

کنترل فعال نوسان‌های سازه بر پایه‌ی میرایی بحرانی با یک عملگر و در نظر گرفتن اثر دو مود نوسان

جواد علامتیان* (دانشیار)

حمید داوطلب (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد

مهندسی عمران شریف، (تابش ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۲۳-۱۳

در نوشتار حاضر، فرایند نوینی بر پایه‌ی میرایی بحرانی برای کنترل فعال سازه‌ها ارائه شده است که بر اساس نگره‌های دینامیک سازه و بهبود عملکرد روش میرایی بحرانی است. در شیوه‌ی متداول، بحرانی شدن مودهای نوسان سازه نیازمند استفاده از چند عملگر است که نصب و استفاده از آن‌ها در کنترل فعال بسیار دشوار و پرهزینه است. روش پیشنهادی در نوشتار حاضر، نقص ذکر شده را برطرف می‌کند؛ به گونه‌ی که با استفاده از فقط یک عملگر، دو مود نوسان سازه در شرایط میرایی قرار می‌گیرند و کارایی و عملکرد روش میرایی بحرانی را افزایش می‌دهند. همچنین، با استفاده از شرط نیمه‌معین مثبت بودن ماتریس میرایی کل سامانه، شرطی نوین برای تعیین محل حسگر و عملگر ارائه شده است. همچنین بر پایه‌ی دو نگره‌ی پیشنهادی، یک الگوریتم نوین کنترل فعال به دست آمده و کارایی آن با کنترل نوسان‌های چند سازه‌ی پرشی تحت بارگذاری‌های مختلف بررسی شده است. نتایج به دست آمده، برتری چشمگیر عملکرد کنترل فعال پیشنهادی را نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد.

alamatian@mshdiau.ac.ir
hamiddavt@lab@yahoo.com

واژگان کلیدی: سازه‌ی هوشمند، کنترل فعال، میرایی بحرانی.

۱. مقدمه

کنترل نوسان و کاهش پاسخ سازه، یکی از مهم‌ترین عنوان‌ها در تحلیل و طراحی دینامیکی سازه‌هاست. در این راستا، بهبود عملکرد لرزه‌ی سازه‌ها و کنترل نوسان‌های آن‌ها، اهمیت ویژه‌ی دارد. ساختمان‌های هوشمند، سامانه‌هایی هستند که می‌توانند در برابر تحریک‌های خارجی، مانند زلزله و باد از خود محافظت کنند.^[۱] به سخن دیگر، سازه‌ی هوشمند می‌تواند مطابق با محیط دینامیکی تغییر کند.^[۲] در این میان، حفظ و بهبود عملکرد سازه در مقابل تحریک‌های خارجی موضوع مهمی است که با عنوان کنترل سازه شناخته می‌شود.^[۱] تاکنون مطالعات زیادی در زمینه‌ی کنترل سازه انجام شده است. به طور کلی، روش‌های کنترل سازه در ۳ دسته‌ی روش‌های فعال، غیرفعال و نیمه‌فعال طبقه‌بندی می‌شوند.^[۳] در سامانه‌ی کنترل غیرفعال نیازی به منبع خارجی برای تأمین نیرو نیست و نیروهای کنترلی با استفاده از حرکت سازه تولید می‌شوند. سامانه‌ی کنترل غیرفعال، سیستمی است که در آن سختی یا میرایی سازه بدون نیاز به منبع انرژی خارجی تغییر پیدا می‌کند.^[۴] کنترل‌کننده‌های غیرفعال به علت سادگی اجرا و بی‌نیازی به نیروی خارجی، بسیار فراوان استفاده می‌شوند. البته باید در نظر داشت که کنترل‌کننده‌های غیرفعال در حدود بسامدی محدود، عملکرد

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۳/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۶/۵/۲۲، پذیرش ۱۳۹۶/۷/۲۲.

DOI:10.24200/J30.2018.2121.2096

متناسبی دارند و ممکن است در زلزله‌های شدید، منجر به افزایش دامنه‌ی نوسان و انهدام سازه شوند.^[۱] به همین دلیل به روش‌های کنترل فعال که ظرفیت بالایی برای کنترل محدوده‌ی گسترده‌ی نوسان‌های سازه دارند، توجه شده است. هر روش کنترل فعال بر پایه‌ی یک الگوریتم خاص، ارتعاش‌ها را کنترل می‌کند. هدف معمول در همه‌ی روش‌ها، کمینه‌سازی ارتعاش‌ها در زمان موجود است.^[۲] در سیستم‌های کنترل فعال، همواره یک منبع تولید نیروی خارجی مورد نیاز است که بر معادله‌ی تعادل سازه تأثیر می‌گذارد.^[۱] محل عملگر و مقدار نیروی اعمال شده از سوی آن از جمله عوامل مهمی هستند که تأثیر شایانی در بازدهی فرایند کنترل فعال دارند. در صورت عدم تناسب الگوریتم انتخاب شده برای فرایند کنترل فعال، نیروی اعمالی از سوی عملگر می‌تواند منجر به ناپایداری شود. بنابراین خطر ناپایداری و پیچیدگی و حجم زیاد محاسبات به عنوان برخی از دشواری‌های کنترل‌کننده‌های فعال مطرح است. روش کنترل نیمه‌فعال نیز بر پایه‌ی اصلاح سیستم‌های کنترل غیرفعال در ترکیب با فرایندهای فعال به دست آمده است.^[۱]

تاکنون الگوریتم‌های کنترل فعال متعددی توسط بسیاری از پژوهشگران معرفی شده است. در پژوهشی در سال ۱۹۸۸، مودهای انتخاب شده با روشی ساده به فرم یگانه ساده‌سازی شدند، به طوری که موقعیت مناسب المان‌های پیروالکترونیک به دست

در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۴، روش میرایی بحرانی برای استفاده از چند عملگر و حسگر تعمیم داده شد^[۱] و نیروی هر عملگر به‌عنوان یک میراگر لزج اضافی مدل شد، به گونه‌ی که مودهای ارتعاش کمتری در شرایط بحرانی میرا می‌شوند. به سخن دیگر، بحرانی شدن مودهای نوسان سازه نیازمند استفاده از چند عملگر است که نصب و استفاده از آن‌ها در کنترل فعال بسیار دشوار و پرهزینه است. لذا در پژوهشی در سال ۲۰۱۵، شیوه‌ی جدیدی برای مشخص کردن محل‌های حسگر و عملگر پیشنهاد شد^[۱۷] که در آن با معرفی معیار بزرگ‌نمایی، نوسان سازه‌هایی با انواع مختلف درجه‌های آزادی همانند قاب‌های پرتال کنترل شده است.

بیشتر الگوریتم‌های کنترل فعال سازه، براساس مفاهیم بنیادی ریاضیات استوار هستند و از مبانی اساسی دینامیک سازه که بیانگر رفتار دینامیکی سازه‌ها هستند، چشم‌پوشی می‌کنند. روش میرایی بحرانی تلاش می‌کند که این کاستی را برطرف کند و براساس مبانی دینامیک سازه‌ی، الگوریتم جدیدی برای کنترل فعال ارائه کند. با این وجود، استفاده از چند عملگر برای بحرانی کردن چند مود نوسان سبب افزایش هزینه‌ی کنترل فعال می‌شود. روش پیشنهادی در نوشتار حاضر، این نقص را برطرف می‌کند، به گونه‌ی که با استفاده از فقط یک عملگر، دو مود نوسان سازه در شرایط میرایی قرار می‌گیرند. در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن فقط یک عملگر به‌عنوان میراگر اضافی لزج، اثر دو مود نوسان در معادله‌های کنترل سازه وارد شده‌اند. همچنین، یک شرط جدید برای جانمایی محل حسگر و عملگر، ارائه شده است.

۲. کنترل فعال بر پایه‌ی نگره‌ی میرایی بحرانی

روش میرایی بحرانی، فرایند نوینی برای کنترل فعال سازه‌ها ارائه کرده است^[۱۲] که برخلاف بیشتر روش‌های کنترل فعال که مبتنی بر ریاضیات هستند، بر پایه‌ی تئوری‌های دینامیک سازه‌ها استوار است. در روش میرایی بحرانی، عملگر به‌عنوان میراگر اضافی در نظر گرفته می‌شود و به دنبال آن، مقدار نیرو و همچنین محل مناسب عملگر و حسگر مشخص می‌شود. در روش مذکور، نیروی عملگر به‌گونه‌ی رابطه‌سازی می‌شود که میرایی نخستین مود نوسان بحرانی شود. در نتیجه، مقدار نیروی عملگر در هر لحظه به‌دست می‌آید. معادله‌ی تعادل دینامیکی سازه با روش‌های مختلفی، از جمله اصل همپلتون (رابطه‌ی ۱) بیان می‌شود^[۱۸]:

$$[M]\{\ddot{D}\} + [C]\{\dot{D}\} + [K]\{D\} = \{P\} \quad (1)$$

که در آن، $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه هستند. همچنین بردارهای $\{P\}$ و $\{D\}$ ، بردارهای بار خارجی و تغییر مکان‌های گره‌ی هستند. در مورد کنترل فعال، معادله‌ی تعادل دینامیکی به‌صورت رابطه‌ی ۲ نوشته می‌شود^[۱۹]:

$$[M]\{\ddot{D}\} + [C]\{\dot{D}\} + [K]\{D\} + \{F_a\} = \{P\} \quad (2)$$

که در آن، $\{F_a\}$ بردار نیروی عملگر است. از دیدگاه دینامیک سازه‌ها، مفهوم اگر رفتار سازه در شرایط میرایی بحرانی باشد، ارتعاش‌های سازه در کمینه‌ی زمان ممکن، میرا می‌شود، ایده‌ی اصلی استفاده شده در روش میرایی بحرانی است. با انتقال معادله‌ی ۲ به فضای مودال ($\{D\} = [\Phi]\{Z\}$) و با پیش‌ضرب ترانزاده‌ی

آمد^[۵] همچنین برخی پژوهشگران (۱۹۸۸)، یک ساختمان ۴ طبقه را با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مدل کردند، به طوری که با عملگرهای پیزوالکتریکی کنترل می‌شد. نتایج نشان داد که شتاب طبقه می‌تواند تا ۷۰٪ کاهش یابد^[۶]. تعیین موقعیت مناسب عملگرهای پیزوالکتریکی توسط پژوهشگران دیگری نیز بررسی شده است. در پژوهشی در سال ۱۹۹۹، یک ماتریس قابل کنترل برای ورق‌های کامپوزیتی ارائه شد، به طوری که در آن از بیشینه‌ی مقادیر ویژه به‌عنوان تابع عملکرد و نیز از الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن مکان مناسب حسگرها و عملگرهای پیزوالکتریک استفاده شده است^[۷]. همچنین در همان سال، با استفاده از قابلیت کنترل مودها، معیارهای دیگری برای مشخص کردن موقعیت بهینه‌ی عملگرهای پیزوالکتریک ارائه شد^[۸]. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۰، نیز یک مسئله‌ی کاهش ارتعاش به گونه‌ی در نظر گرفته شد که میزان نیروی صوتی کلی آزاد شده یا انرژی پتانسیل صوتی کمینه شود و برای دست‌یابی به موقعیت مناسب عملگرها از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است^[۹].

همچنین در سال ۲۰۰۶، یک تابع عملکرد براساس بیشینه‌سازی انرژی تلف شده‌ی حاصل از فرایند کنترل بررسی شد و براساس آن، یک الگوریتم ژنتیک کدنویسی شد که قادر به حل مسئله‌ی بهینه‌سازی بود^[۹]. در یک مطالعه‌ی تجربی روی عملگرهای پیزوالکتریک (۲۰۰۶) نیز ارتعاش‌های یک قاب ۳ طبقه با استفاده از حسگرها و عملگرهای پیزوالکتریک کنترل شد و سازوکار مدل انتساب قطب برای کنترل کلیه‌ی مودهای ارتعاش پیاده‌سازی شد^[۱۰]. همچنین در سال ۲۰۱۴، یک مدل کنترل پایه‌ی انطباقی در میراگرهای جرم فعال به‌کار رفته است که فرایند آن به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بوده است^[۱۱]. از سوی دیگر، یک فرایند کنترل بر پایه‌ی تأخیر زمانی بازخورد شتاب نیز ارائه شده است، که شیوه‌ی آن برای کنترل نوسان‌های تیر یک سرگیردار به کار رفته است^[۱۲]. یک شاخص کنترل فعال نیز در سال ۲۰۱۴ برای سازه‌های سه‌بعدی ارائه شده و عملکرد آن در ساختمان ۶ طبقه، تحت اثر چند زلزله‌ی میدان دور و نزدیک بررسی شده است^[۱۳]. همچنین برخی پژوهشگران در سال ۲۰۱۵، یک شیوه‌ی نوین برای کنترل فعال نوسان‌های صفحه‌های مرکب پیشنهاد کرده‌اند^[۱۴]. در مطالعه‌ی دیگر (۲۰۱۷)، نیز یک مدل کنترلی سریع برای کاربرد در سازه‌های بزرگ که تحت اثر شتاب پایه‌ی زمین‌لرزه قرار دارند، ارائه شده است^[۱۵] که در آن نیروی عملگر با حل یک دستگاه خطی متمم و انجام یک تحلیل پویا به دست آمده است. همچنین، در همان سال یک شیوه‌ی کنترل فعال - غیرفعال برای سنجش نوسان‌های سازه‌های خرپایی ابداع شد^[۱۶] که کارایی مناسبی در هر دو بسامدهای بالا و پایین داشت.

در سازه‌های هوشمند، عملکرد مناسب حسگرها و عملگرها وابسته به تعیین دقیق موقعیت و نیروی اعمالی به سازه از طرف عملگرهاست. تاکنون الگوریتم‌های گوناگونی برای کنترل فعال ارائه شده است. برای نمونه می‌توان به الگوریتم‌های کنترل بهینه‌ی خطی، کنترل بهینه‌ی آنی، انتساب قطب، کنترل غیرخطی، کنترل مود لغزشی، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی عصبی اشاره کرد^[۱]. در الگوریتم‌های مذکور و موارد مشابه، قوانین بنیادی دینامیک سازه‌ها که بیانگر رفتار دینامیکی سازه هستند، در نظر گرفته نمی‌شوند. برای حل مشکل ذکر شده، برخی پژوهشگران در سال ۲۰۱۱، الگوریتم نوینی بر پایه‌ی نگره‌ی بنیادی دینامیک سازه‌ها ارائه کردند^[۴] که در آن با استفاده از مفهوم میرایی بحرانی، عملگر معادل با یک میراگر اضافی در سازه بررسی شده است. بر این اساس، نیروی عملگر در هر گام از فرایند کنترل، محاسبه و محل مناسب حسگر و عملگر با استفاده از بردارهای شکل نوسان تعیین شده است.

ماتریس شکل نوسان، رابطه‌ی ۳ برای هر مود دلخواه نوشته می‌شود:

$$\left(\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\} \ddot{Z}_i + \{\varphi_i\}^T [C] \{\varphi_i\} \dot{Z}_i + \{\varphi_i\}^T [K] \{\varphi_i\} Z_i + \{\varphi_i\}^T \{F_a\} \right) = \{\varphi_i\}^T \{P\} \quad (3)$$

که در آن، $\{\varphi_i\}$ بردار شکل مود \dot{Z}_i و $\{Z\}$ بردار تغییر مکان‌های مودی را نشان می‌دهد. با فرض داشتن فقط یک عملگر در درجه‌ی آزادی k ، معادله‌ی ۳ به صورت معادله‌ی ۴ قابل بازنویسی خواهد بود: [۲]

$$M_i \ddot{Z}_i + C_i \dot{Z}_i + K_i Z_i + \varphi_{ki} F_a^k = \{\varphi_i\}^T \{P\} \quad (4)$$

که در آن، M_i ، C_i و K_i به ترتیب مقادیر جرم، میرایی و سختی مود \dot{Z}_i هستند. افزون بر این، مقدار F_a^k نیروی عملگر وارد بر درجه آزادی k است و φ_{ki} درایه‌ی k از بردار ویژه‌ی مود \dot{Z}_i را مشخص می‌کند. از آنجا که عملگر به عنوان یک میراگر اضافی لزج در نظر گرفته می‌شود، می‌توان معادله‌ی ۴ را به صورت معادله‌ی ۵ بیان کرد:

$$M_i \ddot{Z}_i + \left(C_i + \frac{\varphi_{ki} F_a^k}{\dot{Z}_i} \right) \dot{Z}_i + K_i Z_i = \{\varphi_i\}^T \{P\} \quad (5)$$

که در آن، فقط برای انجام رابطه‌سازی کنترل فعال پیشنهادی، نیروی عملگر به صورت میرایی معادل نوشته می‌شود. بنابراین، میرایی ساختگی فقط برای رابطه‌سازی و تعیین نیروی عملگر استفاده می‌شود. عامل C_i^* به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$C_i^* = C_i + \frac{\varphi_{ki} F_a^k}{\dot{Z}_i} \quad (6)$$

با در نظر گرفتن اثر مود اول ($i = 1$) و براساس این فرض که اگر رفتار سازه در شرایط میرایی بحرانی باشد، نوسان‌های سازه در کمینه‌ی زمان ممکن میرا می‌شود، میرایی سازه برابر میرایی حالت بحرانی قرار داده می‌شود (رابطه‌ی ۷):

$$C_1^* = C_{cr} = 2M_1\omega_1 \quad (7)$$

که در آن، M_1 و ω_1 به ترتیب جرم و کوچک‌ترین بسامد طبیعی سازه مربوط به نخستین مود نوسان است. انتخاب محل‌های مناسب برای حسگر و عملگر، منجر به عملکرد مناسب‌تر الگوریتم کنترل فعال می‌شود. براساس تئوری‌های دینامیک سازه، عملگر باید به آن درجه آزادی که بیشترین مقدار در مود اول بردار شکل نوسان را دارد، متصل شود. درایه‌های با مقدار زیاد در بردار شکل مود، تأثیر قابل توجهی در پاسخ دارند. بنابراین درجه‌ی آزادی که بیشترین مقدار در بردار شکل را دارد، به عنوان محل نصب عملگر انتخاب می‌شود. همچنین حسگر باید به درجه آزادی که بیشترین مقدار را در سطر اول معکوس ماتریس شکل مودی دارد، متصل شود. بر پایه‌ی آنچه که بیان شد، مقدار کمیت \dot{Z}_1 را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۸ تقریب زد:

$$\dot{Z}_1 \approx \varphi_{1L}^{-1} \dot{D}_L \quad (8)$$

که در آن، L محل نصب حسگر و φ_{1L}^{-1} درایه‌ی L از سطر اول معکوس ماتریس بردارهای ویژه است. پس از مشخص شدن محل‌های نصب حسگر و عملگر الگوی مطرح شده، نیروی عملگر با در نظر گرفتن اثر مود اول در هر لحظه مطابق رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود: [۲]

$$F_a^k = \frac{\varphi_{1L}^{-1}}{\varphi_{k1}} (2M_1\omega_1 - C_1) \dot{D}_L \quad (9)$$

۳. رابطه‌سازی پیشنهادی کنترل فعال بر پایه‌ی میرایی

بحرانی با در نظر گرفتن اثر دو مود نوسان

رابطه‌سازی ارائه شده در روش میرایی بحرانی فقط اثر مود اول را در نظر می‌گیرد. اگرچه مود اول بیشترین سهم را در پاسخ سامانه دارد، اما وارد کردن اثر مودهای بالاتر می‌تواند منجر به فرایند کنترلی مناسب‌تری شود. به سخن دیگر، انتظار می‌رود که با در نظر گرفتن اثر مودهای بالاتر، دامنه‌ی نوسان در مقایسه با الگوریتم میرایی بحرانی کاهش یابد. از این رو، در ادامه راهکار نویسی برای وارد کردن اثر مودهای بالاتر با استفاده از فقط یک عملگر ارائه شده است. با در نظر گرفتن آثار مودهای اول و دوم، معادله‌ی ۴ به صورت رابطه‌ی ۱۰ بازنویسی می‌شود:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{Z}_1 + C_1 \dot{Z}_1 + K_1 Z_1 + \varphi_{k1} F_a^k = \{\varphi_1\}^T \{P\} \\ M_2 \ddot{Z}_2 + C_2 \dot{Z}_2 + K_2 Z_2 + \varphi_{k2} F_a^k = \{\varphi_2\}^T \{P\} \end{cases} \quad (10)$$

معادله‌های ۱۰ را می‌توان به صورت روابط ۱۱ بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{Z}_1 + \left(C_1 + \frac{\varphi_{k1} F_a^k}{\dot{Z}_1} \right) \dot{Z}_1 + K_1 Z_1 = \{\varphi_1\}^T \{P\} \\ M_2 \ddot{Z}_2 + \left(C_2 + \frac{\varphi_{k2} F_a^k}{\dot{Z}_2} \right) \dot{Z}_2 + K_2 Z_2 = \{\varphi_2\}^T \{P\} \end{cases} \quad (11)$$

اکنون کمیت C_i^* با میرایی بحرانی متناظر در مود \dot{Z}_i برابر قرار داده می‌شود (روابط ۱۲):

$$\begin{cases} C_1^* = C_{cr1} = 2M_1\omega_1 \\ C_2^* = C_{cr2} = 2M_2\omega_2 \end{cases} \quad (12)$$

براساس رابطه‌های ۱۱ و ۱۲، برای محاسبه‌ی نیروی عملگر در هر مود، به مقدار سرعت مودی یا \dot{Z}_i^* نیاز خواهد بود. این کمیت‌ها را می‌توان براساس ایده‌ی پیشنهادی در روش میرایی بحرانی برای هر مود به صورت رابطه‌ی ۱۳ تقریب زد:

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 \approx \varphi_{1L_1}^{-1} \dot{D}_{L_1} \\ \dot{Z}_2 \approx \varphi_{2L_2}^{-1} \dot{D}_{L_2} \end{cases} \quad (13)$$

که در آن، L_1 و L_2 به ترتیب محل نصب حسگر با در نظر گرفتن اثر مودهای اول و دوم هستند. بر این اساس، فقط نیروی عملگر موجود با روی هم‌گذاری اثر مودهای اول و دوم به صورت رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$F_a^k = \frac{\varphi_{1L_1}^{-1}}{\varphi_{k1}} (2M_1\omega_1 - C_1) \dot{D}_{L_1} + \frac{\varphi_{2L_2}^{-1}}{\varphi_{k2}} (2M_2\omega_2 - C_2) \dot{D}_{L_2} \quad (14)$$

رابطه‌ی ۱۴ نشان می‌دهد که نیروی عملگر، تابع سرعت در درجه‌های آزادی اول و دوم است؛ چرا که عملگر به عنوان یک میراگر اضافی در سیستم پنداشته شده است. بنابراین، رابطه‌ی ۱۴ را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۵ ماتریسی بیان کرد:

$$F_a^k = [\bar{C}] \{\dot{D}\} \quad (15)$$

که در آن، $[\bar{C}]$ ماتریس میرایی ناشی از وجود نیروی عملگر در سامانه است. آشکار است که همه‌ی درایه‌های ماتریس مذکور صفر است و فقط درایه‌های سطر k و

ستون‌های L_1 و L_2 آن مقدار خواهد داشت. با جای‌گذاری رابطه‌ی ۱۵ در رابطه‌ی ۲، معادله‌ی تعادل را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۶ بازآرایی کرد:

$$[M]\{\ddot{D}\} + ([C] + [\bar{C}])\{\dot{D}\} + [K]\{D\} = \{P\} \quad (16)$$

رابطه‌ی ۱۶ به وضوح نشان می‌دهد که عملگرها باعث افزایش میرایی سامانه‌ی کنترل شده می‌شوند. باید دانست که ماتریس $[\bar{C}]$ در حالت کلی یک ماتریس نامتقارن است. این ویژگی موجب نامتقارن شدن ماتریس میرایی کل سامانه و ناپایداری عددی در فرایند تابع اولیه‌گیری می‌شود؛ حال آنکه بر پایه‌ی نگره‌های بنیادی دینامیک سازه، ماتریس میرایی در سامانه‌های پویا باید نیمه‌معین مثبت باشد.^[۲۰] بر این اساس لازم است که تقارن ماتریس میرایی حفظ شود. این حالت هنگامی رخ می‌دهد که مقادیر L_1 و L_2 یکسان و برابر با k باشند. به سخن دیگر، روش پیشنهادی فقط به یک حسگر نیاز دارد که محل نصب آن در درجه آزادی خواهد بود که عملگر در آن نصب شده است. گفتمنی است که در حالت مذکور، $[\bar{C}]$ یک ماتریس قطری خواهد بود که فقط درایه‌ی k آن مقدار دارد. براساس آنچه که بیان شد، درایه‌ی مذکور مطابق رابطه‌ی ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$\bar{C}(k, k) = \frac{\varphi_{1k}^{-1}}{\varphi_{k1}} (2M_1\omega_1 - C_1) + \frac{\varphi_{2k}^{-1}}{\varphi_{k2}} (2M_2\omega_2 - C_2) \quad (17)$$

برای تعیین محل نصب عملگر مطابق الگوی پیشین، از ماتریس شکل مودی استفاده می‌شود. تاکنون مطالعات وسیعی بر روی تعیین محل‌های مناسب عملگر و حسگر انجام شده است.^[۲۱-۲۳] نتایج مطالعات مذکور در الگوی ساده و کامل ارائه شده در نوشتاری در سال ۲۰۱۱،^[۲۱] در نظر گرفته شده است. براساس روش مذکور، در مود نوسان n ام، سهم درجه‌ی آزادی n ام با φ_n مشخص می‌شود. بنابراین، هر چه درایه‌ی مذکور بزرگ‌تر باشد، سهم آن درجه‌ی آزادی در آن مود نوسان بیشتر می‌شود. بنابراین، لازم است عملگر به درجه‌ی آزادی متصل شود که بیشترین سهم را در آن مود داشته باشد. در نتیجه، محل نصب عملگر براساس بزرگ‌ترین درایه‌ی سطر اول از ماتریس شکل مودی قابل تعیین خواهد بود.^[۲۱]

باید دانست، در شیوه‌ی ذکر شده، عملگر و حسگر می‌توانند در درجه‌های آزادی متفاوت نصب شوند. در روش پیشنهادی، از شرط حفظ تقارن ماتریس میرایی معادل سازه استفاده می‌شود و حسگر و عملگر در یک درجه آزادی نصب می‌شوند. این فرایند سبب تضمین پایداری روش تابع اولیه‌گیری می‌شود. بنابراین، در روش پیشنهادی، عملگر و حسگر در یک درجه آزادی نصب می‌شوند. در نهایت، مقدار نیروی عملگر با روی هم‌گذاری اثر مودهای اول و دوم مطابق رابطه‌ی ۱۸ محاسبه خواهد شد:

$$F_a^k = [\bar{C}]\{\dot{D}\} = \left(\frac{\varphi_{1k}^{-1}}{\varphi_{k1}} (2M_1\omega_1 - C_1) + \frac{\varphi_{2k}^{-1}}{\varphi_{k2}} (2M_2\omega_2 - C_2) \right) \dot{D}_k \quad (18)$$

به این ترتیب آثار مودهای اول و دوم نوسان، فقط با یک عملگر در معادلات دینامیک سازه وارد می‌شوند. با این فرایند، کارایی روش میرایی بحرانی افزایش می‌یابد. همچنین، هزینه‌ی اجرای مکانیزم کنترل فعال، به دلیل استفاده از تعداد کمتری عملگر، کاهش پیدا می‌کند. در ادامه، عملکرد روش پیشنهادی در کاهش پاسخ‌های سازه بررسی شده است. این ارزیابی با نتایج ارائه شده در بخش نمونه‌های عددی انجام شده است. لازم به ذکر است که ویژگی اصلی نوشتار حاضر و برتری روش کنترل فعال پیشنهادی، استفاده از تعداد کمتر عملگر است. به سخن دیگر، محدودیتی برای

تعداد عملگر وجود ندارد و استفاده از تعداد بیشتری عملگر پیش از این بررسی شده است.^[۱] به عنوان نمونه، بحرانی کردن دو مود نوسان با دو عملگر پیش از این به کار رفته است.^[۱] بنابراین، جنبه‌ی اصلی نوآوری نوشتار حاضر، استفاده از یک عملگر برای بحرانی کردن میرایی دو مود نوسان است.

۴. نمونه‌های عددی

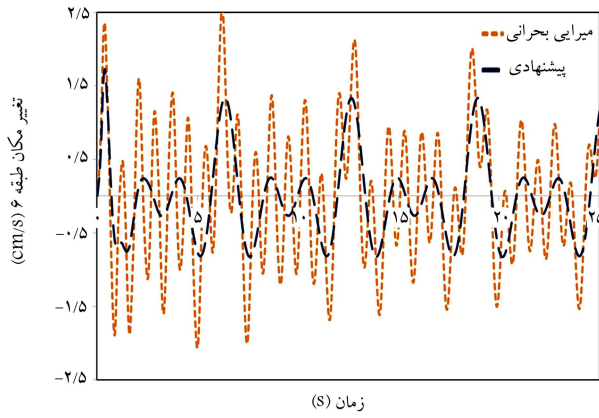
در نوشتار حاضر، برای ارزیابی روش پیشنهادی کنترل فعال و مقایسه‌ی آن با روش میرایی بحرانی، دو نمونه‌ی عددی با شرایط بارگذاری گوناگون بررسی شده‌اند. برای این کار، شیوه‌های مزبور با روش تابع اولیه‌گیری ضمنی نیومارک ترکیب شده و سپس در یک فرایند گام به گام، پاسخ سازه در حالت‌های مختلف و در ایستگاه‌های زمانی مشخص محاسبه شده است. این فرایند توسط یک برنامه‌ی رایانه‌ی که توسط نویسندگان نوشتار حاضر توسعه یافته است، انجام شده است. گام‌های الگوریتم پیشنهادی را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

۱. برپایی ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی، تعیین اندازه‌ی گام زمانی Δt و قرار دادن $n \rightarrow 0$ ؛
 ۲. تعیین موقعیت نصب عملگر k و قرار دادن محل نصب حسگر $k \rightarrow L$ براساس روش پیشنهادی؛
 ۳. محاسبه‌ی درایه‌ی قطری ماتریس $[\bar{C}]$ از رابطه‌ی ۱۷؛
 ۴. قرار دادن $[C] \rightarrow [C] + [\bar{C}]$ ؛
 ۵. محاسبه‌ی بردارهای تغییرمکان، سرعت و شتاب در گام جاری با استفاده از روش نیومارک؛
 ۶. محاسبه نیروی عملگر براساس رابطه‌ی ۱۸؛
 ۷. قرار دادن $n \rightarrow n + 1$ ؛
 ۸. پایان الگوریتم در صورتی که زمان تحلیل به پایان رسیده است؛ در غیر این صورت تکرار از گام ۵.
- در ادامه، نوسان‌های چند سازه‌ی برشی با روش کنترل فعال پیشنهادی کنترل شده است.

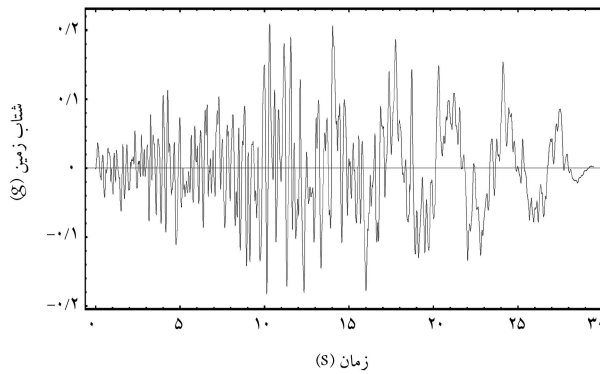
۱.۴. ساختمان برشی ۶ طبقه

یک ساختمان برشی ۶ طبقه مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. مشخصات جرم و سختی هر طبقه بر روی شکل ۱ مشخص شده است. ماتریس میرایی، متناسب با سختی فرض شده و ضریب تناسب آن برابر 0.01 و گام زمانی تحلیل برابر 0.05 ثانیه در نظر گرفته شده است.^[۲۴] افزون بر این، کوچک‌ترین زمان تناوب سازه برابر 0.32 ثانیه بوده است.

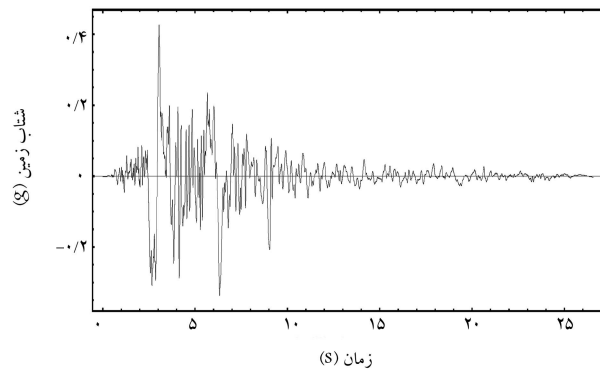
محل نصب حسگر و عملگر با حل مسئله‌ی مقدار ویژه و محاسبه‌ی بردارهای شکل مودی قابل محاسبه است. جدول ۱، جزئیات فرایند مذکور را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه درایه‌ی متناظر با درجه آزادی ششم در بردار شکل مربوط به مود اول، بیشترین مقدار را دارد، عملگر در درجه‌ی آزادی ششم نصب شده است. از سوی دیگر، بیشترین مقدار سطر اول معکوس ماتریس شکل مودی در درایه‌ی چهارم رخ می‌دهد. از این رو در روش میرایی بحرانی، حسگر در درجه‌ی آزادی چهارم نصب



شکل ۳. تاریخچه‌ی زمانی سرعت طبقه‌ی بام در ساختمان برشی ۶ طبقه تحت اثر بار هارمونیک.



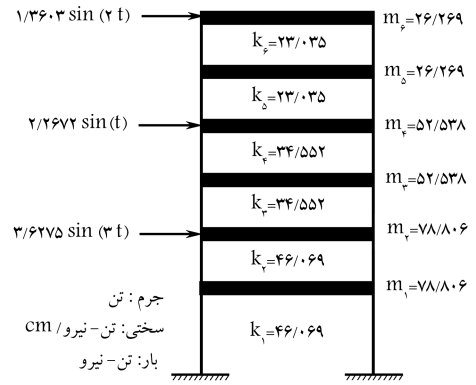
شکل ۴. شتاب‌نگاشت افقی زلزله‌ی منجیل.



شکل ۵. شتاب‌نگاشت افقی زلزله‌ی نورتریج.

بیشتر، مقادیر بیشینه‌ی تغییرمکان در هر طبقه و بیشینه‌ی نیروی عملگر در جدول ۲ مقایسه شده است. می‌توان مشاهده کرد که روش ارائه شده، مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان در همه‌ی طبقات را کاهش داده است و نیز بیشینه‌ی مقدار نیروی عملگر در روش پیشنهادی کمتر از روش میرایی بحرانی است.

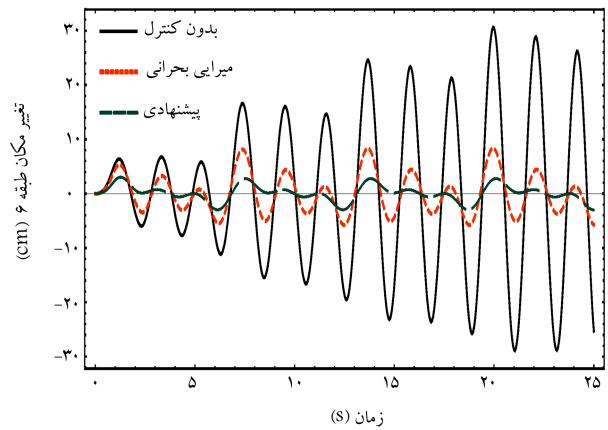
در تحلیل بعد، ساختمان تحت اثر شتاب‌نگاشت افقی دو زلزله‌ی منجیل (حوزه‌ی دور) و نورتریج (حوزه‌ی نزدیک) قرار گرفته است. شتاب‌نگاشت دو زلزله‌ی مذکور به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شوند. با انتخاب گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه برای زلزله‌ی منجیل و ۰/۰۱ ثانیه برای زلزله‌ی نورتریج، کارایی الگوریتم کنترل پیشنهادی بررسی شده است. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان افقی بام برای زلزله‌های



شکل ۱. ساختمان برشی ۶ طبقه.

جدول ۱. محل نصب حسگر و عملگر برای ساختمان برشی ۶ طبقه.

درجه آزادی	$\{\varphi_1^{inv}\}$	$\{\varphi_1\}$	حالت کنترل مناسب	
			میرایی بحرانی	پیشنهادی
۱	۰/۲۵۷۶	۰/۱۲۷۵		
۲	۰/۴۸۹۳	۰/۲۴۲۳		
۳	۰/۴۸۸۷	۰/۳۶۳۰	S۴ - A۶	S۶ - A۶
۴	۰/۶۰۷۸	۰/۴۵۱۴		
۵	۰/۳۵۲۶	۰/۵۲۳۸		
۶	۰/۳۷۷۸	۰/۵۶۱۳		



شکل ۲. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان طبقه‌ی بام در ساختمان برشی ۶ طبقه تحت اثر بار هارمونیک.

شده است؛ حال آنکه در روش پیشنهادی، محل نصب حسگر و عملگر یکسان و در درجه آزادی ششم است.

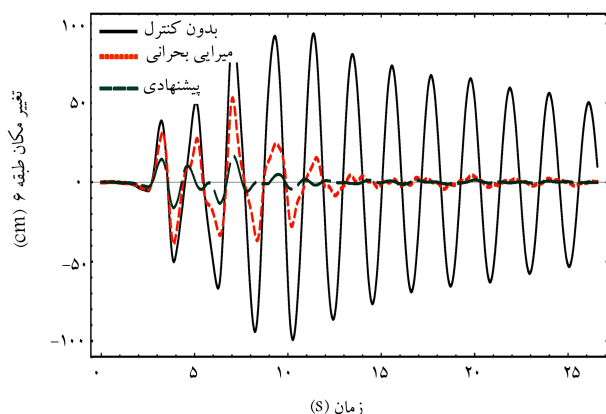
با تعیین محل نصب حسگر و عملگر، کارایی فرایند کنترلی پیشنهادی آزموده می‌شود. برای این کار، نخست سازه‌ی مورد بررسی تحت اثر بار هارمونیک مطابق شکل ۱ قرار می‌گیرد. شکل‌های ۲ و ۳، به ترتیب، تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان افقی و سرعت افقی بام را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی در مقایسه با روش میرایی بحرانی، عملکرد بهتری داشته و دامنه‌ی نوسان را به میزان چشم‌گیری کاهش داده است. همچنین مطابق شکل ۳، کاهش سرعت در روش کنترل فعال پیشنهادی بیشتر از روش میرایی بحرانی است. بنابراین، کارایی فرایند ذکر شده در کاهش انرژی جنبشی سازه بیشتر از روش میرایی بحرانی است. برای بررسی

جدول ۲. مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی پاسخ و نیروی عملگر در ساختمان برشی ۶ طبقه تحت اثر بار هارمونیک.

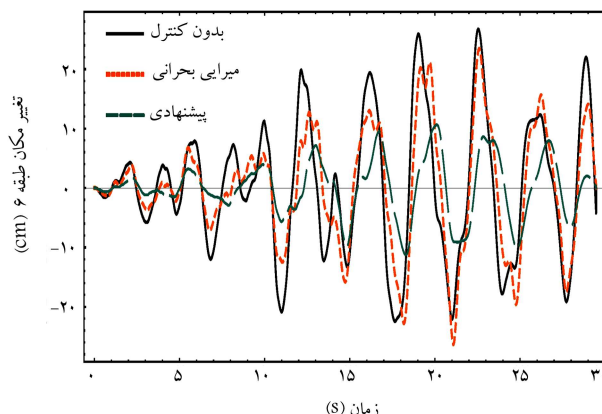
طبقه	بیشینه‌ی تغییر مکان (سانتی متر)			درصد کاهش تغییر مکان (%)		بیشینه‌ی نیروی عملگر (تن - نیرو)	
	بدون کنترل	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی
۱	۶/۷۳	۱/۷۸	۱/۰۲	۷۳/۵۶	۸۴/۸۶		
۲	۱۲/۸۲	۳/۴۲	۱/۹۶	۷۳/۳۳	۸۴/۷۱		
۳	۱۹/۴۴	۵/۱۲	۲/۴۰	۷۳/۶۶	۸۷/۶۷	۳/۸۳۴	۳/۴۷۴
۴	۲۴/۴۵	۶/۵۷	۲/۷۲	۷۳/۱۲	۸۸/۸۹		
۵	۲۸/۴۰	۷/۶۱	۲/۸۳	۷۳/۲۰	۹۰/۰۲		
۶	۳۰/۶۰	۸/۳۳	۳/۰۳	۷۲/۷۶	۹۰/۱۰		

جدول ۳. مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی پاسخ و نیروی عملگر در ساختمان برشی ۶ طبقه تحت اثر شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل.

طبقه	بیشینه‌ی تغییر مکان (سانتی متر)			درصد کاهش تغییر مکان (%)		بیشینه‌ی نیروی عملگر (تن - نیرو)	
	بدون کنترل	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی
۱	۷/۳۵	۶/۴۴	۴/۹۰	۱۲/۳۷	۳۳/۳۵		
۲	۱۲/۹۷	۱۱/۶۲	۸/۳۷	۱۰/۴۰	۳۵/۴۴		
۳	۱۷/۰۵	۱۶/۶۱	۱۰/۹۵	۲/۵۴	۳۵/۷۹	۱۵/۴۵۳	۱۵/۸۷۲
۴	۲۱/۳۹	۱۹/۰۹	۱۱/۸۸	۱۰/۷۴	۴۴/۴۳		
۵	۲۴/۸۸	۲۲/۵۸	۱۱/۵۵	۹/۲۳	۵۳/۵۶		
۶	۲۶/۶۹	۲۶/۳۰	۱۱/۲۴	۱/۴۶	۵۷/۸۸		



شکل ۷. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه‌ی بام در ساختمان برشی ۶ طبقه تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی نورث ریج.



شکل ۸. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه‌ی بام در ساختمان برشی ۶ طبقه تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل.

در مرحله‌ی نخست، پاسخ سازه در برابر بار ضربه‌ی با تاریخچه‌ی زمانی نشان داده شده در شکل ۹ سنجیده می‌شود. در تحلیل بعد با حذف بارهای جانبی، ساختمان مورد بررسی تحت اثر شتاب‌نگاشت افقی زلزله‌ی منجیل قرار گرفته است. (شکل ۳) در گام آخر، پاسخ سازه نسبت به بارگذاری لرزه‌ی ناشی از شتاب زلزله‌ی نورث ریج محاسبه شده است. (شکل ۴)

برای تعیین محل نصب حسگر و عملگر از جدول ۵ که از حل مسئله‌ی مقدار ویژه به دست آمده است، استفاده شده است. زمان تناوب اصلی نوسان سازه برابر ۰/۵۸ ثانیه است. با توجه به اینکه بیشترین مقدار بردار شکل مود اول در درایه‌ی متناظر با درجه‌ی آزادی دهم رخ داده است، عملگر (و حسگر در روش پیشنهادی) در درجه‌ی آزادی دهم نصب شد. محل نصب حسگر در روش میرایی بحرانی نیز در درجه‌ی آزادی نهم است.

منجیل و نورث ریج به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ رسم شده است. آشکار است که روش پیشنهادی نسبت به روش میرایی بحرانی، عملکرد بهتری دارد و در زمان کمتری نوسان‌های سازه میرا می‌کند. همچنین، بررسی جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که میزان کاهش بیشینه‌ی دامنه‌ی تغییر مکان در تمام درجه‌های آزادی و در هر دو نوع بارگذاری، کمتر از روش میرایی بحرانی است. با وجود این، نیروی مورد نیاز برای میرا کردن نوسان‌های سازه، اندکی بیشتر است.

۲.۴. ساختمان برشی ۱۰ طبقه

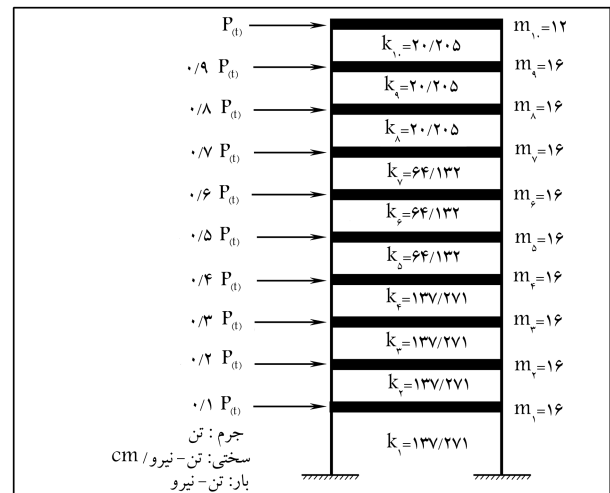
در بخش حاضر، یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه مطابق شکل ۸ در نظر گرفته شده است.^[۲۵] ماتریس میرایی سازه با استفاده از الگوی میرایی ریلی و با در نظر گرفتن ۵٪ میرایی در مودهای اول و سوم ارائه شده است.^[۲۶]

جدول ۴. مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی پاسخ و نیروی عملگر در ساختمان برشی ۶ طبقه تحت اثر شتاب‌نگاشت زلزله‌ی نورث‌ریج.

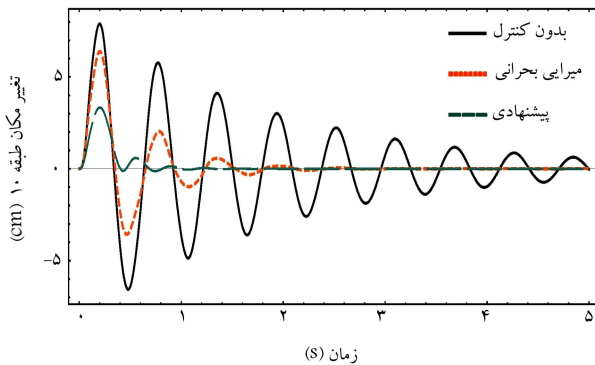
طبقه	بیشینه‌ی تغییر مکان (سانتی متر)			درصد کاهش تغییر مکان (%)		بیشینه‌ی نیروی عملگر (تن - نیرو)	
	بدون کنترل	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی
۱	۲۴/۵۲	۱۲/۸۸	۱۰/۰۹	۴۷/۴۵	۵۸/۸۷		
۲	۴۵/۴۶	۲۱/۰۰	۱۷/۱۵	۵۳/۸۰	۶۲/۲۷		
۳	۶۴/۳۵	۲۵/۰۹	۲۱/۸۹	۶۱/۰۱	۶۵/۹۸	۴۲/۱۹۲	۳۲/۰۹۸
۴	۷۸/۷۷	۳۳/۳۱	۲۲/۹۳	۵۷/۷۲	۷۰/۸۹		
۵	۹۱/۸۷	۴۵/۴۹	۱۸/۶۳	۵۰/۴۹	۷۹/۷۲		
۶	۹۹/۱۰	۵۳/۰۱	۱۶/۵۳	۴۶/۵۱	۸۳/۳۲		

جدول ۵. محل نصب حسگر و عملگر برای ساختمان برشی ۱۰ طبقه.

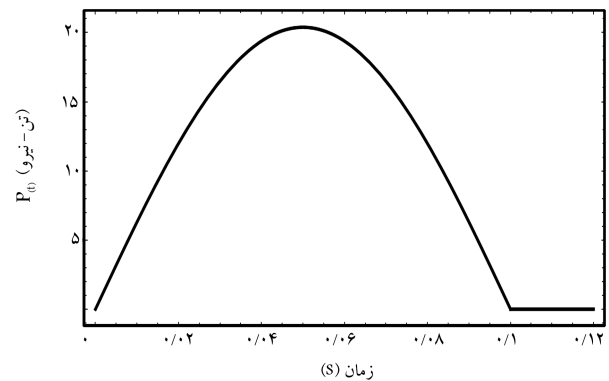
طبقه	{ φ_1 }	{ φ^{ms} }	حالت کنترل مناسب	
			میرایی بحرانی	پیشنهادی
۱	۰/۰۳۷۱	۰/۰۳۴۱۸		
۲	۰/۰۷۳۷	۰/۰۶۷۹		
۳	۰/۱۰۹۲	۰/۱۰۰۰۶		
۴	۰/۱۴۳۳	۰/۱۳۲		
۵	۰/۲۱۱۹	۰/۱۹۵۲	$S_{10} - A_{10}$	$S_9 - A_{10}$
۶	۰/۲۷۴۲	۰/۲۵۲۶		
۷	۰/۳۲۸۳	۰/۳۰۲۵		
۸	۰/۴۶۹۲	۰/۴۳۲۲		
۹	۰/۵۶۵۷	۰/۵۲۱۲		
۱۰	۰/۴۵۶۶	۰/۵۶۰۹		



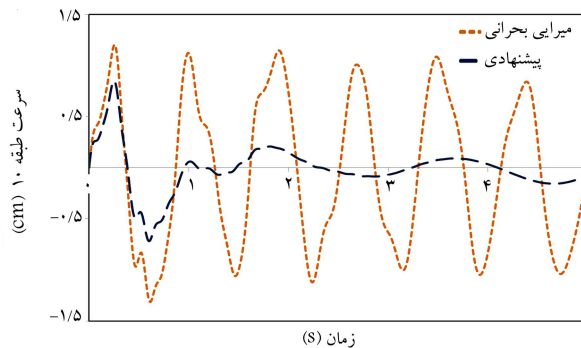
شکل ۸. ساختمان برشی ۱۰ طبقه.



شکل ۱۰. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه‌ی بام در ساختمان برشی ۱۰ طبقه تحت بار ضربه‌یی.



شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی بار ضربه‌یی.



شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقه‌ی بام در ساختمان برشی ۱۰ طبقه تحت بار ضربه‌یی.

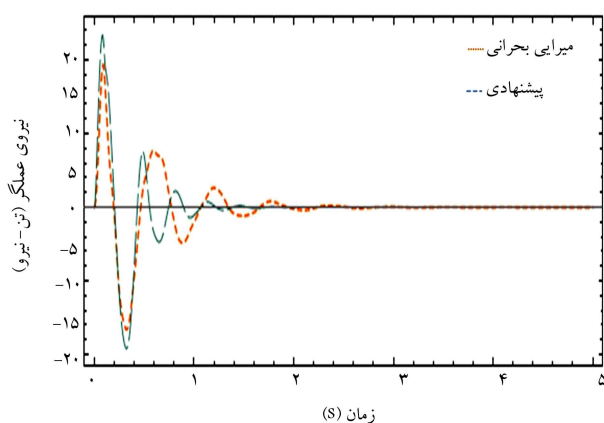
با انتخاب گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه، پاسخ سامانه در برابر بار ضربه‌یی محاسبه شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به ترتیب تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان و سرعت بام رسم شده است. آشکار است که میزان کاهش دامنه‌ی تغییر مکان در روش پیشنهادی بیشتر از روش میرایی بحرانی است و نوسان‌ها زودتر میرا می‌شوند. بر اساس شکل ۱۱، کاهش سرعت سازه در روش پیشنهادی بیشتر از روش میرایی بحرانی است. در نتیجه، کاهش انرژی جنبشی سازه در فرایند پیشنهادی بسیار چشمگیرتر از روش میرایی بحرانی است. همچنین در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که روش ارائه شده، مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان را در همه‌ی درجه‌های آزادی کاهش داده است (جدول ۴) و در مقایسه با روش میرایی بحرانی، عملکرد مناسب‌تری دارد. لازم به ذکر است

جدول ۶. مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی پاسخ و نیروی عملگر در ساختمان برشی ۱۰ طبقه تحت بار ضربه‌یی.

طبقه	بیشینه‌ی تغییر مکان (سانتی‌متر)			درصد کاهش تغییر مکان (%)		بیشینه‌ی نیروی عملگر (تن - نیرو)	
	بدون کنترل	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی
۱	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۳	۱/۲۲	۲/۹۲		
۲	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۸۶	۱/۱۱	۳/۲۶		
۳	۱/۳۲	۱/۳۰	۱/۲۶	۱/۷۵	۴/۷۳		
۴	۱/۷۶	۱/۷۱	۱/۶۴	۲/۶۸	۶/۸۷		
۵	۲/۶۶	۲/۵۴	۲/۳۵	۴/۷۲	۱۱/۶۶	۲۳/۸۲۰	۱۹/۶۹۲
۶	۳/۵۰	۳/۲۶	۲/۹۲	۶/۶۹	۱۶/۵۸		
۷	۴/۲۲	۳/۸۵	۳/۲۸	۸/۸۸	۲۲/۱۸		
۸	۶/۰۶	۵/۱۲	۳/۷۴	۱۵/۵۱	۳۸/۲۸		
۹	۷/۲۷	۵/۸۵	۳/۴۵	۱۹/۵۰	۵۲/۴۴		
۱۰	۷/۸۹	۶/۳۸	۳/۳۳	۱۹/۰۶	۵۷/۷۳		

جدول ۷. مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی پاسخ و نیروی عملگر در ساختمان برشی ۱۰ طبقه تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی منجیل.

طبقه	بیشینه‌ی تغییر مکان (سانتی‌متر)			درصد کاهش تغییر مکان (%)		بیشینه‌ی نیروی عملگر (تن - نیرو)	
	بدون کنترل	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی
۱	۰/۳۹	۰/۲۳	۰/۳۱	۳۹/۶۵	۲۰/۹۹		
۲	۰/۷۵	۰/۴۴	۰/۵۹	۴۰/۵۵	۲۰/۴۵		
۳	۱/۰۹	۰/۶۳	۰/۸۶	۴۲/۸۷	۲۱/۷۸		
۴	۱/۴۳	۰/۷۹	۱/۰۸	۴۴/۸۱	۲۳/۹۲		
۵	۲/۰۹	۱/۱۲	۱/۴۸	۴۶/۳۳	۲۹/۳۳	۱۶/۶۲۷	۱۰/۶۶۵
۶	۲/۷۰	۱/۴۵	۱/۷۶	۴۶/۳۵	۳۴/۹۱		
۷	۳/۲۴	۱/۷۵	۱/۸۹	۴۵/۸۵	۴۱/۶۴		
۸	۴/۶۸	۲/۶	۱/۸۸	۴۴/۴۵	۵۹/۷۹		
۹	۵/۶۸	۳/۱۶	۱/۷۵	۴۴/۳	۶۹/۰۸		
۱۰	۶/۱۲	۳/۳۹	۱/۷۳	۴۴/۶۲	۷۱/۷۱		



شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی نیروی عملگر در ساختمان برشی ۱۰ طبقه تحت بار ضربه‌یی.

که مقدار نیروی عملگر مورد نیاز برای کنترل نوسان‌های سازه در این حالت بیشتر از روش میرایی بحرانی است (جدول ۶). برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، شکل ۱۲ تاریخچه‌ی زمانی نیروی عملگر را برای بار دینامیکی ضربه‌یی نشان می‌دهد. بر این اساس، در آغاز فرایند کنترل، نیروی مورد نیاز در عملگر با روش کنترل فعال پیشنهادی بیشتر از فرایند میرایی بحرانی است. با گذشت زمان، این اختلاف کاهش می‌یابد. باید دانست، هر چه نیروی عملگر بیشتر باشد، هزینه‌ی ایجاد آن بیشتر است. در شکل ۱۳، نمودار تغییرات جابه‌جایی افقی طبقه‌ی بام نسبت به زمان و به ازاء گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه در حالت بارگذاری لرزه‌یی ناشی از شتاب‌نگاشت افقی زلزله‌ی منجیل رسم شده است. همچنین مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی هر طبقه و بیشینه‌ی نیروی عملگر مورد نیاز در حالت مذکور در جدول ۷ ارائه شده است که مطابق آن در روش پیشنهادی، میزان کاهش تغییر مکان در درجه‌ی آزادی که عملگر در آن نصب شده است، بیشینه بوده و در طبقه‌های ۸ الی ۱۰ بیشتر از روش میرایی بحرانی و در سایر طبقات کمتر است. البته باید آگاه بود که بیشترین مقدار تغییر مکان

جدول ۸. مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی پاسخ و نیروی عملگر در ساختمان برشی ۱۰ طبقه تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی نورث‌ریج.

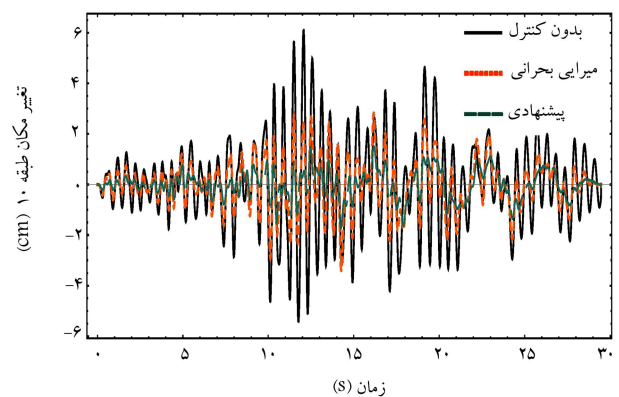
طبقه	بیشینه‌ی تغییرمکان (سانتی‌متر)			درصد کاهش تغییر مکان (%)		بیشینه‌ی نیروی عملگر (تن - نیرو)	
	بدون کنترل	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی	میرایی بحرانی	پیشنهادی
۱	۰/۶۵	۰/۵۶	۰/۴۸	۱۴/۲۳	۲۵/۹۳		
۲	۱/۲۶	۱/۰۸	۰/۹۲	۱۴/۷۱	۲۶/۸۰		
۳	۱/۸۴	۱/۵۶	۱/۳۲	۱۵/۳۵	۲۷/۹۶		
۴	۲/۳۶	۱/۹۸	۱/۶۶	۱۶/۲۰	۲۹/۶۹		
۵	۳/۳۹	۲/۷۸	۲/۲۵	۱۸/۰۵	۳۳/۷۰	۱۷/۳۲۱	۲۶/۳۲۵
۶	۴/۳۱	۳/۴۶	۲/۶۶	۱۹/۸۰	۳۸/۳۰		
۷	۵/۱۳	۴/۰۲	۲/۸۸	۲۱/۵۹	۴۳/۸۳		
۸	۷/۴۰	۵/۵۷	۲/۹۸	۲۴/۶۷	۵۹/۷۹		
۹	۹/۰۹	۶/۸۲	۲/۷۵	۲۴/۹۶	۶۹/۷۳		
۱۰	۹/۸۶	۷/۴۴	۲/۷۰	۲۴/۶۰	۷۲/۶۵		

کاهش بیشینه‌ی مقدار تغییرمکان در مقایسه با روش میرایی بحرانی، برتری کامل دارد. به سخن دیگر، در روش پیشنهادی، درصد کاهش تغییرمکان در همه‌ی درجه‌های آزادی بیشتر از رویکرد میرایی بحرانی است.

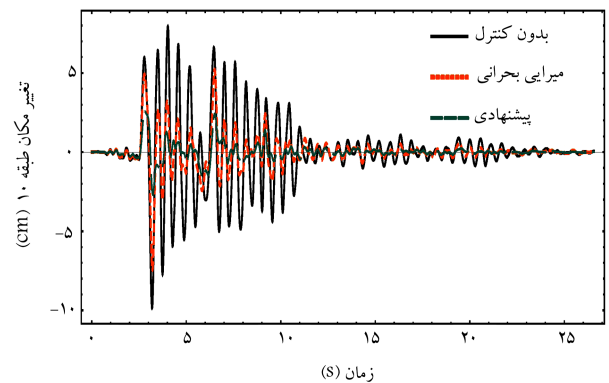
شایان توجه است، بررسی نتایج حاصل از مثال‌های عددی نشان می‌دهند که میرایی طبیعی سازه در مقایسه با میرایی معادل ناشی از نیروی کنترلی بسیار کوچک و قابل چشم‌پوشی است. از سوی دیگر، تأخیر زمانی نقش بسیار مهم و تعیین‌کننده‌ی در کارایی فرایندهای کنترل فعال دارد. هر چه زمان تأخیر بیشتر باشد، کارایی الگوریتم کاهش می‌یابد. یک نوع از تأخیرهای زمانی به صورت خودکار در فرایند کنترل وارد شده‌اند. به سخن دیگر، در همه‌ی روش‌های کنترل فعال، داده‌های سازه توسط حسگر برداشت می‌شوند، که براساس آن‌ها، نیروی عملگر محاسبه و به سازه اعمال شده است. این همان فرایندی است که در برنامه‌نویسی و مدل‌سازی کنترل فعال سازه‌ها اجرا می‌شود. به عبارت دیگر، نیروی عملگر براساس داده‌های گام زمانی پیشین حساب می‌شود. در نتیجه، اثر تأخیر زمانی مذکور به صورت خودکار در فرایند کنترل و نتایج عددی وارد شده است. از سوی دیگر، روش‌های خانوادگی میرایی بحرانی که رابطه‌ی بسته‌ی ریاضی دارند، فاقد تأخیر زمانی ذاتی هستند. به عبارت دیگر، همه‌ی کمیت‌ها به صورت عددی در رابطه‌ی ۱۸ قرار داده می‌شوند و نیروی عملگر، به صورت آنی حساب می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که تأخیر زمانی در روش‌های ژنتیک، شبکه‌ی عصبی و مانند آن‌ها، که نیازمند آموزش الگوریتم هستند، اهمیت ویژه‌ی دارند. در روش پیشنهادی، از رابطه‌ی بسته‌ی ریاضی و با عوامل مشخص، برای محاسبه‌ی نیروی عملگر استفاده شده است که فاقد تأخیر زمانی است.

۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، یک روش نوین برای بهبود فرایند کنترلی میرایی بحرانی با در نظر گرفتن فقط یک عملگر و وارد کردن اثر دو مود نوسان در معادله‌ی تعادل دینامیکی ارائه شده است. باید دانست که در شیوه‌ی متداول، بحرانی شدن مودهای نوسان سازه نیازمند استفاده از چند عملگر است. نصب و استفاده از چند عملگر در کنترل فعال بسیار دشوار و پرهزینه است. روش پیشنهادی این نقص را برطرف کرد، به گونه‌ی که با استفاده از فقط یک عملگر، دو مود نوسان سازه در شرایط میرایی قرار گرفت. در این رویکرد، نیروی عملگر مشابه نیروهای میرایی پنداشته شد. این نیرو به



شکل ۱۳. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان طبقه‌ی بام در ساختمان برشی ۱۰ طبقه تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی نورث‌ریج.



شکل ۱۴. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان طبقه‌ی بام در ساختمان برشی ۱۰ طبقه تحت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی نورث‌ریج.

در درجه‌های آزادی مذکور رخ می‌دهد که روش پیشنهادی به میزان قابل توجهی آن‌ها را کاهش داده است.

شکل ۱۴، تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان افقی طبقه‌ی بام نسبت به تحریک تکیه‌گاهی برآمده از شتاب‌نگاشت زلزله‌ی نورث‌ریج را نمایش می‌دهد. در جدول ۸، مقادیر بیشینه‌ی تغییرمکان در ۳ حالت بدون کنترل، روش میرایی بحرانی و روش پیشنهادی مقایسه شده است. در این حالت، روش کنترلی پیشنهادی از دیدگاه

نوع بارگذاری و یا زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک حساسیتی ندارد و در هر شرایطی، عملکرد مناسب خود را حفظ می‌کند. از سوی دیگر، برای اعمال چنین نیروهایی می‌توان از ابزاری مانند پیزوالکتریک‌ها استفاده کرد. این ابزار توانایی اعمال نیرو در زمان کوتاه (بدون تأخیر زمانی) را دارند. ولتاژ ورودی ابزار مذکور توسط الگوریتم پیشنهادی تنظیم می‌شود. به سخن دیگر، در هر لحظه، نیروی عملگر در الگوریتم پیشنهادی، با تغییر ولتاژ ورودی توسط پیزوالکتریک ایجاد می‌شود. همچنین با تحلیل نتایج خروجی ملاحظه می‌شود که بهبود پاسخ و کاهش تغییر مکان در درجه‌های آزادی که عملگر در آن نصب شده است، بیشینه بوده و در درجه‌های آزادی نزدیک به عملگر، بیشتر از سایر درجه‌های آزادی است. بنابراین، تعمیم روش مذکور به حالت چند عملگر و حسگر، می‌تواند کارایی الگوریتم پیشنهادی را بیش از پیش آشکار سازد و نتایج بهتری را نتیجه دهد.

گونه‌ی رابطه‌سازی شد که میرایی مودهای اول و دوم نوسان بحرانی شود. همچنین با یک شرط نوین، محل مناسب نصب حسگر و عملگر مشخص شد، به گونه‌ی که پایداری الگوریتم کنترلی تضمین شود. برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی و مقایسه‌ی آن با فرایند میرایی بحرانی، دو ساختمان برشی ۶ و ۱۰ طبقه تحت اثر بارگذاری‌های گوناگون، شامل بار هارمونیک، ضربه و لرزه‌ی (حوزه‌های دور و نزدیک) بررسی شدند. براساس نتایج عددی، روش پیشنهادی با حفظ پایداری، توانایی کاهش چشمگیر نوسان‌های سازه را دارد. مقدار بیشینه‌ی نیروی عملگر در روش پیشنهادی، در بیشتر موارد بررسی شده بیشتر از روش میرایی بحرانی بوده است که این کاستی را می‌توان با افزایش تعداد عملگرها پوشش داد. با بررسی چند سازه‌ی برشی با انواع مختلف بارگذاری و اعمال شتاب‌نگاشت زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی، نسبت به

منابع (References)

- Karimpour, B., Keyhani, A. and Alamatian, J. "New active control method based on using multiactuators and sensors considering uncertainty of parameters", *Advances in Civil Engineering*, **2014**, 10 p. (2014).
- Fisco, N. and Adeli, H. "Smart structures: part I- Active and semi-active control", *Scientia Iranica*, **18**(3), pp. 275-284 (2011).
- Alamatian, J. and Rezaeepazhand, J. "A simple approach for determination of actuator and sensor locations in smart structures subjected to the dynamic loads", *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics*, **24**(4), pp. 341-350 (2011).
- Korkmaz, S. "A review of active structural control: challenges for engineering informatics", *Computers & Structures*, **89**(23), pp. 2113-2132 (2011).
- Bayard, D.S., Hadaegh, F.Y. and Meldrum, D.R. "Optimal experiment design for identification of large space structures", *Automatica*, **24**(3), pp. 357-364 (1988).
- Kamada, T., Fujita, T., Hatayama, T. and et al. "Active vibration control of flexural-shear type frame structures with smart structures using piezoelectric actuators", *Smart Materials and Structures*, **7**(4), pp. 479-488 (1998).
- Han, J.-H. and Lee, I. "Optimal placement of piezoelectric sensors and actuators for vibration control of a composite plate using genetic algorithms", *Smart Materials and Structures*, **8**(2), pp. 257-267 (1999).
- Sadri, A., Wright, J. and Wynne, R. "Modelling and optimal placement of piezoelectric actuators in isotropic plates using genetic algorithms", *Smart Materials and Structures*, **8**(4), pp. 490-498 (1999).
- Gao, F., Shen, Y. and Li, L. "The optimal design of piezoelectric actuators for plate vibroacoustic control using genetic algorithms with immune diversity", *Smart Materials and Structures*, **9**(4), pp. 485-491 (2000).
- Sethi, V. and Song, G. "Multimode vibration control of a smart model frame structure", *Smart Materials and Structures*, **15**(2), pp. 473-479 (2006).
- Tu, J., Lin, X., Tu, B. and et al. "Simulation and experimental tests on active mass damper control system based on model reference adaptive control algorithm", *Journal of Sound and Vibration*, **333**(20), pp. 4828-4842 (2014).
- An, F., Chen, W.D. and Shao, M.Q. "Dynamic behavior of time-delayed acceleration feedback controller for active vibration control of flexible structures", *Journal of Sound and Vibration*, **333**(20), pp. 4789-4809 (2014).
- Yanik, A., Aldemir, U. and Bakioglu, M. "A new active control performance index for vibration control of three-dimensional structures", *Engineering Structures*, **62-63**, pp. 53-64 (2014).
- Phung-Van, P., Nguyen, L.B., Tran, L.V. and et al. "An efficient computational approach for control of nonlinear transient responses of smart piezoelectric composite plates", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **76**, pp. 190-202 (2015).
- Peng, H., Li, F., Zhang, S. and et al. "A novel fast model predictive control with actuator saturation for large-scale structures", *Computers and Structures*, **187**, pp. 35-49 (2017).
- Zhang, Y., Zang, Y., Li, M. and et al. "Active-passive integrated vibration control for control moment gyros and its application to satellites", *Journal of Sound and Vibration*, **394**, pp. 1-14 (2017).
- Alamatian, J. and Rezaeepazhand, J. "Vibration suppression of down-scaled frames using a multi-criteria sensor/actuator placement algorithm", *International Journal of Modelling and Simulation*, **35**(2), pp. 1-16 (2016).
- Chopra, A.K. "Dynamics of structures", Prentice Hall New Jersey, 3ed edition (1995).
- Preumont, A. "Vibration control of active structures: An introduction", Springer Science & Business Media (2011).

20. Meirovitch, L. "Computational methods in structural dynamics", Springer Science & Business Media (1980).
21. Dhingra, A. and Lee, B. "Multiobjective design of actively controlled structures using a hybrid optimization method", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **38**(20), pp. 3383-3401 (1995).
22. Kondoh, S., Yatomi, C. and Inoue, K. "The positioning of sensors and actuators in the vibration control of flexible systems", *JSME International Journal, Ser. 3, Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry*, **33**(2), pp. 145-152 (1990).
23. Baruh, H. "Placement of sensors and actuators in structural control", *Control and Dynamic Systems, Integrated Technology Methods and Applications in Aerospace Systems Design: Advances in Theory and Applications*, **52**, pp. 359-390 (2012).
24. Bruant, I. and et al., "A methodology for determination of piezoelectric actuator and sensor location on beam structures", *Journal of Sound and Vibration*, **243**(5), pp. 861-882 (2001).
25. Rezaiee-Pajand, M., Sarafrazi, S.R. and Hashemian, M. "Improving stability domains of the implicit higher order accuracy method", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **88**(9), pp. 880-896 (2011).
26. Rostami, S., Shojaee, S. and Saffari, H. "An explicit time integration method for structural dynamics using cubic B-spline polynomial functions", *Scientia Iranica*, **20**(1), pp. 23-33 (2013).