



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



A Review of Structural Health Monitoring Methods

Gholamreza Havaei

Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Structural Health Monitoring (SHM) plays a crucial role in the reliable assessment and evaluation of structural conditions. Among the various algorithms used in SHM for identifying structural system parameters, Subspace System Identification (SSI) is a dependable time-domain method that employs extended observability matrices. In recent years, a significant number of studies have specifically focused on the practical applications of SSI. However, to date, no comprehensive review has been conducted on the use of SSI in monitoring the health of civil engineering structures. This study aims to review the literature that has employed SSI algorithms for damage detection and modal analysis of structures, with a particular emphasis on data-driven and covariance-based SSI algorithms. In this review, we consider the subspace algorithm as a solution for real-world SHM applications. A comparative evaluation between SSI and other methods is presented to highlight its advantages and limitations. Practical SHM approaches in civil engineering structures are classified into three categories ranging from simple one-dimensional (1D) to highly complex structures, and the capability of SSI in identifying various damage scenarios is reported.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 October 2020

Revise Date: 19 February 2021

Accept Date: 07 March 2021

Keywords:

*Structural Health Monitoring
vibration-based damage
detection
system identification
Subspace System Identification
(SSI)*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525723.3739>

*Corresponding author: Gholamreza Havaei

Email address: Havaei@aut.ac.ir

مروری بر روش‌های پایش سلامت سازه‌ها

غلامرضا هوایی

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

چکیده:

پایین‌تر و ارزیابی وضعیت قابل اعتماد سازه‌ها است. در میان الگوریتم‌های مورد استفاده برای SHM برای شناسایی پارامترهای سیستم سازه‌ها، شناسایی سیستم زیر فضا (SSI) یک روش قابل اعتماد در حوزه زمان است که از ماتریس‌های قابل مشاهده بسط یافته استفاده می‌کند. تعداد قابل توجهی از مطالعات به طور خاص در کاربردهای عملی SSI در سال‌های اخیر متمرکز شده است. با این حال، تاکنون هیچ مطالعه‌ی جامعی برای بررسی کاربرد SSI در پایش سلامت سازه‌های مهندسی عمران انجام نشده است. هدف این تحقیق، بررسی مطالعاتی است که از الگوریتم SSI برای شناسایی آسیب و تحلیل مودال سازه‌ها استفاده کرده‌اند. تمرکز اساسی بر الگوریتم‌های SSI مبتنی بر داده و کوواریانس است. در این بررسی، ما الگوریتم زیرفضا را برای حل مسئله کاربردهای SHM در جهان واقعی در نظر می‌گیریم. با توجه به عملکرد، مقایسه‌ای بین SSI و سایر روش‌ها به منظور بررسی مزایا و معایب آن ارائه شده است. روشهای کاربردی SHM در سازه‌های مهندسی عمران در سه دسته از ساده یک بعدی (1D) تا سازه‌های بسیار پیچیده دسته‌بندی می‌شوند و قابلیت شناسایی SSI برای سناریوهای مختلف آسیب گزارش می‌شود.

کلمات کلیدی: پایش سلامت سازه‌های (SHM)، تشخیص آسیب مبتنی بر ارتعاش، شناسایی سیستم، شناسایی زیر فضای سیستم (SSI)

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525723.3739	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.525723.3739	۱۴۰۰/۰۴/۳۱	۱۳۹۹/۱۲/۱۷	۱۳۹۹/۱۲/۱۷	۱۳۹۹/۱۲/۰۱	۱۳۹۹/۰۸/۰۷
				*نویسنده مسئول:		
				غلامرضا هوایی		
				پست الکترونیکی:		
				havaei@aut.ac.ir		

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، علاقه قابل توجهی به مفهوم "شهر هوشمند"، نظارت، کنترل و حفظ وضعیت سلامت زیرساخت‌های حیاتی، مانند جاده‌ها، ساختمان‌ها، پل‌ها و تونل‌ها به وجود آمده است. برای ارائه خدمات با کیفیت بالا لازم است که سلامت سازه در طول چرخه عمر به طور مداوم مورد بازرسی قرار گیرد. سازه‌های مهندسی عمران برای زندگی افراد و یا تأسیسات طراحی شده‌اند و خرابی آنها ممکن است عواقب فاجعه باری را از نظر زندگی افراد و دارایی‌های اقتصادی به همراه داشته باشد. پیش سلامت سازه‌ای^۱ (SHM) یکی از بازیگران اصلی مفهوم شهر هوشمند است. SHM یک راه حل موثر است که در ایمنی، کاهش هزینه‌های نگهداری و ارزیابی وضعیت قابل اعتماد سازه‌ها کمک می‌کند [۱].

SHM یک موضوع میان رشته‌ای است که شامل دانش و تجربیات حاصل از فن‌آوری‌های هم‌افزایی در مهندسی عمران، مکانیک، کنترل و کامپیوتر مرتبط با ارزیابی سلامت سازه‌ها است. پیش سلامت سازه‌ها در سه دهه گذشته موضوع بسیاری از مطالعات بوده است. توسعه یک روش SHM قابل اعتماد برای سازه‌های عمرانی به دلیل عدم اطمینان ناشی از محیط و پیچیدگی‌های مرتبط، یک کار چالش برانگیز است. چهار سطح تجزیه و تحلیل تشخیص آسیب در زمینه SHM اعمال می‌شود که شامل موارد زیر است:

(۱) تشخیص،

(۲) تعیین موقعیت،

(۳) کمی سازی و

(۴) پیش بینی عمر باقیمانده.

به طوریکه که در ادبیات فنی، در مورد سه سطح اول با صراحت بیشتری گزارش شده است.

بسته به اینکه بار وارده به چه صورت باشد، روشهای SHM را می‌توان به دو دسته روشهای مبتنی بر استاتیک و مبتنی بر دینامیک تقسیم‌بندی کرد. روش‌هایی که از ویژگی‌های ارتعاشی سازه‌ها برای ارزیابی وضعیت سلامت سازه‌ها استفاده می‌کنند، اصطلاحاً تشخیص آسیب مبتنی بر ارتعاش^۲ (VDD) نامیده می‌شوند. اساس کار VDD برآورد پارامترهای مودال یک سازه می‌باشد که از مدل تحلیلی ساخته شده توسط روش‌های شناسایی سیستم استفاده می‌کن. روشهای تشخیص آسیب مبتنی بر استاتیک^۳ (SDD) به اندازه‌گیری تغییر در پاسخ استاتیکی سازه مانند ظرفیت تحمل بار، فشار، تغییر مکان و سختی متکی هستند. وو و همکاران [۵] از داده‌های کرنش برای تشخیص آسیب سازه‌ای استفاده کرده‌اند. چن و همکاران [۶] روشی را برای تشخیص آسیب ارائه دادند که در آن از اندازه‌گیری نیروی ماند کابل و دمای سازه‌ای استفاده می‌شد. یو و همکاران [۷] از داده‌های تغییر مکان برای شناسایی آسیب در سازه‌ها استفاده کردند. زو و همکاران [۸] با استفاده از اطلاعات کرنش سازه‌ها برای تشخیص ناهنجاری، روشی مبتنی بر دما معرفی کردند.

وزنه متحرک^۴ (WIM) یک روش طبقه بندی وسایل نقلیه است که به طور گسترده برای پیش سلامت سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. وزنه متحرک عبوری از روی پل (BWIM) نوعی فناوری WIM است که می‌تواند داده‌های ترافیکی از جمله سرعت، تعداد محورها، فاصله محورها و وزن ناخالص و محور وسایل نقلیه عبوری را با استفاده از یک سری کرنش‌سنج‌های معمولی شناسایی کند. BWIM مخصوصاً برای اندازه‌گیری کوتاه مدت داده‌های ترافیکی مناسب است، زیرا به راحتی روی پل قابل نصب و جدا شدن است. کاردینی و دوولف [۹] با استفاده از کرنش‌سنج برای دستیابی به اطلاعات در مورد تعداد و وزن کامیون‌هایی که از پل‌های بزرگراه عبور می‌کردند، BWIM را اعمال کردند. کانترو و همکاران [۱۰] برای استخراج یک شاخص آسیب، یک روش شناسایی آسیب مبتنی بر BWIM، از طریق معرفی مفهوم "محور

¹ Structural Health Monitoring

² vibration-based damage detection (VDD)

³ Static-based damage detection

⁴ Weigh in motion

مجازی" ارائه دادند. گونزالس و کارومی [۱۱] با استفاده از پاسخ شتاب عرشه و BWIM یک روش تشخیص آسیب بدون مدل ارائه دادند. کالیبانکار و اودین [۱۲] برای برآورد اندرکنش چند وسیله نقلیه-پل در BWIM، یک مدل المان محدود سه بعدی ایجاد کردند. عوامل محیطی، نقطه ضعف تشخیص آسیب مبتنی بر استاتیک و ارتعاش است. با این حال، در برخی موارد، روشهای مبتنی بر دما در مقایسه با روشهای مبتنی بر ارتعاش، حساسیت بیشتری نشان می دهند.

تخمین پارامترهای مودال در SHM معمولاً با روشهای شناسایی سیستم انجام می شود. شناسایی سیستم یک روش ریاضی برای ایجاد یک مدل تحلیلی بر اساس داده های تجربی است. شناسایی سیستم یک عرصه بالغ در SHM برای استخراج پارامترهای مودال در روش های VDD است. روشهای شناسایی سیستم در SHM را می توان بر اساس حوزه آنها به سه دسته طبقه بندی کرد، از جمله: حوزه زمان^۵ (TD)، حوزه فرکانس^۶ (FD) و حوزه زمان/فرکانس^۷ (TFD). روش های TD به دلیل استفاده مستقیم از سیگنال های ارتعاش، برای پیش سلامت سازه های جذاب تر هستند. روش های TD به طور کلی در سه گروه شناسایی سیستم زیر فضا (SSI)، روش تحریک طبیعی^۸ (NEXT) و میانگین متحرک خود بازگشتی^۹ (ARMA) طبقه بندی می شوند. پیش فرض روش NEXT این است که سیگنال های پاسخ سازه ای برای تحریک محیطی و ارتعاش آزاد، فرم تحلیلی یکسانی دارند. روش های مبتنی بر ARMA استراتژی های آماری محبوب و متداولی برای VDD سازه های مهندسی عمران هستند. قسمت رگرسیون خودبازگشتی (AR) ARMA یک تابع خطی برای تاریخچه زمانی پاسخ را مدل و بخش میانگین متحرک (MA) میانگین متحرک پاسخ اندازه گیری را تعیین می کند. الگوریتم SSI ترکیبی هماهنگ از ابزارهای جبری، ریاضی، آماری و هندسی را برای شناسایی پارامترهای سیستم ارائه می دهد. SSI از مزایای LS، زاویه بین فضاها، تجزیه QR، تجزیه مقدار منفرد (SVD)، فیلتر کالمن و تئوری فهم تصادفی در رابطه با مسئله شناسایی پارامترهای مودال بهره می برد. روشهای مبتنی بر زیر فضا که برای شناسایی پارامترهای سازه های عمرانی مورد استفاده قرار می گیرند، عمدتاً یکی از دو روش شناسایی سیستم زیر فضایی داده محور (SSI-COV) و شناسایی سیستم زیر فضایی مبتنی بر کواریانس (SSI-COV) هستند. مدل ARMA بیشترین شباهت را به مدل SSI-COV دارد، زیرا هر دو روش از تابع همبستگی اندازه گیری ارتعاش در مرحله پیش پردازش خود استفاده می کنند.

روش های شناسایی سیستم، ابزاری قدرتمندی برای ساخت یک مدل تحلیلی از یک سیستم دینامیکی فراهم می کنند. استفاده از سیستم شناسایی زیر فضایی برای تحلیل مودال، یک زمینه کاملاً تثبیت شده در دینامیک سازه هاست. روش های VDD به تغییرات قابل مشاهده در تغییر پارامترهای مودال (فرکانس تشدید، میرایی و شکل مود) یا مشتقات آنها به عنوان شاخص وجود آسیب متکی هستند [۱۷]. سونگ و همکاران [۱۸] و ریندرز [۱۹] شناسایی سیستم زیر فضایی را برای استفاده در تحلیل VDD و مودال بررسی کردند.

سازه ها در VDD را می توان به طور کلی به دو دسته تقسیم کرد: (۱) سازه های مهندسی مکانیک، مانند هواپیماها، تست خود، کشتی و (۲) سازه های مهندسی عمران، مانند پل ها، ساختمان ها، ژاکتهای دریایی و سدها. حفظ تمایز واضح بین سازه های مکانیکی و مهندسی عمران دشوار است، اما به عنوان یک ایده کلی، می توان آنها را براساس ویژگی های آنها تفکیک کرد. به طور کلی، سازه های مهندسی مکانیک و عمران معمولاً تحت شرایط بارگذاری و مرزی مختلفی قرار می گیرند. سازه های عمرانی ثابت، عظیم و سنگین هستند و از نقطه نظر سازه ای و هندسی ساده هستند. سازه های مهندسی عمران را می توان به صورت عناصر سازه ای ساده مانند تیرها (به عنوان مثال، در پل ها و توربین های بادی) و قاب ها (به عنوان مثال، در ساختمان ها و ژاکت های دریایی) مدل سازی کرد. پوسته ها و صفحات عمدتاً در سازه های نگهدارنده و انتقال مایعات (به عنوان مثال در سدها و لوله ها) استفاده می شوند. با این حال روش های VDD برای سازه هایی با ویژگی های دینامیکی متغیر مانند سدها و مخازن آب مناسب نیستند. از این رو، تمرکز مطالعات در مورد VDD سازه های مهندسی عمران استفاده از الگوریتم های توسعه یافته آنها در سازه های تیر و قاب است. از آنجایی که نیاز و چالش های به کار رفته برای هر کلاس از ساختار VDD متفاوت است، به کارگیری تکنیک های متنوع ضروری است.

⁵ Time Domain

⁶ Frequency Domain

⁷ Time-frequency Domain

⁸ natural excitation technique

⁹ auto-regressive moving average

شناسایی سیستم زیر فضایی یکی از روشهای معروف در حوزه زمان است که برای اولین بار توسط ون اورششی و دی مور [۲۰] برای استخراج پارامترهای مودال پیشنهاد شد. پیترز و دروئک [۲۱] با گسترش روش مدیریت داده‌های تصادفی، کارایی محاسباتی را افزایش دادند. پیترز و دروئک همچنین برای بهبود کیفیت نتایج شناسایی شده از نمودار پایداری برای شناسایی سیستم زیر فضایی استفاده کردند [۲۲]. اورشی و همکاران [۲۱] با استفاده از مفهوم ماتریس‌های وزن در شناسایی سیستم زیر فضا، به عنوان مبنایی برای استفاده از فضای ستون ماتریس مشاهده پذیری توسعه یافته، این الگوریتم را بسط دادند.

بر اساس داده‌های ورودی و خروجی تلفیقی، روش‌های شناسایی را می‌توان به دو دسته طبقه بندی کرد: روش‌هایی که شامل اندازه‌گیری ورودی - خروجی برای شناسایی پارامترهای سیستم است که به اصطلاح روشهای ورودی - خروجی نام دارند، و رویکردهایی که فقط از اندازه‌گیری‌های مجهول خروجی استفاده می‌کنند و با نام روش‌های خروجی-تنها (خروجی محور) شناخته می‌شوند. از آنجا که روش‌های خروجی-تنها همه نیروهای تحریک را به عنوان یک خروجی ناشناخته در نظر می‌گیرند، نتایج بدست آمده قابل کنترل و تکرار نیستند. علاوه بر این، دقت نتایج با تغییر در سطح نویز بسیار تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با وجود چالش‌های ذکر شده، به دلیل مشکلات فنی مرتبط با تحریک مصنوعی سازه‌های بزرگ مهندسی عمران که نیاز اصلی روش‌های ورودی - خروجی است، روش‌های خروجی-تنها بر روش‌های ورودی و خروجی ارجح هستند [۱۷]. کیم و همکاران [۲۳] با استفاده از مدلی از یک سازه قاب چند طبقه تحت تحریک پایه، مقایسه‌ای بین روش‌های شناسایی سیستم ورودی-خروجی و خروجی-تنها انجام دادند. پارامترهای مودال از مدل فضای حالت ورودی - خروجی استخراج شده و نتایج بدست آمده با نتایج بدست آمده از داده‌های پاسخ خروجی-تنها مقایسه شد. روش ورودی - خروجی دقت بالاتری را نتیجه می‌دهد.

الگوریتم ورودی - خروجی هنوز یک انتخاب وسوسه انگیز برای تحریک ناشی از زلزله است. ملینگر و همکاران [۲۴] طرح جدیدی را برای شناسایی مودال با استفاده از روشهای خروجی-تنها و ورودی - خروجی ارائه کردند. کیفیت پارامترهای سیستم شناسایی شده با استفاده از تحلیل مونت کارلو از نقطه نظر صحت تخمین‌ها و مقاومت در برابر نویز مورد ارزیابی قرار گرفت. استنباط شد که استفاده از اطلاعات ورودی نتایج قابل اطمینان تری را برای شناسایی مودال فراهم می‌کند. شین و همکاران [۲۵] با استفاده از داده‌های آزمون پلتفرم ژاکت دریایی، عملکرد شناسایی زیرفضای تصادفی مبتنی بر داده (SSI-DATA) را ارزیابی کردند. کارایی و بهره‌دهی سه سیگنال تحریک مختلف از جمله ضربه‌ای، پله‌ای و حرکت زمین با استفاده از هر دو الگوریتم ورودی - خروجی و خروجی-تنها مورد بررسی قرار گرفت. تمام رویکردها با فرکانس‌های مودال برآورد شده برای مودهای قوی‌تر، توافق بسیار خوبی داشتند. با این حال، تخمین نسبت میرایی با دقت کمتری گزارش شده است.

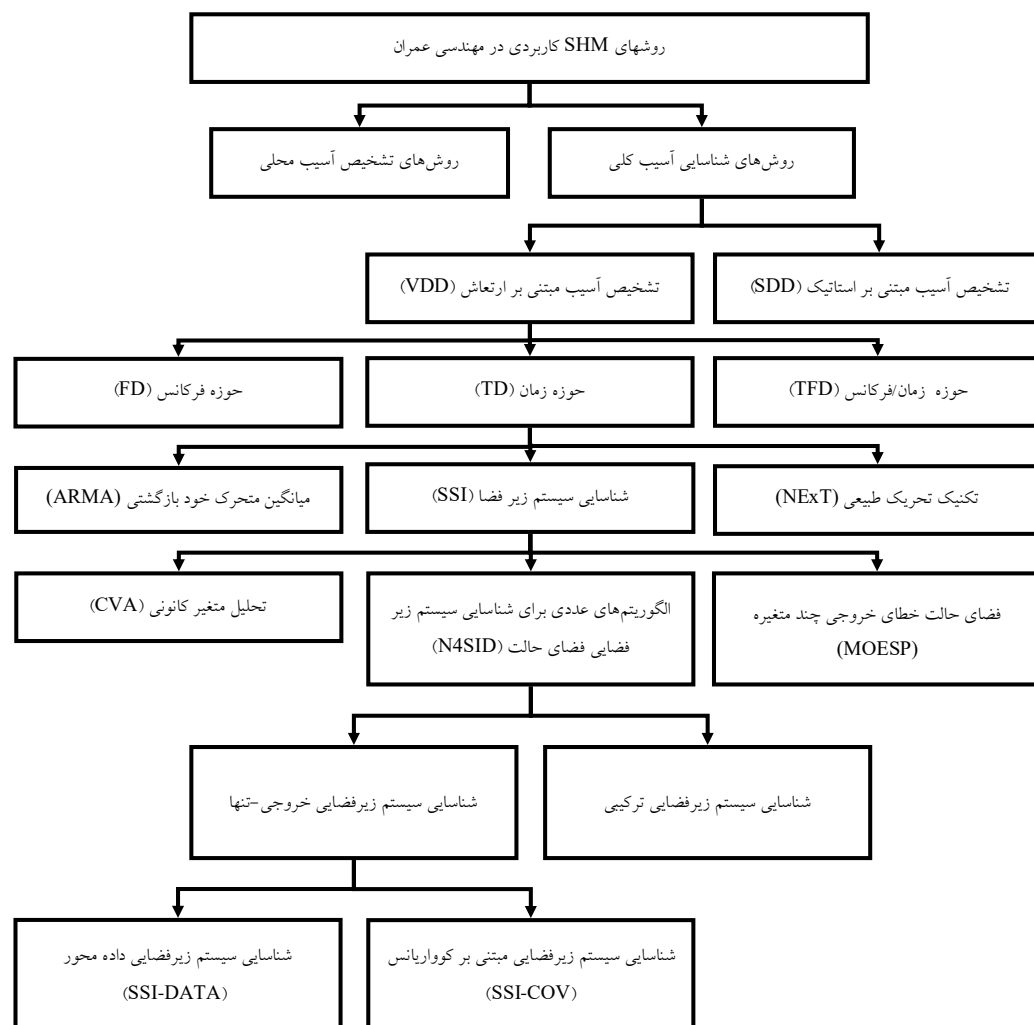
۲- پایش سلامت سازه‌ای (SHM)

یک سیستم SHM استراتژی‌هایی را برای شناسایی آسیب سازه‌ها پیاده‌سازی می‌کند. در حال حاضر، SHM به عنوان ابزاری کاملاً تثبیت شده برای تشخیص خسارات در جوامع مهندسی عمران شناخته شده است و در تعدادی از سازه‌های مختلف مانند ساختمان‌ها، پل‌ها و سدها به کار گرفته می‌شود. داده‌های سازه‌ای از طریق حسگرهای نصب شده در چندین نقطه جمع آوری می‌شوند و برای ارزیابی سلامت سازه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. شکل (۱-۲) طبقه بندی روش‌های SHM را با تمرکز بر الگوریتم‌های کلیدی مبتنی بر زیر فضا نشان می‌دهد. روش‌های SHM به روش‌های محلی تقسیم می‌شوند که عمدتاً به استراتژی‌های ارزیابی غیر مخرب^{۱۰} (NDE) و روش‌های کلی متکی هستند. بر اساس حوزه مورد بررسی، استراتژی‌های VDD می‌توانند به صورت روش‌های TD، FD و TFD دسته بندی شوند. روش‌های TD معمولاً شامل یکی از خانواده‌های میانگین متحرک خود بازگشتی (ARMA)، روش تحریک طبیعی (NEXT) یا شناسایی سیستم زیر فضایی (SSI) هستند. روش‌های SSI کلاس مهمی از الگوریتم‌ها هستند و می‌توان آن‌ها را به سه دسته ی تحلیل متغیر کانونی^{۱۱} (CVA)،

¹⁰ non-destructive evaluation

¹¹ canonical variate analysis

الگوریتم‌های عددی برای شناسایی زیر فضای سیستم فضای حالت^{۱۲} (N4SID) و خطای خروجی چند متغیری فضای حالت^{۱۳} (MOESP) تقسیم کرد. N4SID به دلیل قابلیت کار با داده‌های خروجی-تنها (ورودی تصادفی، ناشناخته) یکی از محبوب ترین الگوریتم SSI در SHM است. معمولاً در SHM سازه‌های مهندسی عمران، دو نوع الگوریتم N4SID مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی روش SSI-DATA و دیگری روش SSI-COV.



شکل ۱- طبقه بندی روشهای پایش سلامت سازه‌ای (SHM) با تمرکز بر الگوریتم شناسایی سیستم زیر فضایی (SSI).

NDE یک روش SHM محلی است که برای انجام آزمایش‌های تصادفی مقید برای تشخیص وضعیت و شدت نقص‌های احتمالی استفاده می‌شود. برخی از روش‌های NDE مربوط به اندازه‌گیری نقص در اجزای فولادی است، در حالی که برخی دیگر برای زیرسازه‌های بتنی طراحی شده‌اند. چندین روش NDE برای شناسایی نقص در سازه‌های فلزی در دسترس است مانند آزمایش اولتراسونیک^{۱۴} (UT)، آزمایش رادیوگرافی^{۱۵} (RT) و آزمایش جریان مخالف^{۱۶} (ET). UT یک روش NDE صوتی است که از امواج مافوق صوت عبوری از یک سازه

¹² Numerical algorithms for state-space subspace system identification

¹³ multivariable output error state-space

¹⁴ ultrasonic test

¹⁵ radiographic test

¹⁶ eddy current test

برای تشخیص نقص استفاده می‌کند. روش آزمون اولتراسونیک آرایه‌ای مرحله‌ای^{۱۷} (PAUT) نوع قابل اطمینان تری از UT است که برای شبیه‌سازی قابل اعتماد پروفایل نمونه از تعداد بیشتری آرایه استفاده می‌کند. برای NDE روی اجزای بتن، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. این روش‌ها از روش‌های ارزیابی مقاومت بسیار ساده، مانند استفاده از چکش ارتجاعی^{۱۸}، تا روش‌های پیچیده‌تر، مانند ضربه-اکو^{۱۹} و آزمایش رادیوگرافی^{۲۰} متغیر است.

حتی اگر روش‌های محلی SHM عملکرد بسیار خوبی برای شناسایی و محلی‌سازی خسارت داشته باشند، محدودیت‌ها و اشکالاتی دارند. عیب اصلی این تکنیک‌ها این است که فرآیند ارزیابی بدون هیچ گونه اطلاع قبلی از محل تقریبی آسیب قابل اجرا نیست. علاوه بر این، در بسیاری از موارد، دسترسی به زیر منطقه آزمون یک نیاز اساسی است که همیشه مقرون به صرفه یا عملی نیست. اطلاعات دقیق بیشتر در مورد روش‌های محلی SHM در سازه‌های مهندسی عمران در [۲۷] ارائه شده است. محققان پیشنهاد کرده‌اند با استفاده از روش‌های کلی شناسایی آسیب، خسارات موجود در سازه‌ها را شناسایی کنند تا بتوانند بر محدودیت‌های ذکر شده قبلی غلبه کنند. روش‌های کلی، انتخاب‌های بسیار موثری برای غلبه بر محدودیت روش‌های محلی SHM در مهندسی عمران هستند. در روش‌های کلی، محدودیتی در مورد محل آسیب یا حتی دسترسی و آماده‌سازی منطقه آسیب دیده وجود ندارد. این روش‌ها می‌توانند ضمن استفاده از خصوصیات کلی سازه‌ها، میزان خسارات را محلی‌سازی و تخمین بزنند. روش‌های VDD در زیر بخش‌های بعدی مطالعه خواهند شد.

۳- تشخیص خرابی مبتنی بر ارتعاش (VDD)

VDD محبوب‌ترین روش در SHM کلی در نظر گرفته می‌شود. روش‌های VDD به عنوان شاخصی از وجود آسیب، به تغییر در خصوصیات دینامیکی متکی هستند. این روش‌ها از تغییرات مشاهده شده در پارامترهای مودال، مانند فرکانس تشدید، میرایی و شکل مود یا مشتق آن‌ها به عنوان شاخص‌های تغییر در خصوصیات فیزیکی یک سازه بهره‌برداری می‌کنند. یک بررسی کامل از روش‌های شناسایی سیستم در VDD و تحلیل مودال در کارهای سونگ و [۱۸] و ریندرز و همکاران [۱۹] ارائه شده است.

۴- روش‌های حوزه فرکانس (FD)

نمایش FD سیگنال، با استفاده از تبدیل فوریه‌ی سیگنال پاسخ TD استخراج می‌شود. تبدیل فوریه با ترکیبی خطی از نماهای پیچیده، یک تابع هارمونیک را توصیف می‌کند. تعدادی از الگوریتم‌های پیشرفته به منظور بهبود کارایی محاسباتی تبدیل فوریه، که در مجموع به عنوان تبدیل سریع فوریه (FFT) نامیده می‌شوند، توسعه یافته‌اند. FFT عموماً برای استخراج توابع پاسخ فرکانس (FRF) استفاده می‌شود و در بسیاری از رویکردهای شناسایی آسیب FD، نقش اساسی را بازی می‌کند. روش‌های FD در VDD را می‌توان به سه دسته اصلی طبقه بندی کرد که عبارتند از:

۱. روش‌های جمع آوری قله‌ها^{۲۱} (PP)؛

۲. روش‌های تابع شاخص مود مختلط^{۲۲} (CMIF) و

۳. روش‌های حداقل مربعات حوزه فرکانس مختلط^{۲۳} (LSCF).

¹⁷ phased array ultrasonic test

¹⁸ rebound hammer

¹⁹ impact-echo

²⁰ radiography testing

²¹ peak picking

²² complex mode indication function

²³ least squares complex frequency-domain

روش‌های PP که به عنوان دامنه فرکانس اساسی^{۲۴} (BFD) نیز شناخته می‌شوند، معمول ترین رویکردها در آزمایش مودال هستند که ابتدا به ساکن به تحلیل طیفی توان^{۲۵} و تبدیل فوریه متکی هستند. روش‌های PP ماهیت کیفی دارند و بر اساس این واقعیت است که FRF تقریباً در نزدیکی‌های فرکانس طبیعی حداکثر می‌شود. بعلاوه، این روشها به همراه رویکرد پهنای باند نیمه توان^{۲۶} می‌توانند برای استخراج نسبت میرایی به کار گرفته شوند. تجزیه دامنه فرکانس^{۲۷} (FDD) یک روش دقیق و ساده برای شناسایی سیستم است که به طور گسترده در تحلیل مودال استفاده می‌شود. FDD بر اساس تجزیه چگالی طیفی ایجاد شده است. طیف‌های بدست آمده، یک فرم کاهش یافته از پاسخ دینامیکی برای مودهای منحصر به فرد است [۲۸]. روش تجزیه دامنه فرکانس تقویت شده^{۲۸} (EFDD) بسط روش FDD برای برآورد پارامترهای مودال قابل اطمینان است.

روش‌های CMIF را همچنین می‌توان بسط روش‌های PP دانست. آن‌ها به طور گسترده‌ای برای شناسایی خروجی-تنهای پارامترهای سیستم استفاده شده‌اند. CMIF با انجام SVD روی ماتریس FRF نرمال در هر خط طیفی ایجاد می‌شود [۳۰]. CMIF با الگوریتم‌های دیگری ترکیب می‌شود تا به عنوان یک مدل مستقل مانند تابع پاسخ فرکانس تقویت شده^{۲۹} (eFRF) و تابع نشانگر شاخص مودی تقویت شده^{۳۰} (EMIF) استفاده شود. eFRF توسعه بعدی روش CMIF است و از آن برای تخمین فرکانس‌های مرتبط با یک قله خاص در CMIF استفاده می‌شود. eFRF ریشه در مفهوم تبدیل مختصات فیزیکی برای تقویت برآورد پارامترهای مودال دارد. EMIF را می‌توان به عنوان بسط CMIF / eFRF در نظر گرفت که پارامترهای مودال را در چندین مود همزمان تخمین می‌زند. خاصیت متمایز این روش به دلیل ثابت بودن تعداد فرکانس‌های طبیعی بر اساس قله‌های نمودارهای CMIF است.

LSCF روشی سریع و دقیق برای تخمین پارامترهای مودال است. در اصل، از LSCF برای استخراج مقادیر اولیه در روش بیشینه احتمال^{۳۱} استفاده شد. LSCF به دلیل نمودار پایداری واضح، عملکرد قابل اعتمادی دارد [۳۲]. روش کمترین مربعات حوزه فرکانس مختلط چند مرجعی^{۳۲} (PolyMAX)، نسخه چند مرجعی LSCF است که از مدل ماتریس جزء راست^{۳۳} استفاده می‌کند. مزیت اصلی این روش این است که می‌توان فرکانس‌های مودال با فاصله نزدیک را از یکدیگر جدا کرد. ال کافافی و پیترز [۳۴] برای تحلیل مودال، روش کمترین مربعات حوزه فرکانس مختلط چند مرجعی^{۳۴} (pLSCF) را ارائه دادند. یک طرح دو مرحله‌ای برای تقویت تخمین میرایی ارائه شده است. روش پیشنهادی می‌تواند زمان پردازش و دقت شناسایی مودال را بهبود بخشد، به ویژه برای تخمین میرایی.

روش‌های FD سریع و دقیق هستند، اما از برخی محدودیت‌ها در وضوح فرکانس داده‌های طیفی تخمین زده شده رنج می‌برند. روشهای معمول FD برای تحلیل سیگنالهای غیرخطی و غیر پایستار، دقیق و قابل اعتماد نیستند. در محدوده‌های فرکانس پایین یا زمانی که تعداد مودهای درگیر کم هستند وضوح پارامترهای شناسایی سیستم در این روشها ضعیف است. علاوه بر این، ضرایب میرایی تخمین زده شده در روش‌های FD غیر پارامتریک، دقیق نیستند [۱۷]. تقاضای زیاد برای دستیابی به دقت بالاتر و استخراج اطلاعات بیشتر از پاسخ‌های ارتعاشی در زمینه شناسایی سیستم، منجر به توسعه روش‌های TD شده است.

۵- روش‌های حوزه زمان (TD)

²⁴ basic frequency-domain

²⁵ power spectral analysis

²⁶ half power bandwidth approach

²⁷ Frequency domain decomposition

²⁸ enhanced frequency domain decomposition

²⁹ enhanced frequency response function

³⁰ enhanced mode indicator function

³¹ maximum likelihood method

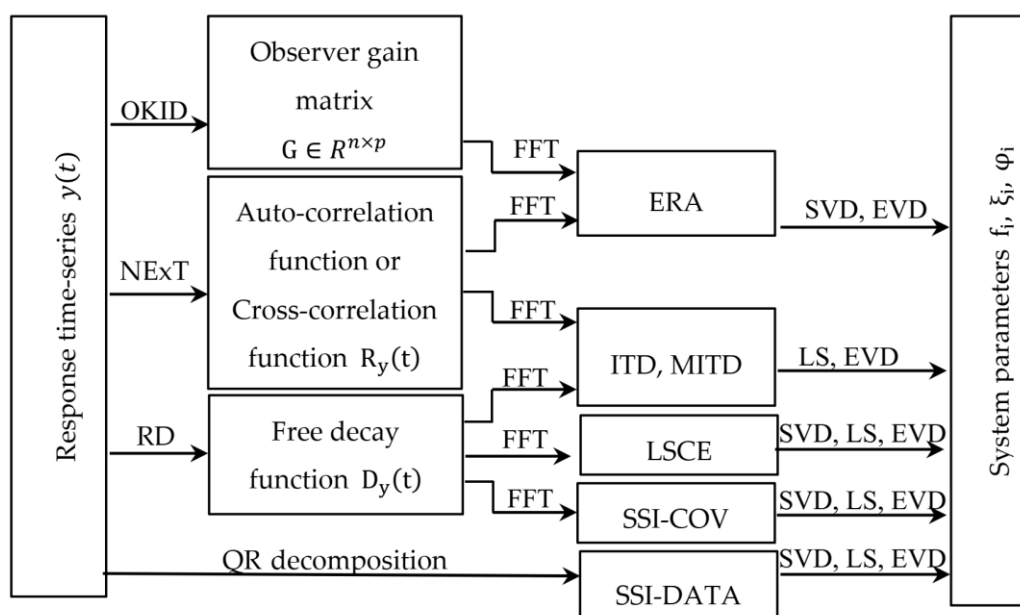
³² polyreference least-squares complex frequency-domain method

³³ ight matrix-fraction model

³⁴ poly-reference least squares complex frequency-domain

تکنیک‌های TD به این واقعیت متکی هستند که می‌توان از طریق پاسخ تاریخیچه زمانی یک سیستم دینامیکی، خواص ارتعاشی سازه‌ها را به دست آورد. از این رو، پاسخ استخراج شده در حالت سالم با پاسخی که در وضعیت آسیب دیده دارد متفاوت است. شکل ۲ معماری شماتیک روش‌های TD را نشان می‌دهد که برای شناسایی سیستم‌های دینامیکی استفاده شده است. تکنیک‌های مختلف عددی، به عنوان مثال، SVD، FFT، حداقل مربعات (LS)، تجزیه QR، تجزیه بردار ویژه^{۳۵} (EVD)، و روش‌های آماری، برای توسعه این الگوریتم‌ها استفاده شده است. در صورت عدم دسترسی به داده‌های ورودی، شناسایی فیلتر مشاهده‌گر/کالمن^{۳۶} (OKID)، NExT و کاهش تصادفی^{۳۷} (RD) متداول‌ترین روش‌های TD برای استخراج FRF هستند. سیگنال ورودی را می‌توان با استفاده از یک تابع خود-همبستگی^{۳۸} یا همبستگی متقابل^{۳۹} تخمین زد.

تکنیک‌های TD به این واقعیت متکی هستند که می‌توان از طریق پاسخ تاریخیچه زمانی یک سیستم دینامیکی، خواص ارتعاشی سازه‌ها را به دست آورد. از این رو، پاسخ استخراج شده در حالت سالم با پاسخی که در وضعیت آسیب دیده دارد متفاوت است. شکل (۲-۲) معماری شماتیک روش‌های TD را نشان می‌دهد که برای شناسایی سیستم‌های دینامیکی استفاده شده است. تکنیک‌های مختلف عددی، به عنوان مثال، SVD، FFT، حداقل مربعات (LS)، تجزیه QR، تجزیه بردار ویژه^{۴۰} (EVD)، و روش‌های آماری، برای توسعه این الگوریتم‌ها استفاده شده است. در صورت عدم دسترسی به داده‌های ورودی، شناسایی فیلتر مشاهده‌گر/کالمن^{۴۱} (OKID)، NExT و کاهش تصادفی^{۴۲} (RD) متداول‌ترین روش‌های TD برای استخراج FRF هستند. سیگنال ورودی را می‌توان با استفاده از یک تابع خود-همبستگی^{۴۳} یا همبستگی متقابل^{۴۴} تخمین زد [۳۶].



شکل ۲- مدل شماتیک برای برخی روش‌های شناسایی مودال حوزه زمان خروجی-محور

³⁵ Eigen-vector decomposition

³⁶ Observer/Kalman filter identification

³⁷ random decrement

³⁸ auto-correlation

³⁹ cross-correlation

⁴⁰ Eigen-vector decomposition

⁴¹ Observer/Kalman filter identification

⁴² random decrement

⁴³ auto-correlation

⁴⁴ cross-correlation

تکنیک‌های TD در پایش سلامت سازه‌های عمرانی را می‌توان در سه دسته شناخته شده طبقه بندی کرد که عبارتند از:

۱. روش‌های NExT،

۲. روش‌های ARMA، و

۳. روش‌های SSI.

این روش‌ها برای شناسایی پارامترهای سیستم در سازه‌های مهندسی عمران مورد پذیرش قرار گرفته‌اند. برای این روش‌ها، مدل‌های خروجی-تنها نیز بسط داده شده‌اند. روش‌های NExT و SSI-COV به طور کلی غیرمستقیم هستند اما روش‌های SSI-DATA و ARMA دارای ماهیت مستقیم هستند، همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. روش‌های TD در مقایسه با روش‌های تحلیل مودال، به دلیل استفاده مستقیم از سیگنال‌های پاسخ، برای پایش مداوم مناسب ترند. علاوه بر این، اطلاعات استخراج شده با استفاده از روش‌های TD کامل‌تر از روش‌های FD هستند، به ویژه هنگامی که تعداد زیادی مود یا بازه‌های فرکانسی بزرگی وجود دارد. توضیحات بیشتر در مورد روش‌های شناسایی NExT و ARMA در زیر بخش‌های زیر ارائه شده است.

روش‌های SSI در یک بخش جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۶- روش‌های تکنیک تحریک طبیعی (NExT)

جیمز و همکاران [۳۷] برای اولین بار NExT را برای تحلیل مودال سیستم‌های در معرض عدم اطمینان نوین ارائه دادند. ایده اصلی در پشت طرح NExT این است که همبستگی متقابل سیگنال پاسخ ناشی از تحریک تصادفی را می‌توان به صورت جمع سینوس‌های با دامنه کاهشی در نظر گرفت. مدل نمایی مختلط^{۴۵} (CE) بر اساس روش پرونی^{۴۶} ساخته شده است و اولین روش تخمین مودال است که به صورت تک ورودی تک ورودی^{۴۷} (SISO) استفاده می‌شود. الگوریتم CE، منحنی‌های پاسخ ضربه تحلیلی را روی داده‌های پاسخ ضربه آزمایشی متناسب می‌کند [۳]. الگوریتم CE با استفاده از روش LS به نسخه چند خروجی تک ورودی^{۴۸} (SIMO) گسترش یافته است. این الگوریتم، با نام الگوریتم کمترین مربعات نمایی^{۴۹} (LSCE) شناخته می‌شود. نمایی مختلط چند مرجعی^{۵۰} (PRCE)، بسط LSCE به فرم شناسایی چند خروجی چند ورودی^{۵۱} (MIMO) از پارامترهای مودال است [۱۷].

یوانگ و همکاران [۳۸] ابتدا روش الگوریتم تحقق سیستم ویژه^{۵۲} (ERA) را برای شناسایی مودال در زمینه مهندسی هوافضا پیشنهاد دادند. این روش برای استخراج ضرایب یک سیستم دینامیکی، از فرم‌های فضای حالت به همراه پارامترهای مارکوف استفاده می‌کند. یوانگ و همکاران [۳۹] با استفاده از همبستگی داده‌ها (ERA / DC)، ERA بسط یافته را معرفی کردند. در روش پیشنهادی، رویکرد مبتنی بر تحقق ERA با شایستگی همبستگی فضای حالت^{۵۳} ترکیب می‌شود. پارامترهای مودال استخراج شده در این روش حساسیت کمتری نسبت به تخریب نوین دارند و در معرض خطای بایاس کمتری هستند.

⁴⁵ Complex exponential

⁴⁶ Prony's method

⁴⁷ single-input single-output

⁴⁸ single-input multiple-output

⁴⁹ least-squares complex exponential

⁵⁰ polyreference complex exponential

⁵¹ multiple-input multiple-output

⁵² Eigensystem realization algorithm

⁵³ state-space correlation fit

حوزه زمان ابراهیم^{۵۴} (ITD) از اولین الگوریتم‌های SIMO برای برآورد مقادیر ویژه و بردارهای ویژه در یک گام بود. گزارش شده است که روش ITD برای سیستم‌های با میرایی سنگین یا سیستم‌هایی با فرکانس طبیعی پایین مناسب نیست [۴۱]. حوزه زمانی ابراهیم چندگانه^{۵۵} (MRITD) یک بسط پیشرفته از ITD برای تحلیل مودال MIMO است. این روش یک رویکرد تجزیه مودال با وضوح بالا است که بر اساس تحلیل مقدار ویژه بنا شده است. OKID در اصل همراه و همزاد ERA بود و با عنوان OKID-ERA نشان داده می‌شود. این روش ایجاد یک ناظر LS غیر بازگشتی را برای مرتبط ساختن داده‌های ورودی و خروجی پیشنهاد می‌کند. در سال‌های اخیر، OKID به عنوان یک کلاس جداگانه از الگوریتم‌ها معرفی شده است که می‌تواند به صورت ترکیبی با سایر مدل‌ها ترکیب شود. روش‌های خروجی محور ERA-OKID و شناسایی خروجی-محور مشاهده‌گر/فیلتر کالمن^{۵۶} (O3KID) دو نسخه اخیر از OKID برای تحلیل مودال تجربی سازه‌های مهندسی عمران هستند. روش RD یک روش TD برای تحلیل مودال است که از طریق تبدیل پاسخ‌های سیستم به توابع کاهش تصادفی کار می‌کند [۱۷]. توابع RD پاسخ‌های ارتعاش آزاد یک سیستم در نظر گرفته می‌شوند. با فرض یک فرآیند تصادفی پایستار گوسی با میانگین صفر، توابع RD با توابع همبستگی متناسب هستند. روش پیشنهادی از مفهوم میانگین گیری برای استخراج توشیح کاهش تصادفی^{۵۷} (RDS) سازه‌ها استفاده می‌کند. روش‌های NEXt برای مطمئن برای شناسایی سازه‌های مهندسی عمران فراهم می‌کند. این روش‌ها بر روی چندین سازه دنیای واقعی پیاده‌سازی شده‌اند. با این حال، نتایج بدست آمده برای نسبت‌های میرایی نسبت به نتایجی که با هم‌تایان دیگر مانند الگوریتم‌های SSI و FDD بدست آمده‌اند، دارای دقت کمتری هستند [۵۵].

۷- روش‌های میانگین متحرک خود بازگشتی (ARMA)

روش‌های مبتنی بر میانگین متحرک (ARMA) نسبت به روش‌های آماری محض ارجحیت دارند. هدف بخش رگرسیون خودکار (AR) مدل سازی تابع خطی تاریخچه زمان و هدف میانگین متحرک (MA) تعیین میانگین متحرک سری زمانی است [۴۳]. ساختار کلی مدل‌های مبتنی بر AR بستگی به این دارد که کدام چند جمله‌ای $A(q)$ ، $B(q)$ ، $C(q)$ ، $D(q)$ و $F(q)$ در مدل استفاده شود. معادله (۱-۲) ساختار کلی مدل‌های مبتنی بر AR را نشان می‌دهد.

ساختار کلی مدل‌های مبتنی بر AR بستگی به این دارد که کدام چند جمله‌ای $A(q)$ ، $B(q)$ ، $C(q)$ ، $D(q)$ و $F(q)$ در مدل استفاده شود. معادله (۱-۲) ساختار کلی مدل‌های مبتنی بر AR را نشان می‌دهد.

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t)$$

جدول ۱ رایج ترین مدل‌های ARMA را نشان می‌دهد که در شناسایی سیستم سازه‌های مهندسی عمران استفاده شده است.

جدول ۱- مدل‌های رایج میانگین متحرک خود بازگشتی به همراه چندجمله‌ای‌های مربوطه [۱۷]

نام مدل	چندجمله‌ای‌های مورد استفاده
ARX	$A(q), B(q)$
Auto_Regressive Moving Average with eXogenous variable (ARMAX)	$A(q), B(q), C(q)$
ARMA	$A(q), C(q)$
Auto_Regressive Auto_Regressive with eXogenous input (ARARX)	$A(q), B(q), D(q)$

⁵⁴ Ibrahim time-domain

⁵⁵ multiple references Ibrahim time-domain

⁵⁶ output-only observer/Kalman filter identification

⁵⁷ random decrement signatures

چندین مطالعه با استفاده از روش‌های مبتنی بر رگرسیون خودکار برای شناسایی آسیب در سازه‌ها انجام شده است.

یک مروری کامل از روش‌های کاربردی ARMA در SHM و تحلیل مودال با تمرکز بر روش‌های آزمون، ویژگی‌های آسیب و تکنیک‌های تشخیص الگوی درگیر برای سازه‌هایی از یک مدل بسیار ساده‌ی سیستم جرم و فنر گرفته تا سازه‌های دنیای واقعی با جزئیات کاملتر، در [۱۷] ارائه شده است. در بسیاری از موارد، ضرایب الگوریتم تلفیقی مبتنی بر AR مستقیماً به عنوان خصیصه‌های آسیب استفاده می‌شوند. برای تحلیل مودال، از پارامترهای سیستم استخراج شده برای ارزیابی رفتار دینامیکی در یک سازه استفاده می‌شود. با استفاده از پارامترهای مودال به عنوان خصیصه‌های آسیب، می‌توان تغییر پارامترهای استخراج شده برای حالت مرجع و واقعی را برای ارزیابی شرایط یک سازه در نظر گرفت. نتایج بدست آمده برای پارامترهای مودال در مقایسه با سایر روش‌های TD قوی تر هستند. با این حال، پراکندگی بالاتر در نسبت‌های میرایی مشاهده می‌شود و خطای گزارش شده بسیار بیشتر از سایر روش‌های TD، مانند SSI است.

۸- روش‌های شناسایی سیستم زیر فضایی (SSI)

روش‌های پارامتریک TD یک چارچوب ریاضی قدرتمند و تطبیق پذیر برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های دینامیکی ارائه می‌دهند. در میان تمام روش‌های شناسایی سیستم، تکنیک‌های مبتنی بر زیرفضا، قابل توجه‌ترین دستاورد در زمینه کنترل و شناسایی سیستم هستند. در همین حال، بسیاری از مطالعات تحقیقاتی در مورد شناسایی سیستم در سال‌های اخیر بر روی روش‌های زیرفضا متمرکز شده است. رویکرد زیر فضایی یک روش مناسب برای تخمین مدل فضای حالت یک سیستم دینامیکی است. SSI یک الگوریتم قابل اعتماد از نظر عددی است و مدل‌های با کیفیت خوب را تخمین می‌زند، مخصوصاً برای سیستم‌های چند متغیره [۱۷]. فرم فضای حالت معادله حرکت را می‌توان بصورت معادله زیر نوشت:

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + v(t) \end{cases}$$

که در آن $x(t+1)$ ، $u(t+1)$ و $x(t)$ و $u(t)$ به ترتیب اسکالرها و بردارهای حالت در لحظات t و $t+1$ هستند. $y(t)$ بردار خروجی است، A ، B ، C و D به ترتیب ماتریس‌های سیستم، کنترل، خروجی و بازخورد هستند. $w(t)$ و $v(t)$ به ترتیب نویز اندازه‌گیری و فرآیند هستند. بیشتر الگوریتم‌های زیرفضایی که در ادبیات گزارش شده‌اند ارتباط نزدیکی با روش‌های مبتنی بر LS دارند. در مرحله اول، یک برآورد مورب^{۵۸} محاسبه می‌شود و برای حدس مرتبه سیستم و توالی حالت، قبل و بعد از آن در ماتریس وزن مناسب ضرب می‌شود. در مرحله دوم، به منظور از بین بردن وابستگی الگوریتم SSI به خروجی آینده از یک برآورد هندسی سازگار استفاده شده است. در مرحله سوم، برای تحریک ماتریس‌های A و C ، LS به کار گرفته می‌شود. سرانجام، برای حدس مدل سیستم از پیش‌بینی گر کالمن با بهره K کالمن در مدل فضای حالت استفاده می‌شود. به یک معنای عمومی، بیشترین روش‌های تحقیق در زمینه زیرفضایی را می‌توان در سه دسته اصلی زیر طبقه بندی کرد:

روش‌های CVA؛

• روش‌های MOESP؛ و

• روش‌های N4SID.

لاریمور و والاس [۴۵] روش‌های CVA را پیشنهاد کردند که براساس پارامترهای مارکوف برای شناسایی سیستم TD است. این مطالعه با همان اصول فعالیت‌های پیشگام آکایکه [۴۶] در یک زمینه آماری ادامه دارد. SVD به عنوان ابزاری برای استخراج متغیرهای کانونی درگیر استفاده می‌شود. ورهگن [۹۰] روش MOESP را برای شناسایی مدل فضای حالت چند متغیره از داده‌های ورودی و خروجی نویزدار ارائه داد. الگوریتم زیر فضایی MOESP برای دو ویژگی شناخته شده است، ویژگی‌هایی از ماتریس هنکل با اندازه کاهش یافته و ماتریس قابل مشاهده. این روش برای سیستم‌های تصادفی قابل استفاده نبود. ون اورشی و دی مور [۹۱] طرح‌های زیر فضایی پیشنهادی را

⁵⁸ Oblique projection

با یک رویکرد عملگرا یکپارچه کردند که از آن با عنوان N4SID یاد می‌شود. این الگوریتم به دلیل استفاده از تجزیه SVD و QR از نظر تحلیلی قوی و قابل اعتماد بود. براساس روش، الگوریتم زیرفضا با داده‌های تاریخیچه زمانی اندازه‌گیری شده سروکار دارد که می‌توان آنها را به دو دسته SSI-DATA و SSI-COV تقسیم کرد. در دو زیر بخش بعدی، توزیع مقالات الگوریتم‌های SSI-DATA و SSI-COV در SHM سازه‌های مهندسی عمران به طور خلاصه بیان شده است.

۹- توزیع مقالات رویکرد SSI-DATA در تشخیص خرابی

در مجموع ۳۱ مطالعه از روش SSI-DATA به تنهایی یا در ترکیب با روش‌های دیگر در سازه‌های آزمایشی مختلف مانند تیرها و قاب‌های ۲ بعدی، ساختمان‌ها و سازه‌های قاب سه بعدی و پل‌ها و سایر سازه‌ها استفاده شده است [۱۷].

WSNs نویدبخش استفاده از فناوری آینده هستند و اکنون برای SHM سازه‌های مهندسی عمران استفاده می‌شوند. برخی از مطالعات در رابطه با استفاده از الگوریتم SSI-DATA با محدودیت امکانات WSNs برای انتقال داده و ایجاد شبکه‌های مترکم از سنسورهای بی‌سیم کم هزینه برای زیرساخت‌های پیچیده [۱۷] انجام شده است. برای مقابله با محدودیت‌های امکانات WSN برای انتقال داده‌ها، چو و همکاران [۶۶] الگوریتم غیرمترکز SSI-DATA پیاده‌سازی شده در شبکه‌های WSN مبتنی بر Imote2 را ارائه دادند. از آزمون آزمایشگاهی ساختمان برشی پنج طبقه به عنوان آزمون تأیید استفاده شد. نتایج شناسایی به دست آمده از تکنیک‌های SSI غیرمترکز و مترکز نزدیک به یکدیگر بود. کوراتا و همکاران [۴۷] سیستم پایش سلامت سازه‌ای زیرساخت‌های بی‌سیم جدید فعال شده با اینترنت را برای زیرساخت‌های عمرانی بزرگ-مقیاس توسعه دادند. برای بررسی کاربرد چارچوب پیشنهادی، یک سیستم پایش بی‌سیم در پل جدید کارونز نصب شد. نتایج به دست آمده کاربرد پایدار و قابل اعتماد سیستم پیشنهادی را روی تعداد زیادی گره تأیید می‌کند. کیم و لینچ [۴۸] الگوریتم غیرمستقیم SSI-DATA را بر اساس پارامترهای مارکوف که برای شبکه‌های غیرمترکز طرح‌ریزی شده بود، معرفی کردند. استراتژی پیشنهادی با آزمایش دینامیکی بالکن کنسول‌دار در یک ساختمان تاریخی تأیید می‌شود. خصوصیات سیستم با دقت بالایی شناسایی شد.

به روزرسانی مدل FE ابزاری قدرتمند در SHM است تا اطمینان حاصل شود که تحلیل FE رفتار واقعی سازه‌ها را منعکس می‌کند. چندین تحقیق در مورد SSI-DATA بر محدودیت عملی به روزرسانی FE و تأیید اعتبار یک مدل FE قابل اعتماد مترکز شده است [۴۹-۵۱]. به منظور اعتبارسنجی مدل‌های FE با استفاده از روش‌های شناسایی، نودری و همکاران [۴۹] یک چارچوب به روزرسانی مدل FE را برای شناسایی آسیب در یک ساختمان ۱۰ طبقه بتن آرمه پیاده‌سازی کردند. با توجه به محدودیت‌های پاسخ‌های آزمایشگاهی و خطاهای اندازه‌گیری، ممکن است بهینه‌سازی در مسئله به روزرسانی FE به چندین جواب در دامنه جستجو منتج شود. برای مقابله با این مشکل، شبیر و اومنزتر [۵۰] از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۵۹} (PSO) با تکنیک نیچه متوالی^{۶۰} (SNT) برای به روزرسانی مدل FE یک پل کابلی عابر پیاده استفاده کردند. نشان داده شد که روش پیشنهادی اطمینان بیشتری برای به روزرسانی مدل می‌دهد. به منظور آگاهی از رفتار دینامیکی ساختمان‌های پیچیده‌ای که در معرض زلزله‌های نزدیک به گسل قرار گرفته‌اند، فوتی و همکاران [۵۱] برای شناسایی پارامترهای مودال دو ساختمان به منظور به روزرسانی مدل FE از سازه‌های آسیب دیده، از روش‌های خروجی-تنهای EFDD و SSI-DATA استفاده نمودند. آزمایش بر روی یک ساختمان پیچیده انجام شد که در اثر زلزله به شدت آسیب دیده بود. پس از یک سری اصلاحات در مدل، توافق رضایت بخشی حاصل شد.

⁵⁹ particle swarm optimization

⁶⁰ sequential Niche technique

همچنین تحقیق برای بهبود عملکرد SSI-DATA کلاسیک جهت استفاده در SHM زمان پیوسته و افزایش کارایی انجام شده است. به منظور ردیابی وضعیت سازه‌های فعلی با استفاده از پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان، چن و لو [۵۲] دو الگوریتم بازگشتی SSI-DATA را با استفاده از الگوریتم نوسازی بونافید LQ^{۶۱} و الگوریتم لم معکوس^{۶۲} توسعه دادند. برای تأیید روشهای پیشنهادی از دو مجموعه داده پاسخ لرزه‌ای ساختمان استفاده شده است: یک سازه فولادی سه طبقه و یک ساختمان دبستان بتن آرمه چهار طبقه. نتایج نشان می‌دهد که معکوس شناسایی سیستم زیر فضا با ضریب فراموشی می‌تواند تخمین دقیق‌تری از تغییر سختی را فراهم کند. لی و همکاران [۵۳] برای شناسایی نرمی سازه‌ای با استفاده از ضرایب مقیاس مودال، یک روش شناسایی سیستم زیر فضایی مبتنی بر مرجع^{۶۳} ایجاد کردند. یک مدل عددی از یک پل RC و یک تیر در مقیاس آزمایشگاهی با شرایط تکیه گاهی ساده، برای نشان دادن توانایی روش پیشنهادی ارائه شده است. نمونه‌ها، توانایی روش پیشنهادی را با موفقیت نشان دادند. دای و همکاران [۵۴] یک روش شناسایی سیستم زیر فضایی اصلاح شده برای تحلیل مودال سازه‌های تحت تحریک هارمونیک با فرکانس‌های نزدیک به فرکانس‌های طبیعی سازه ارائه داده‌اند. در این روش، ماتریس هانکل با افزودن بردارهای هارمونیک اصلاح شد. کاربرد این الگوریتم در مدل عددی سیستم دینامیکی جرمی متمرکز و برج توربین بادی در مقیاس ابزاری در حال سرویس دهی، تخمین دقیق پارامترهای مودال را نتیجه داد. ژانگ و همکاران [۵۵] یک ماتریس CH را به عنوان جایگزینی برای ماتریس هنکل معرفی کردند و یک عملگر برآمدگر^{۶۴} را جایگزین تجزیه QR کلاسیک کردند. برای تأیید روش از یک مدل عددی هفت درجه آزادی و آزمون آزمایشی پل چائوتیانمن استفاده شد. بهره‌وری محاسباتی بهبود یافته بدون از دست رفتن کیفیت و جداسازی مودهای جعلی از مزایای بدست آمده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی است.

۱۰- توزیع مقالات رویکرد SSI-COV در تشخیص خرابی

جدول (۲-۳) مطالعات با تمرکز بر روی روش SSI-COV را نشان می‌دهد. از داده‌های ارائه شده در این جدول، در مجموع ۲۵ مطالعه از SSI-COV در سازه‌های مختلف از جمله تیرها و قاب‌های دو بعدی، سازه‌ها و ساختمان‌های با قاب‌های سه بعدی و پل‌ها استفاده شده است.

به منظور بهبود قابلیت شناسایی مودهای ضعیف تحریک شده، ژانگ و همکاران [۸۱] شاخص انرژی مولفه‌ای^{۶۵} (CEI) و یک نمودار پایداری جایگزین را برای شناسایی مودهای جعلی و فیزیکی معرفی کرد. یک مدل شبیه سازی شده ۷ درجه آزادی جرم و فنر با میرایی و یک مدل آزمایشگاهی سازه قاب فلزی که تحت بار باد قرار گرفته است برای تأیید طرح پیشنهادی استفاده شد. عملکرد خوب به ویژه برای داده‌های اندازه گیری شده با SNR کم مشاهده گردید. به منظور شناسایی تغییرات سازه‌ای در حضور عوامل متغیر محیطی، کاردن و براونجن [۸۲] یک الگوریتم خوشه بندی فازی^{۶۶} را برای استخراج پارامترهای مودال از قطب‌های واقعی و عددی ارائه دادند. داده‌ها از Z24 Bridge و ساختمان اداری Republic Plaza در سنگاپور برای اعتبارسنجی آزمایشگاهی روش مربوطه، مورد استفاده قرار گرفت. خسارت وارده به پل Z24 با استفاده از روش پیشنهادی با موفقیت شناسایی شد. تغییرات در مودهای ساختمان اداری Plaza در سنگاپور نیز به وضوح ثبت و ضبط شد.

چندین مطالعه در مورد SSI-COV با هدف بهبود عملکرد ذاتی الگوریتم SSI-COV در مواجهه با اثرات زیست محیطی و عملیاتی طی فرآیند شناسایی بود. داهلر و همکاران [۸۳] یک شناسایی آسیب SSI-COV سریع و کارآمد ارائه نمودند که نسبت به تغییرات کوواریانس تحریک مقاوم است. سه کاربرد عددی ارائه شد. گزارش شده است که رویکرد جدید می‌تواند سطوح مختلف خسارت را بهتر تشخیص و تفکیک کند.

⁶¹ BonaFide LQ

⁶² inversion lemma

⁶³ reference-based subspace system identification technique

⁶⁴ projection operator

⁶⁵ component energy index

⁶⁶ fuzzy clustering algorithm

چندین تحقیق در رابطه با اصلاح روند تشخیص آسیب روی SSI-COV با معرفی یک ویژگی حساس به آسیب و عدم حساسیت به نوی وجود دارد. برای تمییز دادن تغییرات در پارامترهای مودال ناشی از خسارت ناشی از عوامل محیطی رخ داده است با سویل و همکاران [۸۴] یک الگوریتم تشخیص آسیب با استفاده از باقیمانده فضای پوچ^{۶۷}، آزمون χ^2 و رد مزاحمت آماری^{۶۸} طراحی کردند. یک تیر عمودی ساخته شده از فولاد و آلومینیوم برای بررسی طرح ارائه شده تحت دمای کنترل شده محیط آزمایش شد. ارتباط الگوریتم ارائه شده با استفاده از یک سازه آزمون در مقیاس آزمایشگاهی نشان داده شد. بالمس و همکاران [۸۵] استفاده از باقیمانده زیر فضایی به عنوان ویژگی آسیب و آزمایشات χ^2 پیشنهاد دادند تا اثر نویز از پارامترهای مودال تخمین زده شده، تفکیک گردند. برای تأیید روش پیشنهادی از یک عرشه پل شبیه سازی شده با تغییرات دمای کنترل شده استفاده شده است. کارایی روش در مدل شبیه سازی برای موارد مختلف دما تأیید شد. ژو و همکاران [۸۶] از یک باقیمانده شناسایی سیستم زیر فضا و آزمونهای کلی χ^2 برای تشخیص آسیب استفاده کردند. یک پل آزمایشگاهی مقیاس کامل با شبیه سازی عددی تأیید شد. گزارش شده است که آسیب در برج در همان زمان شناسایی شده است. به منظور در نظر گرفتن غیرخطی بودن سازه ها برای شناسایی خصوصیات مودال، سان و همکاران [۸۷] یک فاصله زیرفضایی غیرخطی را به عنوان ویژگی آسیب تعریف کردند. شاخص پیشنهادی با داده های به دست آمده از یک سازه ساندویچی ویسکوالاستیک^{۶۹} (VSS) که در معرض سالخورگی تسریع شده قرار داشت، تأیید شد. نشان داده شده است که شاخص طراحی شده برای ارزیابی وضعیت سلامت سازه بسیار موثر است. رن و همکاران [۸۸] توابع تصمیم گیری فاصله ماهالانوبیس^{۷۰} و اقلیدسی را برای شناسایی الگوی شاخص آسیب پیشنهادی اتخاذ کردند. برای تأیید روش پیشنهادی از یک سیگنال عددی و دو مدل تیر دینامیکی FE شبیه سازی شده استفاده شد. این روش قادر به تعیین محل آسیب در سازه های تیر FE بود.

۱۱- توزیع مقالات رویکردهای شناسایی سیستم زیر فضایی ترکیبی

جدول (۴-۲) نشان می دهد که از تکنیک های شناسایی سیستم زیرفضای ترکیبی استفاده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول، در مجموع ۱۳ مطالعه از الگوریتم های شناسایی سیستم فضایی ترکیبی برای تحلیل سازه های مختلف آزمون استفاده کرده اند [۱۷]. اگرچه الگوریتم شناسایی سیستم زیر فضایی در اصل یک رویکرد شناسایی TD است، با این حال برخی از محققان نسخه FD الگوریتم شناسایی سیستم زیرفضایی ترکیبی را برای شناسایی پارامترهای ارتعاش ارائه کرده اند [۱۰۴-۱۰۵]. به منظور پاسخگویی به چالش های تفسیر مرتبط با شناسایی سیستم به دست آمده از داده های سنسور اندازه گیری، اورگسا [۱۰۵] دو روش شناسایی سیستم FD را با اتخاذ روش های شناسایی سیستم زیر فضایی McKelvey و ERA ارائه داد. برای تأیید الگوریتم های پیشنهادی از مدل FE یک سازه صفحه استفاده شد. این روش ها با دقت بالا قادر به پیش بینی فرکانس های طبیعی و نسبت میرایی بودند. آکچای [۱۰۴] با محاسبه حداقل تحقق نمونه های طیف توان و یک ضریب طیفی کانونی^{۷۱}، الگوریتم زیر فضایی دو مرحله ای را پیشنهاد کرد. یک مثال عددی برای نشان دادن عملکرد الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. اشکال جدی در مورد عملکرد قابل اعتماد الگوریتم، مربوط به رکوردهای داده کوتاه و داده های خراب است. چندین مطالعه مربوط به بهبود عملکرد الگوریتم شناسایی سیستم زیرفضای ترکیبی [۲۳، ۱۰۶-۱۰۷] برای مقابله با این مشکلات است. کیم و لینچ [۲۳] یک چارچوب نظری برای استخراج پارامترهای فیزیکی واقعی سازه ها با استفاده از یک مدل فیزیکی و یک مدل ریاضی مبتنی بر داده ارائه دادند. مدل عددی یک سازه برشی چند درجه آزادی و آزمون تأیید آزمایشگاهی یک سازه قاب فولادی شش طبقه که تحت تحریک پایه قرار دارد مورد آزمایش قرار گرفت. چارچوب پیشنهادی جعبه خاکستری عملکرد امیدوار کننده ای را برای SHM سازه های مهندسی عمران که تحت تحریک پایه قرار دارند نشان داده است. گاندینو و دیگران [۱۰۶] برای شناسایی مودال پارامترها، فرمول بندی چند متغیره SSI-COV ورودی و خروجی ایجاد کرد. به منظور اعتبارسنجی، از یک مثال عددی ۱۵ درجه آزادی و یک برنامه آزمایشگاهی متشکل از یک سازه فلزی با دیواره نازک استفاده شده است. نتایج بدست آمده مشابه نتایج بدست آمده از روش data-driven بود. ورهگن و هانسون [۱۰۷]، یک

⁶⁷ null space residual

⁶⁸ statistical nuisance rejection

⁶⁹ viscoelastic sandwich structure

⁷⁰ Mahalanobis

⁷¹ canonical spectral factor

N2SID ورودی-خروجی data-driven را با استفاده از بهینه سازی نرُم هسته‌ای محدب^{۷۲} معرفی کردند. فرمول‌بندی‌های ریاضی برای استخراج نظریه الگوریتم N2SID ارائه شده‌اند. توالی برای استخراج پارامترهای سیستم از N2SID به وضوح نشان داده شد.

۱۲- مقایسه الگوریتم‌های شناسایی سیستم

۱-۱۲ مقایسه روشهای شناسایی SSI

تعدادی روش شناسایی سیستم زیر فضایی برای شناسایی مودال و VDD سازه‌های عمرانی استفاده شده است. این روش‌ها به صورت الگوریتم‌های خروجی-تنها یا ورودی-خروجی هستند. الگوریتم‌های خروجی-تنها برای تحلیل ارتعاشات سازه‌های تحت تحریک محیطی استفاده می‌شوند. تکنیک‌های SSI-COV و SSI-DATA دو الگوریتم اصلی شناسایی سیستم زیرفضایی خروجی-تنها هستند. الگوریتم SSI-COV برای کاهش ابعاد داده‌های اندازه‌گیری از کوواریانس تاریخچه زمانی خام استفاده می‌کند. کاهش داده‌ها در SSI-DATA با استفاده از برآمدگی QR ماتریس هانکل انجام می‌شود. هر دو الگوریتم شناسایی سیستم زیر فضایی از SVD برای تعیین مرتبه یک سیستم دینامیکی استفاده می‌کنند. محاسبه ماتریس کوواریانس در مقایسه با محاسبه تجزیه QR، به مراتب سریعتر است. با این حال، گزارش شده است که هر دو الگوریتم برای برآورد پارامترهای مودال عملکرد خوبی دارند در حالیکه انتظار می‌رود SSI-DATA به دلیل اجتناب از مربع سازی داده‌های اندازه‌گیری، از نظر تئوری قوی‌تر باشد. الگوریتم شناسایی سیستم زیرفضای ترکیبی برای شناسایی پارامترهای سیستم با داده‌های ورودی معلوم استفاده می‌شود. سیستم شناسایی زیرفضایی ورودی-خروجی در مقایسه با روش خروجی-تنها نتایج قابل اطمینان‌تری بدست می‌دهد. چندین الگوریتم بر اساس SSI-COV، SSI-DATA و روش ترکیبی برای بهبود عملکرد شناسایی سیستم زیر فضایی جهت کاربرد در SHM معرفی شده است. با تغییر در ساختار الگوریتم‌های اساسی یا با افزودن مراحل پیش‌پردازش یا پس‌پردازش به الگوریتم شناسایی سیستم زیر فضایی اصلی، عملکرد آن افزایش می‌یابد. در برخی موارد، الگوریتم شناسایی سیستم زیرفضا با سایر روش‌های تحلیلی ادغام شده است تا عملکرد بالاتری داشته باشد.

۲-۱۲ مقایسه بین SSI و سایر الگوریتم‌های شناسایی سیستم

در سالهای اخیر، مطالعات زیادی برای مقایسه عملکرد شناسایی سیستم زیر فضایی با سایر روشهای حوزه زمان (TD)، حوزه فرکانس (FD) و حوزه فرکانس زمان (TFD) انجام شده است. این زیر بخش، به بررسی مطالعات با تمرکز بر مزایا و معایب شناسایی سیستم زیر فضایی می‌پردازد. رانیثری و همکاران [۱۱۴] عملکرد SSI-COV و FDD را برای شناسایی مودال سازه‌های تحت تحریک محیطی ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که شناسایی سیستم زیر فضایی انتخاب مناسب‌تری برای شناسایی فرکانس‌های مودال با فاصله نزدیک است، با این حال اثر همبست شدن نتیجه‌های غیرقابل اطمینان را برای جفت دوم فرکانس‌های طبیعی با فاصله نزدیک به همراه دارد. علاوه بر این، شناسایی سیستم زیر فضایی دارای این نقص است که به قضاوت انسان برای تعیین مرتبه سیستم نیازمند است.

ژرالدو و همکاران [۱۱۵] مقایسه‌ای تحلیلی بین الگوریتم تحقق سیستم ویژه^{۷۳} (ERA)، شناسایی سیستم زیر فضا و تکنیک‌های میانگین متحرک خود رگرسیون^{۷۴} (ARMA) برای شناسایی حالت سازه‌های تحت تحریک محیطی ارائه داده‌اند. مشخص شده است که شناسایی سیستم زیر فضایی دقیقترین نتایج را برای آزمونهای تحلیلی و تجربی ارائه داده است. مگالها و همکاران [۱۱۶] با استفاده از داده‌های میدانی بدست آمده از یک پل قوسی بتنی، الگوریتم‌های SSI-COV و حداقل مربعات فرکانس مختلط چندمرجعی^{۷۵} (p-LSCF) را مقایسه کردند. هم SSI-COV و هم p-LSCF نتیجه خوبی برای شکل‌های مودی و فرکانس طبیعی می‌دهند. با این حال، برای تغییرات روزانه نسبت میرایی، p-LSCF نتایج بهتری به دست می‌دهند. معاونی و همکاران [۱۱۷] برای شناسایی مودال یک سازه مقیاس کامل بر روی میز لرزه، از SSI-DATA، روش تحریک طبیعی چند مرجعی^{۷۶} به همراه الگوریتم تحقق مقدار ویژه سیستم (MNExT - ERA) [۱۱۸]، تجزیه دامنه

⁷² convex nuclear norm optimization

⁷³ eigensystem realization algorithm

⁷⁴ auto-regressive moving average

⁷⁵ poly-reference least squares complex frequency

⁷⁶ multiple-reference natural excitation technique

فرکانس توسعه یافته^{۷۷} (EFDD) [۱۱۹]، شناسایی زیرفضای تصادفی/تعیینی^{۷۸} (DSI) [۱۲۰]، شناسایی مشاهده گر/فیلتر کالمن^{۷۹} (OKID) ERA- [۱۲۱] و الگوریتم تحقق عمومی^{۸۰} (GRA) [۱۲۲] استفاده کردند. اشکال مودی شناسایی شده توسط الگوریتم شناسایی سیستم زیر فضا، دقیق ترین بود. نسبت میرایی اندازه گیری شده برای SSI-DATA و ERA-MNeXT بالاتر از موارد بدست آمده از EFDD بود.

وانگ و همکاران [۱۲۳] عملکرد شناسایی سیستم زیرفضایی، روشهای ERA، ARMA و حوزه زمان ابراهیم^{۸۱} (ITD) را مطالعه کردند. برای شناسایی مودال در یک مدل عددی با استفاده از شناسایی سیستم زیر فضایی نتیجه پایدارتری گزارش شد. با این حال، ERA برای تست میدانی عملکرد بهتری دارد. کیم و لینچ [۱۲۴] روشهای شناسایی سیستم زیر فضایی و روشهای FDD را مطالعه کردند. برای FDD با داده‌های اندازه‌گیری خروجی-تنها مشکل وضوح گزارش شد. کانها و همکاران [۱۲۵] نتایج شناسایی مودال SSI-COV و FDD را مقایسه کردند. نتایج به دست آمده برای هر دو روش بیش از حد مشابه بود. لیو و همکاران [۱۲۶] تحلیل مودال پل Lupu در شانگهای را با استفاده از سیستم شناسایی زیر فضایی، ERA، PolyMAX، روش طیف توان چند جمله‌ای^{۸۲} (PPM)، طیف توان روش تبدیل z^{۸۳} (PZM)، EFDD، تجزیه حوزه فرکانس فضایی^{۸۴} (FSDD) و تبدیل موجک^{۸۵} (WT) تحت تحریک محیطی پیاده سازی نمودند. PPM، PolyMAX، PZM، EFDD و FSDD در FD هستند. شناسایی سیستم زیر فضایی و ERA روشهای TD هستند که در شناسایی مودال سازه‌ها استفاده می‌شوند در حالی که WT در حوزه زمان/فرکانس است. شناسایی سیستم زیرفضایی دقیق ترین نتایج را برای پارامترهای مودال ارائه می‌دهد، اما بار محاسباتی الگوریتم قابل توجه است.

سراولو و ایباتی [۱۲۷] یک مطالعه مقایسه‌ای بین ERA اعمال شده به AR، RDS و SSI-DATA انجام دادند. تمامی روش‌ها در شناسایی مودال تحت شرایط محیطی، به اندازه کافی قوی بودند، اما شناسایی سیستم زیرفضایی عملکرد برتر را نشان داد. به طور کلی، مقایسه نشان داد که الگوریتم شناسایی سیستم زیرفضایی برای شناسایی فرکانس طبیعی، شکل مود و نسبت میرایی عملکرد بهتری دارد. با این حال، بار محاسباتی الگوریتم و تعیین پارامترهای تعریف شده توسط کاربر دو چالشی هستند که به عنوان اصلی‌ترین نقطه ضعف استفاده از الگوریتم شناسایی سیستم زیر فضایی گزارش شده‌اند. در زیر بخش بعدی، مطالعات انجام شده برای غلبه بر این چالشها و بهبود عملکرد الگوریتم‌های مبتنی بر زیر فضا برجسته شده است.

SSI-DATA یک روش مستقیم است و برای محاسبه توابع همبستگی یا تحلیل طیفی به پیش‌پردازش داده‌ها نیاز ندارد. از طرف دیگر، الگوریتم شناسایی زیر فضا در فرآیند تحلیل از فاکتورگیری QR، تجزیه SVD و تکنیک‌های عددی قوی LS استفاده می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری بر پیشرفت‌های اخیر در روش‌های SHM مبتنی بر زیرفضا ارائه شده است. SSI یک انتخاب قدرتمند برای شناسایی مودال است، به ویژه هنگام کار با فرکانس‌هایی با فاصله نزدیک یا سیگنال‌های پاسخ همراه با نویز. اشکال مودی شناسایی شده با استفاده از SSI-DATA در مقایسه با ERA-MNeXT و EFDD قابلیت اطمینان بیشتری داشتند. علاوه بر این، با استفاده از الگوریتم SSI در مقایسه با ARMA خطاهای کمتری در تخمین نسبت میرایی به دست آمد. با این حال، برخی از معایب در استفاده از SSI وجود دارد، مانند نیاز به قضاوت انسان برای مرتبه سیستم و تلاش محاسباتی زیاد الگوریتم SSI.

⁷⁷ enhanced frequency domain decomposition

⁷⁸ deterministic-stochastic subspace identification

⁷⁹ observer/Kalman filter identification

⁸⁰ generalrealization algorithm

⁸¹ Ibrahim time-domain

⁸² polynomial power spectrum method

⁸³ Power spectrum z-transform method

⁸⁴ frequency spatial domain decomposition

⁸⁵ Wavelet transforms

در بیشتر سازه‌ها، آسیب به صورت کاهش در سطح مقطع اعضای سازه وارد می‌شود. بررسی مدل‌های کاربردی مورد استفاده برای تأیید الگوریتم‌های تشخیص آسیب نشان می‌دهد که خسارات در سازه‌های ۲ بعدی معمولاً با دقت بالایی قابل تشخیص هستند. قاب‌های سه بعدی و سازه‌های ساختمانی به طور کلی پیچیده هستند و هم مهندسان و هم محققان را با چالش مواجه می‌کنند. با وجود اینکه بسیاری از الگوریتم‌های پیشنهادی SHM در سازه‌های ساده به خوبی کار می‌کنند، اما استفاده قوی از این روش‌ها برای حل مسئله تشخیص آسیب محلی در سازه‌های مهندسی عمران واقعی و پیچیده تأیید نشده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استراتژی‌های تشخیص آسیب که از پارامترهای ارتعاش یک سیستم دینامیکی استفاده می‌کنند، فقط برای تشخیص خسارات کلی کارآمد هستند و به طور کلی برای تشخیص آسیب‌های محلی در سازه‌ها حساسیت کافی ندارند.

بیشتر نرم افزارهای موجود در بازار به طور کلی برای تحلیل مودال طراحی شده‌اند و نمی‌توانند مستقیماً برای SHM سازه‌ها استفاده شوند. جعبه ابزار تحلیل مودال تجاری معرفی شده عمدتاً با استفاده از LabVIEW پیاده سازی می‌شود، که تعداد محدودی از روش‌های شناسایی سیستم را تطبیق می‌دهد، به عنوان مثال SSI، LSCF، FDD و SSI. شناسایی پارامترهای مودال به طور کلی با استخراج سیگنال پاسخ سازه‌ها آغاز می‌شود و پارامترهای مودال فرکانس طبیعی، اشکال مودی و نسبت میرایی را نتیجه می‌دهد. با این حال، الگوریتم‌های SHM به دلیل طیف گسترده‌ای از روش‌های گزارش شده و ساختارهای ذاتی آن‌ها، معمولاً پیچیده هستند. از این رو، پیاده سازی یک الگوریتم واحد برای گستره عظیمی از هر دسته، یک موضوع کاملاً چالش برانگیز است.

مراجع

- [1] Zhou, L., Guo, J., Wen, X., Ma, J., Yang, F., Wang, C., & Zhang, D. (2020). Monitoring and analysis of dynamic characteristics of super high-rise buildings using GB-RAR: A case study of the WGC under construction, China. *Applied Sciences*, 10(3), 808. <https://doi.org/10.3390/app10030808> (accessed May 23, 2025).
- [2] Yu, Z., Xia, H., Goicolea, J.M., & Xia, C. (2016). Bridge damage identification from moving load induced deflection based on wavelet transform and Lipschitz exponent. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 16(1), 1550003. <https://doi.org/10.1142/S0219455415500032> (accessed May 23, 2025).
- [3] Qiao, L., & Esmaeily, A. (2011). An overview of signal-based damage detection methods. *Applied Mechanics and Materials*, 94–96, 834–851. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.94-96.834> (accessed May 23, 2025).
- [4] Cardini, A.J., & DeWolf, J.T. (2009). Implementation of a long-term bridge weigh-in-motion system for a steel girder bridge in the interstate highway system. *Journal of Bridge Engineering*, 14(6), 418–423. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000023) (accessed May 23, 2025).
- [5] Cantero, D., Karoumi, R., & González, A. (2015). The virtual axle concept for detection of localised damage using bridge weigh-in-motion data. *Engineering Structures*, 89, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.036> (accessed May 23, 2025).
- [6] Gonzalez, I., & Karoumi, R. (2015). BWIM aided damage detection in bridges using machine learning. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(5), 715–725. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0136-4> (accessed May 23, 2025).
- [7] Kalyankar, R., & Uddin, N. (2017). Axle detection on prestressed concrete bridge using bridge weigh-in-motion system. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(2), 191–205. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0214-1> (accessed May 23, 2025).
- [8] Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Heidarzaei, M., Koloor, S.R.K., & Petru, M. (2020). Application of the subspace-based methods in health monitoring of civil structures: A systematic review and meta-analysis. *Applied Sciences*, 10(10), 3606. <https://doi.org/10.3390/app10103606> (accessed May 23, 2025).
- [9] Song, G., Wang, C., & Wang, B. (2017). Structural health monitoring (SHM) of civil structures. *Applied Sciences*, 7(8), 789. <https://doi.org/10.3390/app7080789> (accessed May 23, 2025).
- [10] Reynders, E. (2012). System identification methods for (operational) modal analysis: Review and comparison. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 19(1), 51–124. <https://doi.org/10.1007/s11831-012-9069-x> (accessed May 23, 2025).
- [11] Van Overschee, P., & De Moor, B.L. (1996). *Subspace identification for linear systems: Theory—Implementation—Application*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2504-0> (accessed May 23, 2025).
- [12] Peeters, B., & De Roeck, G. (1999). Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(6), 855–878. <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1249> (accessed May 23, 2025).

- [13] Chang, C.-M., & Loh, C.-H. (2015). Improved stochastic subspace system identification for structural health monitoring. *Journal of Physics: Conference Series*, 628, 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/628/1/012010> (accessed May 23, 2025).
- [14] Kim, J., & Lynch, J.P. (2012). Subspace system identification of support-excited structures—Part I: Theory and black-box system identification. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(14), 2235–2251. <https://doi.org/10.1002/eqe.2184> (accessed May 23, 2025).
- [15] Mellinger, P., Döhler, M., & Mevel, L. (2016). Variance estimation of modal parameters from output-only and input/output subspace-based system identification. *Journal of Sound and Vibration*, 379, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.04.009> (accessed May 23, 2025).
- [16] Xin, J., Sheng, J., & Sui, W. (2012). Study on the reason for difference of data-driven and covariance-driven stochastic subspace identification method. *Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, Hangzhou, China, March 23–25, pp. 356–360. <https://doi.org/10.1109/ICCSEE.2012.269> (accessed May 23, 2025).
- [17] Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Kolor, S.R.K., & Petru, M. (2020). Health monitoring of civil infrastructures by subspace system identification method: An overview. *Applied Sciences*, 10(8), 2786. <https://doi.org/10.3390/app10082786> (accessed May 23, 2025).
- [18] Ettouney, M.M., & Alampalli, S. (2016). *Infrastructure Health in Civil Engineering: Theory and Components* (Vol. 1). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19009> (accessed May 23, 2025).
- [19] Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2001). Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10(3), 441. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/3/303> (accessed May 23, 2025).
- [20] Khalilinia, H., Zhang, L., & Venkatasubramanian, V. (2015). Fast frequency-domain decomposition for ambient oscillation monitoring. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(4), 1631–1633. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2365696> (accessed May 23, 2025).
- [21] Guillaume, P., Verboven, P., Vanlanduit, S. (1998). Frequency-domain maximum likelihood identification of modal parameters with confidence intervals. *International Seminar on Modal Analysis*, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 1(1), 359–366.
- [22] Kim, J., Lynch, J.P. (2011). Comparison study of output-only subspace and frequency-domain methods for system identification of base excited civil engineering structures. In *Civil Engineering Topics*, Springer, New York, NY, Vol. 4, pp. 305–312.
- [23] Cunha, A., Caetano, E., Magalhães, F., Moutinho, C. (2013). Recent perspectives in dynamic testing and monitoring of bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 20, 853–877. <https://doi.org/10.1002/stc.1535>
- [24] James, G.H., Carne, T.G., Lauffer, J.P. (1993). The Natural Excitation Technique (NExT) for Modal Parameter Extraction from Operating Wind Turbines. Sandia National Labs, Albuquerque, NM, USA.
- [25] Juang, J.-N., Pappa, R.S. (1985). An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 8(5), 620–627. <https://doi.org/10.2514/3.20031>
- [26] Juang, J.-N., Cooper, J.E., Wright, J.R. (1988). An eigensystem realization algorithm using data correlations (ERA/DC) for modal parameter identification. *Control Advanced Technology*, 4, 5–14.
- [27] Zhang, L., Yao, Y., Lu, M. (1987). An improved time domain polyreference method for modal identification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1(4), 399–413.
- [28] Zhang, L. (2004). An overview of major developments and issues in modal identification. In *Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC)*, Detroit, MI, USA, 12 August 2004, pp. 1–8.
- [29] Ljung, L. (1999). *System Identification: Theory for the User*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [30] Larimore, W.E. (1990). Canonical variate analysis in identification, filtering, and adaptive control. In *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control*, Honolulu, HI, USA, 5–7 December 1990; pp. 596–604.
- [31] Akaike, H. (1975). Markovian representation of stochastic processes by canonical variables. *SIAM Journal on Control*, 13(1), 162–173. <https://doi.org/10.1137/0313012>
- [32] Kurata, M., Kim, J., Lynch, J.P., et al. (2013). Internet-Enabled Wireless Structural Monitoring Systems: Development and Permanent Deployment at the New Carquinez Suspension Bridge. *Journal of Structural Engineering*, 139, 1688–1702. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000609](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000609)
- [33] Kim, J., Lynch, J.P. (2012). Autonomous Decentralized System Identification by Markov Parameter Estimation Using Distributed Smart Wireless Sensor Networks. *Journal of Engineering Mechanics*, 138, 478–490. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000359](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000359)
- [34] Nozari, A., Behmanesh, I., Yousefianmoghadam, S., et al. (2017). Effects of variability in ambient vibration data on model updating and damage identification of a 10-story building. *Engineering Structures*, 151, 540–553. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.044>

- [35] Shabbir, F., Omenzetter, P. (2015). Particle Swarm Optimization with Sequential Niche Technique for Dynamic Finite Element Model Updating. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30, 359–375. <https://doi.org/10.1111/mice.12100>
- [36] Foti, D., Gattulli, V., Potenza, F. (2014). Output-Only Identification and Model Updating by Dynamic Testing in Unfavorable Conditions of a Seismically Damaged Building. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29, 659–675. <https://doi.org/10.1111/mice.12071>
- [37] Chen, J.D., Loh, C.H. (2017). Tracking modal parameters of building structures from experimental studies and earthquake response measurements. *Structural Health Monitoring*, 16(5), 551–567. <https://doi.org/10.1177/1475921717696339>
- [38] Li, P.J., Xia, Q., Zhang, J. (2017). Subspace Flexibility Identification Adaptive to Different Types of Input Forces. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 18, 1850067. <https://doi.org/10.1142/s0219455418500670>
- [39] Dai, K., Wang, Y., Huang, Y., et al. (2017). Development of a modified stochastic subspace identification method for rapid structural assessment of in-service utility-scale wind turbine towers. *Wind Energy*, 20, 1687–1710. <https://doi.org/10.1002/we.2117>
- [40] Zhang, G., Tang, B., Tang, G. (2012). An improved stochastic subspace identification for operational modal analysis. *Measurement*, 45, 1246–1256. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.034>
- [41] Priori, C., De Angelis, M., Betti, R. (2018). On the selection of user-defined parameters in data-driven stochastic subspace identification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 100, 501–523. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.07.045>
- [42] Pioldi, F., Rizzi, E. (2017). Earthquake-induced structural response output-only identification by two different Operational Modal Analysis techniques. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47, 257–264. <https://doi.org/10.1002/eqe.2947>
- [43] Park, S.K., Noh, H.Y. (2017). Updating Structural Parameters with Spatially Incomplete Measurements Using Subspace System Identification. *Journal of Engineering Mechanics*, 143, 04017040. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001226](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001226)
- [44] Tarinejad, R., Pourgholi, M. (2016). Modal identification of arch dams using balanced stochastic subspace identification. *Journal of Vibration and Control*, 24, 2030–2044. <https://doi.org/10.1177/1077546316670417>
- [45] Soria, J., Díaz, I.M., García-Palacios, J.H., Ibán, N. (2016). Vibration Monitoring of a Steel-Plated Stress-Ribbon Footbridge: Uncertainties in the Modal Estimation. *Journal of Bridge Engineering*, 21, C5015002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000830](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000830)
- [46] Loh, C.H., Chao, S.H., Weng, J.H., Wu, T.H. (2015). Application of subspace identification technique to long-term seismic response monitoring of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44, 385–402. <https://doi.org/10.1002/eqe.2475>
- [47] Lardies, J. (2015). Modal Parameter Identification from Output Data Only: Equivalent Approaches. *Shock and Vibration*, 2015, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2015/124932>
- [48] Cho, S., Park, J.W., Sim, S.H. (2015). Decentralized system identification using stochastic subspace identification for wireless sensor networks. *Sensors*, 15, 8131–8145. <https://doi.org/10.3390/s150408131>
- [49] Kim, J., Kim, K., Son, H. (2014). Subspace model identification of guided wave propagation in metallic plates. *Smart Materials and Structures*, 23, 035006. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/3/035006>
- [50] Yu, K., Yang, K., Bai, Y. (2014). Experimental investigation on the time-varying modal parameters of a trapezoidal plate in temperature-varying environments by subspace tracking-based method. *Journal of Vibration and Control*, 21, 3305–3319. <https://doi.org/10.1177/1077546314521445>
- [51] Ubertini, F.; Gentile, C.; Materazzi, A.L. Automated modal identification in operational conditions and its application to bridges. *Eng. Struct.* **2013**, 46, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.07.031>
- [52] Döhler, M.; Lam, X.-B.; Mevel, L. Uncertainty quantification for modal parameters from stochastic subspace identification on multi-setup measurements. *Mech. Syst. Signal Process.* **2013**, 36, 562–581.
- [53] Döhler, M.; Mevel, L. Efficient multi-order uncertainty computation for stochastic subspace identification. *Mech. Syst. Signal Process.* **2013**, 38, 346–366.
- [54] Moaveni, B.; He, X.; Conte, J.P.; Restrepo, J.I.; Panagiotou, M. System identification study of a 7-story full-scale building slice tested on the UCSD-NEES shake table. *J. Struct. Eng.* **2010**, 137, 705–717.
- [55] Zhang, G.; Tang, B.; Tang, G. An improved stochastic subspace identification for operational modal analysis. *Measurement* **2012**, 45, 1246–1256.
- [56] Lardies, J.; Minh-Ngi, T. Modal parameter identification of stay cables from output-only measurements. *Mech. Syst. Signal Process.* **2011**, 25, 133–150.
- [57] Weng, J.-H.; Loh, C.-H. Recursive subspace identification for on-line tracking of structural modal parameter. *Mech. Syst. Signal Process.* **2011**, 25, 2923–2937. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.05.013>
- [58] Carden, E.P.; Mita, A. Challenges in developing confidence intervals on modal parameters estimated for large civil infrastructure with stochastic subspace identification. *Struct. Control Health Monit.* **2011**, 18, 53–78.

- [59] Brownjohn, J.M.W.; Carden, E.P.; Goddard, C.R.; Oudin, G. Real-time performance monitoring of tuned mass damper system for a 183 m reinforced concrete chimney. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **2010**, *98*, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.10.013>
- [60] Hu, W.-H.; Cunha, A.; Caetano, E.; Magalhães, F.; Moutinho, C. LabVIEW toolkits for output-only modal identification and long-term dynamic structural monitoring. *Struct. Infrastruct. Eng.* **2010**, *6*, 557–574.
- [61] Marchesiello, S.; Bedaoui, S.; Garibaldi, L.; Argoul, P. Time-dependent identification of a bridge-like structure with crossing loads. *Mech. Syst. Signal Process.* **2009**, *23*, 2019–2028.
- [62] Deraemaeker, A.; Reynders, E.; De Roeck, G.; Kullaa, J. Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment. *Mech. Syst. Signal Process.* **2008**, *22*, 34–56.
- [63] Alicioğlu, B.; Luş, H. Ambient vibration analysis with subspace methods and automated mode selection: Case studies. *J. Struct. Eng.* **2008**, *134*, 1016–1029.
- [64] He, X.; Moaveni, B.; Conte, J.P.; Elgamal, A.; Masri, S.F. Modal identification study of Vincent Thomas Bridge using simulated wind-induced ambient vibration data. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* **2008**, *23*, 373–388. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00544.x>
- [65] Loh, C.H.; Liu, Y.C.; Ni, Y.Q. SSA-based stochastic subspace identification of structures from output-only vibration measurements. *Smart Struct. Syst.* **2012**, *10*, 331–351.
- [66] Attig, M.; Abdelghani, M.; Kahla, N. Output-only modal identification of tensegrity structures. *Eng. Struct. Technol.* **2016**, *8*, 52–64.
- [67] Reynders, E.; Pintelon, R.; De Roeck, G. Uncertainty bounds on modal parameters obtained from stochastic subspace identification. *Mech. Syst. Signal Process.* **2008**, *22*, 948–969.
- [68] Zhang, Z.; Fan, J.; Hua, H. Simulation and experiment of a blind subspace identification method. *J. Sound Vib.* **2008**, *311*, 941–952.
- [69] Carden, E.P.; Brownjohn, J.M.W. Fuzzy clustering of stability diagrams for vibration-based structural health monitoring. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* **2008**, *23*, 360–372.
- [70] Döhler, M.; Mevel, L.; Hille, F. Subspace-based damage detection under changes in the ambient excitation statistics. *Mech. Syst. Signal Process.* **2014**, *45*, 207–224. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.10.023>
- [71] Basseville, M.; Bourquin, F.; Mevel, L.; Nasser, H.; Treysède, F. Handling the temperature effect in vibration monitoring: Two subspace-based analytical approaches. *J. Eng. Mech.* **2010**, *136*, 367.
- [72] Balmes, E.; Basseville, M.; Mevel, L.; Nasser, H.; Zhou, W. Statistical model-based damage localization: A combined subspace-based and substructuring approach. *Struct. Control Health Monit.* **2008**, *15*, 857–875. <https://doi.org/10.1002/stc.223>
- [73] Zhou, W.; Li, S.; Li, H. Damage detection for SMC benchmark problem: A subspace-based approach. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* **2016**, *16*, 1640025. <https://doi.org/10.1142/s0219455416400253>
- [74] Sun, C.; Zhang, Z.; Luo, X.; Guo, T.; Qu, J.; Li, B. Support vector machine-based Grassmann manifold distance for health monitoring of viscoelastic sandwich structure with material ageing. *J. Sound Vib.* **2016**, *368*, 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.01.021>
- [75] Ren, W.X.; Lin, Y.Q.; Fang, S.E. Structural damage detection based on stochastic subspace identification and statistical pattern recognition: I. Theory. *Smart Mater. Struct.* **2011**, *20*, 115009.
- [76] Zarbaf, E.; Norouzi, M.; Allemang, R.J.; Hunt, V.J.; Helmicki, A.; Nims, D.K. Stay force estimation in cable-stayed bridges using stochastic subspace identification methods. *J. Bridge Eng.* **2017**, *22*, 04017055. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001091](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001091)
- [77] Reynders, E.; Maes, K.; Lombaert, G.; De Roeck, G. Uncertainty quantification in operational modal analysis with stochastic subspace identification: Validation and applications. *Mech. Syst. Signal Process.* **2016**, *66*, 13–30.
- [78] Wu, W.H.; Wang, S.W.; Chen, C.C.; Lai, G. Application of stochastic subspace identification for stay cables with an alternative stabilization diagram and hierarchical sifting process. *Struct. Control Health Monit.* **2016**, *23*, 1194–1213. <https://doi.org/10.1002/stc.1836>
- [79] Karami, K.; Akbarabadi, S. Developing a smart structure using integrated subspace-based damage detection and semi-active control. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* **2016**, *31*, 887–903. <https://doi.org/10.1111/mice.12231>
- [80] Khan, I.U.; Shan, D.S.; Li, Q.; He, J.; Nan, F.L. Data interpretation and continuous modal parameter identification of cable stayed bridge. *Open Civ. Eng. J.* **2015**, *9*, 577–591.
- [81] Guo Y, Kwon DK, Kareem A. Near-real-time hybrid system identification framework for civil structures with application to Burj Khalifa. *J Struct Eng.* 2015;142(2):4015132. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001402.
- [82] Ben Mekki O, Siegert D, Toutlemonde F, Mevel L, Goursat M. A new composite bridge: Feasibility validation and vibration monitoring. *Mech Adv Mater Struct.* 2015;22(10):850–863. doi:10.1080/15376494.2013.864432.
- [83] Tondreau G, Deraemaeker A. Numerical and experimental analysis of uncertainty on modal parameters estimated with the stochastic subspace method. *J Sound Vib.* 2014;333(18):4376–4401.
- [84] Dohler M, Hille F, Mevel L, Rucker W. Structural health monitoring with statistical methods during progressive damage test of S101 Bridge. *Eng Struct.* 2014;69:183–193. doi:10.1016/j.engstruct.2014.03.010.

- [85] Hong AL, Ubertini F, Betti R. New stochastic subspace approach for system identification and its application to long-span bridges. *J Eng Mech.* 2013;139(5):724–736. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000524.
- [86] Döhler M, Mevel L. Modular subspace-based system identification from multi-setup measurements. *IEEE Trans Autom Control.* 2012;57(11):2951–2956.
- [87] Chauhan S. Using the unified matrix polynomial approach (UMPA) for the development of the stochastic subspace identification (SSI) algorithm. *J Vib Control.* 2012;19(13):1950–1961. doi:10.1177/1077546312450045.
- [88] Whelan MJ, Gangone MV, Janoyan KD, Jha R. Real-time wireless vibration monitoring for operational modal analysis of an integral abutment highway bridge. *Eng Struct.* 2009;31(10):2224–2235. doi:10.1016/j.engstruct.2009.03.022.
- [89] Akçay H. Frequency domain subspace-based identification of discrete-time singular power spectra. *Signal Process.* 2012;92(9):2075–2081.
- [90] Urgessa GS. Vibration properties of beams using frequency-domain system identification methods. *J Vib Control.* 2010;17(9):1287–1294. doi:10.1177/1077546310378431.
- [91] Gandino E, Garibaldi L, Marchesiello S. Covariance-driven subspace identification: A complete input–output approach. *J Sound Vib.* 2013;332(26):7000–7017. doi:10.1016/j.jsv.2013.08.025.
- [92] Verhaegen M, Hansson A. N2SID: Nuclear norm subspace identification of innovation models. *Automatica.* 2016;72:57–63.
- [93] Marchesiello S, Fasana A, Garibaldi L. Modal contributions and effects of spurious poles in nonlinear subspace identification. *Mech Syst Signal Process.* 2016;74:111–132. doi:10.1016/j.ymsp.2015.05.008.
- [94] Shi Y, Li Z, Chang CC. Output-only subspace identification of structural properties and unknown ground excitation for shear-beam buildings. *Adv Mech Eng.* 2016;8:1687814016679908. doi:10.1177/1687814016679908.
- [95] Zhong K, Chang CC. Recursive combined subspace identification technique for tracking dynamic characteristics of structures under earthquake excitation. *J Eng Mech.* 2016;142(2):4016092. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001156.
- [96] Al-Gahtani O, El-Gebeily M, Khulief Y. Output-only identification of system parameters from noisy measurements by multiwavelet denoising. *Adv Mech Eng.* 2014;6:218328. doi:10.1155/2014/218328.
- [97] Weng JH, Loh CH, Yang JN. Experimental study of damage detection by data-driven subspace identification and finite-element model updating. *J Struct Eng.* 2009;135(12):1533–1544. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000079.
- [98] Kurka PRG, Cambraia HN. Application of a multivariable input–output subspace identification technique in structural analysis. *J Sound Vib.* 2008;312(3):461–475. doi:10.1016/j.jsv.2007.07.089.
- [99] Rainieri C, Fabbrocino G. Automated output-only dynamic identification of civil engineering structures. *Mech Syst Signal Process.* 2010;24(3):678–695. doi:10.1016/j.ymsp.2009.10.003.
- [100] Giraldo DF, Song W, Dyke SJ, Caicedo JM. Modal identification through ambient vibration: Comparative study. *J Eng Mech.* 2009;135(8):759–770.
- [101] Magalhães F, Reynders E, Cunha Á, De Roeck G. Online automatic identification of modal parameters of a bridge using the p-LSCF method. In: *Proc IOMAC'09–3rd Int Operational Modal Analysis Conf*, Ancona, Italy; 2009 May 4–6.
- [102] Moaveni B, He X, Conte JP, Restrepo JI, Panagiotou M. System identification study of a 7-story full-scale building slice tested on the UCSD-NEES shake table. *J Struct Eng.* 2010;137(6):705–717.
- [103] Prowell I, Elgamal A, Luco JE, Conte JP. In-situ ambient vibration study of a 900-kW wind turbine. *J Earthq Eng.* 2019;1–22. doi:10.1080/13632469.2019.1662344.
- [104] Li W, Vu V-H, Liu Z, Thomas M, Hazel B. Extraction of modal parameters for identification of time-varying systems using data-driven stochastic subspace identification. *J Vib Control.* 2018;24(22):4781–4796.
- [105] Júnior JSS, Costa EBM. Fuzzy modelling methodologies based on OKID/ERA algorithm applied to quadrotor aerial robots. In: *Intelligent Systems: Theory, Research and Innovation in Applications*. Berlin: Springer; 2020. p. 295–317.
- [106] Dautt-Silva A, De Callafon RA. Optimal input shaping with finite resolution computed from step-response experimental data. In: *Proc 2018 Annu Amer Control Conf (ACC)*, Milwaukee, WI; 2018 Jun 27–29. p. 6703–6708.
- [107] Wang SQ, Zhang YT, Feng YX. Comparative study of output-based modal identification methods using measured signals from an offshore platform. In: *Proc ASME 2010 29th Int Conf Ocean, Offshore and Arctic Eng*, Shanghai, China; 2010 Jun 6–11. New York: ASME; 2010. p. 561–567.
- [108] Kim J, Lynch JP. Comparison study of output-only subspace and frequency-domain methods for system identification of base excited civil engineering structures. In: *Civil Engineering Topics*. Berlin: Springer; 2011. Vol. 4, p. 305–312.
- [109] Cunha A, Caetano E, Ribeiro P, Müller G. Vibration-based SHM of a centenary bridge: A comparative study between two different automated OMA techniques. *Preservation.* 2011;1:12.
- [110] Liu CW, Wu JZ, Zhang YG. Review and prospect on modal parameter identification of spatial lattice structure based on ambient excitation. In: *Appl Mech Mater*. Stafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd.; 2011. Vol. 94, p. 1271–1217.
- [111] R. Ceravolo and G. Abbiati, "Time domain identification of structures: Comparative analysis of output-only methods," *J. Eng. Mech.*, vol. 139, pp. 537–544, 2012.
- [112] L. Mevel, M. Basseville, A. Benveniste, and M. Goursat, "Merging sensor data from multiple measurement set-ups for non-stationary subspace-based modal analysis," *J. Sound Vib.*, vol. 249, pp. 719–741, 2002.

- [113] F. Magalhães, E. Caetano, and Á. Cunha, "Challenges in the application of stochastic modal identification methods to a cable-stayed bridge," *J. Bridge Eng.*, vol. 12, pp. 746–754, 2007.
- [114] B. Moaveni, X. He, J. P. Conte, J. I. Restrepo, and M. Panagiotou, "System identification study of a 7-story full-scale building slice tested on the UCSD-NEES shake table," *J. Struct. Eng.*, vol. 137, pp. 705–717, 2010.
- [115] F. Magalhães, E. Reynders, Á. Cunha, and G. De Roeck, "Online automatic identification of modal parameters of a bridge using the p-LSCF method," in *Proc. IOMAC*, Ancona, Italy, May 4–6, 2009.
- [116] S. Q. Wang, Y. T. Zhang, and Y. X. Feng, "Comparative study of output-based modal identification methods using measured signals from an offshore platform," in *Proc. ASME 2010 29th Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Eng.*, New York, NY, USA: ASME, 2010, pp. 561–567.
- [117] A. Cunha, E. Caetano, P. Ribeiro, and G. Müller, "Vibration-based SHM of a centenary bridge: A comparative study between two different automated OMA techniques," *Preservation*, vol. 1, p. 12, 2011.
- [118] R. Ceravolo and G. Abbiati, "Time domain identification of structures: Comparative analysis of output-only methods," *J. Eng. Mech.*, vol. 139, pp. 537–544, 2012.
- [119] M. Döhler, P. Andersen, and L. Mevel, "Variance computation of modal parameter estimates from UPC subspace identification," *Irnia*, vol. 16, pp. 416–432, 2017.
- [120] Y. Zhou et al., "Structural Identification Study of a Steel Multi-Girder Bridge Based on Multiple Reference Impact Test," *Int. Symp. Innov. Sustain. Struct. Civ. Eng.*, vol. 12, pp. 315–356, 2013.
- [121] W.-H. Hu, Á. Cunha, E. Caetano, F. Magalhães, and C. Moutinho, "LabVIEW toolkits for output-only modal identification and long-term dynamic structural monitoring," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 6, pp. 557–574, 2010.
- [122] M. Chang, S. N. Pakzad, and R. Leonard, "Modal identification using smit," in *Topics on the Dynamics of Civil Structures*, vol. 1, New York, NY, USA: Springer, 2012, pp. 221–228.
- [123] M. Goursat and L. Mevel, "COSMAD: Identification and diagnosis for mechanical structures with Scilab," in *Proc. 2008 IEEE Int. Conf. Comput.-Aided Control Syst. Design*, San Antonio, TX, USA, Sep. 3–5, 2008, pp. 353–358.
- [124] F. Potenza et al., "Long-term structural monitoring of the damaged Basilica, S. Maria di Collemaggio through a low-cost wireless sensor network," *J. Civ. Struct. Health Monit.*, vol. 5, pp. 655–676, 2015, doi: 10.1007/s13349-015-0146-3.
- [125] D. Bauer, "Asymptotic properties of subspace estimators," *Automatica*, vol. 41, pp. 359–376, 2005.
- [126] A. Chiuso and G. Picci, "Asymptotic variance of subspace methods by data orthogonalization and model decoupling: A comparative analysis," *Automatica*, vol. 40, pp. 1705–1717, 2004.
- [127] D. Bauer and L. Ljung, "Some facts about the choice of the weighting matrices in Larimore type of subspace algorithms," *Automatica*, vol. 38, pp. 763–773, 2002.