

شناسایی مودال یک تیر طره به کمک روش پردازش تصویر و توابع انتقال پذیری

پارسا سلامی پور

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی

parsasalamipour@email.kntu.ac.ir

رضا کاظمی*

استاد مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی

kazemi@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۲۷

چکیده

در این مقاله به ارائه روشی جایگزین در حوزه تحلیل مودال عملیاتی، با بهره‌گیری از روش‌های تصویربرداری و توابع انتقال‌پذیری پرداخته شده است. حسگرهای تصویری از سویی به دلیل غیرتماسی بودن، جرم مضاعفی به سازه تحمیل نکرده، و توابع انتقال‌پذیری از سوی دیگر مستقل از نوع تحریک بوده و توانایی استخراج شکل مودها را به صورت مستقیم دارند. نوآوری این پژوهش بهره‌گیری از ترکیب این دو روش جهت ثبت پاسخ دینامیکی و شناسایی مودال سازه است. به منظور ثبت تاریخچه زمانی پاسخ از سیگنال ویدئویی، از روش تطبیق بلوکی با دقت زیرپیکسل استفاده شده است. صحت‌سنجی این روش از طریق ثبت پاسخ انتهای آزاد یک تیر یکسرگیردار فولادی به تحریک ضربه، با دوربین فیلم‌برداری سرعت بالا و ارتعاش‌سنج لیزری، بطور همزمان صورت گرفته، که نمودارهای ریشه میانگین مربعات خطا^۱ در حوزه زمان، و چگالی طیفی توان در حوزه فرکانس، نشان از دقت بالای این روش دارند. به کمک این روش، تاریخچه زمانی جابجایی‌های نقاط مختلف سازه مذکور از سیگنال ویدئویی استخراج، و خواص مودال سازه، یعنی فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل مودها، بوسیله روش ماتریس انتقال‌پذیری شناسایی شده‌اند. نتایج حاصل از روش پیشنهادی، با روش زیرفضا و نیز حل تحلیلی مقایسه شده، که نتایج بدست‌آمده بیانگر دقت روش شناسایی مودال ارائه‌شده در این مقاله هستند، بطوریکه بیشترین مقدار خطای نسبی تخمین فرکانس طبیعی مودهای اول و دوم، نسبت به مقادیر حاصل از روش لیزر به ترتیب ۰/۳۴٪ و ۱/۵٪ می‌باشد. و نسبت به مقادیر تحلیلی به ترتیب ۰/۱۹٪ و ۰/۱۳٪، و

واژگان کلیدی: شناسایی مودال، پردازش تصویر، پردازش ویدئو، تابع انتقال‌پذیری، آزمون مودال

۱. مقدمه

طی دهه‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه آنالیز مودال صورت گرفته است. نیازهای طراحی امروزی سازه‌های مکانیکی، هوایی و ساختمانی مطابق با استانداردها و ضوابط وضع شده توسط دولت‌ها و سازمان‌های بین‌المللی، و یا نیازهای مشتری، چالش‌های جدیدی را در درک رفتار دینامیکی چنین سازه‌هایی، بوسیله روش‌های عددی، تجربی و یا ترکیبی از آنها به وجود آورده است [۱]. روش اجزاء محدود به عنوان یک روش فراگیر در تحلیل کامپیوتری، در مواردی به دلیل عدم قطعیت در شرایط مرزی و یا فرضیات ساده‌شونده در مدل‌سازی اجزای میرایی و غیرخطی، به تنهایی قادر به تعیین دقیق رفتار دینامیکی سازه نمی‌باشد. آزمون مودال آزمایشگاهی (EMA) و عملیاتی (OMA) به عنوان ابزارهایی مناسب جهت شناسایی دقیق مشخصات دینامیکی سازه‌ها و صحت‌گذاری روش اجزاء محدود تبدیل شده‌اند [۲، ۳]. کاربردهای آنالیز مودال عمدتاً در ارتباط با استفاده از مدل مودال بدست آمده در طراحی/بازطراحی محصول، پیش‌بینی رفتار سازه‌ها و سامانه‌ها، شناسایی عیوب و خرابی‌ها، پایش وضعیت سازه‌ها و صحت‌گذاری/بروزرسانی مدل‌های اجزاء محدود می‌باشد [۴].

در آزمون مودال آزمایشگاهی با هدف یافتن ارتباط بین ورودی و خروجی سامانه ارتعاشی، هر دو سیگنال زمانی پاسخ و تحریک، ثبت شده و به کمک روش‌های شناسایی سامانه^۴، یک مدل مودال که حاوی مشخصات دینامیکی سامانه است استخراج می‌شود [۵]. در اجرای این آزمون، ممکن است انرژی نیروها/گشتاورهای وارد به سازه، برای تحریک تمامی موده‌های حرکتی آن کافی

نبوده و لذا سهم برخی از موده‌ها در پاسخ اندازه‌گیری شده ظاهر نشود، و یا شرایط کاری سازه کاملاً متفاوت با شرایط کنترل شده آزمایشگاهی باشد [۵-۷]. از اواسط دهه ۱۹۹۰ میلادی روش‌های شناسایی سامانه خروجی-تنها^۵، نظیر تجزیه حوزه فرکانس (FDD)^۶ [۸]، کمترین مربعات (LS)^۷ [۹، ۱۰] و زیرفضای اتفاقی (SSI)^۸ [۶، ۹، ۱۱] در حوزه تحلیل مودال مطرح شدند. به کارگیری چنین روش‌هایی امکان شناسایی و استخراج مدل مودال یک سازه را در شرایط کاری آن و تحت ارتعاشات محیطی، بدون نیاز به ثبت نیروهای ورودی به سامانه، می‌دهد [۵]. محدودیت اصلی روش‌های OMA شرط در نظر گرفتن اغتشاش سفید^۹ به عنوان تحریک ورودی به سامانه است؛ در صورتیکه تحریک واقعی به سامانه ممکن است اغتشاش سفید نبوده و شامل هارمونیک‌های مشخصی باشد. در این شرایط، روش‌های OMA که پیش‌تر ذکر شد فرکانس‌های تحریک را نیز به عنوان فرکانس‌های طبیعی سازه شناسایی می‌کنند [۱۲]. برای رفع این مشکل تاکنون روش‌های مختلفی از سوی محققین حوزه تحلیل مودال ارائه شده است. در سال ۲۰۰۸، استفاده از توابع انتقال‌پذیری^{۱۰} از سوی دورینت و همکاران [۴] در حوزه OMA مطرح شد. این محققین نشان دادند که تابع انتقال‌پذیری در سامانه‌های تک-ورودی مستقل از نوع تحریک ورودی به سازه بوده و همچنین نسبت به شناسایی فرکانس‌ها و موده‌های غیرواقعی مقاوم است. طی سال‌های اخیر تحقیقات در زمینه استفاده از روش انتقال‌پذیری در شناسایی مودال سازه‌ها رشد داشته و آن را به روشی قابل اعتماد در حوزه تحلیل مودال عملیاتی تبدیل کرده است [۱۳-۱۶].

اندازه‌گیری پاسخ، بخش اصلی و مشترک در هر دو روش EMA و OMA بوده که از طریق خوانش مقادیر حسگرهای تماسی یا غیرتماسی میسر می‌شود. از جمله پرکاربردترین حسگرهای تماسی می‌توان به شتاب-سنج‌ها، اشاره نمود. علی‌رغم کاربرد گسترده شتاب‌سنج‌ها، به دلیل عدم امکان اندازه‌گیری تمام-دامنه^{۱۱}، احتمال نصب شتاب‌سنج در نقاط گره‌ای سازه و نیز تحمیل جرم مضاعف به سازه، ممکن است شناسایی مودال با خطا مواجه شود [۱۷]. علاوه بر این، نصب شتاب‌سنج‌ها و تجهیزات مربوطه روی سازه‌های بزرگ مانند پل‌ها و ساختمان‌ها و یا تجهیزات صنعتی، فرایندی زمان‌بر است. به دلیل محدودیت‌های ذکر شده، در مواردی نیاز است که از حسگرهای غیرتماسی برای آزمون مودال استفاده کرد. حسگرهای نوری یا اپتیکی به دلیل مزایایی نظیر قدرت پردازش، حافظه‌دار بودن و بهره‌گیری از حسگرهای تصویری، همواره مورد توجه بوده‌اند [۱۷]. بطور کلی، حسگرهای اپتیکی به دو نوع حسگرهای مبتنی بر اشعه لیزر، و حسگرهای تصویری دریافت کننده نور بازتابی از اشیاء، تقسیم می‌شوند.

ارتعاش‌سنج‌های لیزری (LDV^{۱۲})، به دلیل غیرتماسی بودن، جرم مضاعف به سازه تحمیل نکرده، لذا خواص دینامیکی سازه دستخوش تغییر نمی‌شود. همچنین لیزر-اسکنرها قابلیت ثبت پاسخ تمام دامنه را نیز دارند. ظهور حسگرهای تصویربرداری با دقت و سرعت بالا و بکارگیری آنها در بسیاری از دوربین‌های متداول (مانند حسگرهای CMOS^{۱۳} و CCD^{۱۴})، توجه محققان را به استفاده از روش‌های تصویربرداری و پردازش تصویر در زمینه ارتعاش‌سنجی و آزمون مودال جلب کرده‌است. هلفریک و همکاران [۱۸] با استفاده از روش همبستگی تصویر دیجیتال (DIC^{۱۵})، به بررسی آسیب در یک تیر

یکسرگردار آلومینیومی پرداختند. هونادی و همکاران [۱۹] با فیلمبرداری پرسرعت (1000 fps) از یک ورق فولادی، ضرایب میرایی مربوط به هر یک از فرکانس‌های طبیعی سازه را، با روش نقاط نیم-توان تخمین زدند. در تحقیق دیگر، کیم و همکاران [۲۰] به کمک تصویربرداری با کوادکوپتر و نیز روش پردازش تصویر تطبیق بلوکی، توانستند نیروی کشش در کابل‌های یک پل معلق را از طریق ارتباط بین فرکانس‌های طبیعی کابل و نیروی کشش، تخمین بزنند. همچنین، کرومانیس و همکاران [۲۱] با استفاده از دوربین یک گوشی تلفن همراه با نرخ تصویربرداری 30 fps و استفاده از روش همبستگی نقاط نشانه بین چارچوب‌های متوالی، پاسخ زمانی یک تیر یکسرگردار را در شرایط کاری مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. در پژوهش دیگر، بختیاری‌نژاد و همکاران [۲۲] از حسگرهای تصویری در زمینه ارتعاش‌سنجی سامانه‌های دوار استفاده کرده‌اند. قابلیت اندازه‌گیری تمام-دامنه، عدم تحمیل جرم مضاعف به سازه و سهولت در راه‌اندازی آزمون، از مزایای استفاده از روش تصویربرداری است. لذا بهره‌گیری از این روش جهت استخراج پاسخ دینامیکی سازه‌ها، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد، به موازات روش‌های متداول قبلی (نظیر شتاب‌سنج و لیزر)، در حوزه تحلیل و شناسایی مودال مطرح باشد.

در این مقاله از روش پردازش تصویر در حوزه آزمون مودال عملیاتی استفاده شده است. تا آنجا که نویسندگان این مقاله اطلاع دارند، تاکنون ترکیب روش‌های تصویربرداری و توابع انتقال‌پذیری به‌منظور شناسایی و تخمین خواص مودال سازه‌ها، یعنی فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل مودها

به کار گرفته نشده است. در این مقاله پس از شرح روش پردازش تصویر و استخراج سیگنال جابجایی در بخش ۲، به مرور روش شناسایی مودال بر مبنای توابع انتقال پذیری در بخش ۳ پرداخته می شود. بخش ۴ این مقاله به ارتباط این توابع در دستگاه مختصات جهانی و دستگاه مختصات تصویر می پردازد. به منظور ارزیابی روش ارائه شده در این مقاله، آزمون مودال خروجی - تنها بر روی یک تیر فولادی یکسرگیردار اجرا شده است. شرایط آزمون مودال، صحت سنجی روش پردازش تصویر و شناسایی مودال به کمک روش انتقال پذیری در بخش ۵ آمده است.

۲. پردازش ویدئو و استخراج جابجایی ها

در حوزه بینایی ماشین و پردازش تصویر، سیگنال های ویدئویی حاوی اطلاعات غنی از نحوه حرکت اجسام یا دوربین هستند. استخراج چنین اطلاعاتی از دنباله تصاویر ویدئویی با بکارگیری الگوریتم های تخمین حرکت^{۱۷} میسر می شود. هدف اصلی این الگوریتم ها، تخمین حرکت اجسام در دنباله تصاویر است که از کاربردهای آن می توان به نظارت ویدئویی^{۱۸}، بینایی روبات^{۱۹}، هدایت خودروهای خودران^{۲۰}، پایش سلامت سازه ها^{۲۱}، تحلیل حرکت انسان^{۲۲} و کنترل کیفیت محصولات در خطوط تولید اشاره کرد [۲۳]. در تحلیل مودال به کمک تصویربرداری، لازم است پاسخ سازه در نقاط مختلف با دوربین فیلم برداری ثبت، و از طریق پردازش چارچوب به چارچوب، برحسب زمان بیان شود. در حوزه بینایی ماشین^{۲۳}، یکی از روش های

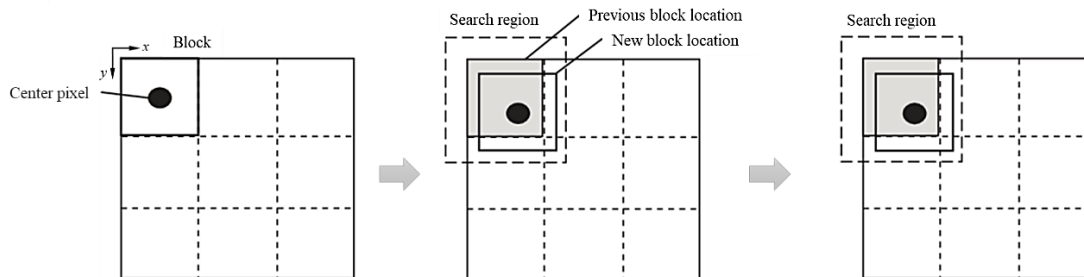
متداول برای تخمین حرکت از سیگنال ویدئویی، روش تطبیق یا تناظریابی است، که به روش تطبیق بلوکی^{۲۴} نیز شناخته می شود. شکل ۱ روش تطبیق بلوکی را به صورت گرافیکی نشان داده است. پس از تقسیم هر چارچوب از سیگنال ویدئویی به مجموعه ای از بلوک ها، بردار جابجایی به ازای هر بلوک و در محدوده ناحیه جستجو^{۲۵}، با یافتن محل بیشینه تابع همبستگی متقابل دوبعدی^{۲۶} بین دو چارچوب متوالی n م و $n+1$ م، طبق روابط ۱ و ۲ حاصل خواهد شد. جهت مطالعه بیشتر به [۲۴، ۲۵] رجوع شود.

$$K = \sum_{x,y} I_n(x,y)I_{n+1}(x + dx,y + dy) \quad (1)$$

$$[dx,dy]^T = \operatorname{argmax}_{x,y} K \quad (2)$$

در روابط فوق، K همبستگی متقابل دوبعدی، I_n و I_{n+1} به ترتیب سطح روشنایی بلوک در چارچوب n م و $n+1$ م و dx و dy به ترتیب المان های بردار جابجایی هر بلوک در راستاهای x و y مختصات تصویر می باشند (شکل ۱). لازم به ذکر است که المان های بردار جابجایی که از رابطه ۲ بدست می آیند، بصورت اعداد صحیح و برحسب پیکسل هستند. جهت برآورد دقیق تر مقادیر جابجایی، روش های تخمین زیرپیکسل^{۲۷} ارائه شده اند، که قابلیت تخمین مقادیر جابجایی کمتر از یک پیکسل را نیز دارند [۲۶، ۲۷]. در این مقاله برای افزایش دقت الگوریتم تطبیق بلوکی، از روش میان یابی به کمک توابع چندجمله ای، مطابق [۲۷] بهره گرفته شده است.

STEP1: Subdivide the image in frame k. STEP2: Establish the search region in frame k+1. STEP3: Search for the new block location in frame k+1.



شکل ۱. تخمین حرکت به روش تطبیق بلوکی [۲۵]

که در آن $H_{ij}(\omega)$ تابع پاسخ فرکانسی نقطه i نسبت به نیروی اعمال شده در نقطه j بوده، و N تعداد درجات آزادی است.

یکی از خواص مهم تابع انتقال پذیری برای سامانه‌های تک-ورودی، استقلال از دامنه نیروی تحریک است و مزیت استفاده از آن عدم نیاز به اندازه‌گیری نیروی خارجی یا فرض داشتن تحریک اغتشاش سفید در آزمون مودال خروجی-تنها است [۱۳]. هنگامی که صرفاً یک نیروی تحریک به سامانه اعمال شده باشد، طبق رابطه ۴، ارتباط تابع انتقال پذیری بین نقاط p و q ، با تابع پاسخ فرکانسی آنها، بصورت زیر است:

$$T_{pq}(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{X_q(\omega)} = \frac{H_{pj}(\omega)F_j(\omega)}{H_{qj}(\omega)F_j(\omega)} = \frac{H_{pj}(\omega)}{H_{qj}(\omega)} \triangleq T_{pq}^j(\omega) \quad (5)$$

در چنین شرایطی، طبق رابطه ۵، تابع انتقال پذیری صرفاً به محل اعمال نیرو وابسته است. خاصیت مهم دیگری که باید به آن اشاره شود آنست که در سامانه‌ها با نسبت میرایی کم، تابع انتقال پذیری در مجاورت فرکانس طبیعی، به مقداری ثابت همگرا می‌شود [۴]،

$$\lim_{\omega \rightarrow \omega_r} T_{pq}(\omega) = \frac{\varphi_{pr}}{\varphi_{qr}} \quad (6)$$

که این مقدار ثابت برابر با نسبت ضرایب شکل مود مربوط به فرکانس ω_r است. رابطه ۶ بیان می‌کند که

۳. شناسایی خواص مودال سازه

در این بخش به شرح روش توابع انتقال پذیری در شناسایی مودال خروجی-تنها بعنوان یکی از روش‌های شناسایی حوزه فرکانس پرداخته می‌شود. همانطور که در مقدمه ذکر شد، رویکرد مقاله حاضر استفاده از روش‌های پردازش تصویر و توابع انتقال پذیری به منظور شناسایی خواص مودال سازه‌ها می‌باشد. همچنین در این بخش، فرایند شناسایی خواص مودال به روش زیرفضای اتفافی، به منظور مقایسه نتایج روش انتقال پذیری با آن، به اختصار آمده است.

۱.۳. شناسایی مودال به کمک توابع انتقال پذیری

تابع انتقال پذیری بصورت نسبت تبدیل فوریه پاسخ زمانی نقطه p ، به تبدیل فوریه پاسخ زمانی نقطه q از سازه، و بصورت زیر تعریف می‌شود [۴]:

$$T_{pq}(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{X_q(\omega)} \quad (3)$$

که در آن $X_p(\omega)$ و $X_q(\omega)$ به ترتیب تبدیل فوریه پاسخ‌های زمانی $x_p(t)$ و $x_q(t)$ هستند. ارتباط تابع انتقال پذیری و توابع پاسخ فرکانسی ۲۸ بصورت زیر قابل بیان است.

$$T_{pq}(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{X_q(\omega)} = \frac{\sum_{j=1}^N H_{pj}(\omega)F_j(\omega)}{\sum_{j=1}^n H_{qj}(\omega)F_j(\omega)} \quad (4)$$

به‌عنوان ماتریس انتقال‌پذیری بصوت زیر تشکیل می‌شود:

$$\tilde{\mathbf{T}}(\omega) = \begin{bmatrix} T_{mn}^{(1)}(\omega) & \dots & T_{mn}^{(N_e)}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{pq}^{(1)}(\omega) & \dots & T_{pq}^{(N_e)}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن $N_e \geq 2$ تعداد شرایط نیرویی مختلف بوده، و mn و pq در هر سطر نشان‌دهنده درجات آزادی اندازه‌گیری جهت محاسبه توابع انتقال‌پذیری هستند. تجزیه مقدار تکین^{۳۲} ماتریس $\tilde{\mathbf{T}}(\omega)$ بصورت زیر است:

$$\tilde{\mathbf{T}}(\omega) = \mathbf{U}(\omega)\mathbf{S}(\omega)\mathbf{V}(\omega)^* \quad (10)$$

که در آن $\mathbf{U}(\omega)$ و $\mathbf{V}(\omega)$ به ترتیب بردارهای تکین چپ و راست هستند و \square^* بیانگر ترانپوز مزدوج می‌باشد. همچنین ماتریس قطری $\mathbf{S}(\omega)$ بصورت

$$\mathbf{S}(\omega) = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{N_\sigma} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

و شامل $N_\sigma = \min(M, N_e)$ مقدار تکین بوده بطوریکه $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{N_\sigma}$. با توجه به روابط ۶، ۷ و ۹ در مجاورت فرکانس طبیعی سامانه، تمامی ستون‌های ماتریس انتقال‌پذیری با یکدیگر برابر هستند. لذا ماتریس $\tilde{\mathbf{T}}(\omega)$ دارای شرایط بحرانی^{۳۳} و رتبه^{۳۴} یک بوده و صرفاً دارای یک مقدار تکین غیرصفر است ($\sigma_1 \neq 0, \sigma_i \cong 0 (i = 2, \dots, N_\sigma)$). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پیرامون فرکانس طبیعی سامانه، معکوس مقادیر تکین $\tilde{\mathbf{T}}(\omega)$ ، بجز مقدار تکین اول به بینهایت میل می‌کنند (رابطه ۱۲).

در همسایگی فرکانس‌های طبیعی سامانه ($\omega_r; r = 1, \dots, n$)، تابع انتقال‌پذیری، مستقل از محل اعمال تحریک خارجی است. لذا با استفاده از این خاصیت، می‌توان فرکانس‌های طبیعی سامانه را تخمین زد. اگر تابع انتقال‌پذیری بین نقاط p و q در دو حالت بارگذاری مختلف I و II به ترتیب با $T_{pq}^{(I)}$ و $T_{pq}^{(II)}$ نشان داده شوند، با توجه به استقلال تابع انتقال‌پذیری از نوع تحریک و در نظر گرفتن رابطه ۶ می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} & \lim_{\omega \rightarrow \omega_r} \Delta T_{pq}^{(I,II)}(\omega) \\ &= \lim_{\omega \rightarrow \omega_r} \left(T_{pq}^{(I)}(\omega) - T_{pq}^{(II)}(\omega) \right) \\ &= \frac{\varphi_{pr}}{\varphi_{qr}} - \frac{\varphi_{pr}}{\varphi_{qr}} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta T_{pq}^{(I,II)}(\omega)^{-1} = \left(T_{pq}^{(I)}(\omega) - T_{pq}^{(II)}(\omega) \right)^{-1} \quad (8)$$

با دقت در روابط ۷ و ۸ می‌توان مشاهده کرد که قطب‌های سامانه، در واقع صفرهای عبارت $\Delta T_{pq}^{(I,II)}(\omega)$ هستند و از معکوس کردن این عبارت حاصل خواهند شد (رابطه ۸).

با پیاده‌سازی روش‌های شناسایی سامانه، همچون انتخاب قله^{۲۹} یا کم‌ترین مربعات، روی $\Delta T_{pq}^{(I,II)}(\omega)^{-1}$ فرکانس‌های طبیعی سامانه قابل شناسایی خواهند بود. در استفاده از روش‌های پارامتری مانند کم‌ترین مربعات، ذکر این نکته لازم است که مدل مودال برازش شده^{۳۰} بر تابع $\Delta T_{pq}^{(I,II)}(\omega)^{-1}$ در رابطه ۸، ممکن است شامل مجموعه‌ای از نقاط قله باشد که صرفاً بخشی یا زیرمجموعه‌ای از آنها متناظر با قطب‌های واقعی سامانه هستند [۴، ۵]. برای رفع این مشکل، روش شناسایی مودال مبتنی بر ماتریس انتقال‌پذیری^{۳۱} ارائه شده است [۲۸]. در این روش، ماتریس $\tilde{\mathbf{T}}(\omega) \in \mathbb{C}^{M \times N_e}$

بطور کلی روش زیرفضای اتفاقی بر مبنای داده^{۳۵} و بر مبنای همبستگی^{۳۶} تقسیم‌بندی و ارائه شده است، که در این مقاله از روش زیرفضای اتفاقی بر مبنای داده بهره گرفته شده است. همچنین، معادلات ارائه شده در این بخش برگرفته از مراجع [۲۹، ۳۰] است. در روش‌های زیرفضای اتفاقی، رفتار سامانه بر اساس مدل فضای حالت مدل‌سازی می‌شود. در شرایطی که ورودی‌های سامانه در دسترس نباشند یا ثبت نگردند، مدل فضای حالت زمان-گسسته به صورت زیر خواهد بود

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (16)$$

که در آن \mathbf{x}_k و \mathbf{y}_k به ترتیب بیانگر بردارهای حالت زمان-گسسته و خروجی نمونه‌برداری شده، \mathbf{A}_d ماتریس حالت سامانه زمان-گسسته، \mathbf{C} ماتریس خروجی، \mathbf{w}_k اغتشاش فرایند، و \mathbf{v}_k اغتشاش اندازه‌گیری می‌باشند. مرحله نخست در روش زیرفضای اتفاقی تشکیل ماتریس بلوکی هنکل بطور مستقیم و صرفاً از روی خروجی‌های نمونه‌برداری شده است.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 & \mathbf{y}_2 & \dots & \mathbf{y}_{n_p-2s+1} \\ \mathbf{y}_2 & \mathbf{y}_3 & \dots & \mathbf{y}_{n_p-2s+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}_s & \mathbf{y}_{s+1} & \dots & \mathbf{y}_{n_p-s} \\ \mathbf{y}_{s+1} & \mathbf{y}_{s+2} & \dots & \mathbf{y}_{n_p-s+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}_{2s} & \mathbf{y}_{2s+1} & \dots & \mathbf{y}_{n_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_p \\ \mathbf{H}_f \end{bmatrix} \quad (17)$$

که n_p تعداد نمونه‌ها و $2s$ تعداد بلوک‌های ماتریس \mathbf{H} می‌باشند. همانطور که در رابطه ۱۷ نشان داده شده است، ماتریس \mathbf{H} به دو زیرماتریس گذشته \mathbf{H}_p و آینده \mathbf{H}_f قابل تقسیم است. شناسایی ماتریس‌های سامانه در رابطه ۱۶ براساس تصویر کردن فضای سطری زیرماتریس آینده بر فضای سطری زیرماتریس گذشته و ماتریس تصویرسازی^{۳۷} \mathbf{P} بصورت زیر است

$$\mathbf{S}(\omega)^{-1} = [1/\sigma_i] = \begin{bmatrix} 1/c & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \infty & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \infty \end{bmatrix} \quad (12)$$

لذا به‌منظور شناسایی خواص مودال سامانه کافی است روش‌هایی مانند انتخاب قله و یا کم‌ترین مربعات، بر روی معکوس مقادیر تکین ماتریس $\tilde{\mathbf{T}}(\omega)$ پیاده گردد. با پیاده‌سازی روش کم‌ترین مربعات [۱] بر روی فرکانس‌های مختلط سامانه بصورت $\lambda_r = \delta_r + j\omega_{dr}$ حاصل شده، که ω_{dr} فرکانس طبیعی میرا و $\omega_r = |\lambda_r|$ فرکانس طبیعی نامیرای سامانه هستند. نسبت میرایی سامانه و فرکانس طبیعی نامیرا بر حسب هرتر نیز از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} \text{ (Hz)} \quad (13)$$

$$\zeta_r = \frac{-\text{Re}\{\lambda_r\}}{|\lambda_r|} \quad (14)$$

همچنین با در نظر گرفتن مقدار واحد برای درجه‌آزادی مرجع، $\varphi_{ur} = 1$ ، شکل مود متناظر با ω_r از رابطه ۶ به صورت زیر خواهد بود.

$$\{\boldsymbol{\varphi}_r\} = [\varphi_{1r}, \varphi_{2r}, \dots, 1, \dots, \varphi_{N_{or}}]^T. \quad (15)$$

در این مقاله، با بهره‌گیری از روش تخمین حرکت تطبیق بلوکی، از یک تیر یکسرگیردار تحت آزمون ضربه، فیلم‌برداری و توابع انتقال‌پذیری حاصل شده‌اند. سپس خواص مودال سازه، از جمله فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل مودها، از روش ماتریس انتقال‌پذیری شناسایی شده‌اند.

۲.۳. شناسایی مودال به روش زیرفضای اتفاقی

جهت مقایسه نتایج حاصل از روش انتقال‌پذیری، در این بخش فرایند روش زیرفضای اتفاقی نیز، بعنوان یکی از روش‌های پارامتری حوزه زمان در زمینه شناسایی مودال خروجی-تنها، به اختصار آمده است.

فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی مشابه روابط (۱۳-۱۴) هستند.

۴. اجرای آزمون مودال

به‌منظور بررسی و ارزیابی روش پردازش ویدئو و نیز شناسایی مودال سامانه از طریق توابع و ماتریس انتقال‌پذیری، آزمون ضربه روی یک تیر یکسرگیردار اجرا شده است. این آزمون با رویکرد آزمون مودال عملیاتی و بدون ثبت نیروی ورودی به سازه اجرا شده و صرفاً پاسخ جابجایی سازه در نقاط مختلف به ثبت رسیده است. در ادامه به شرح اجرای آزمون و نتایج حاصل از آن پرداخته می‌شود.

۱.۴. آماده‌سازی آزمون

شکل ۲ راه‌اندازی آزمون مودال را بصورت شماتیک نشان می‌دهد. نمونه آزمون، یک تسمه فولادی با ابعاد ۵۵×۳ سانتی‌متر و با ضخامت ۳ میلی‌متر بوده که از یک انتها گیردار شد. این تیر سه بار تحت تحریک ضربه با چکش، در سه نقطه مختلف و دلخواه در نزدیکی سمت گیردار و به حد کافی دور از نقاط گره‌ای مودهای ابتدایی قرار گرفت. فاصله مواضع تحریک‌های ضربه F_1 ، F_2 و F_3 از انتهای گیردار به ترتیب ۵۰، ۱۰۰ و ۱۲۵ میلیمتر بوده که محدوده آنها در شکل ۳ مشخص شده‌اند. پاسخ سازه به این تحریک‌ها، همزمان توسط دوربین فیلمبرداری و ارتعاش‌سنج لیزری ثبت گردید. پاسخ کل سازه توسط دوربین فیلم‌برداری Casio-ExilimF1 مجهز به حسگر CMOS با نرخ ۳۰۰ چارچوب‌درثانیه و به مدت زمان تقریبی ۱۶ ثانیه، تحت شرایط نور با شدت ثابت ضبط شد. همچنین به‌منظور صحت‌سنجی روش تصویربرداری، سرعت انتهای آزاد تیر به‌وسیله یک ارتعاش‌سنج لیزری از نوع نقطه‌ای^{۳۹}

$$\mathbf{P} = \mathbf{H}_f \mathbf{H}_p^T (\mathbf{H}_p \mathbf{H}_p^T)^{\dagger} \mathbf{H}_p. \quad (18)$$

نشان داده می‌شود که ماتریس \mathbf{P} بصورت حاصلضرب ماتریس مشاهده‌پذیری $\mathbf{\Gamma}$ و ماتریس حالات کاملن^{۳۸} \mathbf{X} ، به صورت $\mathbf{P} = \mathbf{\Gamma X}$ قابل بیان است که

$$\mathbf{\Gamma} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{C A}_d \quad \mathbf{C A}_d^2 \quad \dots \quad \mathbf{C A}_d^{s-1}]^T \quad (19)$$

در اینجا با تجزیه مقدار تکین ماتریس تصویرسازی به‌صورت

$\mathbf{P} = \mathbf{U \Sigma V}^*$ ، ماتریس‌های مشاهده‌پذیری و دنباله حالات کاملن را می‌توان تخمین زد.

$$\hat{\mathbf{\Gamma}} = \mathbf{U \Sigma}^{1/2} \quad (20)$$

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{\Sigma}^{1/2} \mathbf{V}^* \quad (21)$$

که بالانویس \wedge نشان‌دهنده مقادیر تخمینی است. همچنین ماتریس‌های \mathbf{A}_d و \mathbf{C} ، با حذف یک بلوک از بالا و پایین ماتریس $\hat{\mathbf{\Gamma}}$ و از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$\hat{\mathbf{A}}_d = (\hat{\mathbf{\Gamma}}(1:s-1))^{\dagger} \hat{\mathbf{\Gamma}}(2:s) \quad (22)$$

$$\hat{\mathbf{C}} = \hat{\mathbf{\Gamma}}(1:1) \quad (23)$$

بعلاوه، با تجزیه مقدار ویژه ماتریس $\hat{\mathbf{A}}_d$ ، فرکانس‌های مختلط و شکل مودهای سامانه زمان-پیوسته طبق روابط ۲۵ و ۲۶ حاصل می‌شوند.

$$\hat{\mathbf{A}}_d = \mathbf{\Psi \mu_r \Psi}^{-1} \quad (24)$$

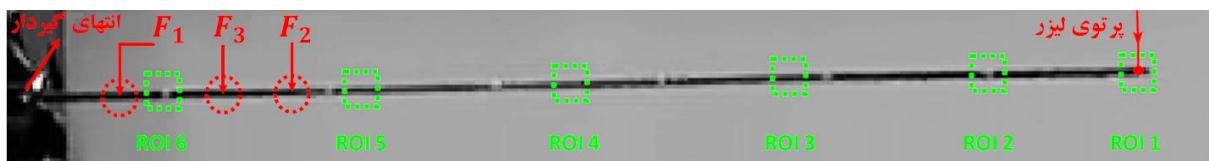
$$\lambda_r = \frac{\ln(\mu_r)}{\Delta T} \quad (25)$$

$$\mathbf{\Phi} = \hat{\mathbf{C}} \mathbf{\Psi} \quad (26)$$

در رابطه (۲۴)، μ_r ماتریس قطری شامل قطب‌های سامانه زمان-گسسته و $\mathbf{\Psi}$ ماتریس بردارهای ویژه $\hat{\mathbf{A}}_d$ و در رابطه ۲۵، ΔT دوره نمونه‌برداری می‌باشند. ضمناً



شکل ۲. آماده‌سازی و چیدمان آزمون مودال



شکل ۳. یک چارچوب از سیگنال ویدئویی به همراه مواضع تحریک ضربه، محل تابش لیزر و نواحی انتخاب شده جهت تخمین جابجایی‌ها

۲.۴. صحت‌سنجی روش پردازش ویدئو

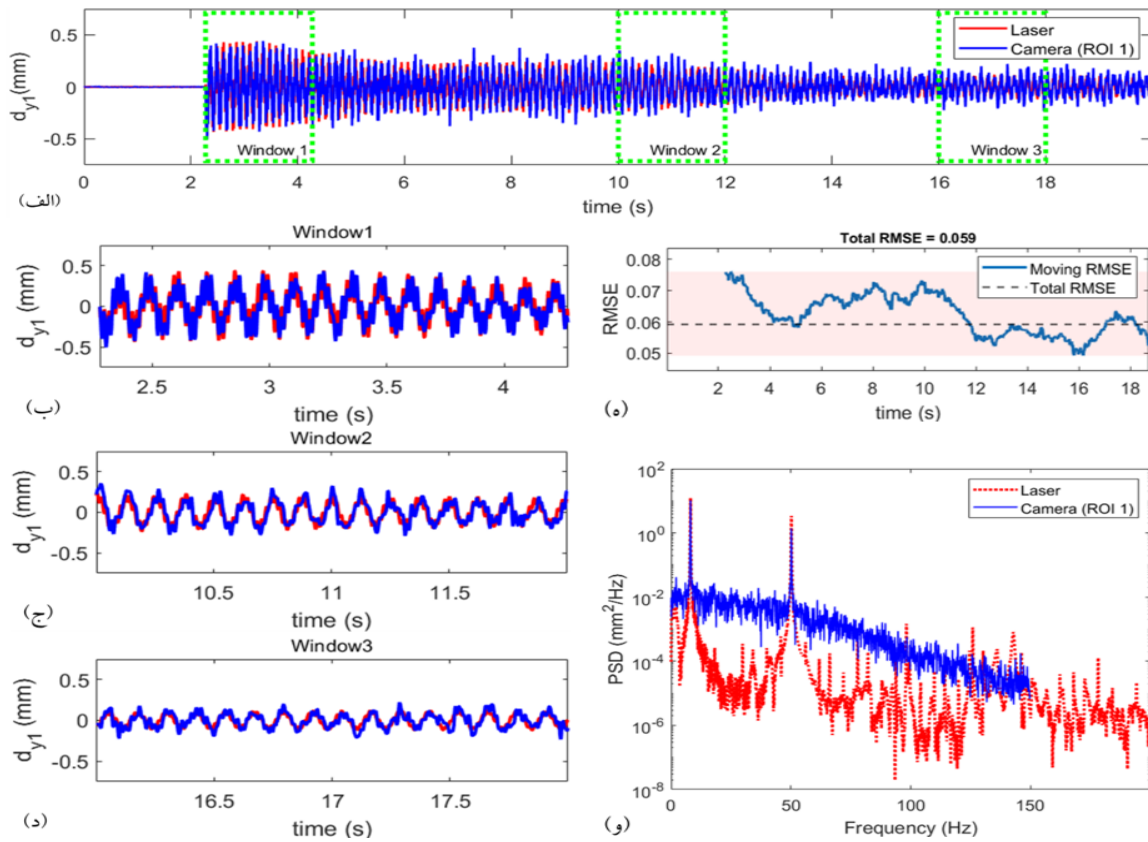
با استفاده از روش تطبیق بلوکی که در بخش ۲ ارائه شد، پاسخ جابجایی سازه در شش ناحیه مدنظر استخراج گردید. همچنین پاسخ جابجایی انتهای آزاد تیر (ناحیه شماره ۱ در شکل ۳) با انتگرال‌گیری عددی از مقادیر سرعت ثبت شده توسط ارتعاش‌سنج لیزری نیز حاصل شد. برای هر سه حالت تحریک، مقادیر پاسخ زمانی مربوط به جابجایی انتهای آزاد تیر، و نیز چگالی طیفی توان (PSD^1) جابجایی، از روش‌های تابش لیزر و پردازش ویدئو، حاصل و با یکدیگر مقایسه شدند (شکل ۴-شکل ۶). بعلاوه، مقدار خطای کلی ϵ_2 و متحرک ϵ_3 پاسخ زمانی حاصل از پردازش ویدئو نسبت به مقادیر ثبت‌شده توسط لیزر محاسبه شد. مقدار

خطای متحرک با در نظر گرفتن پنجره‌ای متحرک به طول ۵۰۰ نمونه روی پاسخ جابجایی انتهای آزاد تیر بدست آمده‌است. شکل‌های ۴ تا ۶ نتایج صحت‌سنجی روش پردازش ویدئو ارائه شده در این مقاله را نشان می‌دهند. مقادیر فرکانس‌های طبیعی از نمودار چگالی طیفی توان جابجایی بدست آمده‌اند.

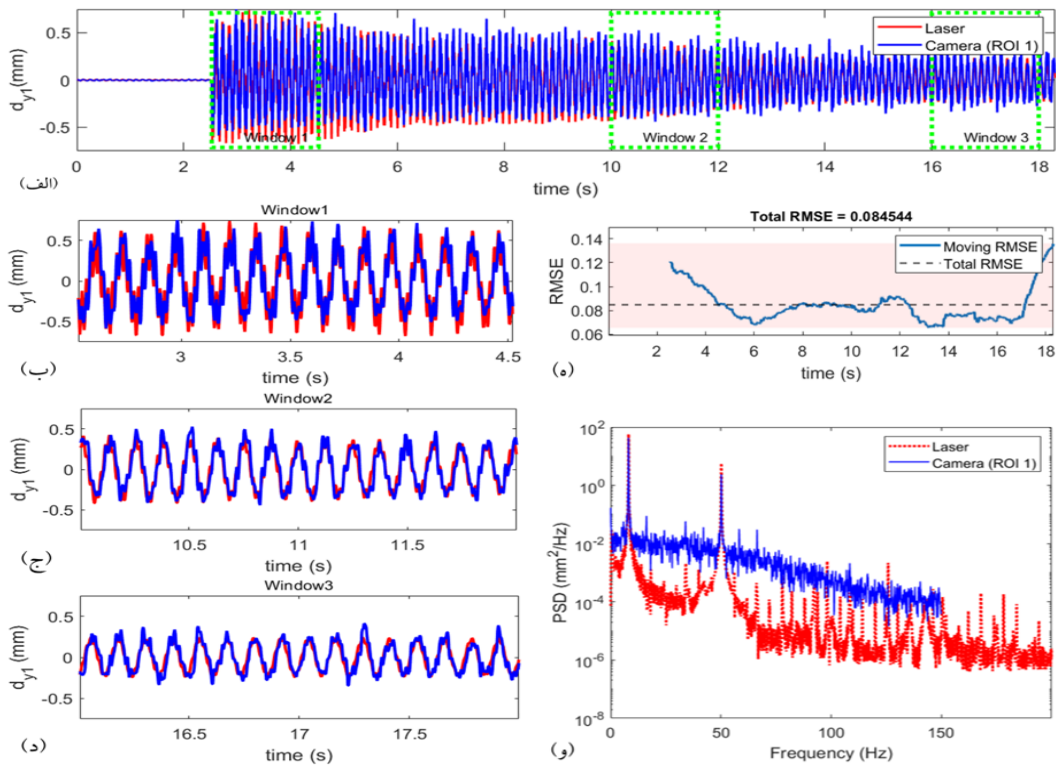
همچنین، مقادیر فرکانس طبیعی این سازه با استفاده از روابط تحلیلی تیر اویلر-برنولی با شرایط مرزی گیردار-آزاد ϵ_4 نیز حاصل شدند. در جدول ۱، درصد خطای روش تصویربرداری نسبت به مقدار تحلیلی با ϵ_1 ، و نسبت به مقدار بدست‌آمده از روش لیزر با ϵ_2 نشان داده شده‌اند. مقادیر خطای پاسخ زمانی و نیز خطای تخمین فرکانس طبیعی (جدول ۱)، دقت

۹۷تا آمده است. در زیربخش بعد، به پیاده‌سازی روش انتقال‌پذیری در شناسایی خواص مودال سازه پرداخته شده‌است.

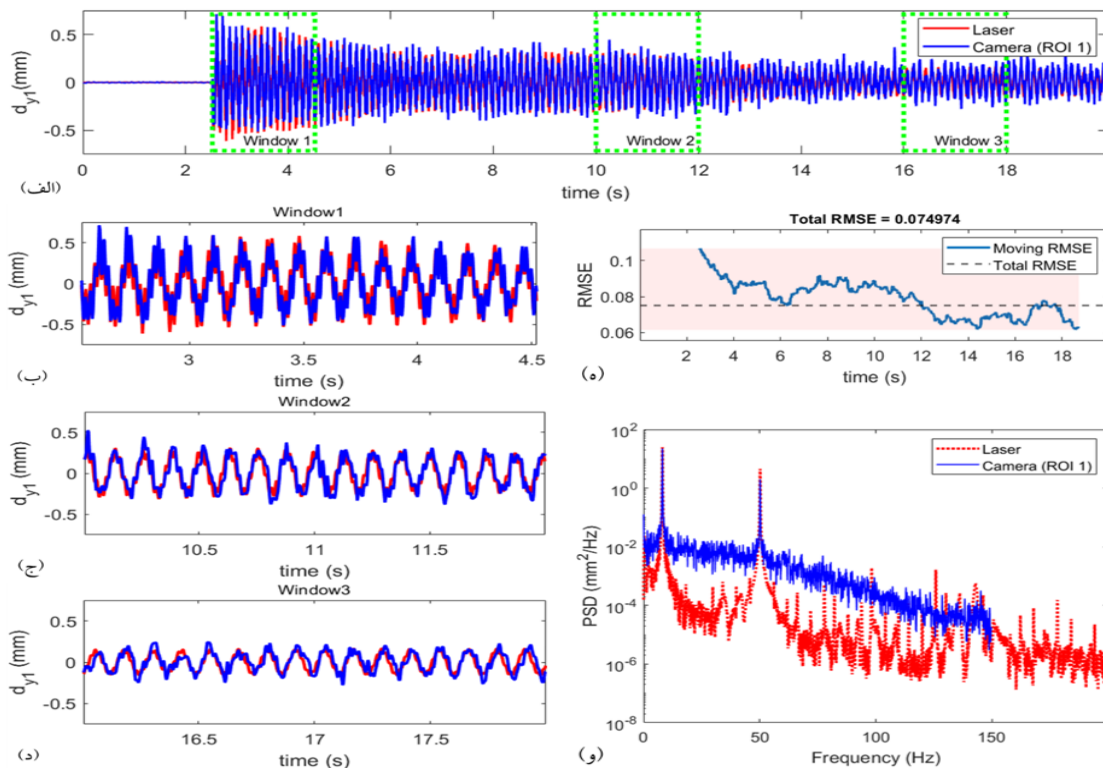
الگوریتم تطبیق بلوکی جهت تخمین حرکت از سیگنال ویدئویی را نشان می‌دهد. همچنین تاریخچه زمانی پاسخ جابجایی تمامی نقاط مدنظر از تیر، در شکل‌های



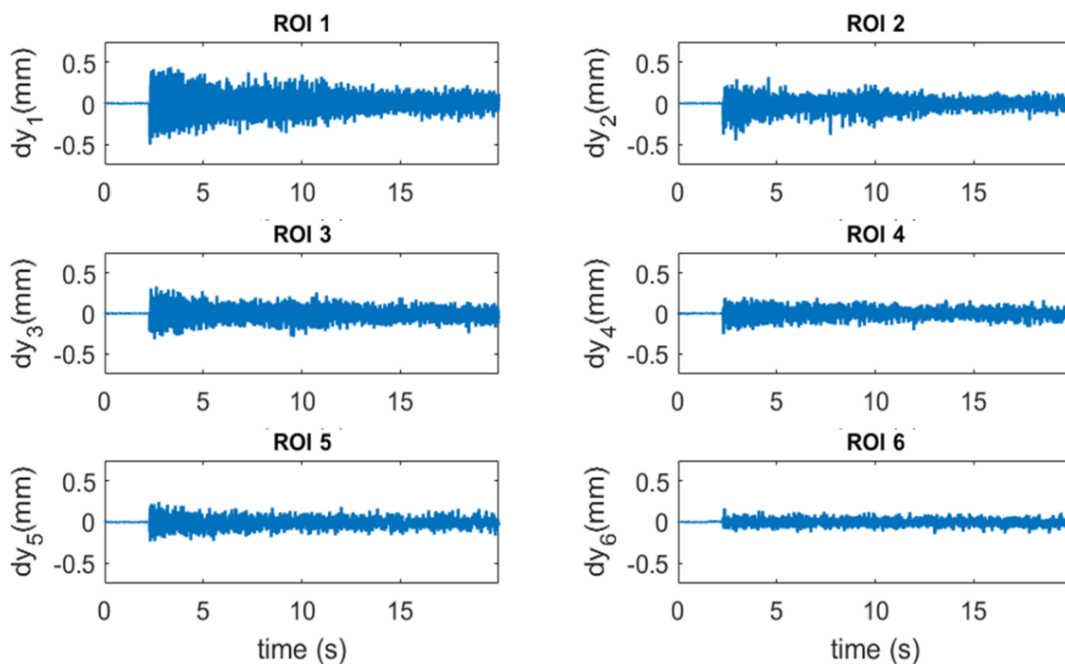
شکل ۴. صحت‌سنجی روش پردازش ویدئو برای حالت تحریک شماره ۱، الف) پاسخ زمانی جابجایی انتهای آزاد تیر، ب-د) نمای بزرگنمایی شده پنجره‌های ۱-۳، ه) خطای پاسخ جابجایی ثبت شده توسط روش تصویربرداری نسبت به روش لیزر، و) چگالی طیفی توان جابجایی



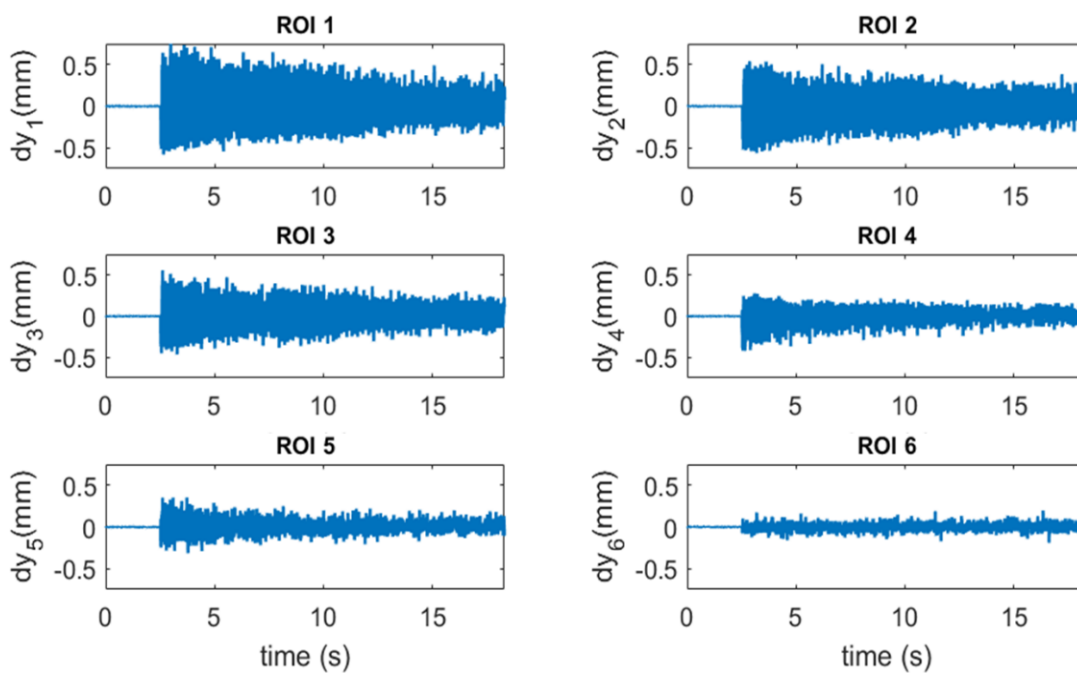
شکل ۵. صحت‌سنجی روش پردازش ویدئو برای حالت تحریک شماره ۲، الف) پاسخ زمانی جابجایی انتهای آزاد تیر، ب-د) نمای بزرگنمایی شده پنجره‌های ۱-۳، ه) خطای پاسخ جابجایی ثبت شده توسط روش تصویربرداری نسبت به روش لیزر، و) چگالی طیفی توان جابجایی



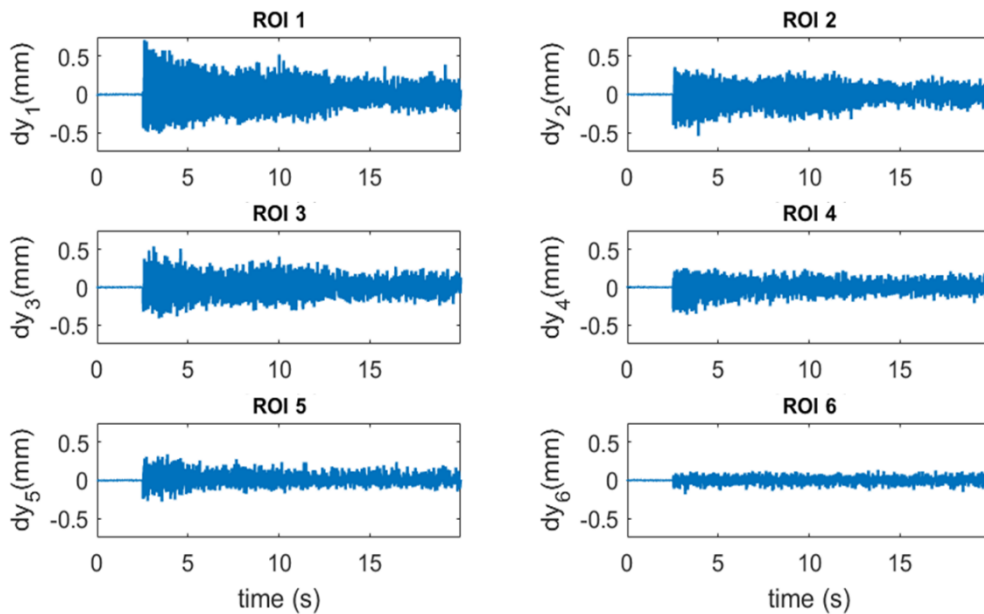
شکل ۶. صحت‌سنجی روش پردازش ویدئو برای حالت تحریک شماره ۳، الف) پاسخ زمانی جابجایی انتهای آزاد تیر، ب-د) نمای بزرگنمایی شده پنجره‌های ۱-۳، ه) خطای پاسخ جابجایی ثبت شده توسط روش تصویربرداری نسبت به روش لیزر، و) چگالی طیفی توان جابجایی



شکل ۷. جابجایی نقاط مدنظر تیر یکسرگردار در تحریک شماره ۱ از روش پردازش ویدئو



شکل ۸. جابجایی نقاط مدنظر تیر یکسرگردار در تحریک شماره ۲ از روش پردازش ویدئو



شکل ۹. جابجایی نقاط مدنظر تیر یکسرگیردار در تحریک شماره ۳ از روش پردازش ویدئو

جدول ۱. مقایسه مقادیر فرکانس‌های طبیعی (هرتز) حاصل شده از روش‌های پردازش ویدئو، لیزر و حل تحلیلی

تحریک شماره ۳				تحریک شماره ۲				تحریک شماره ۱				تحلیلی	مود
$\varepsilon_2(\%)$	$\varepsilon_1(\%)$	لیزر	ویدئو	$\varepsilon_2(\%)$	$\varepsilon_1(\%)$	لیزر	ویدئو	$\varepsilon_2(\%)$	$\varepsilon_1(\%)$	لیزر	ویدئو		
0.048	0.135	8.105	8.102	0.192	0.344	8.1	8.085	0.012	0.134	8.1	8.101	8.112	۱
0.066	1.283	50.22	50.186	0.127	1.354	50.15	50.15	0.103	1.338	50.21	50.158	50.839	۲

سه ماتریس بصورت زیر با توجه به رابطه ۹ در نظر گرفته شده‌اند.

$$\tilde{\mathbf{T}}_1(\omega) = \begin{bmatrix} T_{31}^1(\omega) & T_{31}^2(\omega) & T_{31}^3(\omega) \\ T_{53}^1(\omega) & T_{53}^2(\omega) & T_{53}^3(\omega) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\tilde{\mathbf{T}}_2(\omega) = \begin{bmatrix} T_{51}^1(\omega) & T_{51}^2(\omega) & T_{51}^3(\omega) \\ T_{32}^1(\omega) & T_{32}^2(\omega) & T_{32}^3(\omega) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\tilde{\mathbf{T}}_3(\omega) = \begin{bmatrix} T_{42}^1(\omega) & T_{42}^2(\omega) & T_{42}^3(\omega) \\ T_{52}^1(\omega) & T_{52}^2(\omega) & T_{52}^3(\omega) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

با اجرای روش شناسایی مبتنی بر ماتریس

۳.۴. شناسایی مودال به کمک توابع انتقال پذیری

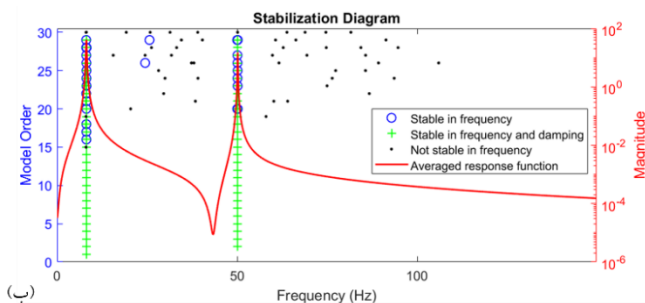
در این زیربخش با استفاده از پاسخ زمانی تیر یکسرگیردار که از روش پردازش ویدئو حاصل شده‌اند، به شناسایی خواص مودال سازه، یعنی فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل مودها، به کمک روش ماتریس انتقال پذیری پرداخته می‌شود. همان‌طور که در بخش ۳ ذکر شد، در روش انتقال پذیری لازم است پاسخ سازه حداقل در دو شرایط نیرویی مجزا ثبت شود. در این مقاله، شرط مذکور با سه بار تغییر محل اعمال ضربه به سازه (مطابق زیربخش ۵-۲) برآورده شده‌است. به‌منظور پیاده سازی روش ماتریس انتقال پذیری و نیز بررسی تکرارپذیری نتایج شناسایی مودال به این روش،

و نسبت‌های میرایی، شکل موده‌های حاصل شده از هر دو روش نیز با شاخص $MAC^{۴۶}$ ، طبق رابطه ۳۰ مقایسه شده‌اند.

$$MAC(\varphi_1, \varphi_2) = \frac{|\varphi_1^* \varphi_2|^2}{\|\varphi_1\|_2^2 \|\varphi_2\|_2^2}, \quad (۳۰)$$

$$\|\varphi_1\|_2, \|\varphi_2\|_2 \neq 0$$

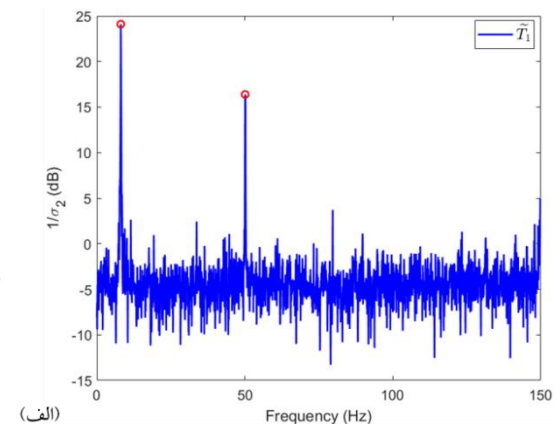
که در آن \square^* نشان‌دهنده ترانپوز مجزوم مختلط می‌باشد. لازم به ذکر است که $0 \leq MAC(\varphi_1, \varphi_2) \leq 1$ ، بطوریکه برای دو شکل مود متفاوت مقدار این شاخص برابر صفر بوده، و مقدار یک بیانگر تطابق کامل دو شکل مود است. با توجه به جدول ۲، خواص مودال بدست آمده از روش ماتریس انتقال‌پذیری و روش زیرفضا، انطباق قابل قبولی بر یکدیگر دارند. همچنین، تکرارپذیری روش TRM، با مقایسه خواص مودال تخمین زده شده بوسیله هر یک از ماتریس‌های انتقال‌پذیری در روابط ۲۷-۲۹، در جدول ۲ قابل مشاهده است. در ضمن، فرکانس‌های طبیعی و شکل موده‌های حاصل شده از این دو روش با نتایج بدست آمده از حل تحلیلی نیز مقایسه شده‌اند. مقادیر خطای نسبی فرکانس طبیعی نسبت به حل تحلیلی، و شکل موده‌های حاصله در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند.

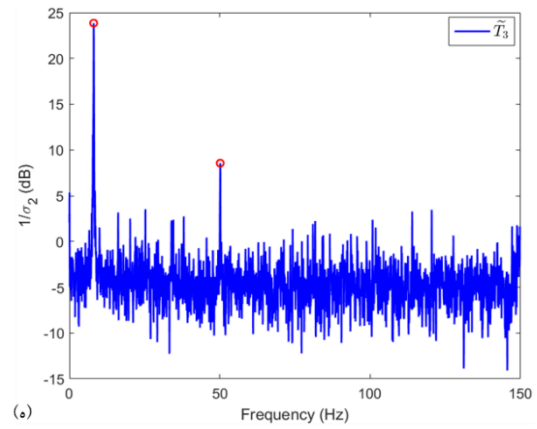
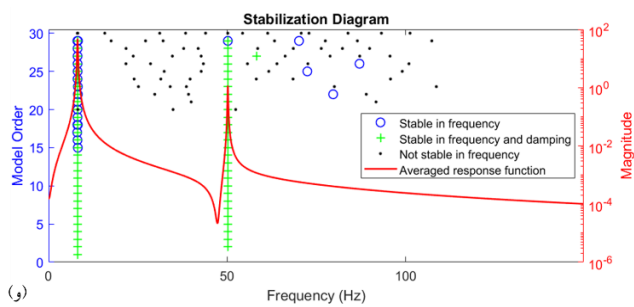
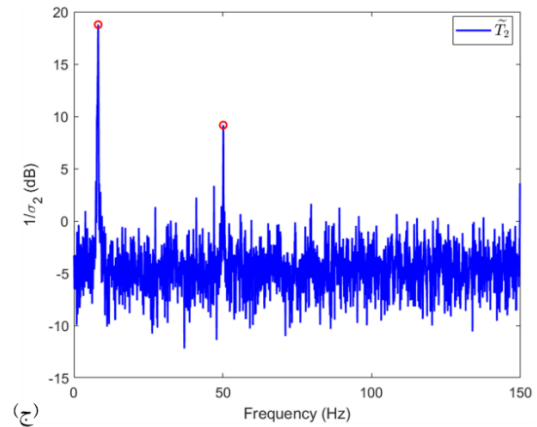
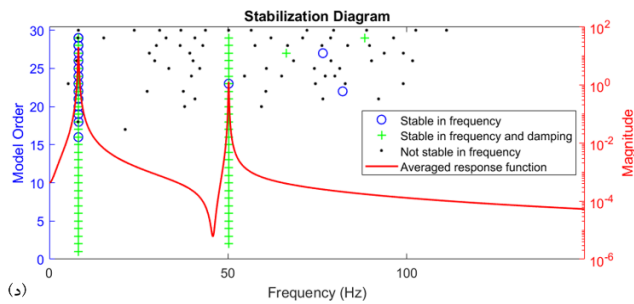


انتقال‌پذیری، بر روی هریک از ماتریس‌های روابط ۲۷-۲۹، خواص مودال سازه شامل فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل مودها حاصل شده‌اند. لازم به ذکر است در تعیین شکل مودها، انتهای آزاد تیر به‌عنوان درجه‌آزادی مرجع با مقدار دامنه ۱، در نظر گرفته شده‌است.

شکل ۱۰ معکوس مقدار تکین دوم هر یک از ماتریس‌های انتقال‌پذیری $\bar{T}_1(\omega)$ ، $\bar{T}_2(\omega)$ و $\bar{T}_3(\omega)$ را، به همراه نمودار پایداری^{۴۵} آنها، نمایش می‌دهد. همان‌طور که در بخش ۳ بیان شد، پیرامون فرکانس طبیعی سازه، معکوس مقادیر تکین ماتریس انتقال‌پذیری (به جز مقدار تکین اول)، به بیشینه خود می‌رسند (شکل ۱۰).

همچنین، به‌منظور مقایسه نتایج حاصله با سایر روش‌های شناسایی مودال در حوزه فرکانس، روش شناسایی زیرفضا (SSI) نیز بر روی پاسخ‌های زمانی بدست آمده از روش تصویربرداری، پیاده شد. در جدول ۲ نتایج حاصل از شناسایی مودال به روش ماتریس انتقال‌پذیری (TRM) با روش شناسایی زیرفضا (SSI) مقایسه شده‌است. در این جدول علاوه بر ارائه و مقایسه مقادیر بدست آمده برای فرکانس‌های طبیعی

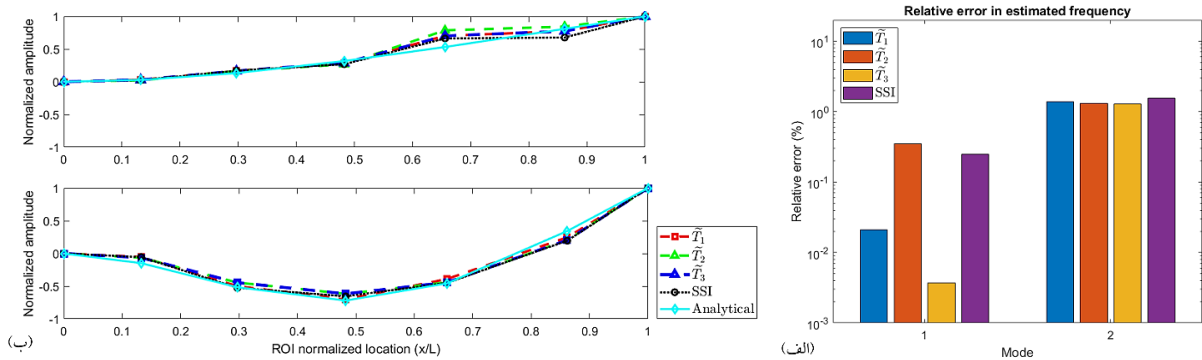




شکل ۱۰. الف، ج، ه) معکوس مقدار تکین دوم ماتریس‌های انتقال‌پذیری \tilde{T}_1 ، \tilde{T}_2 و \tilde{T}_3 ، ب، د، و) نمودارهای پایداری

جدول ۲. مقایسه خواص مودال حاصله از روش‌های SSI و TRM

مود	TRM										
	\tilde{T}_3			\tilde{T}_2			\tilde{T}_1				
	MAC	$\zeta(\%)$	$f(\text{Hz})$	MAC	$\zeta(\%)$	$f(\text{Hz})$	MAC	$\zeta(\%)$	$f(\text{Hz})$	SSI	
										$\zeta(\%)$	$f(\text{Hz})$
۱	0.997	1.13	8.112	0.990	1.246	8.141	0.997	1.234	8.114	1.275	8.092
۲	0.997	0.148	50.179	0.997	0.157	50.171	0.995	0.144	50.133	0.163	50.05



شکل ۱۱. (الف) خطای نسبی فرکانس‌های طبیعی تخمین زده شده از روش‌های TRM و SSI نسبت به مقدار تحلیلی، (ب) شکل مودهای حاصل شده از ماتریس‌های انتقال‌پذیری \bar{T}_1 ، \bar{T}_2 و \bar{T}_3 ، روش SSI و حل تحلیلی

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با رویکرد تحلیل مودال عملیاتی (OMA)، به ترکیب روش‌های پردازش تصویر و توابع انتقال‌پذیری جهت تخمین خواص مودال سازه‌ها پرداخته شد. به منظور استخراج تاریخچه زمانی جابجایی‌ها از سیگنال ویدئویی، از روش تطبیق بلوکی با دقت زیرپیکسل استفاده شد. جهت صحت‌سنجی این روش، مقادیر جابجایی انتهای آزاد یک تیر یکسرگیردار بوسیله یک حسگر غیرتماسی دیگر، یعنی ارتعاش‌سنج لیزری ثبت و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج صحت‌سنجی در قالب نمودارهای خطای متحرک در حوزه زمان، و چگالی طیفی توان در حوزه فرکانس ارائه شدند، و نشان داده شد که روش تطبیق بلوکی زیرپیکسل علاوه بر دقت بالا در تخمین جابجایی‌ها از سیگنال ویدئویی، رفتار نوسانی سازه را نیز به خوبی ثبت کرده‌است. با اجرای سه آزمون مودال مجزا بصورت تحریک ضربه در

نزدیکی تکیه‌گاه تیر و ثبت تاریخچه زمانی جابجایی‌های شش نقطه از آن توسط روش تطبیق بلوکی، خواص مودال این سازه به کمک روش شناسایی ماتریس انتقال‌پذیری استخراج شدند. خواص مودال بدست آمده از این طریق، با روش متداول زیرفضا (SSI) و نیز حل تحلیلی مقایسه شدند. نتایج این مقایسه بیانگر دقت روش شناسایی مودال ارائه شده بوده، بطوریکه مقدار خطای نسبی تخمین فرکانس طبیعی در مود اول کمتر از ۰/۳۵٪ و در مود دوم کمتر از ۱/۵٪ می‌باشد.

در مجموع پژوهش حاضر نشان داده است که ثبت پاسخ زمانی سازه‌ها به کمک روش‌های تصویربرداری و ترکیب آنها با روش‌های شناسایی سامانه، می‌تواند به‌عنوان روشی جایگزین و کارآمد، به موازات روش‌های پیشین، مانند نصب شتاب‌سنج و ارتعاش‌سنج لیزری، مورد توجه باشد.

- [1] Fu, Zhi-Fang, and Jimin He. *Modal analysis*. Elsevier, 2001.
- [۲] سرپرست، آشوری، and خطیبی. "هنر اندازه گیری و مدل سازی در آزمایش مودال و مشکلات آن (بخش اول)." *مجله علمی صوت و ارتعاش*, no. 1 (2012): 59-68.
- [3] Maia, Nuno Manuel Mendes, and Júlio Martins Montalvão e Silva. "*Theoretical and experimental modal analysis*." Wiley-Blackwell, 1997.
- [4] Devriendt, Christof, and Patrick Guillaume. "Identification of modal parameters from transmissibility measurements." *Journal of Sound and Vibration* 314, no. 1-2 (2008): 343-356. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2007.12.022>.
- [5] Yan, Wang-Ji, Meng-Yun Zhao, Qian Sun, and Wei-Xin Ren. "Transmissibility-based system identification for structural health Monitoring: Fundamentals, approaches, and applications." *Mechanical Systems and Signal Processing* 117 (2019): 453-482. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.06.053>.
- [6] Reynders, Edwin, and Guido De Roeck. "Reference-based combined deterministic–stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis." *Mechanical Systems and Signal Processing* 22, no. 3 (2008): 617-637. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.09.004>.
- [7] Reynders, Edwin. "System identification methods for (operational) modal analysis: review and comparison." *Archives of Computational Methods in Engineering* 19 (2012): 51-124. <https://dx.doi.org/10.1007/s11831-012-9069-x>.
- [8] Brincker, Rune, Lingmi Zhang, and Palle Andersen. "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition." *Smart materials and structures* 10, no. 3 (2001): 441. <https://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/10/3/303>.
- [9] Peeters, Bart, Herman Van der Auweraer, Patrick Guillaume, and Jan Leuridan. "The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation?." *Shock and Vibration* 11, no. 3-4 (2004): 395-409. <https://dx.doi.org/10.1155/2004/523692>.
- [10] Van Der Auweraer, Herman, Patrick Guillaume, Peter Verboven, and Steve Vanlanduit. "Application of a fast-stabilizing frequency domain parameter estimation method." *J. Dyn. Sys., Meas., Control* 123, no. 4 (2001): 651-658. <https://dx.doi.org/10.1115/1.1410369>.
- [11] Peeters, Bart, and Guido De Roeck. "Stochastic system identification for operational modal analysis: a review." *J. Dyn. Sys., Meas., Control* 123, no. 4 (2001): 659-667. <https://dx.doi.org/10.1115/1.1410370>.
- [12] Araújo, Iván Gómez, Jesús Antonio García Sánchez, and Palle Andersen. "Modal parameter identification based on combining transmissibility functions and blind source separation techniques." *Mechanical Systems and Signal Processing* 105 (2018): 276-293. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.12.016>.
- [13] Devriendt, Christof, Gunther Steenackers, Gert De Sitter, and Patrick Guillaume. "From operating deflection shapes towards mode shapes using transmissibility measurements." *Mechanical Systems and Signal Processing* 24, no. 3 (2010): 665-677. <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.10.018>.
- [14] Y Yan, Wang-Ji, and Wei-Xin Ren. "Use of continuous-wavelet transmissibility for structural operational modal analysis." *Journal of Structural Engineering* 139, no. 9 (2013): 1444-1456.

[https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000711](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000711).

- [15] Araújo, Iván Gómez, and Jose Elias Laier. "Operational modal analysis using SVD of power spectral density transmissibility matrices." *Mechanical Systems and Signal Processing* 46, no. 1 (2014): 129-145.
<https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.01.001>.
- [16] Weijtjens, Wout, Gert De Sitter, Christof Devriendt, and Patrick Guillaume. "Operational modal parameter estimation of MIMO systems using transmissibility functions." *Automatica* 50, no. 2 (2014): 559-564.
<https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.11.021>.
- [17] Baqersad, Javad, Peyman Poozesh, Christopher Niezrecki, and Peter Avitabile. "Photogrammetry and optical methods in structural dynamics—A review." *Mechanical Systems and Signal Processing* 86 (2017): 17-34.
<https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.02.011>.
- [18] Helfrick, Mark N., Christopher Niezrecki, and Peter Avitabile. "Curvature methods of damage detection using digital image correlation." In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2009*, vol. 7295, pp. 130-141. SPIE, 2009.
- [19] Huňady, Róbert, Martin Hagara, and Martin Schrötter. "Using high-speed digital image correlation to determine the damping ratio." *Procedia Engineering* 48 (2012): 242-249.
<https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.510>.
- [20] Kim, Sung-Wan, Bub-Gyu Jeon, Jin-Hwan Cheung, Seong-Do Kim, and Jae-Bong Park. "Stay cable tension estimation using a vision-based monitoring system under various weather conditions." *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 7 (2017): 343-357.
<https://dx.doi.org/10.1007/s13349-017-0226-7>.
- [21] Kromanis, R., and A. Al-Habaibeh. "Low cost vision-based systems using smartphones for measuring deformation in structures for condition monitoring and asset management." In *8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII 2017*, pp. 390-400. Curran Associates Inc., 2017.
- [۲۲] بختیاری نژاد، معدنی پور، و حسین زاده. "شناسایی ارتعاشات سامانه های دورانی با استفاده از روش پردازش تصویر." *مجله علمی صوت و ارتعاش* ۶، no. 11 (2017): 95-112.
- [23] Pesquet-Popescu, Béatrice, Marco Cagnazzo, and Frédéric Dufaux. "Motion estimation techniques." *Telecom ParisTech* (2016): 33-34.
- [24] Gonzalez, Rafael C. *Digital Image Processing*: Pearson education india, 2009.
- [25] Pratt, William K. *Introduction to digital image processing*. CRC press, 2013.
<https://books.google.com/books?id=eoTSBQAAQBAJ>.
- [26] Guizar-Sicairos, Manuel, Samuel T. Thurman, and James R. Fienup. "Efficient subpixel image registration algorithms." *Optics letters* 33, no. 2 (2008): 156-158.
<https://dx.doi.org/10.1364/OL.33.000156>.
- [27] Shabani, Mohammad Amin, Laleh Samadfam, and Mohammad Amin Sadeghi. "Local visual microphones: improved sound extraction from silent video." *arXiv preprint arXiv:1801.09436* (2018).
- [28] Devriendt, Christof, Wout Weijtjens, Gert De Sitter, and Patrick Guillaume. "Combining multiple single-reference transmissibility functions in a unique matrix formulation for operational modal analysis." *Mechanical Systems and Signal Processing* 40, no. 1 (2013): 278-287.
<https://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.04.008>.

- [29] Van Overschee, Peter, and BL0888 De Moor. *Subspace identification for linear systems: Theory—Implementation—Applications*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [30] Brincker, Rune, and Carlos Ventura. *Introduction to operational modal analysis*. John Wiley & Sons, 2015.

پی نوشت

-
1. Root mean square error (RSME)
 2. Experimental modal analysis (EMA)
 3. Operational modal analysis (OMA)
 4. System Identification
 5. Output-only system identification
 6. Frequency domain decomposition (FDD)
 7. Least-squares method (LS)
 8. Stochastic sub-space identification (SSI)
 9. White noise
 10. Transmissibility functions
 11. Full-field measurement
 12. Laser Doppler vibrometer
 13. Complementary Metal Oxide Semiconductor
 14. Charge-coupled device
 15. Digital image correlation
 16. Frame
 17. Motion estimation
 18. Video surveillance
 19. Robot vision
 20. Autonomous vehicles
 21. Structural health monitoring (SHM)
 22. Gait analysis
 23. Machine vision
 24. Block matching
 25. Search region
 26. 2-D Cross correlation
 27. Sub-pixel motion estimation
 28. Frequency response function (FRF)
 29. Peak picking
 30. Fitted modal model
 31. Transmissibility-based OMA (TOMA)
 32. Singular value decomposition (SVD)
 33. Ill-condition
 34. Rank
 35. Data-driven Stochastic sub-space identification (DD-SSI)
 36. Covariance-driven Stochastic sub-space identification (COV-SSI)
 37. Projection matrix
 38. Kalman states
 39. Single-point laser vibrometer
 40. Regions of Interest
 41. Power spectral density (PSD)
 42. Total root mean square error
 43. Moving root mean square error
 44. Clamped-Free boundary condition
 45. Stability diagram
 46. Modal assurance criteria (MAC)