

Investigation of mass change detection utilizing the digital image processing

Amin Havaran¹, Mussa Mahmoudi^{2*}

1- Ph.D. candidate of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaie Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineerin, Shahid Rajaie Teacher Training University, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Currently, to obtain the dynamic properties of structures in structural engineering, experimental relationships, mathematical models and computer software aids are mainly used. These dynamic properties depend on many details about material behavior and the compound of the structures, which could not all be taken into account in analytical models. Therefore, there are always differences between the analytical models and the actual structures. So, seismic tests on structures is the most reliable method for obtaining these properties, so far, various methods have been developed in the world to preform these seismic experiments on the experimental structures such as image processing method. In this paper, the image processing method utilized through the dynamic properties of structures for mass change detection in the structure. For this purpose, a cantilever beam oscillated and the recorded displacements are considered as the inputs of the system identification. By deriving these displacements twice, the acceleration of the structure obtained and by processing these accelerations, natural frequency and shape mode of structure have been extracted and compared with the results of the accelerometer sensors embedded on the structure. Finally, mode shape curvature method utilized and the location of the sensors on the structure has been detected with good accuracy.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 June 2019

Revise Date: 13 July 2019

Accept Date: 23 July 2019

Keywords:

Image processing
Structural dynamic
Mode shape curvature method
Dynamic properties of
structures
damage detection

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.190320.1885

*Corresponding author: Mussa Mahmoudi

Email address: m.mahmoudi@sru.ac.ir

شناسایی محل تغییر جرم در سازه با استفاده از روش پردازش تصاویر دیجیتال

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

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

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

چکیده

در حال حاضر برای به دست آوردن خصوصیات دینامیکی سازه‌ها در مهندسی سازه عمدتاً از روابط تجربی و یا مدل‌های ریاضی و نرم‌افزارهای کامپیوتری استفاده می‌شود. این خصوصیات دینامیکی به بسیاری از جزئیات رفتار مصالح و ترکیب سازه بستگی دارد که تمام این جزئیات را نمی‌توان در مدل‌های تحلیلی دخالت داد؛ بنابراین همیشه بین مدل‌های تحلیلی و سازه واقعی اختلافاتی وجود دارد. لذا انجام آزمایش‌های لرزه‌ای بر روی سازه‌ها مطمئن‌ترین روش برای به دست آوردن خصوصیات مذکور بوده و تاکنون روش‌های مختلفی در دنیا برای انجام این آزمایش‌های لرزه‌ای بر روی یک سازه آزمایشگاهی به‌وسیله پردازش تصویر انجام شده است. در این مقاله سعی شده محل تغییر جرم در سازه از طریق خصوصیات دینامیکی سازه‌ها با استفاده از پردازش تصویر به دست آید. بدین منظور از سازه فیلم‌برداری شده و تغییر مکان‌های ثبت‌شده به‌عنوان سیگنال‌های ورودی سیستم در نظر گرفته می‌شود، با دو بار مشتق گرفتن از این تغییر مکان‌ها، شتاب سازه به دست می‌آید و با پردازش این شتاب‌ها، زمان تناوب‌های طبیعی و شکل مود سازه استخراج شده و با نتایج حاصل از حسگرهای شتاب تعبیه‌شده روی سازه مقایسه گردیده است، درنهایت با استفاده از روش منحنی شکل مود، سازه به همراه حسگر و بدون حسگر، مقایسه شده است و به‌راحتی توانست وجود افزایش جرم در سازه را تشخیص دهد.

کلمات کلیدی: پردازش تصویر، دینامیک سازه، انحنای شکل مود، خصوصیات دینامیکی سازه‌ها، شناسایی خرابی سازه‌ها

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.190320.1885	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.190320.1885	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۰۵/۰۱	۱۳۹۸/۰۵/۰۱	۱۳۹۸/۰۴/۲۲	۱۳۹۸/۰۳/۲۸
موسی محمودی صاحبی m.mahmoudi@sru.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌ها از قبیل زمان تناوب‌های طبیعی ارتعاشی، نسبت میرایی و شکل مودهای ارتعاشی نقش بسزایی در تحلیل، طراحی، نگهداری، پایش سلامت سازه و شناسایی آسیب در سازه دارند لذا دقت و کاهش هزینه ارزیابی این خصوصیات نقش مهمی در افزایش کارایی و در نتیجه عمر مفید سازه‌ها و حفظ منابع طبیعی و ملی کشورها خواهد داشت.

به منظور پایش سلامت سازه‌ها و شناسایی خرابی در آن‌ها لازم است که خصوصیات دینامیکی سازه‌ها مانند پریودهای طبیعی ارتعاشی، شکل مودهای ارتعاش و میرایی سازه‌ها در دسترس باشند. این خصوصیات دینامیکی به بسیاری از جزئیات رفتار مصالح و ترکیب سازه بستگی دارد که تمام این جزئیات را نمی‌توان در مدل‌های تحلیلی دخالت داد؛ بنابراین همیشه بین مدل‌های تحلیلی و سازه واقعی اختلافاتی وجود دارد. تنها با تعیین مستقیم این خصوصیات دینامیکی به وسیله آزمایش بر روی ساختمان‌های واقعی و مقایسه با نتایج تحلیلی است که می‌توان به میزان دقت نتایج تحلیل دست یافت و در مورد قابل قبول بودن نتایج تحلیل قضاوت نمود. از آنجایی که حسگرهای جاسازی شده در سازه دارای مشکلات خاص خود (از جمله مشکل دسترسی، هزینه، سیم‌کشی، تغییر در خصوصیات جرم یا سختی سازه) هستند. روش جایگزین به منظور کاهش نیاز نصب حسگرها و هزینه آن‌ها، استفاده از روش سنجش از راه دور بر اساس پردازش تصویر است.

هرچه مقادیر خصوصیات لرزه‌ای سازه‌ها دقیق‌تر اندازه‌گیری شده باشد، تعیین پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. یکی از راه‌های برداشت تغییر مکان‌های سازه استفاده از انواع حسگرها و یا فیلم برداری است. تاریخچه استفاده از تصاویر در پردازش دینامیکی سازه‌ها روش ردیابی نقاط و ردیابی لبه برمی‌گردد. ردیابی نقاط در سازه‌ها خود شامل ضبط دوبعدی و سه‌بعدی می‌باشد. در ضبط دوبعدی تنها از یک دوربین استفاده می‌شود ولی در ضبط سه‌بعدی از دو یا چند دوربین استفاده می‌گردد.

در اوایل به منظور ضبط تغییر مکان‌ها دوبعدی تنها استفاده از یک دوربین مقدور بود. به عنوان مثال یکی از اولین تلاش‌ها برای ضبط تغییر مکان‌های دینامیکی در سال ۱۹۹۹ انجام شده است [۱]. در این تحقیق یک سیستم بهنگام فتوگرامتری مبتنی بر استفاده از یک دوربین استفاده شد تا مقدار تغییر مکان‌های نشانگرهایی را که بر روی پل نصب شده بودند را تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی اندازه‌گیری نماید.

در سال ۲۰۰۳ تعدادی از محققان از دو چراغ آل ای دی^۱ بافاصله معلوم به عنوان نشانگر در وسط دهانه میانی پل وینسنت توماس^۲ با طول ۴۵۷ متر استفاده نمودند آن‌ها از فاصله بین چراغ‌ها به منظور کالیبراسیون دوربین استفاده کردند. برای ضبط نوسانات سازه، دوربین خانگی با ضبط ۳۰ فریم بر ثانیه را روی پل نصب نمودند و از نتایج آن به منظور کنترل سلامت سازه استفاده کردند [۲].

در سال ۲۰۰۷ جابجایی‌های به دست آمده از تحریک محیطی پل به حوزه فرکانس تبدیل شد و فرکانس طبیعی پل به دست آمد، همچنین از نقاط اوج به دست آمده برای به دست آوردن شکل مود سازه استفاده گردید [۳].

از دیگر تحقیقات که سعی به ضبط جابجایی‌های دینامیکی پل ریلی تحت ارتعاش حرکت قطار نمود مطالعات سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ بود. در این تحقیقات سعی شد با استفاده از دوربین معمولی، با مقدار بزرگنمایی‌های متفاوت و همچنین انواع مختلف نشانگرها در فاصله ۱۰۰ متری از دوربین، بهترین حالت فیلم برداری به دست آید [۴، ۵].

در سال ۲۰۱۵ تعدادی از محققان از دو نوع دوربین معمولی برای به دست آوردن فرکانس‌ها و شکل مود پل کابلی Chi-Lu استفاده کردند. [۶].

از آنجایی که حرکت سازه‌های مختلف در اثر ارتعاشات ممکن است بسیار سریع باشد همچنین به علت فرکانس‌های نمونه برداری پایین دوربین‌ها و در نتیجه سختی به دست آوردن نحوه حرکت سازه، در سال ۲۰۱۴ الگوریتمی برای تشخیص حرکت سریع کابلی که با دست نوسان پیدا می‌کند ارائه شد [۷].

^۱ LED^۲ Vincent Thomas

هرچند تاکنون مطالعه‌ای با استفاده از پردازش تصویر به منظور پایش سلامت سازه انجام نشده است ولی استفاده از خصوصیات دینامیکی سازه برای این منظور به طور گسترده تاکنون انجام شده است. برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ از تغییرات فرکانس زاویه‌ای اندازه‌گیری شده برای پایش سلامت، محل و مقدار خرابی سازه بر اساس تکنیک‌های ریاضی استفاده شد [۸]. شناسایی سیستم (SI) یعنی پروسه مدل‌سازی سیستم ناشناخته بر مبنای ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم در علوم مختلف مهندسی [۹]. در مهندسی سازه، شناسایی سیستم، شامل شناسایی مشخصات سازه‌ای از قبیل سختی، مشخصات لرزه‌ای مانند فرکانس، شکل مود، نسبت میرایی سازه و همچنین انرژی کرنش و تنش یا واکنش سازه هست. بیشترین بررسی‌ها برای شناسایی سیستم، شناسایی دینامیکی سازه تحت اثر بارهای دینامیکی شامل رفت‌وآمد وسایل نقلیه، زلزله، باد یا برخورد بوده است [۱۰].

از اولین تحقیقات در زمینه‌ی شناسایی سیستم را می‌توان به تحقیقات سال ۱۹۸۶ نام برد. محققان آزمایش استاتیکی و استاتیکی افزایش یافته را بر روی پل بتنی پیش‌تنیده درحالی‌که تحت اثر بار دینامیکی محیطی بود را برای بررسی مناسب بودن اندازه‌گیری خصوصیات دینامیکی سازه برای پایش سلامت سازه انجام دادند. آن‌ها در حین پروسه زوال سازه، ارتعاشات افقی و عمودی سازه را تحت اثر بار دینامیکی محیطی ضبط کرده، فرکانس‌های زاویه‌ای پل را اندازه گرفتند. مشاهده شد که فرکانس طبیعی سازه با افزایش بار استاتیکی کاهش پیدا می‌کند [۱۱]. در سال ۲۰۰۹ یک سیستم پایش سلامت سازه مبتنی بر لرزش محیطی برای تحت نظر گرفتن مشخصات مودال پلی در نیویورک آمریکا به کار گرفته شد. خصوصیات دینامیکی پل تحت اثر ارتعاشات محیطی از یک شبکه شتاب‌نگاری به دست آمد و به سیستم پایش سازه وصل شد [۱۲]. در سال ۲۰۱۰ تغییرات خصوصیات دینامیکی سازه به صورت کمی اندازه گرفته شد و تخمین میزان خرابی، محل و مقاومت باقی‌مانده پل با استفاده از مقایسه خصوصیات دینامیکی پل که از اندازه‌گیری شتاب‌های قائم و افقی حاصل از تحریک محیطی داشتند انجام گردید [۱۳].

روش‌های مبتنی بر تغییر در شکل مودها برای پایش سلامت سازه در واقع یکی از روش‌هایی است که از خصوصیات به دست آمده دینامیکی سازه استفاده می‌کند. در سال ۱۹۸۶ استفاده از شکل مودها به عنوان عاملی برای تعیین خرابی در سازه‌ها پیشنهاد شد [۱۴]. استفاده از انحنای شکل مودها و تغییرات در کرنش‌های مودها از جمله روش‌هایی می‌باشد که در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شده. این روش تغییرات انرژی کرنشی ذخیره شده در تیر زمانی که در یک شکل مود خاص تغییر فرم می‌دهد را محاسبه می‌کند. این روش بر پایه کاهش انرژی کرنشی مودال بر اثر ایجاد آسیب بین دو مقطع عرضی سازه‌ای است که از انحنای شکل مودهای اندازه‌گیری شده به دست می‌آید [۱۵]. در سال‌های اخیر استفاده از پردازش تصویر به منظور پایش سلامت سازه گسترش پیدا کرده است در این تحقیقات حتی از درون^۳ به منظور نزدیک‌تر شدن به محل مورد نظر در سازه‌هایی که دسترسی به آن‌ها مشکل است استفاده گردیده است [۱۶-۱۸]. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۹ الگوریتمی جهت پایش کرنش تیغه‌های توربین بادی با استفاده از درون و پردازش تصویر پیشنهاد شده است که قادر است وضعیت این تیغه‌ها حتی هنگام کار را زیر نظر بگیرد [۱۷].

هدف این تحقیق ترکیب روش پردازش تصویر و شناسایی محل خرابی در سازه با استفاده از روش انحنای شکل مود به عنوان روشی ساده و ارزان است. به عبارت دیگر در این مقاله سعی شده است که شناسایی محل افزایش جرم سازه با استفاده از روش پردازش تصویر و روش انحنای شکل مود انجام گیرد. روش پیشنهادی در این مقاله بر روی تیر آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که وزن حسگرها در مقایسه با وزن تیر قابل ملاحظه است، از این اضافه‌وزن به عنوان تغییر در جرم سازه و تشخیص محل آن مورد نظر بوده است. از ارتعاش تیر فیلم‌برداری شده و در نهایت با مقایسه شکل مود به دست آمده از پردازش تصویر، محل افزایش جرم سازه شناسایی شده است.

۲- روش تحقیق

هدف از این مقاله استفاده از پردازش تصاویر به عنوان روشی ارزان‌تر در به دست آوردن خصوصیات دینامیکی سازه و همچنین کاربرد آن‌ها در پایش سلامت سازه می‌باشد.

³ Drone

از آنجایی که آسیب در سازه با تغییر در فرکانس‌های طبیعی آن همراه است و همچنین این فرکانس‌ها با جرم و سختی سازه در ارتباط هستند لذا می‌توان آسیب در سازه‌ها را به صورت کاهش سختی (مدول الاستیسیته) یا تغییر جرم بیان نمود. همچنین بدلیل اینکه هدف این مقاله تنها ارائه روشی آسان برای پیدا کردن محل آسیب در سازه می‌باشد. بنابراین در این مقاله تغییر در جرم سازه و شناسایی محل تغییر آن به عنوان معیاری برای آسیب سازه بیان شده است.

روش کار در این مقاله شامل سه قسمت اساسی است. ۱- پردازش تصویر ۲- پردازش سیگنال (شتاب سازه) حاصل از پردازش تصویر و به دست آوردن خصوصیات دینامیکی سازه‌ها ۳- پایش سلامت سازه

در قسمت نخست، سازه چند درجه آزادی (تیر یکسر گیردار آلومینیومی) تحت آزمایش قرار می‌گیرد، بدین صورت که تغییر مکان‌های حاصل از ارتعاش آزاد تیر در نقاط مهم سازه دو بار ضبط می‌گردد: ۱- بدون استفاده از شتاب سنج و تنها با استفاده از دوربین و ۲- با استفاده از هر دو شتاب سنج و دوربین. سپس تصاویر تغییر مکان‌های موجود با استفاده از روش پردازش تصویر به سری سیگنال عددی تغییر مکان تبدیل گردیده است. تغییر مکان‌های آن به عنوان سیگنال‌های ورودی سیستم در قسمت دوم ثبت می‌شود، با دو بار مشتق‌گیری عددی از این تغییر مکان‌ها، شتاب سازه به دست می‌آید، با پردازش این شتاب‌ها زمان تناوب‌های طبیعی و شکل مودهای متناظر با زمان‌های تناوب سازه استخراج و نتایج آن‌ها با مقادیر حاصل از حسگرهای تعبیه شده روی سازه مقایسه و دقت و خطای روش ارزیابی می‌گردد در نهایت در قسمت سوم این اطلاعات به عنوان اطلاعات ورودی در شناسایی محل آسیب سازه به روش انحنای شکل مود به کار برده می‌شوند. با توجه به اینکه که وزن شتاب سنج‌ها در مقایسه با تیر قابل توجه می‌باشد، همین وزن اضافه شده به تیر مبنای تشخیص محل حسگرها روی سازه در پایش سلامت سازه قرار می‌گیرد.

۲-۱- پردازش تصویر

به طور کلی در پردازش تصویر یک سامانه بینایی رایانه‌ای است که می‌توان آن را به زیرسامانه‌های زیر تقسیم کرد:

الف- تصویربرداری: که تصویر یا دنباله تصاویر با یک سامانه تصویربرداری برداشته می‌شود.

ب- پیش‌پردازش: که در آن تصویر در معرض اعمال سطح پایین قرار می‌گیرد. هدف این گام کاهش نویزها و کم کردن مقدار کلی داده‌هاست.

ج- استخراج ویژگی: که هدف از استخراج ویژگی‌ها کاهش دادن بیشتر داده‌ها به مجموعه‌ای از ویژگی‌هاست.

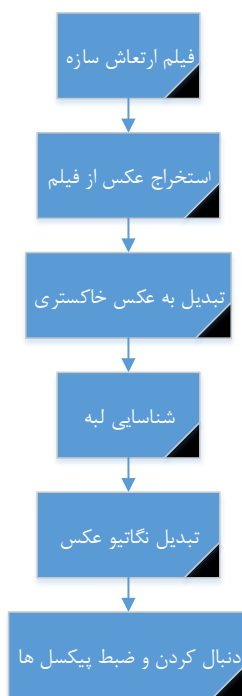
د- ثبت: که هدف برقراری تناظر میان ویژگی‌های مجموعه برداشت شده و ویژگی‌های اجسام شناخته شده در پایگاه داده‌ها، مدل و یا ویژگی‌های تصویر قبلی است [۱۹].

تصاویر دیجیتال از تعداد زیادی مربعات کوچک به نام پیکسل تشکیل شده‌اند. هر پیکسل دارای یک شماره رقمی می‌باشد که بیانگر مقدار روشنایی آن پیکسل است. به این نوع تصاویر، تصاویر رستری^۴ هم می‌گویند؛ به عبارت دیگر یک تصویر را می‌توان توسط تابع دوبعدی $f(x,y)$ که در آن x و y مختصات مکانی و مقدار f در هر نقطه شدت روشنایی تصویر در آن نقطه است تعریف نمود. زمانی که مقادیر x و y با مقادیر گسسته بیان شود، تصویر را تصویر دیجیتالی می‌نامند [۱۹]. برای نمایش یک تصویر $M \times N$ از یک آرایه دوبعدی که M سطر و N ستون دارد استفاده می‌شود. مقدار هر آرایه نشان‌دهنده شدت روشنایی تصویر در آن نقطه است. حداکثر تعداد روشنایی بستگی به تعداد بیت‌ها دارد؛ بنابراین ۸ بیت یعنی ۲۵۶ شماره رقمی که دامنه از ۰ تا ۲۵۵ دارد. مقدار ۰ نشان‌دهنده رنگ سیاه و مقدار ۲۵۵ نشان‌دهنده رنگ سفید است.

در این مقاله به منظور پردازش تصویر برای تشخیص لبه سازه ابتدا عکس‌ها از فیلم استخراج شده است. به منظور تشخیص لبه هر عکس به صورت خاکستری تبدیل می‌گردد سپس با الگوریتم تشخیص لبه، عکس به صورت سیاه و سفید نشان داده شده است و لبه‌های آن

⁴ Raster images

مشخص گردیده است. در نهایت به منظور تشخیص بهتر لبه‌های سازه، عکس با خطوط سفید و زمینه سیاه به صورت عکس با خطوط سیاه و زمینه سفید تبدیل گردیده است و برای به دست آوردن ارتعاش سازه، نقاط مشخص بر روی سازه در عکس‌های متوالی دنبال شده است. در نهایت محل پیکسل‌ها ضبط می‌شوند. خلاصه عملیات فوق در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: مراحل پردازش تصویر دیجیتال.

۲-۲- پردازش سیگنال

در قسمت دوم جهت تشخیص خصوصیات دینامیکی سازه باید سیگنال تغییر مکان حاصل از تصویر به سیگنال شتاب تبدیل گردد. بدین منظور ابتدا باید با دو بار مشتق‌گیری از تغییر مکان‌های به دست آمده از تحریک سازه (که از پردازش تصویر به دست آمده)، شتاب سازه به دست آید. پاسخ حاصل از تحریک سازه طبیعی دارای اغتشاش است که باید اصلاح شوند. پس از اندازه‌گیری پاسخ سازه به منظور کاهش نویز موجود، از روش کاهش نویز با استفاده از تبدیل موجک استفاده شده است. حال برای محاسبه پاسخ مودال، فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی با اعمال تبدیل فوریه بر روی پاسخ تابع، از روش جستار قله با فرض پاسخ ارتعاش آزاد تعیین می‌گردد.

روش دامنه‌ی قله یا جستار قله پارامترهای مودی را از روی ماتریس اف‌آراف^۵ استخراج می‌کند. مقادیر اف‌آراف دارای مقادیر حقیقی و موهومی می‌باشند. فرض اساسی در این روش این است که سازه دارای مودهای نزدیک به هم نیست و مودها به خوبی از هم فاصله‌دارند و میرایی سازه نه خیلی کم و نه خیلی زیاد است. رابطه بین شتاب ورودی به سازه $x(t)$ و پاسخ فرکانسی سازه $y(t)$ به صورت زیر می‌باشد.

$$y(t) = H_{ik}(j\omega) \cdot x(t) \quad (1)$$

$H_{ik}(j\omega)$ تابع پاسخ فرکانسی برای سازه‌ی چند درجه آزاد به صورت زیر می‌باشد:

⁵ Frequency Response Function (FRF)

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

که $H_{ik}(j\omega)$ توصیف کننده رابطه‌ی بین شتاب خروجی در درجه آزادی i به تحریک ورودی در درجه آزادی k در حوزه فرکانس می‌باشد که رابطه اصلی در تحلیل مودی تجربی است و با استفاده از آن می‌توان پارامترهای مودی سازه را به دست آورد. ω_m فرکانس طبیعی یا فرکانس تشدید مود m ام، ζ_m میرایی مود m ام، و $(\varphi_i \varphi_k)_m$ نشان دهنده ضرب عضو i ام و k ام از بردار شکل مودی m ام می‌باشد و p تعداد کل مودهاست [۲۰].

رابطه‌ی (۱) فوق با فرض مود منفرد به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$H_{ik}(j\omega) = \frac{-(\varphi_i \varphi_k)_m \omega^2}{\omega_m^2 - \omega^2 + 2j\zeta_m \omega_m \omega} \quad (3)$$

در صورتی که قدر مطلق تابع پی‌اس‌دی^۶ را برحسب فرکانس رسم کنیم، این نمودار در محل فرکانس‌های طبیعی سازه دارای قله‌هایی است که با شناسایی این قله‌ها می‌توان فرکانس طبیعی سازه را به دست آورد و در صورتی که مقدار این قله‌ها را در فرکانس تشدید یا طبیعی سازه با $Q_{ik}(j\omega_m)$ نشان دهیم، مقدار آن با جایگزینی ω_m در رابطه (۳) به صورت رابطه (۴) بیان می‌گردد [۲۰].

$$Q_{ik}(j\omega_m) = \frac{-(\varphi_i \varphi_k)_m}{2j\zeta_m} \quad (4)$$

با توجه به اینکه پاسخ سازه از جنس شتاب است شناسایی فرکانس‌های طبیعی می‌تواند روی قسمت موهومی یا قدرمطلق تابع پاسخ فرکانسی انجام گیرد. با توجه به اینکه میرایی مودی (ζ_m) برای مود m ام ثابت می‌باشد و $(\varphi_k)_m$ برای توابع موجود در یک ستون از ماتریس اف‌آراف مشترک می‌باشد، پس $(\varphi_i)_m$ با قسم موهومی و همچنین قدرمطلق $Q_{ik}(\omega_m)$ متناسب می‌باشد. یعنی $(\varphi_i)_m \propto |Q_{ik}(j\omega_m)|$ و $(\varphi_i)_m \propto \text{Image}(Q_{ik}(j\omega_m))$ در نتیجه با استخراج $Q_{ik}(j\omega_m)$ ها از نمودار می‌توان اشکال مودی را به دست آورد. میرایی مودی نیز با استفاده از روش نیم توان و فقط از روی نمودار قدرمطلق تابع پاسخ فرکانسی به دست می‌آید. در این روش با به دست آوردن فرکانس‌های متناظر با مقدار $\frac{|Q_{ik}(j\omega_m)|}{\sqrt{2}}$ برای در دو طرف هر قله، که با ω_a و ω_b نشان داده می‌شوند، میرایی مودی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\zeta_m = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_m} \quad (5)$$

پس چون در روش جستار قله نمودار هر تابع پاسخ فرکانسی دارای اطلاعات فرکانس طبیعی و میرایی کل مودهاست می‌توان شناسایی را روی تمام اف‌آراف‌ها انجام داد [۲۱، ۲۲].

در این مقاله نتایج به دست آمده از پردازش تصویر با مقادیر حاصل از شتاب‌سنج قرار گرفته شده بر روی تیر و حل عددی تیر با استفاده از روش المان محدود مقایسه شد و دقت و خطای روش ارزیابی گردیده است.

۲-۳- شناسایی خرابی سازه

قسمت سوم شامل استفاده از شکل مود اول سازه در روش انحای شکل مود به منظور تعیین محل حسگرها می‌باشد. روش انحنا شکل‌های مود برای آشکارسازی آسیب بر این فرض استوار است که تغییرات انحنا شکل‌های مودی می‌تواند با حساسیت بیشتری، ناحیه آسیب دیده را پیش‌بینی کند. انحای شکل مود بر اساس مشتق مرتبه اول شکل‌های مودی طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود [۲۳]:

⁶ Power Spectral Density (PSD)

$$\bar{v}_{i,j} = \frac{\varphi_{(i+1),j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{(i-1),j}}{h^2} \quad (6)$$

که در آن، $\bar{v}_{i,j}$ ، بیانگر انحنای مودی، i شماره گره، z شماره شکل مودی، h فاصله بین گره‌ها و $\varphi_{i,j}$ شکل مود i امین گره در زامین مود است. از آنجایی که تغییرات در انحنای شکل مودی مدنظر می‌باشد، این مقادیر از تفاضل بردار انحنا شکل مودی سازه‌ی آسیب‌دیده ($\bar{v}_{i,j}^{(d)}$) و سازه‌ی سالم ($\bar{v}_{i,j}^{(u)}$) مطابق فرمول زیر به دست می‌آید:

$$\Delta \bar{v}_{i,j} = \bar{v}_{i,j}^{(d)} - \bar{v}_{i,j}^{(u)} \quad (7)$$

از طرفی می‌توان تغییرات انحنا شکل مودی در هر گره با استفاده از رابطه زیر نرمال نمود و در یک دامنه قرارداد [۲۳].

$$\Delta v_{i,j} = \left[1 + \frac{\Delta \bar{v}_{i,j}}{\max(\Delta \bar{v}_{i,j}) - \min(\Delta \bar{v}_{i,j})} \right]^2 \quad (8)$$

۳- نمونه آزمایشگاهی

تیر کنسولی استفاده شده در این تحقیق شامل پروفیل آلومینیومی با مقطع تسمه به طول ۹۰ سانتیمتر، عرض ۵ سانتیمتر و ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد، وزن مخصوص آلومینیوم ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول الاستیسیته آن ۶۹ گیگا پاسکال می‌باشد. شتاب‌سنج‌ها با فرکانس نمونه‌برداری ۵۰۰ هرتز و حداکثر ظرفیت ضبط شتاب $\pm 3g$ در لبه سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. وزن هر حسگر ۲۰ گرم می‌باشد.

برای حل عددی و به دست آوردن مشخصات دینامیکی سازه از نرم‌افزار SAP2000 استفاده شده است. در حل المان محدود انجام شده، با نرم‌افزار SAP2000 از المان تیر برای مدل‌سازی نمونه آزمایشگاهی، با مشخصات آلومینیوم ذکر شده استفاده شده است.

به منظور پردازش تصویر و به دست آوردن ارتعاشات تیر از نرم‌افزار MATLAB و الگوریتم‌های پردازش تصویر در آن استفاده شده است. برای دید رایانه‌ای بهتر و تشخیص بهتر لبه تیر توسط دوربین، این قسمت به صورت شطرنجی سیاه و سفید علامت‌گذاری شده است. از دوربین CASIO-EXZR1200 جهت فیلم‌برداری از ارتعاشات سازه استفاده شده است، دقت استفاده شده برای فیلم‌برداری 640×480 پیکسل و سرعت فیلم‌برداری ۱۲۰ فریم بر ثانیه است. در شکل ۲ و ۳ تیر کنسول آلومینیومی آزمایش شده به همراه حسگرهای شتاب نشان داده شده است.

۴- نتایج

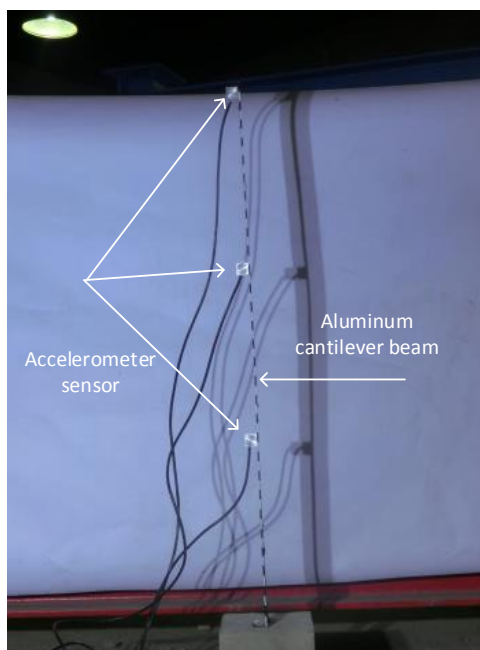
ابتدا نمونه آزمایشگاهی به همراه حسگر شتاب به ارتعاش آزاد درمی‌آید، سپس شتاب‌های متناظر با ارتعاش آزاد ۳ گره روی تیر به وسیله حسگر شتاب‌سنج به دست آمده و از طرفی با استفاده از دوربین، لبه مرتعش شده سازه فیلم‌برداری شده و ۳۰ نقطه روی آن انتخاب گردیده است. تغییر مکان‌های این نقاط استخراج گردیده است. با دو بار مشتق‌گیری از این تغییر مکان‌ها شتاب سازه به دست آمده است. در نهایت سیگنال‌های به دست آمده با استفاده از روش جستارقله تحلیل شده است. شکل مودها و فرکانس طبیعی متناظر با این فرکانس‌ها استخراج گردیده است و با نتایج حاصل از شتاب‌سنج و المان محدود مقایسه شده است.

در مرحله دوم همین تیر، بدون اتصال حسگرها مرتعش شده و به منظور پردازش تصویر، پروسه توضیح داده شده در شکل ۱ انجام شده است. در نهایت محل آسیب در سازه به صورت تغییر در جرم سازه و شناسایی محل تغییر آن بیان شده است.

پروسه توضیح داده شده در شکل ۱ به ترتیب در شکل‌های ۴ تا ۸ نشان داده شده است. در شکل ۴ عکس استخراج شده اولیه از فیلم آورده شده است. در شکل ۵، عکس به صورت خاکستری شده، در شکل ۶، لبه شکل مشخص گردیده و در شکل ۷ تصویر نگاتیو^۷

^۷ Negative Image

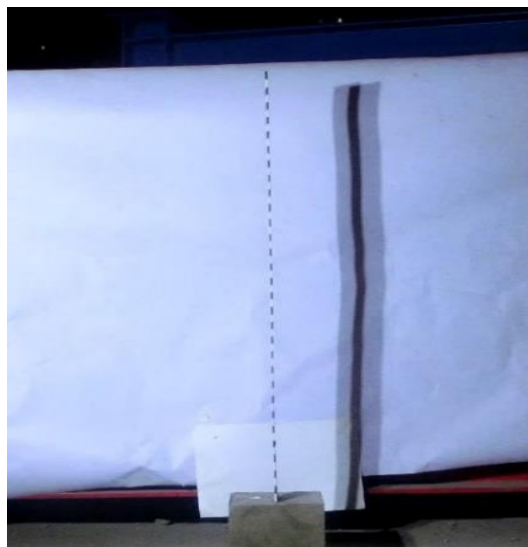
تشکیل شده است. در نهایت طبق شکل ۸ لبه سازه مشخص شده و ارتعاش آن ضبط گردیده است. به منظور راستی آزمایی روش پردازش تصویر، مقایسه شتاب به دست آمده در انتهای تیر کنسول به دو روش پردازش تصویر و شتاب سنج در شکل ۹ نشان داده شده است. همان گونه که در تصویر مشخص است، مقادیر به دست آمده از دو روش مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. همچنین مقایسه فرکانس های طبیعی و شکل مودهای سازه با استفاده از روش المان محدود و حسگرهای شتاب با نتایج حاصل از پردازش تصویر (شکل های ۱۱ و ۱۲ و جدول های ۱ و ۲) نشان دهنده انطباق مناسب نتایج این روش ها باهم دارند.



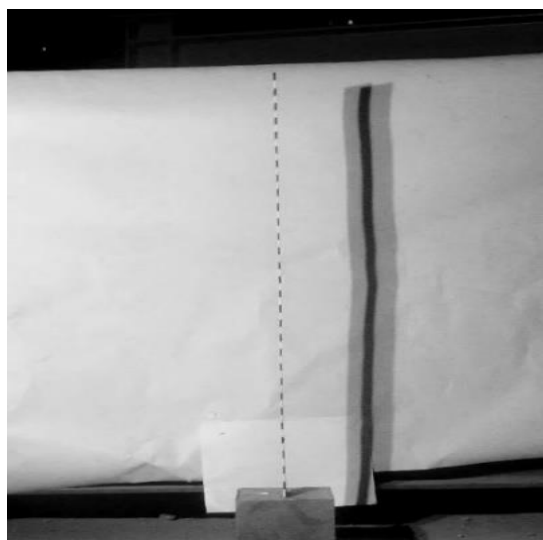
شکل ۲: تیر کنسولی آلومینیومی و حسگرهای شتاب.



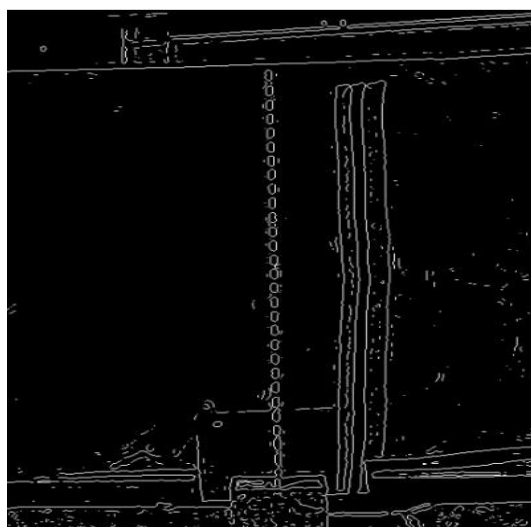
شکل ۳: مجموعه انجام آزمایش شامل دوربین، سازه و حسگرهای شتاب.



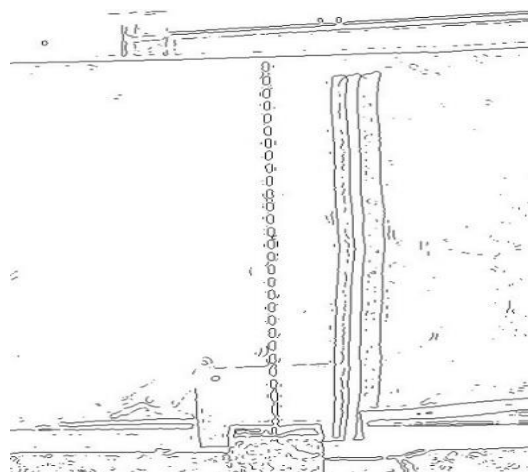
شکل ۴: عکس رنگی استخراج شده از فیلم.



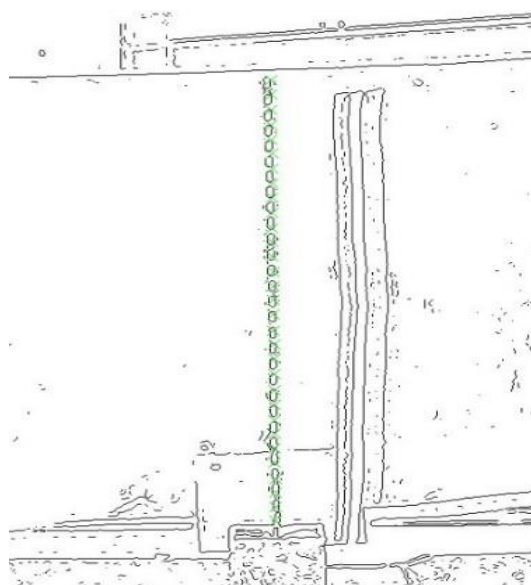
شکل ۵: عکس خاکستری شده.



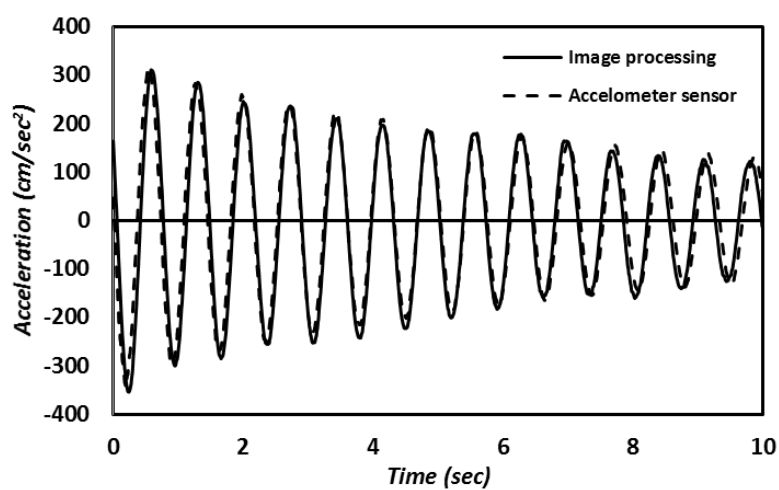
شکل ۶: تشخیص لبه سازه.



شکل ۷: نگاتیو کردن عکس لبه.

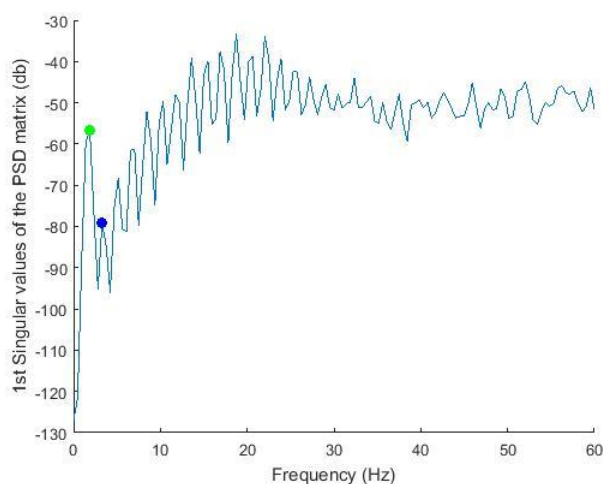


شکل ۸: نشانه گذاری و دنبال کردن لبه.



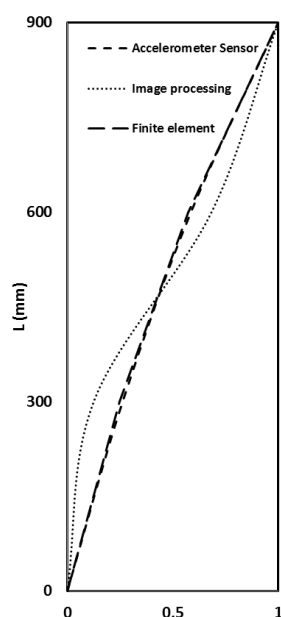
شکل ۹: مقایسه شتاب به دست آمده در انتهای تیر طره به دو روش پردازش تصویر و شتاب سنج.

جهت استخراج خصوصیات دینامیکی سازه شتاب‌های به دست آمده از مرحله قبل توسط روش جستارقله پردازش می‌گردد. در مرحله نخست نمودار اف‌آراف آن رسم می‌گردد و دو قله اول نمودار که نمایانگر دو فرکانس اول سازه می‌باشند انتخاب می‌گردد. نمودار اف‌آراف یا مقادیر ویژه مثبت معین برحسب فرکانس سازه در شکل ۱۰ به همراه دو قله انتخابی (دو فرکانس نخست اول سازه) در روش جستارقله آورده شده است.

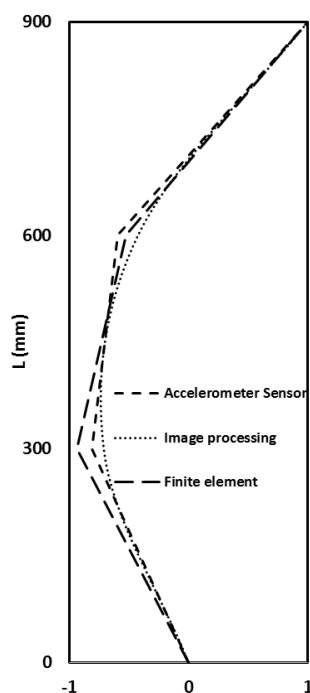


شکل ۱۰: نمودار اف‌آراف سازه.

با انتخاب دو فرکانس اول سازه، دو شکل مود اول سازه استخراج می‌شود. این روند برای هر دو سازه با حسگر و بدون حسگر تکرار شده است. شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نشان‌دهنده مقایسه شکل مود اول به دست آمده تیر با استفاده از خروجی حسگر شتاب‌سنج، نتایج حل عددی المان محدود و فیلم برداری است. انطباق خوب این سه نشانه مناسب بودن روش فیلم برداری در به دست آوردن خصوصیات دینامیکی سازه هست.



شکل ۱۱: مقایسه شکل مود اول تیر، به دست آمده از فیلم برداری، حسگر شتاب و المان محدود.



شکل ۱۲: مقایسه شکل مود دوم تیر، به دست آمده از فیلم برداری، حسگر شتاب و المان محدود.

جدول ۱ نشان دهنده فرکانس های طبیعی مود اول و دوم سازه بر حسب هرتز با روش های مختلف هست. فرکانس های طبیعی به دست آمده در سازه همراه با حسگر شتاب، نشان دهنده انطباق مناسب روش پردازش تصویر با روش استفاده از شتاب سنج و المان محدود می باشد.

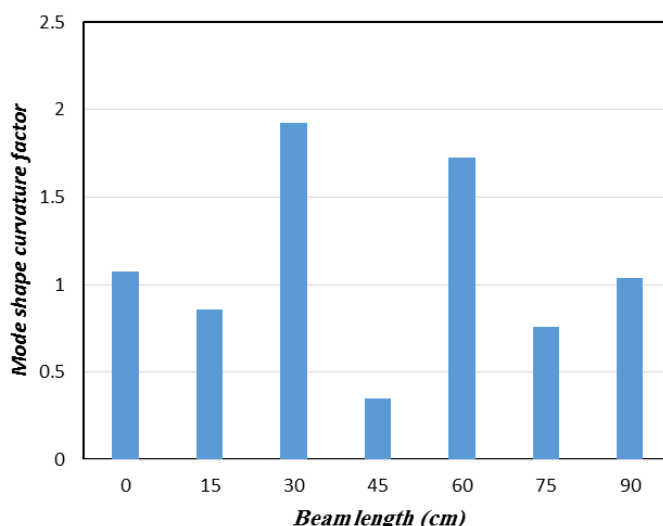
جدول ۱: فرکانس های طبیعی مودهای اول و دوم سازه بر حسب هرتز.

نوع سازه	وسیله اندازه گیری	مود اول	مود دوم
سازه با حسگر	حسگر	1.343	4.273
	فیلم برداری	1.406	4.216
	المان محدود	1.31	3.30
سازه بدون حسگر	فیلم برداری	1.875	5.156
	المان محدود	1.63	4.93

جدول ۲. نسبت میرایی تیر کنسول با حسگر شتاب

(%) نسبت میرایی	مود اول	مود دوم
حسگر شتاب	1.0	0.02
پردازش تصویر	0.47	0.01

مرحله سوم شامل استفاده از اطلاعات به دست آمده از مرحله دوم می‌باشد، بدین صورت که بعد از تحلیل شکل مود مرحله دوم، با به کارگیری روش انحنا شکل مود، محل قرارگیری حسگر بر روی سازه تعیین می‌گردد. در تعیین ضریب انحنا شکل مود از نتایج شکل مود به دست آمده حاصل از پردازش تصویر استفاده شده است. در شکل ۱۳ شاخص ضریب انحنا آسب سازه، تنها با در نظر گرفتن مود اول ارتعاش آن نشان داده شده است، طبق شکل ۱۳، این شاخص توانسته به خوبی محل اتصال حسگر شتاب روی سازه را در ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری از پایه تیر به خوبی نشان دهد، همچنین هرچند در انتهای تیر این شاخص به خوبی عمل نمی‌کند ولی عدد بیشتر از یک، نشان‌دهنده تغییر در جرم تیر در انتهای آن هست.



شکل ۱۳: ضریب انحنا آسب برای تیر یکسر گیردار به همراه حسگر.

۵- نتیجه گیری

هدف این مقاله ارائه روشی ارزان و سریع مبتنی بر پردازش تصویر به منظور پایش سلامت سازه و شناسایی محل تغییر جرم در سازه بوده است. در مرحله نخست از سازه در دو حالت با و بدون اتصال حسگر به آن فیلم برداری شد و تغییر مکان‌های آن ضبط شده است، در مرحله بعد، از این تغییر مکان‌ها دو بار مشتق گرفته شد و از شتاب حاصل برای به دست آوردن شکل مودهای سازه استفاده گردید. این شکل مود بعد از مقایسه با مقادیر به دست آمده از شتاب سنج و المان محدود به منظور صحت سنجی، در مرحله آخر برای شناسایی محل حسگرها به روش انحنا شکل مود استفاده می‌گردد. روش پیشنهادی بر روی تیر آلومینیومی به طول ۹۰ سانتی‌متر، عرض ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت و از آنجایی که وزن حسگرها در مقایسه با وزن تیر قابل ملاحظه است، از این اضافه وزن به عنوان محل تغییر در جرم سازه و تشخیص محل آن مورد نظر بوده است. از ارتعاش آزاد جهت آزمایش تیر استفاده گردید. به منظور دید بهتر دوربین، تیر به صورت شطرنجی علامت گذاری شده است. در نهایت نتایج زیر از تحقیق حاضر می‌توان گرفت:

- ۱- با مقایسه شکل مود به دست آمده از حسگر، المان محدود و پردازش تصویر، انطباق خوبی بین آن‌ها مشاهده گردید در نتیجه روش پردازش تصویر می‌تواند روش مناسبی برای جایگزینی استفاده از حسگرها در آینده در نظر گرفته شود.
- ۲- نتایج نشان داد که با روش مورد استفاده در این تحقیق می‌توان محل افزایش جرم سازه شناسایی نمود.
- ۳- این تحقیق تنها به منظور بررسی امکان پایش سلامت سازه با استفاده از پردازش تصویر است و گسترش و بهبود آن نیازمند تحقیقات بیشتر در خصوص انواع سازه‌ها و روش‌های مختلف می‌باشد.

تقدیر و تشکر

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

مراجع

- [1] P. Olaszek, (1999), "Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method," *Measurement*, vol. 25, pp. 227-236, 4/1.
- [2] A. Wahbeh, J. P. Caffrey, and S. FMasri, (2003), "A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems," *Smart Materials and Structures*, vol. PII, pp. 785-794.
- [3] J. Morlier, P. Salom, and F. Bos, (2007), "New image processing tools for structural dynamic monitoring," *Key Engineering Materials*.
- [4] G. Busca, A. Cigada, P. Mazzoleni, E. Zappa, and M. Franzi, "Cameras as displacement sensors to get the dynamic motion of a bridge," in *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability*, ed: CRC Press, 2012, pp. 2835-2841.
- [5] G. Busca, A. Cigada, P. Mazzoleni, M. Tarabini, and E. Zappa, "Static and Dynamic Monitoring of Bridges by Means of Vision-Based Measuring System," in *Topics in Dynamics of Bridges, Volume 3: Proceedings of the 31st IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2013*, A. Cunha, Ed., ed New York, NY: Springer New York, 2013, pp. 83-92.
- [6] C.-C. Chen, W.-H. Wu, H.-Z. Tseng, C.-H. Chen, and G. Lai, (2015), "Application of digital photogrammetry techniques in identifying the mode shape ratios of stay cables with multiple camcorders," *Measurement*, vol. 75, pp. 134-146.
- [7] B. Hwa Kim, (2014), "Extracting modal parameters of a cable on shaky motion pictures," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 49, pp. 3-12.
- [8] P. Cawley and R. D. Adams, (1979), "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 14, pp. 49-57, April 1, 1979.
- [9] M. Vejmelka, M. Palus, and K. Susmakova, (2010), "Identification of nonlinear oscillatory activity embedded in broadband neural signals," *Int J Neural Syst*, vol. 20, pp. 117-28, Apr.
- [10] G. F. Sirca and H. Adeli, (2012), "System identification in structural engineering," *Scientia Iranica*, vol. 19, pp. 1355-1364.
- [11] M. Kato and S. Shimada, (1986), "Vibration of PC Bridge during Failure Process," *Journal of Structural Engineering*, vol. 112, pp. 1692-1703.
- [12] M. J. Whelan, M. V. Gangone, K. D. Janoyan, and R. Jha, (2009), "Real-time wireless vibration monitoring for operational modal analysis of an integral abutment highway bridge," *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 2224-2235.
- [13] M. J. Whelan and K. D. Janoyan, (2010), "In-Service Diagnostics of a Highway Bridge from a Progressive Damage Case Study," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 15, pp. 597-607.
- [14] W. M. West, "Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an Orbiter test specimen," in *4th International Modal Analysis Conference*, Los Angeles, CA, (1986), pp. 1-6.
- [15] N. Stubbs, J.-T. Kim, and C. Farrar, "Field Verification of a Nondestructive Damage Localization and Severity Estimation Algorithm," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, (1995).
- [16] A. Khadka, Y. Dong, and J. Baqersad, (2019), "Structural Health Monitoring of Wind Turbines Using a Digital Image Correlation System on a UAV," pp. 85-91.
- [17] R. Wu, D. Zhang, Q. Yu, Y. Jiang, and D. Arola, (2019), "Health monitoring of wind turbine blades in operation using three-dimensional digital image correlation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 130, pp. 470-483.
- [18] D. Reagan, A. Sabato, and C. Niezrecki, (2017), "Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges," *Structural Health Monitoring*, vol. 17, pp. 1056-1072.
- [19] W. T. F. Encyclopedia. (2013, 8 December 2013). *Wikipedia The Free Encyclopedia Image processing*. Available: http://fa.wikipedia.org/wiki/Image_processing
- [20] R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen, (2001), "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition," *Smart Materials and Structures*, vol. 10, pp. 441-445.
- [21] D. J. Ewins, (1984), *Modal Testing_ Theory and Practice (Mechanical engineering research studies: Research Studies Press Ltd*.
- [22] h. fathi and o. bahar, (2013), "Identification of Modal Parameters of Structures Using Simple and Nonparametric Identification Methods in the Frequency Field with base oscillation," presented at the 15th conference of civil engineering students, oromie university.
- [23] G. G. Amiri, M. Talebi, M. Talebi, and Z. Tabrizian4, (2013), "DAMAGE ASSESSMENT IN CONNECTIONS OF MOMENT RESISTANT FRAMES USING HILBERT-HUANG mTRANSFOR," *Omran Sharif Journal* vol. 32.2, pp. 3-11.