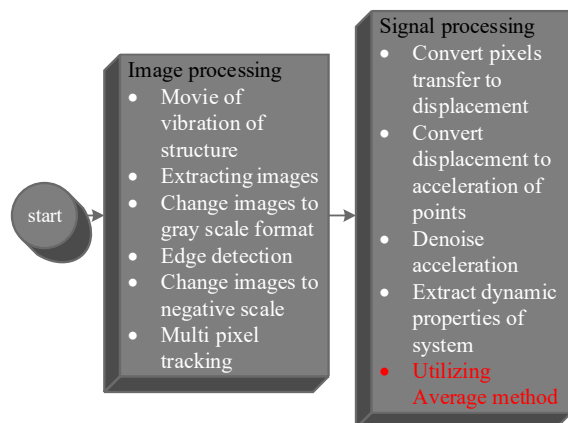


Fig. 3. Summery of the procedure utilized to identification of dynamic properties in this article.

۳- نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایشی شامل دو سازه جداگانه می‌شوند. اول: یک نمونه تیر کنسول آلومینیومی ساخته شده از صفحه با طول $L=900$ میلی‌متر، عرض $b=100$ میلی‌متر و ضخامت $t=2$ میلی‌متر که در شکل (۴) نشان داده شده. برای تشخیص بهتر

$Q_{ik}(j\omega_m)$ در نظر گرفته شود، معادله فوق به صورت زیر تغییر پیدا می‌کند:

$$Q_{ik}(j\omega_m) = \frac{-(\varphi_i \varphi_k)_m}{2j\zeta_m} \quad (3)$$

اگر شناسایی روی مقادیر مطلق تابع پاسخ فرکانس اعمال شود، علامت شکل مودها از بخش موهومی مربوط به دست می‌آید، اما اگر با مقادیر موهومی تابع پاسخ فرکانس شناسایی شوند، این مقادیر علامت خود را دارند. باید توجه داشت که بردارهای شکل مود به دست آمده از روابط فوق به جرم سازه مقیاس نشده‌اند. نسبت میرایی نیز با استفاده از روش نیمه توان از نمودار تابع پاسخ فرکانسی به دست می‌آید. در این روش، با استخراج فرکانس ω_a و ω_b مربوط به مقدار ω_b برای هر قله، میرایی معادل با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\zeta_m = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_m} \quad (4)$$

بنابراین، با توجه به وجود یک قله در هر فرکانس سازه روی نمودار تابع پاسخ فرکانس در روش جستار قله، خواص مودال سازه می‌تواند روی تمام توابع پاسخ فرکانسی شناسایی شوند. در نهایت می‌توان شکل مودها و میرایی‌های سازه را از میانگین‌گیری همه مقادیر شکل مودهای به دست آمده به دست آورد یا در مرحله نخست از توابع پاسخ فرکانسی میانگین‌گیری نمود و از تابع پاسخ میانگین‌گیری شده، شکل مود و میرایی‌ها را به دست آورد. در روش دوم چون تنها عملیات ریاضی روی یک نمودار انجام می‌گردد، سریع‌تر است [22].

همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، در روش معمول (شکل ۲ الف) شکل مودها برای هر نقطه از گراف میانگین تابع پاسخ فرکانس محاسبه می‌شود. در این مقاله (شکل ۲ ب)، شکل مودال‌های هر ستون a تا j به صورت جداگانه به طور معمول استخراج می‌شوند. سپس فرمول زیر برای محاسبه شکل مودهای نهایی استفاده می‌شود.

$$(\varphi_k)_m = \frac{\sum_j^a (\varphi_{ki})_m}{j} \quad (5)$$

در معادله (۵)، $\sum_j^a (\varphi_{ki})_m$ نشان دهنده مجموع m امین مود هر ستون از a تا j برای نقاط i ام مربوطه است. لازم به ذکر است

شکل ۶. (الف) ورق فولاد و ستون قاب، (ب) جرم اضافی

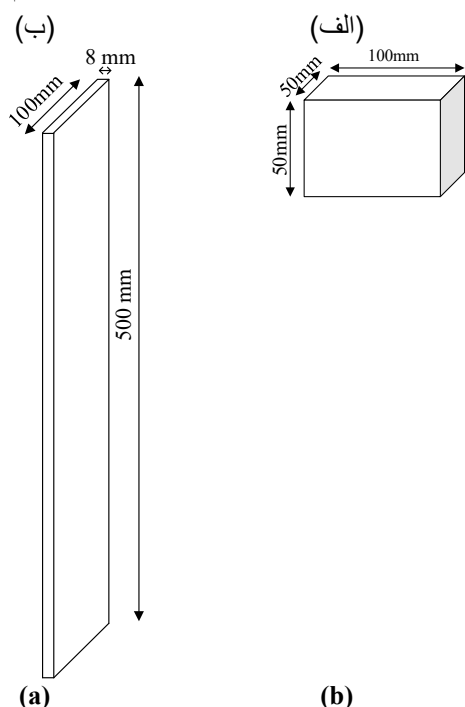


Fig. 6. (a) Steel beam and column plate of the frame, (b) Additional mass

علاوه بر این، سه شتاب سنج در لبه آزاد سازه‌ها نصب شده است. شتاب به‌طور هم‌زمان توسط شتاب سنج و دوربین با سرعت بالا اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۷). شتاب سنج‌ها با فرکانس نمونه‌برداری ۵۰۰ هرتز و بیشینه ظرفیت ضبط شتاب $\pm 3g$ در لبه سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

همچنین دوربین کامپکت CASIO EX-1200 با رزولوشن 512×384 پیکسل و سرعت ۱۲۰ فریم بر ثانیه استفاده شد. در شکل (۷) حس‌گرهای شتاب سنج، دوربین و تیر کنسولی مورد استفاده در این مطالعه نشان داده شده است.

۴- اعتبار سنجی

به‌منظور اعتبارسنجی روش میانگین‌گیری، نتایج حاصل از ویدئوی ارتعاش تیر کنسول آلومینیومی و قاب سه‌طبقه، با نتایج حاصل از حس‌گرهای شتاب مقایسه شدند. سازه‌ها با ضربه چکش در نزدیکی پایه مرتعش شدند و ارتعاش بعد از ضربه اندازه‌گیری شد. پاسخ شتاب-زمان حس‌گرها برای مقایسه با جابه‌جایی اندازه‌گیری شده از دوربین به دست آمد. از آنجایی که هماهنگ‌سازی زمان بین داده‌های دوربین و

لبه‌های تیر، بدنه آن به رنگ سیاه و سفید با عرض ۱۰ میلی‌متر رنگ‌آمیزی شده است. سازه دوم: یک قاب سه‌طبقه (شکل ۵) که از ورق فولادی تشکیل شده است. تیرها و ستون‌های آن از ورق به ابعاد طول $L = 500$ میلی‌متر، عرض $b = 100$ میلی‌متر و ضخامت $t = 8$ میلی‌متر است که در شکل (۶ الف) نشان داده شده است. به‌منظور ایجاد فرکانس طبیعی نزدیک‌تر به فرکانس طبیعی سازه واقعی، چهار وزنه اضافی با ابعاد $100 \times 50 \times 50$ میلی‌متر و وزن $2/5$ کیلوگرم (شکل ۶ ب) در هر طبقه برای افزایش جرم مؤثر نمونه استفاده شده است.

شکل ۴. نمونه تیر کنسولی

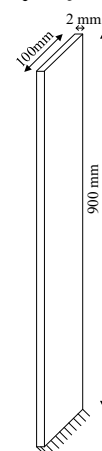


Fig. 4. Cantilever beam specimen

شکل ۵. قاب سه‌طبقه

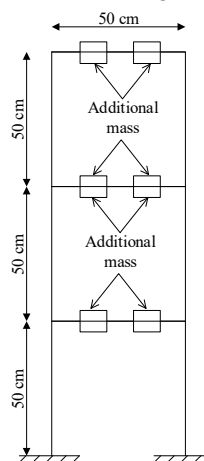


Fig. 5. Three-story frame

شکل ۸. تیر کنسول با سه حسگر شتاب

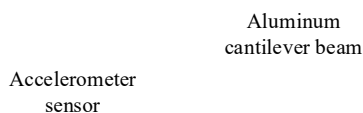


Fig. 8. Cantilever beam with three sensors embedded on it

با استفاده از دوربین، لبه سازه فیلم برداری شده است. عکس‌ها از فیلم استخراج شد و هر عکس به مقیاس خاکستری تغییر یافت. سپس الگوریتم تشخیص لبه استفاده شد، به طوری که تصاویر به تصاویر سیاه و سفید تغییر یافتند و در نهایت، برای نشان دادن بهتر لبه‌های سازه، از عکس‌هایی با خطوط سفید و پس‌زمینه‌های سیاه و سفید به تصاویر با خطوط سیاه و زمینه سفید تبدیل شد. تصاویر به دست آمده در این پروسه برای یک فریم از فیلم ارتعاش سازه در شکل (۹) نشان داده شده است.

شکل ۹. (الف) تصویر تبدیل به خاکستری شده؛ (ب) تصویر با تشخیص

لبه؛ (ج) تصویر با خطوط سیاه و پس‌زمینه سفید تغییر یافته

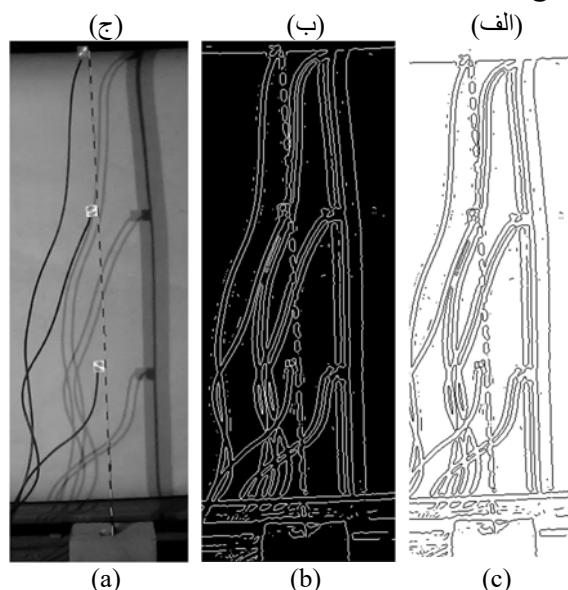


Fig. 9. (a) image changed to gray scale, (b) image with edge detection, (c) image changed with black lines and white backgrounds

ارتعاش شتاب سنج امکان پذیر نبود، بنابراین داده‌های سری زمانی با چشم هماهنگ شده است. هماهنگ سازی چشمی به صورت هماهنگ زمانی قله اولین نوسان در روش پردازش تصویر با قله اولین نوسان حسگر به صورت عددی انجام شده است.

در نهایت با پردازش سیگنال‌های خروجی به دست آمده از پردازش تصویر و حسگرها، خواص دینامیکی سازه‌ها استخراج شده است و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از روش المان محدود مقایسه شده است.

شکل ۷. حسگر شتاب سنج، دیتالاگر، دوربین و تیر مورد استفاده قرار گرفته در آزمایش

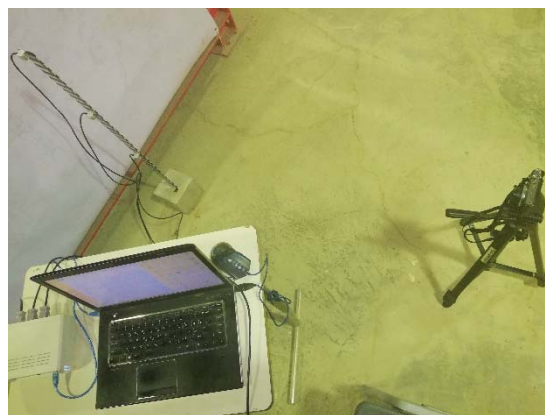


Fig. 7. Accelerometer sensors, data logger, commercial camera and the cantilever beam utilized in this study

۴-۱- تست تیر کنسول

به منظور اعتبار سنجی الگوریتم موجود، نتایج پردازش تصویر با مقادیر حاصل از شتاب سنج‌هایی که روی تیر قرار می‌گیرند مقایسه شده و دقت و خطای روش ارزیابی می‌شود، سپس نتایج الگوریتم جدید با نتایج حاصل از شتاب سنج و روش اجزا محدود مقایسه می‌شود. برای این منظور در مرحله نخست، تیر کنسول با سه حسگر که روی آن قرار گرفته است (شکل ۸) با استفاده از یک چکش در پایه آن مرتعش شد و شتاب‌های مربوط به ۳ نقطه در تیر تحت این ارتعاش توسط حسگرهای شتاب سنج ضبط شد.

در سه مود اول نوسان سازه به ترتیب ۱۴، ۳ و ۶ درصد و این خطا نسبت به نتایج اجزای محدود به ترتیب ۲۵، ۶ و ۱۵ درصد به دست آمده است. در جدول (۲)، نسبت‌های میرایی مربوط به سه فرکانس اولیه سازه باهم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو روش پردازش تصویر (معمولی و میانگین‌گیری) مقادیر یکسان نسبت میرایی استخراج شده است.

شکل ۱۱. مقایسه شتاب سمت راست حاصل از دوربین و شتاب‌سنج

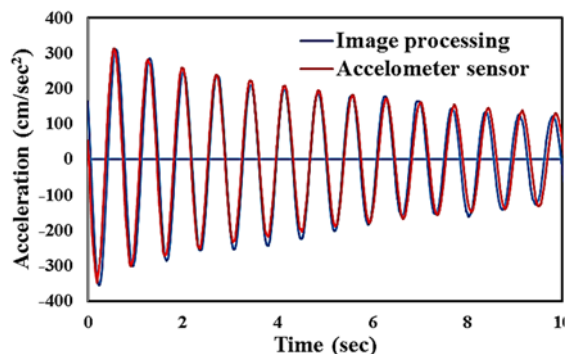


Fig. 11. Comparison between free side acceleration derived from the camera, and the accelerometer

جدول ۱. مقایسه فرکانس طبیعی و درصد خطا نتایج مربوط به تیر کنسولی بر اساس نتایج پردازش تصویر، حسگر شتاب سنج و روش المان محدود

Frequency (Hz)	Mode1	Mode2	Mode3
Image processing	1.64	3.51	9.84
Accelerometer sensor	1.43	3.40	10.5
% error (Image processing in comparison of accelerometer sensor)	14	3	6
Finite element	1.31	3.30	11.62
% error (Image processing in comparison of finite element)	25	6	15

Table 1. Comparison of Natural frequencies and error percentage of cantilever beam based on image processing, Accelerometer sensor, and finite element method.

جدول ۲. نسبت میرایی تیر کنسول

Damping ratio (%)	Mode1	Mode2	Mode3
Accelerometer sensor	1.0	0.02	0.03
Average method	0.47	0.01	0.02
Common method	0.47	0.01	0.02

Table 2. Damping ratios of the cantilever beam

۴-۲- تست قاب سه طبقه

همان‌طور که در شکل (۱۰) قابل مشاهده است، دو ستون و ۴ نقطه در هر ستون در لبه تیر کنسول برای روش میانگین‌گیری انتخاب شده‌اند. تغییر مکان‌های این نقاط استخراج شده‌اند و با استفاده از مشتق دوم این جابه‌جایی، شتاب سازه به دست آمده است. در نهایت، خواص مودال با استفاده از روش جستار قله تجزیه و تحلیل شده است. مودهای شکل، فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی مربوط به این فرکانس‌ها استخراج شده و با نتایج حاصل از شتاب سنج و روش المان محدود مقایسه شده است.

شکل ۱۰. نشانه‌گذاری ۴ نقطه روی هر ستون روی لبه تیر. (الف) روش معمولی، (ب) روش میانگین‌گیری

(الف) (ب)

Fig. 10. 4-point on each column on the edge of the beam. (a) the common method, (b) the Average method

در شکل (۱۱) شتاب حاصل از دوربین و شتاب‌سنج مقایسه شده است که نتایج نشان‌دهنده هماهنگی مناسب این دو بر همدیگر است. اولین سه فرکانس طبیعی تیر کنسول بر اساس پردازش تصویر، حسگر شتاب سنج و روش المان محدود در جدول (۱) مقایسه شده است. بر اساس این جدول انطباق خوبی بین فرکانس‌های طبیعی سازه در سه مود اول نوسان برای روش‌های مختلف به دست آمده است. همچنین در روش پردازش تصویر میزان خطا نسبت به نتایج حاصل از حسگرها

شکل ۱۳. (الف) تصویر تبدیل به خاکستری شده؛ (ب) تصویر با تشخیص لبه؛ (ج) تصویر با خطوط سیاه و پس زمینه سفید تغییر یافته

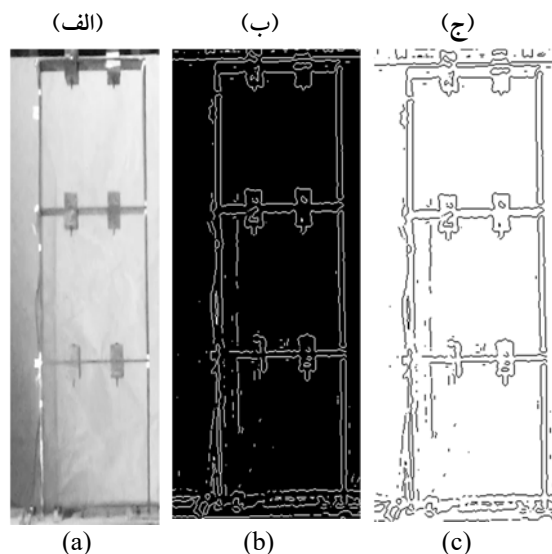


Fig. 13. (b) image changed to gray scale, (c) image with edge detection, (d) image changed with black lines and white backgrounds

شکل ۱۴. نشانه گذاری ۴ نقطه روی هر ستون روی لبه قاب. (الف) روش معمولی، (ب) روش میانگین گیری

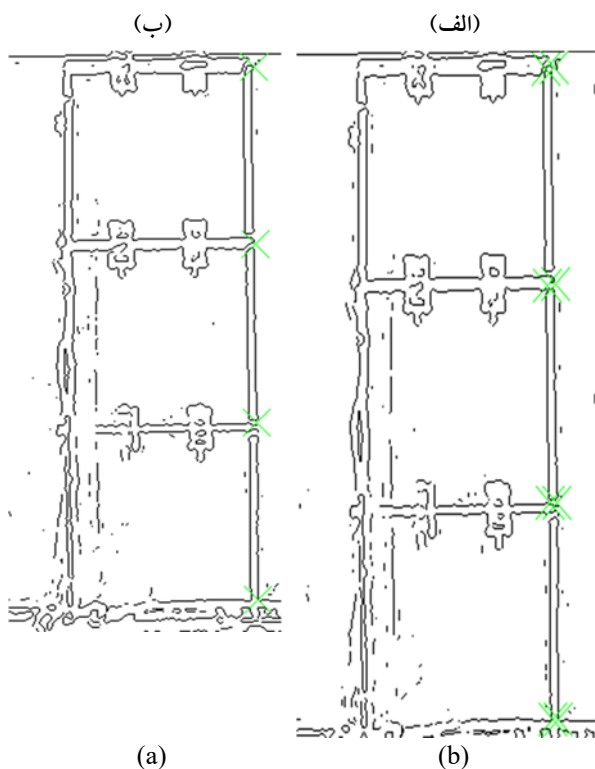


Fig. 14. 4-point on each column on the edge of the frame. (a) the common method, (b) the Average method

شتاب سازه به دست آمده است. در نهایت، خواص مودال با استفاده از روش جستار قله تجزیه و تحلیل شده است. مودهای

یک آزمایش مشابه با آزمایش تیر کنسول آلومینیومی روی یک قاب سه طبقه به منظور مقایسه نتایج حاصل از پردازش تصویر با مقادیر شتاب سنج که روی آن قرار گرفته است و روش المان محدود، اعمال شد. دقت و خطای روش ارزیابی شد، سپس نتایج روش جدید با نتایج حاصل از شتاب سنج و اجزا محدود مقایسه شد. برای این منظور، قاب سه طبقه که سه حسگر در هر طبقه جاسازی شده است (شکل ۱۲). با استفاده از یک چکش در پایه آن تحریک شد و شتاب های مربوط به ۳ حسگر در هر طبقه ضبط شد.

شکل ۱۲. قاب سه طبقه که سه حسگر روی آن تعبیه شده است.

Fig. 12. Three-story frame with three sensors embedded on it.

از سوی دیگر مانند تیر کنسولی، دوربین لبه سازه را فیلم برداری کرد. عکس ها از فیلم استخراج شد و هر عکس به مقیاس خاکستری تغییر یافت، سپس از الگوریتم تشخیص لبه استفاده شد، به طوری که عکس ها به تصاویر سیاه و سفید تغییر یافتند. در نهایت، برای نشان دادن بهتر لبه های سازه، از عکس هایی با خطوط سفید و پس زمینه های سیاه و سفید به تصاویر با خطوط سیاه و زمینه های سفید تبدیل شد. تصاویر به دست آمده در این پروسه برای یک فریم از فیلم ارتعاش سازه در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، دو ستون و ۴ نقطه در هر ستون بر روی لبه قاب در روش میانگین گیری انتخاب شده اند و تغییر مکان های این نقاط استخراج شدند.

جدول ۳. مقایسه فرکانس طبیعی و درصد خطا نتایج مربوط به فریم سه‌طبقه بر اساس نتایج پردازش تصویر، حسگر شتاب سنج و روش المان محدود

Frequency (Hz)	Mode1	Mode2	Mode3
Image processing	4.68	15.70	23.21
Accelerometer	4.64	15.38	24.10
sensor			
% error (Image processing in comparison of accelerometer sensor)	0.8	2.1	3.6
Finite element	4.59	14.51	24.57
% error (Image processing in comparison of the finite element)	1.9	8.2	5.5

Table 3. Comparison of Natural frequencies and error percentage of Three-story frame based on image processing, Accelerometer sensor, and finite element method.

جدول ۴. نسبت میرایی قاب سه‌طبقه

	Mode1	Mode2	Mode3
Damping ratio (%)			
Accelerometer	1.3	0.747	0.747
sensor			
Average method	1.0	1.0	1.2
Common method	1.0	1.0	1.3

Table 4. Damping ratios of the Three-story frame

۵- نتیجه

۵-۱- تیر کنسول

ابتدا در روش میانگین‌گیری بر روی تیر کنسول آلومینیومی ارتعاش آزاد اعمال می‌شود. پروسه نشان داده شده در شکل (۱)، روی تیر اعمال شده است و نتایج هر مرحله از پردازش تصویر در شکل (۹) آورده شده است. مقایسه شکل مودهای حاصل از روش تشخیص لبه معمولی، روش میانگین‌گیری پیشنهادی، شتاب سنج و اجزا محدود در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۶) مشخص است بین شکل مودهای به‌دست‌آمده از ویدئو و داده‌های مشتق شده از شتاب سنج کمی تفاوت وجود دارد. اگرچه این مقادیر که از جابجایی فیلم در دو روش استخراج می‌شوند به‌طور کامل همسان نیستند (به دلیل مسائل با الگوریتم پردازش تصویر یا حضور حسگر شتاب سنج و کابل آن‌ها در تصاویر)، ولی نتایج روش جدید نتایج بهتر از روش معمول است.

شکل، فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی مربوط به این فرکانس‌ها استخراج شده و با نتایج حاصل از شتاب سنج و روش المان محدود مقایسه شده است.

به منظور راستی آزمایی، همان‌گونه که در شکل (۱۵) نشان داده شده است، مقایسه شتاب طبقه آخر قاب به دست آمده از دوربین و شتاب سنج انجام شده است که نتایج نشان‌دهنده هماهنگی مناسب این دو بر همدیگر است.

اولین سه فرکانس طبیعی قاب سه طبقه بر اساس پردازش تصویر، حسگر شتاب سنج و روش المان محدود در جدول (۳) مقایسه شده است. بر اساس این جدول هماهنگی خوبی بین فرکانس‌های طبیعی سازه در سه مود اول نوسان برای روش‌های مختلف به‌دست‌آمده است. همچنین در روش پردازش تصویر میزان خطا نسبت به نتایج حاصل از حسگرها برای سه مود اول به ترتیب ۰/۸، ۲/۱ و ۳/۶ درصد و این خطا نسبت به نتایج اجزا محدود به ترتیب ۱/۹، ۸/۲ و ۵/۵ درصد به دست آمده است. در جدول (۴)، نسبت‌های میرایی مربوط به سه فرکانس اولیه سازه باهم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو روش پردازش تصویر (معمولی و میانگین‌گیری) مقادیر یکسانی از نسبت میرایی استخراج شده است و همچنین مقادیر به‌دست‌آمده در روش‌های مختلف هماهنگی خوبی باهم دارند.

شکل ۱۵. مقایسه شتاب سمت راست حاصل از دوربین و شتاب سنج.

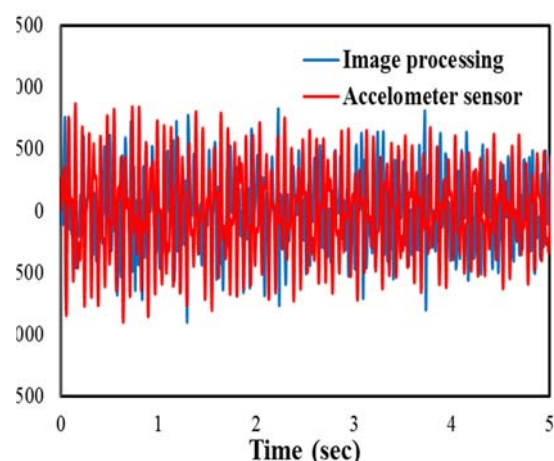


Fig. 15. Comparison between free side acceleration derived from the camera and the accelerometer.

شکل ۱۶. مقایسه اشکال مودی تیر کنسولی حاصل از پردازش تصویر، حسگر شتاب سنج و روش المان محدود. (الف) مود ۱، (ب) مود ۲، (ج) مود ۳

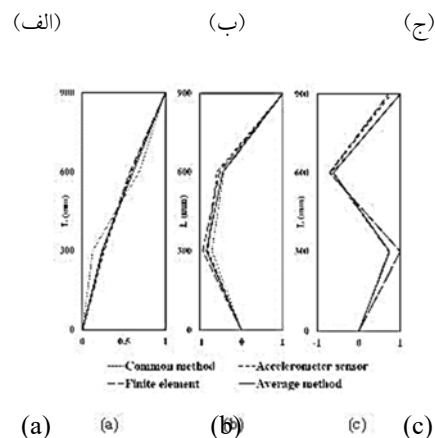


Fig. 16. Comparison of mode shapes of cantilever beam obtained from image processing, accelerometer sensor, and finite element method, (a) mode 1, (b) mode 2, (c) mode 3.

شکل ۱۷. مقایسه اشکال مودی قاب حاصل از پردازش تصویر، حسگر شتاب سنج و روش المان محدود. (الف) مود ۱، (ب) مود ۲، (ج) مود ۳

(الف) (ب) (ج)

Fig. 17. Comparison of mode shapes of frame obtained from image processing, accelerometer sensor, and finite element method, (a) mode 1, (b) mode 2, (c) mode 3.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، سعی شده است تا الگوریتم عددی جدیدی برای بهبود دقت جابه‌جایی سازه که از ویدیو با سرعت بالا به دست می‌آید ارائه شود. برای بررسی سازه‌های پیچیده‌ای که ممکن است در زیرساخت‌های موجود در دنیای واقعی پیدا شود، دو سازه ساده، یک تیر کنسولی و یک قاب ارائه شده است. مقایسه بین جابه‌جایی استخراج شده توسط حسگرهای شتاب و روش المان محدود روی دو سازه انجام شده است. سه شکل مود اول به همراه فرکانس طبیعی آن‌ها به دست آمد. برای سازه تیر کنسول، روش پیشنهادی، دقت فرکانس‌های طبیعی ارتعاش را در مقایسه با روش معمول بهبود نمی‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که در روش جدید بر اساس جداول (۲ و ۴) تفاوت محسوسی در محاسبه نسبت‌های میرایی سیستم ندارد. از سوی دیگر، با وجود کابل‌ها و حسگرها در پردازش تصویر و ضبط جابجایی‌ها، الگوریتم جدید دقت سه شکل مود اول را بهبود می‌بخشد. به همان شیوه، الگوریتم پیشنهادی برای سازه قاب سه طبقه انجام شد، هرچند دقت فرکانس‌های طبیعی آن برای سه مود ارتعاش تغییر نکرد، اما شکل مودهای به دست آمده نسبت به مقادیری که از حسگرهای شتاب سنج به دست می‌آمد، نزدیک‌تر بود. الگوریتم پیشنهادی در این مطالعه روش دقیق‌تری را برای تشخیص لبه و استخراج جابجایی‌ها و شکل مودهای سازه به ارمغان می‌آورد.

۵-۲- قاب سه طبقه

یک الگوریتم مشابه با تیر کنسول آلومینیومی به قاب سه طبقه اعمال شد و ارتعاش آزاد با استفاده از یک چکش در نزدیکی پایه سازه به آن اعمال شد. عکس‌های ارتعاش سازه از روش پردازش تصویر که در بالا توضیح داده شد به دست آمد. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مختلف اعم از روش تشخیص لبه معمولی، روش میانگین‌گیری پیشنهادی، داده‌های شتاب سنج و روش‌های اجزا محدود در شکل (۱۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۷) دیده می‌شود، بین شکل مودهای حاصل از پردازش تصویر و نتایج حاصل از شتاب سنج اختلاف اندکی وجود دارد. اگرچه این مقادیر که از دو روش استخراج می‌شوند، به‌طور کامل (به دلیل مسائل مربوط به الگوریتم پردازش تصویر) به‌طور کامل همسان نیستند، اما روش جدید نتایج بهتر از روش معمول دارد.

- [5] Patsias S, Staszewski WJ. Damage Detection Using Optical Measurements and Wavelets. *Structural Health Monitoring*. 2002;1(1):5-22.
- [6] Poudel UP, Fu G, Ye J. Structural damage detection using digital video imaging technique and wavelet transformation. *Journal of Sound and Vibration*. 2005;286(4-5):869-95.
- [7] Matsuzaki Y, Ji Y, Chang CC. Identification of structural dynamic behavior for the continuous system based on videogrammetric technique. 2006;6173:6173-11.
- [8] Tomizuka M, Chang CC, Yun C-B, Giurgiutiu V. From photogrammetry, computer vision to structural response measurement. 2007;6529:6529-03.
- [9] Ji YF, Chang CC. Nontarget Image-Based Technique for Small Cable Vibration Measurement. *Journal of Bridge Engineering*. 2008;13(1):34-42.
- [10] Kim S-W, Kim N-S. Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing. *NDT & E International*. 2013;59:25-33.
- [11] Bartilson DT, Wiegghaus KT, Hurlebaus S. Targetless computer vision for traffic signal structure vibration studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015;60-61:571-82.
- [12] Pai PF, Feng D, Duan Y. High-Fidelity Camera-based Method for Noncontact Vibration Testing of Structures. 2013.
- [13] Chen JG, Wadhwa N, Cha Y-J, Durand F, Freeman WT, Buyukozturk O. Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification. *Journal of Sound and Vibration*. 2015;345:58-71.
- [14] Encyclopedia WTF. Wikipedia The Free Encyclopedia Image processing 2013 [Available from: http://fa.wikipedia.org/wiki/Image_processing].
- [15] Strang G. *Linear Algebra and Its Applications*: Brooks Cole; 2006.
- [16] Gonzalez RC, Woods RE. *Digital image processing*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc; 2002.
- [17] Timothy K S, Rong-chi C. Super-resolution inpainting. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2005;6(6):487-91.
- [18] Ljung L. *System Identification: Theory for the User*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc; 1987.
- [19] Anderson P, Brinker R, Peeters B, De Roeck G, L. H, Watures T. Comparison of System Identification Methods Using Ambient Bridge Test Data. In *Proceeding of ISMA 23, the International Conference on Noise and Vibration Engineering*; K.U. Leuven, Belgium 1998.
- [20] FELBER AJ. DEVELOPMENT OF A HYBRID BRIDGE EVALUATION SYSTEM. Vancouver, Canada: The University of British Columbia; 1993.
- [21] Kim BH, Stubbs N, Park T. A new method to extract modal parameters using output-only responses. *Journal of Sound and Vibration* 2005;282 215-30.
- [22] Ewins DJ. *Modal Testing_ Theory and Practice* (Mechanical engineering research studies: Research Studies Press Ltd; 1984.

به دست آوردن سریع شکل مدهای سازه می‌تواند یک ابزار مفید، ارزان و کارآمد برای تجزیه و تحلیل مودال سازه باشد. اندازه‌گیری این شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی می‌تواند ابزار قدرتمند برای پایش سلامت سازه‌ها باشد. همچنین استفاده از پردازش تصویر و تشخیص لبه سازه‌ها، نیاز به استفاده از شتاب سنج در پایش سلامت سازه‌ها، به ویژه در مناطق غیرقابل دسترس را کاهش می‌دهد.

تعداد حس‌گرها در این روش هیچ محدودیتی ندارد و تعداد نقطه می‌تواند بر اساس تراکم پیکسل‌ها در تصاویر تعیین شود. هدف نهایی پژوهش آشکارسازی خرابی سازه‌ها با استفاده از ویدئو و ضبط ارتعاشات سازه‌ها و تعیین خواص مودال آن است. برای بهبود این رویکردها می‌توان چندین حوزه تحقیق را پیشنهاد کرد. الگوریتم اتوماتیکی که می‌تواند ویژگی‌های مودال سازه‌ها را در هماهنگ‌سازی چندین ویدئو استخراج کند، برای تجزیه و تحلیل مودال و نظارت بر سلامت سازه‌ها بسیار مفید خواهد بود. چالش‌های بیشتری نیز باید مانند سازه‌هایی با هندسه‌های پیچیده، سازه‌های بزرگ و شرایط فیلم‌برداری مختلف مانند ارتعاش محیط در فیلم‌برداری، شرایط نور محیط و به‌ویژه خطاهای فیلم‌برداری در نظر گرفته شود. تحقیق در این زمینه‌ها راه را برای هدف نهایی استفاده از دوربین به‌جای حس‌گرها به‌منظور ارزیابی پایش سلامت سازه‌ها هموار می‌سازد.

۷- تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق قرارداد شماره ۲۵۹۵۶ مورخ ۹۶/۱۰/۱۸ انجام شده است.

References

۸- مراجع

- [1] Zhang J, Prader J, Grimmelsman KA, Moon F, Aktan AE, Shama A. Experimental Vibration Analysis for Structural Identification of a Long-Span Suspension Bridge. *Journal of Engineering Mechanics*. 2013;139(6):748-59.
- [2] Baqersad J, Poozesh P, Niezrecki C, Avitabile P. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics – A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016.
- [3] Olaszek P. Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method. *Measurement*. 1999;25(3):227-36.
- [4] Hong-yu W, Hong-dong L, Xiu-qing Y, Wei-kang G. TRAINING A NEURAL NETWORK FOR MOMENT BASED IMAGE EDGE DETECTION. *Journal of Zhejiang University(SCIENCE)*. 2000;1(4):398-401.

Utilizing an average method to extract the dynamic properties of structures with image processing

Amin Havarani^{1*}, Mussa Mahmoudi²

1- Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaie Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaie Teacher Training University, Tehran, Iran.

aminhavarani@sru.ac.ir

Abstract

Dynamic properties of structures, such as natural frequency, shape modes, and damping ratios, play a decisive role in structure behavior against dynamic loads like earthquakes. Determining the earthquake forces imposed on structures based on the design spectra is one of the utilization of these properties. Other applications of these features could be utilized to update the finite element model, detect potential damage in structures, long-term health monitoring of structures, and evaluating the safety of structures after heavy loading. Therefore, accuracy and reducing the cost of extracting these properties would have a significant role in improving the efficiency and consequently of the useful life of structures. In other word, the more accurate of structural dynamic properties means, the more accurate determination of the seismic response of the structures. These properties depend on a great deal of detail, such as material behavior and the geometry of the structure, which could not be easily simulated in analytical models. So, performing seismic tests on structures is the most reliable method for obtaining these properties. Determination of these properties have been done in a variety of ways. However, various methods have been developed in many studies to extract these quantities by image processing. The aim of this article is presenting a novel approach to increase the accuracy of remote sensing by image processing. Therefore, the current paper is an attempt to apply the average method to improve efficiency as a cheaper method for obtaining the dynamic properties of structures. For this purpose, a cantilever aluminum beam and a Three-story frame with additional mass have been considered, and the commercial camera captures the vibration of the structure. The extracted displacements of each four points on the edge of the specimen are recorded as the input signals of the system. With two numerical derivatives of these displacements, the acceleration of the structure is obtained. Peak survey method utilized to extract natural frequencies, damping ratios, and mode shapes of the each selected point. The averaging method applied to calculate the final properties of the structure.

At last, the results are compared with the values obtained from the acceleration sensors embedded on the structure and the finite element results. Then the accuracy and error of the algorithm are evaluated. However, these results could be utilized as the input information in the health-monitoring of the structures. The results show that the novel method did not improve the accuracy of the first three natural frequencies modes of vibration in comparison with the standard method for the cantilever beam. It is also observed that the new method wouldn't make a significant difference in the calculation of damping ratios of the system. On the other hand, although the existence of cables and sensors would reduce the accuracy of image processing and recorded displacements, the new algorithm improves the estimation of the first three shapes modes. In the same way, the same function was performed for the Three-story frame structure. Although its natural frequencies did not change for the first three modes of vibration, the mode shapes are closer to the values obtained from the accelerometer sensors.

Keyword: image processing, average method, dynamic properties, natural dynamic frequency, shape mode