



تحولات نوین در تحلیل و کنترل ارتعاشات مکانیکی

جواد محمدی^۱

^۱ گروه مکانیک، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

تحلیل ارتعاشات مکانیکی از ارکان اصلی طراحی و نگهداری سامانه‌های مهندسی به شمار می‌رود. در دهه گذشته، با توسعه فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی، حسگرهای هوشمند و مواد پیشرفته، تحول چشم‌گیری در روش‌های پایش و کنترل ارتعاشات رخ داده است. این مقاله به صورت مروری تنظیم شده و به بررسی آخرین پیشرفت‌های پژوهشی در زمینه تحلیل داده‌های ارتعاشی، پایش سلامت سازه، بهره‌گیری از مواد هوشمند، و تلفیق مدل‌های فیزیکی و داده‌محور می‌پردازد. همچنین کاربردهای صنعتی این حوزه و چشم‌اندازهای آینده آن مورد بحث قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: ارتعاشات مکانیکی، تحلیل داده‌های ارتعاشی، مواد هوشمند، پایش سلامت سازه، هوش مصنوعی.

1. مقدمه

ارتعاشات مکانیکی یکی از پدیده‌های شایع در سیستم‌های دینامیکی مهندسی هستند و وجود آن‌ها را می‌توان در طیف وسیعی از کاربردها، از مقیاس نانو تا سازه‌های غول‌پیکر، مشاهده کرد. بسته به نوع سیستم و شرایط عملکرد، این ارتعاش ها ممکن است تأثیرات مثبت یا منفی داشته باشند. در بسیاری از کاربردهای صنعتی، مانند آن‌هایی که در مبدل‌های اولتراسونیک، دستگاه‌های تصویربرداری پزشکی یا سیستم‌های میکروالکترومکانیکی وجود دارند، لارتعاشات کنترل‌شده برای دستیابی به عملکرد مورد نظر ضروری هستند. در مقابل، در سیستم‌هایی مانند توربین‌ها، پل‌ها و شاسی خودروها یا قطعات هواپیما، ارتعاشات ناخواسته ممکن است کارایی را کاهش دهند، نرخ فرسایش را افزایش دهند و حتی منجر به خرابی‌های فاجعه‌آمیز شوند [1].

با افزایش پیچیدگی سازه‌ها و ماشین‌آلات مدرن، به‌ویژه در صنایع حیاتی مانند هوافضا، انرژی‌های تجدیدپذیر، مهندسی مدرن و پزشکی دقیق، تحلیل دقیق رفتار ارتعاشی به یکی از چالش‌های اصلی در طراحی و نگهداری سیستم‌ها تبدیل شده است. روش‌های کلاسیک مبتنی بر ساخت مدل‌های تحلیلی، مانند معادلات دیفرانسیلی جزئی، مدل‌های المان محدود (FEM)¹ و روش‌های لاگرانژی، در حالی که ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی هستند، در حضور عدم قطعیت‌هایی مانند تغییرپذیری محیطی، تنوع شرایط مرزی و پیچیدگی‌های هندسی و مصالحی، به‌تنهایی پاسخگوی نیازهای تحلیلی نوین نیستند.

توسعه فناوری‌های نوظهور جدید مانند سنسورهای هوشمند، سیستم‌های پایش سلامت سازه، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌سازی ترکیبی، امکان ادغام داده‌های تجربی با مدل‌های نظری را فراهم کرده است. این ادغام مدل تجربی، که ادغام محور داده و فیزیک است، به ظهور رویکردهای جدیدی مانند دوقلوی دیجیتال و مدل‌سازی پیش‌بینی تطبیقی منجر شده است که قادر به شناسایی آسیب‌های زودهنگام، پیش‌بینی و پاسخ کنترل در زمان واقعی می‌باشند [2]. علاوه بر این، کنترل ارتعاشات که قبلاً صرفاً بر اساس رویکردهای غیرفعال مانند استفاده از دمپرهای جرمی یا دمپرهای ویسکوز بود، اکنون به سمت سیستم‌های فعال و نیمه‌فعال با معرفی مواد هوشمند مانند آلیاژهای حافظه‌دار، پیزوالکتریک و مایعات مغناطیسی تغییر یافته است. این سیستم‌ها قادر به انطباق در زمان واقعی با تغییرات دینامیکی متغیر هستند و از روش‌هایی برای کاهش ارتعاشات در سطوح میکرو و ماکرو ارائه می‌دهند.

با در نظر گرفتن همه این موارد، پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌ها به پیدایش نسل جدیدی از سیستم‌های هوشمند منجر شده است که نه تنها قادر به تجزیه و تحلیل دقیق ارتعاشات هستند، بلکه با ادغام یادگیری تطبیقی و سیستم‌های کنترل بازخورد، ایمنی را افزایش داده و هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهند.

در این مقاله، مهمترین نوآوری‌ها در علوم تحلیل، شناسایی و کنترل ارتعاشات مکانیکی فناوری‌های نوین و تأثیرشان در افزایش دقت، کارایی و اطمینان این فرآیندها را بررسی می‌کنند.

2. پیشرفت‌های فناوریانه در تحلیل ارتعاشات

2-1. الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های ارتعاشی

تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN)²، الگوریتم‌های دسته‌بندی (SVM)³، و شبکه‌های بازگشتی (LSTM)⁴ رشد چشمگیری داشته است [3]. این روش‌ها قابلیت شناسایی الگوهای

¹ Finite Element Method² Convolutional Neural Network³ Support Vector Machine⁴ Long Short-Term Memory

پنهان، عیوب مکانیکی و تشخیص زودهنگام خرابی را فراهم می‌کنند. کاهش نویز با روش‌های پیش‌پردازش مانند FFT، EMD و PCA نیز در بهبود دقت این الگوریتم‌ها مؤثر بوده است [4].

۲-۲. حسگرهای هوشمند و پایش سلامت بلادرنگ

حسگرهای MEMS⁵، شتاب‌سنج‌های فیبر نوری، و سامانه‌های بی‌سیم توانسته‌اند امکان پایش گسترده و هم‌زمان را فراهم سازند. این حسگرها در کنار الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌صورت شبکه‌ای عمل کرده و به‌صورت بلادرنگ وضعیت سازه یا ماشین را گزارش می‌دهند [5]. سیستم‌های پایش سلامت سازه مبتنی بر داده اکنون در صنایع پل‌سازی، هوافضا و انرژی بادی رایج شده‌اند [6].

3-2. کنترل فعال با استفاده از مواد هوشمند

مواد هوشمند مانند آلیاژهای حافظه‌دار، مواد پیزوالکتریک و سیالات مغناطیسی کاربرد گسترده‌ای در کنترل فعال ارتعاشات دارند. این مواد قادرند در پاسخ به سیگنال‌های ارتعاشی واکنش فوری نشان دهند. سامانه‌های کنترل تطبیقی مبتنی بر این مواد در رباتیک، سامانه‌های تعلیق هوشمند، و بازوهای فضایی کاربرد دارند [7].

4-2. مدل‌سازی هیبریدی: ترکیب فیزیک و داده

مدل‌سازی هیبریدی با ترکیب مدل‌های فیزیکی (مانند اجزای محدود یا معادلات لاگرانژی) و داده‌های تجربی از حسگرها، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر ارتعاشات را فراهم کرده است. دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) نمونه‌ای از این رویکرد است که در صنایع نیروگاهی و خودروسازی برای پیش‌بینی وضعیت تجهیزات استفاده می‌شود [8].

۳. کاربردهای صنعتی

1-3. توربین‌های بادی و نیروگاه‌ها

پیش‌بینی و پایش عملکرد صحیح و عیب‌یابی اجزای توربین، ژنراتور و یاتاقان با کمک تکنیک‌های بلید، و تشخیص و عیب‌یابی زودهنگام و پیش‌بینی تعمیرات روند تعمیر و نگهداری در بخش صنعتی به گونه‌ای مهندسی و رو به جلو انجام می‌شود. مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین برای پایش در زمان واقعی استفاده می‌شوند [9].

⁵ Micro-Electro-Mechanical Systems

2-3. سازه‌های عمرانی

در پل‌ها و ساختمان‌های بلند، بازرسی مودهای ارتعاشی از طریق حسگرهای نصب‌شده، امکان شناسایی ترک‌های پنهان یا نشست‌های خطرناک را فراهم می‌سازد. به‌کارگیری روش‌های شناسایی مود و خوشه‌بندی سیگنال‌ها نیز به‌طور فزاینده‌ای در حال گسترش است [10].

۳-۳. هوافضا و صنایع پیشرفته

در ماهواره‌ها، بازوهای رباطیک فضایی و سازه‌های قابل بازشدن، ارتعاشات ناخواسته می‌تواند منجر به انحراف عملکردی شود. دمپرهای فعال و کنترل ارتعاش در این سامانه‌ها از اهمیت بالایی برخوردارند [11].

3-4. تجهیزات زیستی و پزشکی

پایش ارتعاشی در ایمپلنت‌های استخوانی و پروتزها، از شکست سازه‌ای پیشگیری می‌کند. تحریک ارتعاشی برای تشخیص تراکم استخوان یا تحلیل خواص مکانیکی بافت‌های زیستی نیز رو به گسترش است [12].

4. چالش‌ها و چشم‌اندازهای جدید

با وجود همه این پیشرفت‌ها، تفاوت‌ها و چالش‌های جدی در زمینه تحلیل و کنترل ارتعاشات وجود دارد که پیاده‌سازی کامل سامانه‌های هوشمند و تطبیقی به چالش کشیده است. برخی از مهمترین این چالش‌ها به این شرح است: ادغام داده‌های چندمنبعی با کیفیت متغیر از حسگرهای MEMS، شتاب‌سنج‌های فیبر نوری، و سامانه‌های وایرلس دارند. اختلاف در دقت اندازه‌گیری، نرخ نمونه‌برداری و سطح نویز این داده‌ها، ادغام آن‌ها در یک چارچوب تحلیلی واحد بسیار مشکل می‌سازد. مدلسازی سیستم‌های غیرخطی و وابسته به بسیاری از سامانه‌های واقعی، دارای غیرخطی، وابسته به زمان و تحت تاثیر شرایط محیطی نظیر دما، رطوبت و بارهای متغیر هستند. مدلسازی این گروه از سیستم‌ها مستلزم پیشرفت در زمینه مدل‌های پارامتریک، غیرپارامتریک و مختلط با دقت بالا است که در حال تحقیق است.

نواقص اقتصادی و عملکردی مواد هوشمند: مواد هوشمند و پیزوالکتریک، آلیاژهای حافظه‌دار و سیالات هوشمند، علی‌رغم تسهیل کنترل ارتعاشات، با مواردی همچون عملکرد ناپایدار، طول عمر کم، و هزینه کلان دست به گریبانند. افزایش دوام، بهبود ساختاری، و توسعه جایگزین‌ها از اهداف کلیدی پژوهش در این حوزه است.

نبود استانداردهای جامع در تبادیل و تفسیر داده‌های ارتعاشی: تدوین الزامات یکپارچه و جهانی برای استانداردسازی، فرمت‌سازی و ذخیره‌سازی داده‌های ارتعاشی هنوز در سطح بین‌المللی به اتمام نرسیده است. این امر موجب می‌شود در خصوص اشتراک‌گذاری و همکاری بین‌سیستمی و بازتولید نتایج، مشکل وجود داشته باشد.

نیاز به الگوریتم‌های سبک کم‌وزن برای استفاده در سخت‌افزارهای نهفته: بخشی از زیرسیستم‌های کنترلی و نظارتی به میکروکنترلرها و فیگهای سخت‌افزاری با دوزی منابع محدود نصب می‌شوند. اکثر الگوریتم‌های یادگیری ماشین به سبب نیاز به ذخیره و کیفیت پردازش به حافظه بالا در صنعتی بودن در مقیاس کلان محدود می‌سازند [14].

4-1 مسیرهای آینده:

در پاسخ به این چالش‌ها، روندهای تحقیقاتی به سوی هوشمندتر، مقیاس‌پذیرتر و خودکارتر از مداخله‌ی انسان متمایل می‌شود. مهم‌ترین مسیرهای پیشنهادی در پژوهش‌های آتی عبارت‌اند از:

دوقلوی دیجیتال (Digital Twin) تطبیقی و تعاملی: یکی از چالش‌های کلیدی در پیش‌بینی رفتار ارتعاشی و در ارزیابی ریسک‌های مربوطه، تصمیم‌گیری‌های تعمیراتی و بلادرنگ، پیش شرط الگوی رفتار غیر خطی و قابلیت به‌روز رسانی رفتار، یکی از مهم‌ترین ابزارها به شمار می‌رود

یادگیری فدرال (Federated Learning) برای تحلیل ارتعاشات توزیع‌شده: در سامانه‌های پایش توزیع‌شده، برای حفظ حریم خصوصی و کاهش بار تبادل داده، تحلیل محلی ارتعاشات با به کارگیری یادگیری فدرال به انجام می‌رسد.

ادغام سامانه‌های پایش سلامت با تعمیرات خودکار و تطبیقی: توسعه سامانه‌هایی که قادر به شناسایی آسیب و به‌طور خودکار دستورات کنترلی - تعمیراتی صادر کند، یکی از اهداف در جهت خودکارسازی کامل پایش و نگهداری به شمار می‌رود [13][14].

5. نتیجه گیری

رشته ارتعاشات مکانیکی از یک حوزه تحلیلی کلاسیک به یک حوزه هوشمند و چند رشته‌ای در حال تغییر است. توسعه حسگرهای پایش، هوش مصنوعی، مواد هوشمند و مدل‌سازی ترکیبی این امکان را فراهم کرده است که سیستم‌ها نه تنها بتوانند ارتعاشات را حس و تجزیه و تحلیل کنند، بلکه به طور خودکار نیز پاسخ دهند. برای تحقق این پتانسیل‌ها، همکاری بین کارشناسان مهندسی مکانیک، علم داده و فناوری‌های مهندسی مدرن ضروری است.

مراجع

1. Rao, S. S. (2017). **Mechanical Vibrations**. Pearson Education.
2. Inman, D. J. (2020). **Engineering Vibration**. Prentice Hall.
3. Alshorman, J., & Al-Habaibeh, A. (2024). Machine learning techniques for vibration-based fault diagnosis. **Applied Acoustics**, 205, 109112.
4. Chen, Y., Li, X., & Zhao, Y. (2023). Vibration monitoring of wind turbines using CNN models. **Renewable Energy**, 212, 505–518.
5. Li, H., Zhang, Y., & Liu, M. (2022). Wireless Sensor Networks in Structural Health Monitoring. **Sensors**, 22(4), 1211.
6. Park, G., Sohn, H., & Farrar, C. R. (2023). Smart materials in structural vibration control. **Smart Structures and Systems**, 31(2), 123–139.
7. Zhang, X., Chen, J., & Liu, T. (2024). Hybrid physical-data modeling in vibration analysis. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 35(1), 25–41.
8. Wang, Z., & Huang, L. (2023). Digital twin application for wind turbine condition monitoring. **Energy Reports**, 9, 4220–4233.
9. Kim, J., & Choi, S. (2022). Machine learning in bridge health monitoring. **Journal of Civil Engineering**, 46(3), 205–215.
10. Lee, D., & Nam, Y. (2021). Active vibration control in aerospace structures. **AIAA Journal**, 59(10), 3852–3866.
11. Singh, R., & Thakur, P. (2023). Biomechanical vibration monitoring using smart sensors. **Biomedical Engineering Letters**, 13(2), 187–197.
12. Zhao, H., Sun, W., & Fan, X. (2023). Modeling nonlinear dynamic vibration systems. **Nonlinear Dynamics**, 111(4), 3543–3562.

13. Miller, A., & Johnson, T. (2024). Real-time edge computing for vibration monitoring. **IEEE Internet of Things Journal**, 11(1), 15–27.
14. ISO/TC 108. (2021). **Standards for Vibration Monitoring**. International Organization for Standardization.

Recent Advances in Mechanical Vibration Analysis and Control

Javad Mohammadi^{*1}

^{1*}Department of Mechanic, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch,
Islamic Azad university, Tehran, Iran.

Abstract— Mechanical vibration analysis is among the foundations of design and maintenance of engineering systems. In the last ten years, with the development of technologies like artificial intelligence, smart sensors, and new materials, a revolution has taken place in how vibration is monitored and controlled. The paper is organized with a review style, presenting the recent research progress in the fields of vibration data analysis, structural health monitoring, utilization of smart materials, and coupling physical and data-driven models. The industrial applications and future prospects of the discipline are also discussed.

Keywords: Mechanical Vibrations, Vibration Data Analysis, Smart Materials, Structural Health Monitoring, Artificial Intelligence.