



بروزرسانی مدل اجزا محدود سازه توسط آنالیز مودال محیطی و الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل

پویان علی‌موری^۱، شاپور مرادی^۲ و رحیم چینی‌پرداز^۳

^۱ دانشجوی دکتری مکانیک، اهواز-بلوار گلستان دانشگاه شهید چمران اهواز-گروه مکانیک

^۲ استاد گروه مکانیک، اهواز-بلوار گلستان دانشگاه شهید چمران اهواز-گروه مکانیک

^۳ استاد گروه آمار، اهواز-بلوار گلستان دانشگاه شهید چمران اهواز-دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۷/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۵

چکیده

در این پژوهش کاربرد آنالیز مودال محیطی و الگوریتم زنبور عسل (BA) در بروزرسانی مدل اجزا محدود (FE)، مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش بهینه‌سازی زنبور عسل، از رفتار غریزی زنبورهای عسل برای یافتن منابع غذایی استفاده می‌نماید. تابع هدفی بر مبنای مجذور خطا بین فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از روش آنالیز مودال محیطی و مدل اجزا محدود تعریف می‌شود. فرکانس‌های مدل تجربی، از روش زیر فضای تصادفی تعیین می‌شوند که یکی از روش‌های قدرتمند آنالیز مودال محیطی است. برای بررسی صحت این روش، الگوریتم ارائه شده روی یک سازه سه طبقه به منظور بروزرسانی پارامترهای مدل اجزا محدود انجام می‌گیرد. در انتها فرکانس‌های بدست آمده از روش عددی، با فرکانس‌های بدست آمده از آنالیز مودال محیطی مقایسه می‌شوند؛ همچنین برای بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل، نتایج با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و روش Nelder-Mead مقایسه می‌گردند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل در مقایسه با روش‌های دیگر بهینه‌سازی، نتایجی دقیق‌تر و سریع‌تری در بروز نمودن مدل اجزا محدود ارائه می‌کند.

کلمات کلیدی: آنالیز ارتعاشات؛ مدل اجزا محدود؛ آنالیز مودال محیطی؛ روش زیر فضای تصادفی؛ الگوریتم زنبور عسل؛ آنالیز حساسیت.

Finite Element Model Updating Using Operational Modal Analysis and Bees Optimization Algorithm

P. Alimouri¹, S. Moradi^{2,*}, R. Chinipardaz³

¹ Ph.D. Student, Mech. Dep., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

² Prof., Mech. Dep., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

³ Prof., Math & Computer Dep., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Abstract

In this study, application of operational modal analysis and bees algorithm (BA) in order finite element model updating are investigated. BA optimization algorithm applies instinctive behavior of honeybees for finding food sources. An objective function is defined as the sum of the squared errors between the obtained natural frequencies by operational modal analysis and finite element method. Experimental natural frequencies are determined by stochastic subspace identification (SSI) which is considered as one of the strong methods of operational modal analysis. In order to investigate the accuracy of the proposed method, BA and SSI methods are implemented on a three story structure to update parameters of its finite element model. Furthermore, to study of effectiveness of BA algorithm, the results of BA algorithm are compared with particle swarm optimization (PSO) and Nelder-Mead (NM) algorithms. The results show that the BA optimization algorithm, in comparison with the PSO and NM methods, is more accurate and faster to update finite element model.

Keywords: Vibration Analysis; Finite Element Model; Operational Modal Analysis; Stochastic Subspace Identification; Bees Algorithm; Sensitive Analysis.

۱- مقدمه

با افزایش تقاضا برای افزایش کارایی و کاهش وزن سازه‌ها در صنایع مدرن مانند، صنایع هوایی و فضایی و حل مشکلات آن‌ها، نیاز به درک درستی از رفتار دینامیکی و ارتعاشی سیستم‌ها و ارائه مدلی دقیق جهت توصیف رفتار آن‌ها است. دقیق بودن مدل دینامیکی، صحت تحلیل‌های انجام شده روی سازه را تضمین می‌نماید [۱]. روش‌های متعددی برای ایجاد یک مدل دینامیکی از یک سیستم مکانیکی بیان شده است که یکی از آن‌ها، آزمایش‌های ارتعاشی و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری است. این روش که به روش آنالیز مودال معروف است، در جهت استخراج پارامترهای دینامیکی سیستم از آزمایش مودال ارائه شده است. طی چند دهه اخیر، آنالیز مودال در زمینه تئوری و عملی توسعه زیادی یافته است. هنگامی که آنالیز مودال روی یک سازه بزرگ انجام می‌گیرد، اندازه‌گیری نیروی تحریک امکان‌ناپذیر بوده، پاسخ‌های خروجی آن تنها اطلاعات کاربردی برای الگوریتم‌های شناسایی سیستم می‌باشند. روش‌های ارتعاشی که تنها بر اساس پاسخ خروجی سیستم می‌باشند، آنالیز مودال عملیاتی نامیده می‌شوند [۲]. روش‌های آنالیز مودال عملیاتی، در دو حوزه فرکانسی و زمانی تقسیم‌بندی می‌شوند. از روش‌های فرکانسی می‌توان، روش تشخیص قله، روش قابلیت انتقال و روش تجزیه مود فرکانسی را نام برد؛ همچنین، روش‌های زیر فضای تصادفی، روش خود رگرسیو خطی و روش زمانی ابراهیم، از بارزترین روش‌ها در حوزه زمان محسوب می‌شوند. نیاز روزافزون صنایع گوناگون به محاسبه دقیق پارامترهای دینامیکی سازه‌ها، باعث توجه بیشتر محققان در دو دهه گذشته به این موضوع شده است. زاقبانی و سانگ من [۳]، از آنالیز مودال محیطی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تعیین پارامترهای مودال یک ماشین ابزار در طی عملیات ماشین کاری استفاده کردند. آن‌ها برای انجام این کار، داده‌های استخراج شده از آزمایش را با استفاده از روش تجزیه دامنه فرکانسی^۱ (FDD)، مورد تحلیل قرار دادند. ابراهیمی و همکاران [۴]، با استفاده از روش FDD فرکانس‌های طبیعی یک تیغه برش ماشین کمباین را با استفاده از داده‌های واقعی محاسبه کردند؛ سپس، تیغه را در

نرم‌افزار Ansys مدل کرده، با استفاده از رابطه اختلاف نسبی بین فرکانس‌های طبیعی، مدل نرم‌افزاری را تصحیح نمودند. در ادامه با اضافه کردن جرم‌های نقطه‌ای به تیغه کمباین، از پدیده تشدید جلوگیری به عمل آوردند. ون اورشی و همکاران [۵]، روش توسعه یافته‌ای در حوزه زمان ارائه دادند که به عنوان جایگزین برای روش‌های کلاسیک مطرح شده است. در این روش مدل تصادفی فضای حالت، از اندازه‌گیری‌های خروجی سیستم محاسبه می‌شود. گام کلیدی در روش شناسایی تصادفی زیر فضا، محاسبه تصویر ماتریس خروجی‌ها بر خروجی‌های گذشته است. نویل و کرشن [۶]، با ترکیب روش زیر فضای تصادفی با روش‌های فرکانسی، روشی جدید ابداع نمودند که توسط آن می‌توان پارامترهای مودال سیستم‌های غیرخطی را محاسبه کرد. برای بررسی صحت روش مذکور، آن‌ها پارامترهای مودال یک سیستم پنج درجه آزادی با دو جز غیر خطی را محاسبه نمودند. دوهلر و مول [۷]، به بررسی روش^۲ SSI در سازه‌های بزرگ پرداختند. آن‌ها بیان کردند که برای بدست آوردن پارامترهای مودال یک سازه بزرگ، باید از تعداد زیادی سنسور برای ثبت سیگنال ارتعاشی استفاده کرد که این کار مستلزم صرف هزینه بسیار زیادی است؛ بنابراین، برای رفع این مشکل، روش ترکیب کردن سنسورها توسط این محققان ابداع گشت. گورسات و همکاران [۸]، داده‌های ارتعاشی به دست آمده از یک فضا-پیما را مورد تحلیل مودال قرار دادند که تحت پرواز تجاری قرار گرفته بود مورد. تحلیل مودال با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی زیر فضا و به دو روش استفاده مستقیم از داده‌ها و نیز محاسبه توابع کوواریانس آنها انجام گرفت. نشان داده شد که فرکانس‌های طبیعی سازه در طی پرواز، به مقدار کم تغییر می‌کنند، اما شکل مودها از ثبات بیشتری برخوردار هستند. کمپالکا و همکاران [۹]، به منظور بررسی دقت الگوریتم‌های شناسایی زیر فضا در تعیین آسیب و محل آن، داده‌های به دست آمده از مدل اجزاء محدود را با داده‌های حاصل از مدل‌سازی تجربی مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که الگوریتم شناسایی زیر فضا با استفاده مستقیم از داده‌ها قادر است، وجود آسیب و محل آن‌ها را با دقت خوبی پیش بینی کند.

² Stochastic Subspace Identification¹ Frequency Domain Decomposition

تجربی محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از آنالیز حساسیت، پارامترهای تاثیر گذار در بروزرسانی مدل سیستم تعیین می‌گردند. در ادامه توسط فرکانس‌های بدست آمده از آنالیز مودال محیطی و مدل اجزا محدود و همچنین با در نظر گرفتن پارامترهای بدست آمده از آنالیز حساسیت، تابع هدفی برای بروزرسانی مدل استفاده می‌شود. در انتها با استفاده از روش بهینه‌سازی زنبور عسل، مدل سازه بروزرسانی شده است و مقدار بهینه برای هر یک از پارامترهای سازه محاسبه می‌شود. برای بررسی صحت روش ارائه شده، از آن روی یک سازه سه طبقه استفاده شده، نتایج حاصل از آن با نتایج بدست آمده از روش‌های بهینه‌سازی PSO و Nelder-Mead مقایسه می‌شوند؛ همچنین، به منظور دقیق بودن نتایج حاصل از آنالیز مودال محیطی، محل مناسب شتاب‌سنج‌ها و تحریک توسط لرزاننده تعیین می‌شود. ویژگی اصلی این تحقیق، بیان روشی کاربردی به منظور بروزرسانی مدل اجزا محدود سازه‌های واقعی در شرایط کارکرد عملی است. هوشمند بودن و کاربرد عملی این روش، این تحقیق را نسبت به پژوهش‌های دیگر متمایز می‌نماید.

۲- تئوری

۲-۱- مدل ارتعاشی

مدل دینامیکی یک سازه خطی را می‌توان با مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل خطی درجه دوم با ضرایب ثابت بیان کرد [۱۶]:

$$M\ddot{y}(t) + D\dot{y}(t) + Ky(t) = f(t) \quad (1)$$

در معادله (۱) M ، D و K به ترتیب، ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه هستند، بردار $y(t)$ بردار تغییر مکان در کلیه درجات آزادی سازه و $f(t)$ بردار نیروهای ورودی سازه است. معادله (۱) را به روش‌های مختلف، می‌توان به صورت سیستمی از معادلات دیفرانسیل درجه اول بازنویسی کرد. از آنجا که داده‌های اندازه‌گیری به صورت گسسته در زمان هستند، معادله (۱) را می‌توان به صورت رابطه (۲) گسسته-سازگی کرد.

$$x_{k+1} = Ax_k + v_k$$

$$y_k = Cx_k + w_k \quad (2)$$

در رابطه (۲) x بردار حالت، y بردار خروجی و بردارهای w و v ، اغتشاش‌های ورودی و خروجی (ورودی سیستم

بروزرسانی روش اجزا محدود، فرایند کاهش تفاوت بین مدل اجزا محدود و مدل تجربی است که به عنوان یک روش معکوس در نظر گرفته می‌شود. روش‌های بر مبنای گرادیان بطور گسترده برای بروزرسانی مدل اجزا محدود به کار می‌رود. کالینز و همکاران [۱۰]، از روش حساسیت ویژه برای بروزرسانی مدل اجزا محدود استفاده نموده است. از جمله مشکلات این روش‌ها، می‌توان به نیافتن نقطه بهینه کلی سیستم اشاره کرد؛ همچنین، قرار داشتن نقاط بهینه در مرزهای سیستم، کارایی این روش‌ها را برای یافتن نقاط بهینه به شدت کاهش می‌دهد. برای حل این مشکلات، روش‌های بهینه‌سازی هوشمند مانند، روش‌های بهینه‌سازی زنبور عسل، الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک و غیره ابداع شدند. علاوه بر رفع مشکلات روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک، ساده بودن و وابسته نبودن به حدس اولیه، از ویژگی‌های منحصر به فرد این روش‌ها محسوب می‌شوند؛ در نتیجه با توجه به این ویژگی‌ها، می‌توان از این روش‌ها برای بروزرسانی مدل اجزا محدود استفاده کرد. دان و همکاران [۱۱]، از الگوریتم ژنتیک برای به‌هنگام‌سازی مدل اجزای محدود یک هواپیمای جنگنده‌ی اف/ا-۱۸ استفاده کردند. مرادی و همکاران [۱۲]، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل و داده‌های آنالیز مودال کلاسیک، یک سیستم لوله را در محیط اجزا محدود بروزرسانی نمودند. مالک‌زهدتاب و همکاران [۱۳]، از الگوریتم ژنتیک برای به‌هنگام‌سازی مدل اجزای محدود یک سکوی دریایی و عیب‌یابی آن استفاده کردند. تابع هدف آن‌ها بر اساس فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای اندازه‌گیری شده و مدل اجزای محدود، تعریف شده است. چوسکی و همکاران [۱۴]، مدل اجزای محدود یک محور دوار به همراه دو تکیه‌گاه، یاتاقان ژورنال را با داده‌های آزمایش چکش به‌هنگام کردند. آن‌ها اتصالات یاتاقان ژورنال را با فنرها و میراکننده‌های خطی و پیچشی در یک نقطه مدل کردند. مرادی و علی‌موری [۱۵]، از روش بهینه‌سازی الگوریتم زنبور عسل و روش کوادراتور دیفرانسیلی برای یافتن ترک در ورق استفاده کردند. با تعریف یک تابع خطا بین فرکانس‌های تجربی و عددی، پارامترهای ترک را اندازه‌گیری کردند.

در پژوهش حاضر، ابتدا توسط آنالیز مودال محیطی (روش زیر فضای تصادفی)، پارامترهای مودال سیستم بصورت

امید ریاضی آن‌ها به صورت میانگین حاصل ضرب و توسط رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$R_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Y_k Y_{k-i}^T \quad (8)$$

از کواریانس‌های بدست آمده در ساخت ماتریس هنکل، مطابق رابطه (۹) استفاده می‌شود [۱۸].

$$H_{p+1,q} = \begin{pmatrix} R_0 & R_1 & \dots & R_{q-1} \\ R_1 & R_2 & \dots & R_q \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ R_p & R_{p+1} & \dots & R_{p+1,q} \end{pmatrix} \quad (9)$$

ماتریس هنکل با استفاده از تجزیه SVD، به دو ماتریس کنترل‌پذیر و مشاهده‌پذیر تجزیه می‌شود.

$$H = o\eta \quad (10)$$

در این رابطه o ، ماتریس مشاهده‌پذیر و η ، ماتریس کنترل‌پذیر hsj ماتریس C که نقش مهمی را در شناسایی مودال سیستم‌ها دارد، برابر با اولین بلوک ردیفی ماتریس مشاهده‌پذیر است (رابطه (۱۱))؛ همچنین با استفاده از رابطه (۱۲)، ماتریس انتقال حالت را می‌توان از خاصیت تغییر ناپذیری ماتریس o به دست آورد.

$$o_p^\uparrow(C, A) = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \cdot \\ CA^{p-1} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$o_p^\downarrow(C, A) = o_p^\uparrow(C, A)A \quad o_p^\downarrow(C, A) = \begin{pmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^p \end{pmatrix} \quad (12)$$

ماتریس A توسط رابطه (۱۳) قابل محاسبه است.

$$A = o_p^\uparrow(C, A)^+ o_p^\downarrow(C, A) \quad (13)$$

در این رابطه بالانویس +، بیانگر شبه معکوس است. با معلوم بودن ماتریس A و طبق روابط (۴) و (۵) می‌توان فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی سیستم را بدست آورد؛ همچنین با محاسبه ماتریس C ، می‌توان شکل موده‌های سیستم را بدست آورد. الگوریتم روش در شکل ۱ آمده است. در جاهایی که نقاط مربوط به هر بعد به صورت ردیفی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، تقریبی از فرکانس طبیعی

به صورت نویز در نظر گرفته می‌شود) می‌باشند؛ همچنین A ، ماتریس حالت و C ، ماتریس خروجی سیستم است. فرکانس‌های طبیعی و شکل موده‌های سیستم از تحلیل مقدار و بردار ویژه ماتریس A و به کمک ماتریس C محاسبه می‌شوند.

$$(A - \lambda_i I)\phi_i = 0 \quad \phi_i = C\phi_i \quad (3)$$

در رابطه (۳) λ فرکانس طبیعی بدون بعد و ϕ شکل مود سیستم است. برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی بر حسب رادیان بر ثانیه و ضرایب میرایی، از روابط (۴-۵) استفاده می‌شود.

$$a = \left| \arctan \frac{\text{Im}(\lambda)}{\text{Re}(\lambda)} \right|, \quad b = \ln |\lambda| \quad (4)$$

$$\omega = \frac{a}{2\pi\tau} \quad \zeta = \frac{100|b|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (5)$$

بنابراین، معادله ارتعاشی به یک مسئله‌شناسایی سیستم تبدیل شده که با حل آن می‌توان، پارامترهای دینامیکی سیستم را یافت.

۲-۲- روش زیر فضای تصادفی

برای بدست آوردن پارامترهای مودال در روش‌های حوزه زمان، نیازی به استفاده از FFT برای انتقال سیگنال به حوزه فرکانس نبوده، از داده‌های به دست آمده به طور مستقیم استفاده می‌شود. این امر موجب حذف کامل خطای نشت (که در اثر استفاده از تابع پنجره بوجود می‌آید) می‌شود. روش شناسایی زیر فضای تصادفی (SSI)، یکی از روش‌هایی است که به طور کامل در حوزه زمان کار می‌کند [۱۷-۲۰]. شناسایی زیرفضا بر اساس داده‌های کواریانس، با ساخت تابع کواریانس مربوط به داده‌های خروجی، مطابق رابطه (۶) آغاز می‌شود.

$$R_i = E(Y_k, Y_{k-i}^T) \quad (6)$$

در جایگاه E عملگر امید ریاضی بوده، i تاخیر زمانی ایجاد شده، بالانویس T نماد ترانپوز و Y مقدار سیگنال‌های خروجی در زمان k ام است که به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.

$$Y_k = Y(k \Delta t) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

در این رابطه N تعداد کل نمونه‌ها است. با توجه به آنکه داده‌های خروجی به صورت گسسته در زمان هستند، پس

$$\frac{|\omega_{pi} - \omega_{qi}|}{\omega_{pi}} \leq \varepsilon_f \quad (14)$$

$$\frac{|\zeta_{pi} - \zeta_{qi}|}{\zeta_{pi}} \leq \varepsilon_\zeta \quad (15)$$

$$1 - MAC(\phi_{pi}, \phi_{qi}) \leq \varepsilon_{MAC} \quad (16)$$

پارامترهای ε_f ، ε_ζ و ε_{MAC} ، سه معیار محدود کننده می‌باشند که نشان می‌دهند، مود واقعی نام بدست آمده از مرتبه p با همان مود از مرتبه q دارای اختلاف کمی است؛ در نتیجه، با اعمال این شروط در الگوریتم روش SSI، مودهای واقعی از مودهای اضافی و نادرست تشخیص داده شده و حذف می‌شوند. این معیارها با سعی و خطا انتخاب می‌گردند که در این پژوهش این پارامترها به ترتیب، $0/0.5$ و $0/0.5$ انتخاب شدند [۲۱].

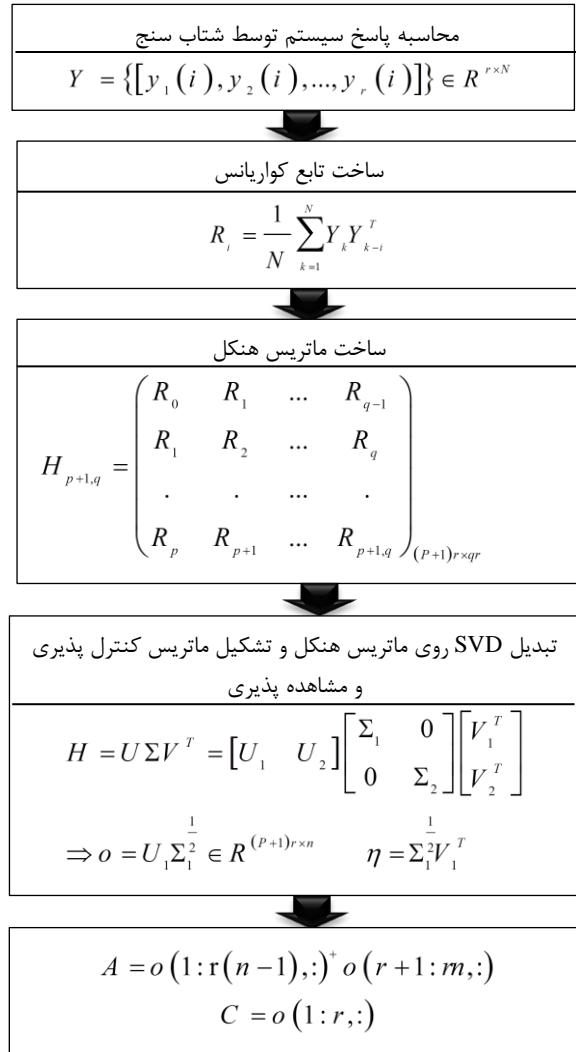
۲-۳- تعیین بهترین درجات آزادی برای مدل تجربی

جهت تحریک سیستم باید توجه داشت که درجات آزادی انتخابی تا آنجا که ممکن است، نزدیک گره‌های مودهای مورد نظر نباشند تا انتقال انرژی از نقطه تحریک به دیگر درجات آزادی سیستم بخوبی صورت گیرد. به این منظور با استفاده از پارامتر ODP که در رابطه (۱۷) آمده است، می‌توان مشخص نمود که درجات آزادی مورد نظر تا چه حد نزدیک گره‌های مودهای مورد نظر سیستم می‌باشند [۲۲].

$$ODP(j) = \prod_{r=1}^j \|\phi_{jr}^2\| \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) j درجه آزادی یا تعداد مودهای سیستم می‌باشند. نقاطی که مقدار ODP آن‌ها صفر یا نزدیک به آن باشد، نقاطی هستند که روی خط گره یا نزدیک به آن قرار دارند و برای تحریک سیستم مناسب نیستند. نقاطی که مقدار ODP آن‌ها بیشینه باشد، برای تحریک سیستم، نقاط مناسبی هستند. هنگام تحریک سازه توسط لرزاننده، احتمال تداخل بین لرزاننده و سازه ایجاد می‌شود که باید به کمترین حد خود برسد. لرزاننده از یک سیستم جرم، فنر و دمپر تشکیل شده است که هرگونه تداخل بین آن و سازه، باعث تغییر در سیگنال تولید شده توسط لرزاننده خواهد داشت.

می‌باشند. این تغییرات ابعاد ماتریس هنکل، به پارامتری بنام مرتبه وابسته است. در واقع پارامتر مرتبه است که هر بار اجرای الگوریتم، ابعاد ماتریس هنکل را مشخص می‌کند.



شکل ۱- الگوریتم روش‌های SSI

اگر مرتبه در نظر گرفته شده برای اجرای SSI کم باشد، بعضی از فرکانس‌ها و شکل مودها در پاسخ ظاهر نمی‌شوند و اگر این مقدار خیلی زیاد در نظر گرفته شود، باعث ایجاد مودهای نادرست و اضافی در پاسخ می‌شود. برای رفع این مشکل و حذف مودهای اضافی، می‌بایست هنگام اجرای روش SSI، از سه شرط زیر که در روابط (۱۴) تا (۱۶) آمده‌اند، بطور همزمان استفاده شود [۲۱].

¹ Optimum Drive Point

است. با در نظر گرفتن این روابط می‌توان پارامترهایی را یافت که نقش اساسی در تغییر فرکانسی ایجاد می‌کنند و از آن‌ها به عنوان متغیرهای ورودی در الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده کرد.

۲-۵- الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل

الگوریتم بهینه‌سازی دسته زنبور عسل، در گروه الگوریتم‌های تکاملی طبقه‌بندی می‌شود. رفتار اجتماعی هماهنگ سازمان یافته‌ای بین دسته‌های زنبور عسل دیده شده که در حل مسائل بهینه‌سازی اجتماعی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در هر دسته زنبورهای پیش‌آهنگی وجود دارند که وظیفه آن‌ها، یافتن منابع غذایی برای کندو است. وقتی زنبورهای پیش‌آهنگ منبع غذایی پیدا می‌نمایند، به کندو بازگشته و گلستان‌های متفاوت کشف شده را بر اساس پارامترهای مشخصی، مورد ارزیابی قرار می‌دهند. آنگاه به اجرای رقص مخصوصی به نام رقص چرخشی می‌پردازند. در گام بعد زنبورهای پیرو به سمت محل شناسایی شده پرواز می‌کنند. تعداد زنبورهای پیرو فرستاده شده با مقدار شهد موجود در گلزار، نسبت مستقیم و با فاصله آن نسبت عکس دارد. از N_i راه‌حل تصادفی N_{i1} جواب که قابلیت بالاتری دارند، به عنوان بهترین جواب‌ها در نظر گرفته می‌شوند. از بین بهترین جواب‌ها، N_{i2} جواب با بالاترین مقدار قابلیت به عنوان جواب‌های ممتاز برگزیده می‌شوند. با هدف یافتن جواب بهتر به جستجو در همسایگی بهترین جواب‌ها پرداخته می‌شود. n_{i1} و n_{i2} تعداد همسایگی‌های جستجو شده در اطراف جواب‌های ممتاز و بهترین جواب‌ها را نشان می‌دهند. راه‌حل‌های باقیمانده به صورت اتفاقی در فضای جستجو انتخاب می‌گردند. تکرار تا زمان رسیدن جواب‌ها به همگرایی ادامه می‌یابد.

شکل ۲ فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل را نمایش می‌دهد. در این تحقیق، به‌منظور روزرسانی سازه سه بعدی و نزدیک نمودن فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده از روش‌های آنالیز مودال تجربی و اجزا محدود، یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود. مقادیر متغیرهای طراحی با مینیمم‌سازی تابع خطا طرح ریزی می‌شود که بر پایه اختلاف نسبت فرکانس‌های تجربی و فرکانس‌های بدست آمده از روش اجزا محدود است. الگوریتم بهینه‌سازی آرایه‌ای از

برای کاهش این اثر، لرزاننده باید در جایی نصب شود که شتاب متوسط کمترین مقدار خود را داشته باشد. شتاب میانگین توسط پارامتر^۱ ADDOFA، به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود [۲۲]:

$$ADDOFA(j) = \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{jr}^2}{\omega_{r1}^2} \quad (18)$$

احتمال وقوع تحریک دو ضربه در نقاطی بیشتر است که ADDOFA بالایی دارند. برای این منظور، نقاطی که نسبت ODP/ADDOFA بالاتری دارند، به عنوان نقاط اعمال تحریک مناسب‌تر هستند.

۲-۴- آنالیز حساسیت

پارامترهای حساس پارامترهایی هستند که تغییر کوچکی در آن‌ها سبب تغییر قابل ملاحظه در خروجی می‌شود. شاخص یکی در هر زمان^۲ (OAT)، یکی از شاخص‌های کاربردی برای تعیین میزان حساسیت خروجی مدل به تغییرات هر یک از پارامترهای ورودی است. در این حالت مطابق معادله (۱۹) برای از بین بردن اثر واحدهای مختلف پارامترها، یک ضریب بی‌بعد کننده نیز در نظر گرفته شده است [۲۳].

$$OAT = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \frac{X}{Y} \quad (19)$$

که در آن X پارامترهای ورودی و Y خروجی است. میزان تغییر در پارامترهای ورودی نیز، به صورت ضریبی از انحراف استاندارد پارامتر در محدوده تعریف شده برای آن، در نظر گرفته می‌شود. شاخص OAT تعریف شده با رابطه (۱۹)، در واقع حساسیت را به صورت محلی اندازه‌گیری می‌کند. شاخص حساسیت کلی^۳ (GSI)، با رابطه (۲۰) تعریف می‌شود و به کمک آن می‌توان، میزان حساسیت کلی را تخمین زد [۲۳]:

$$GSI = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{Y_{max}} \quad (20)$$

در این رابطه Y_{max} و Y_{min} به ترتیب، ماکزیمم و مینیمم خروجی مدل با استفاده از حدود بالا و پایین پارامتر ورودی

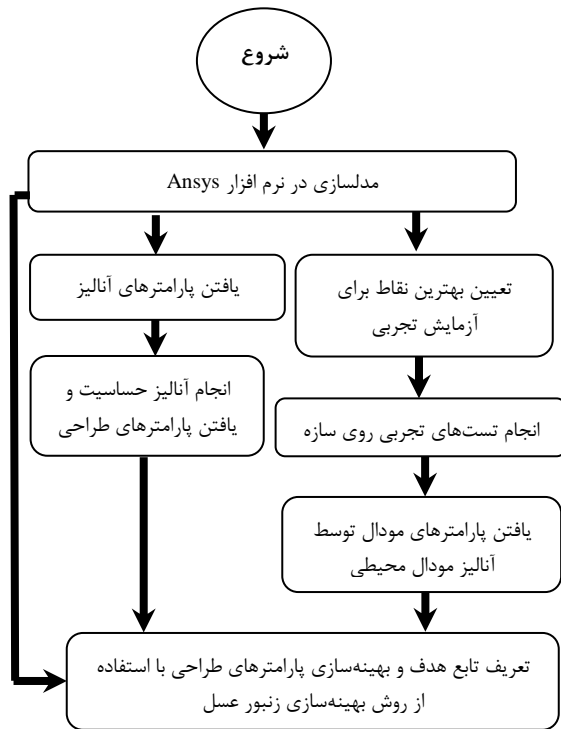
¹ Average Driving DOF Acceleration

² Once at Time

³ Global Sensitivity Index

۳- نتایج

در این پژوهش هدف آن است که مدل اجزا محدود یک سازه، توسط ترکیب روش آنالیز مودال محیطی، آنالیز حساسیت و الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل بهینه‌سازی شود. الگوریتم روش بکار رفته، در شکل ۳ بیان شده است. ابتدا، مدل این سازه در نرم‌افزار Ansys ساخته شده است و فرکانس‌های طبیعی سازه بدست می‌آیند؛ سپس، با استفاده از آنالیز بهترین نقاط برای آزمایش تجربی، بهترین نقاط برای نصب شتاب‌سنج و نقاط تحریک برای سازه تعیین می‌شوند (بخش ۲-۳). در ادامه سازه توسط تحریک‌های مختلف تحریک شده، با استفاده از پاسخ‌های بدست آمده و روش آنالیز مودال SSI، پارامترهای مودال سازه محاسبه می‌شوند (بخش ۲-۲). سپس، با استفاده از آنالیز حساسیت، پارامترهای طراحی مناسب برای بهینه‌سازی بدست می‌آیند. در انتها، با تعریف تابع هدف بر مبنای مجذور نسبی اختلاف فرکانسی بین فرکانس‌های تجربی و فرکانس‌های بدست آمده از روش اجزا محدود و بهینه کردن آن توسط الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل، پارامترهای طراحی سیستم بهینه می‌شوند.

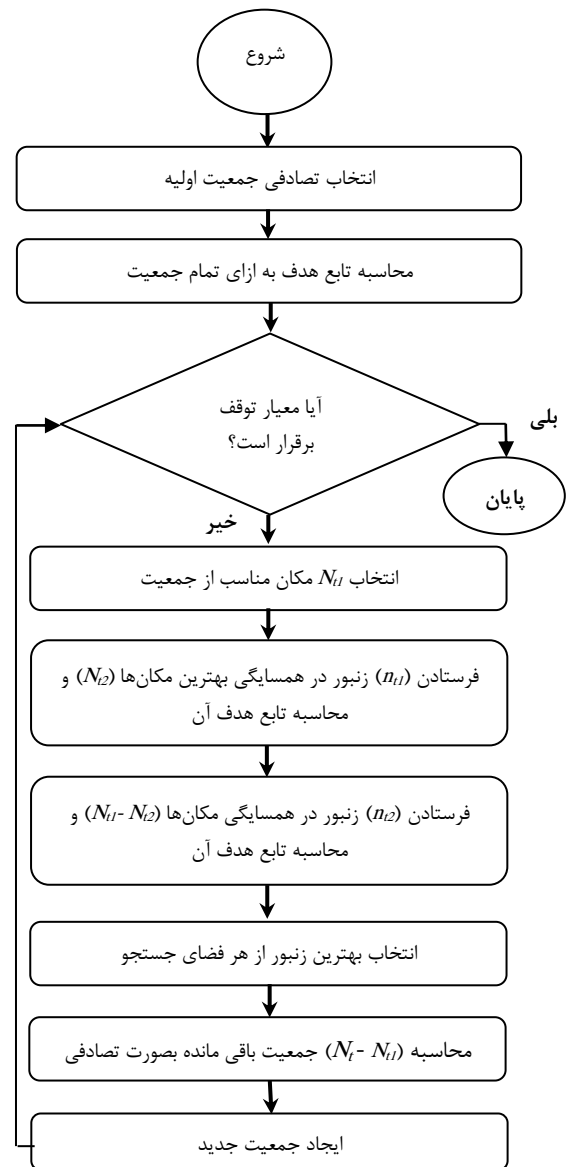


شکل ۳- الگوریتم به روزرسانی مدل اجزا محدود

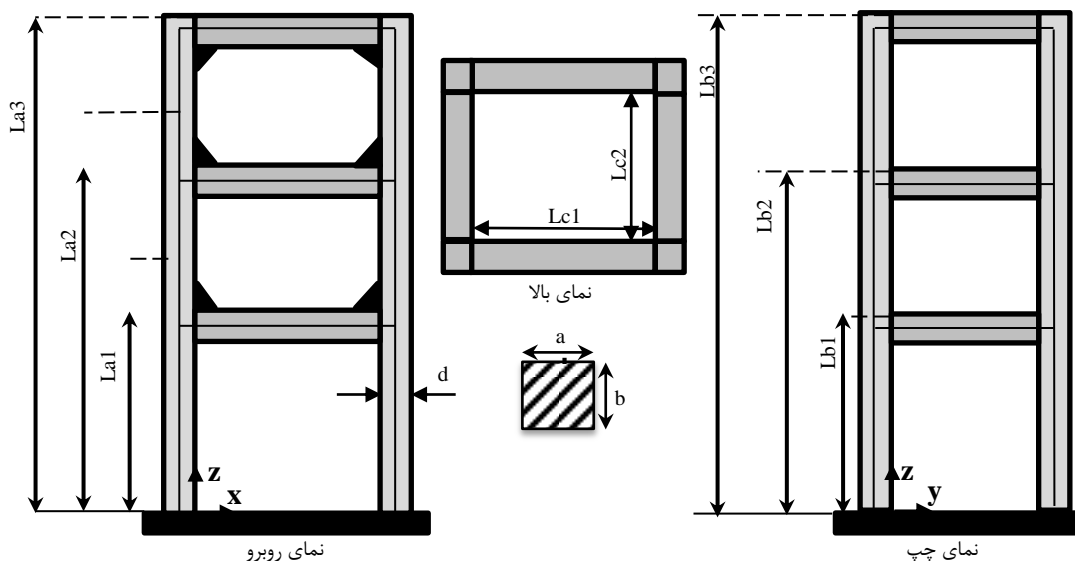
متغیرهایی تعریف می‌کند که می‌بایست آماده بهینه شوند برای هر حالت از آرایه متغیرها، تابع خطا یک خروجی ایجاد می‌کند [۱۵]:

$$Error\ function(\{Z\}) = \sum_{j=1}^s (\Omega_{e,j} - \Omega_{uc,j})^2 \quad (21)$$

در رابطه فوق s تعداد فرکانس‌های طبیعی مورد استفاده، Ω_e فرکانس‌های قاب سه بعدی با حل عددی اجزا محدود و Ω_{uc} فرکانس‌های تجربی آن می‌باشند؛ همچنین، بردار $\{Z\}$ ، شامل متغیرهای طراحی است.

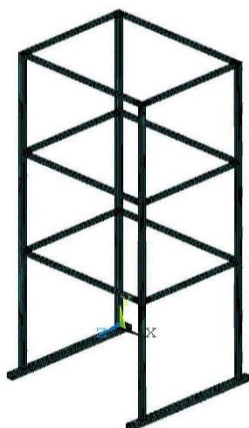


شکل ۲- الگوریتم روش‌های بهینه‌سازی زنبور عسل



شکل ۴- نقشه‌ی سه نمای سازه سه بعدی

جدول ۲ فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از نرم افزار Ansys را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- مدل اجزا محدود قاب سه طبقه

جدول ۲- فرکانس‌های سازه سه طبقه از روش اجزا محدود

فرکانس	روش اجزا محدود (rad/sec)
اول	۷۳/۰۵۲
دوم	۸۴/۷۰۰
سوم	۹۲/۸۶۲
چهارم	۲۳۴/۵۶۴
پنجم	۲۷۶/۰۳۳
ششم	۳۲۶/۴۸۳

۳-۱- مدل‌سازی اجزا محدود

برای اطمینان از صحت روش بروز رسانی مدل اجزا محدود بر مبنای روش بیان شده، سازه سه بعدی مطابق با شکل ۴ ساخته شده است.

در جدول ۱ ابعاد و اندازه قاب سه طبقه آمده است.

شکل شماره ۵ مدل اجزا محدود سازه را در نرم‌افزار Ansys نمایش می‌دهد. برای ساخت این مدل، از المان Solid186 استفاده شده است. در این مدل جوش‌ها در محل اتصال به صورت تغییر در مدول یانگ سیستم در نظر گرفته شده است.

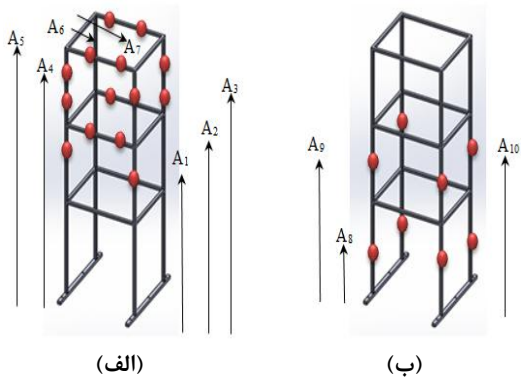
جدول ۱- ابعاد قاب سه طبقه

شماره	پارامتر	نماد	اندازه (متر)
۱		La1	۰/۶۰۰
۲	ارتفاع اعضای افقی در صفحه y-z	La2	۱/۱۰۰
۳		La3	۱/۶۰۰
۴		Lb1	۰/۶۰۰
۵	ارتفاع اعضای افقی در صفحه x-z	Lb2	۱/۱۰۰
۶		Lb3	۱/۶۰۰
۷	طول اعضای افقی در صفحه y-z	Lc1	۰/۵۰۰
۸	طول اعضای افقی در صفحه y-z	Lc2	۰/۴۰۰
۹	عرض مقطع	b	۰/۰۱۶
۱۰	طول مقطع	a	۰/۰۱۶

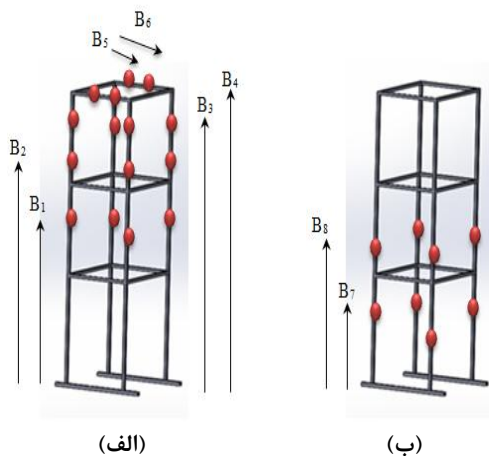
مختصات محل نصب بهترین نقاط برای شتاب‌سنج در جهت y و بهترین نقاط تحریک سازه توسط لرزاننده در جهت y را نشان می‌دهد.

شکل ۸ محل بهترین نقاط برای تحریک و نصب شتاب‌سنج در جهت x را نشان می‌دهد.

جدول ۴ مقادیر مختصات محل نصب بهترین نقاط برای شتاب‌سنج در جهت x و بهترین نقاط تحریک سازه توسط لرزاننده در جهت x را نشان می‌دهد.

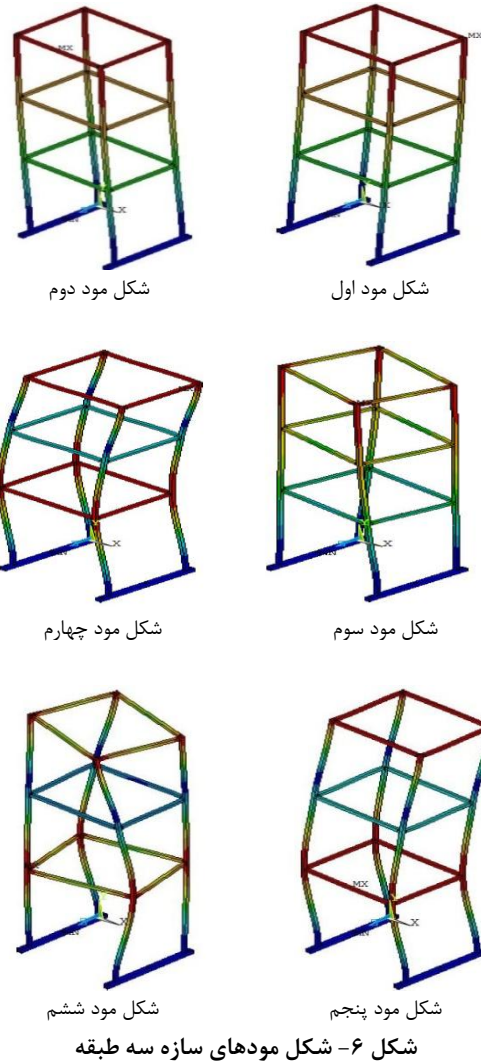


شکل ۷- الف) بهترین محل نصب شتاب‌سنج در جهت y و ب) بهترین محل تحریک سازه توسط لرزاننده در جهت y



شکل ۸- الف) بهترین محل نصب شتاب‌سنج در جهت x و ب) بهترین محل تحریک سازه توسط لرزاننده در جهت x

شکل ۶ شکل مودهای سازه را نشان می‌دهد.



شکل ۶- شکل مودهای سازه سه طبقه

۳-۲- نقاط مناسب نصب لرزاننده و شتاب‌سنج

بدست آوردن پارامترهای مودال، نیاز به طرح‌ریزی دقیق برای انجام آزمایش دارد. مکان مناسب شتاب‌سنج، نقاط تعلیق و تحریک سیستم می‌تواند منجر به کسب داده‌های مودال دقیق‌تر و کامل‌تری شوند.

با توجه به توضیحات بیان شده در بخش (۲-۳)، از روش ADDOFA و نیز مقادیر ODP/ADDOFA، می‌توان بهترین نقاط اندازه‌گیری شتاب‌سنج‌ها و محل تحریک سازه توسط لرزاننده را مشخص کرد. شکل ۷ بهترین نقاط برای تحریک و نصب شتاب‌سنج در جهت y را نشان می‌دهد. جدول ۳ مقادیر

جدول ۳- مختصات محل بهترین نقاط نصب شتاب‌سنج و تحریک در جهت y

نقاط	اندازه (cm)	نقاط	اندازه (cm)
A ₁	۹۵	A ₆	۱۲
A ₂	۱۱۰	A ₇	۴۶
A ₃	۱۲۲	A ₈	۴۴
A ₄	۱۴۴	A ₉	۸۶
A ₅	۱۶۰	A ₁₀	۱۰۵

جدول ۴- مختصات محل بهترین نقاط نصب شتاب‌سنج و تحریک در جهت x

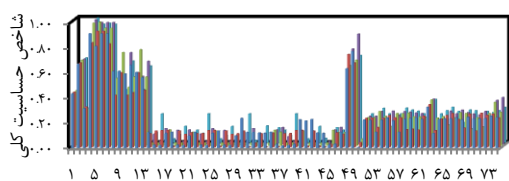
نقاط	اندازه (cm)	نقاط	اندازه (cm)
B ₁	۹۱	B ₅	۱۳
B ₂	۱۲۰	B ₆	۳۳
B ₃	۱۴۸	B ₇	۵۰
B ₄	۱۶۰	B ₈	۷۲

۳-۳- آنالیز حساسیت

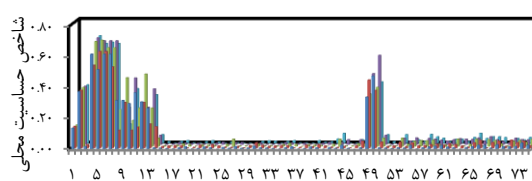
به منظور تعیین پارامترهای موثر برای بروز رسانی مدل اجزا محدود، آنالیز حساسیت طبق بخش (۲-۴) روی سازه سه طبقه صورت می‌گیرد. جدول ۵، پارامترهای مورد بررسی و حد بالا و پایین برای تعیین آنالیز حساسیت را نشان می‌دهد. شکل ۹ میزان حساسیت محلی و شکل ۱۰، حساسیت کلی را برای سازه سه‌بعدی نمایش می‌دهند.

جدول ۵- پارامترهای استفاده شده برای بررسی آنالیز حساسیت قاب سه طبقه سه‌بعدی

شماره	پارامتر	نماد (واحد)	حد پایین	حد بالا
۱	چگالی	ρ (kg/m ³)	۷۶۰۰	۸۰۰۰
۲	مدول یانگ	E (Gpa)	۱۸۰	۲۲۰
۳	ضریب پواسون	ν (بدون بعد)	۰/۲	۰/۴
۴		Da1 (متر)	۱/۵۵	۱/۶۵
۵	طول اعضای	Da2 (متر)	۱/۵۵	۱/۶۵
۶	عمودی	Da3 (متر)	۱/۵۵	۱/۶۵
۷		Da4 (متر)	۱/۵۵	۱/۶۵
۸	ارتفاع اعضای	Dd1 (متر)	۰/۵۸	۰/۶۲
۹	افقی در صفحه $x-z$	Dd2 (متر)	۱/۰۷	۱/۱۴
۱۰		Dd3 (متر)	۱/۵۵	۱/۶۵
۱۱	ارتفاع اعضای	De1 (متر)	۰/۵۸	۰/۶۲
۱۲	افقی در صفحه $y-z$	De2 (متر)	۱/۰۷	۱/۱۴
۱۳		De3 (متر)	۱/۵۵	۱/۶۵
۱۴-۳۰	عرض مقطع	a1...a16 (متر)	۰/۰۱۵۵	۰/۰۱۶۵
۳۱-۴۷	طول مقطع	b1...b16 (متر)	۰/۰۱۵۵	۰/۰۱۶۵
۴۸	طول میله‌های افقی در صفحه $x-z$	Dc (متر)	۰/۴۸	۰/۵۲
۴۹	میله‌های افقی در صفحه $y-z$	Dd (متر)	۰/۳۸	۰/۴۲
۵۰-۷۴	مدول یانگ جوش	E1...E24 (Gpa)	۱۸۰	۲۲۰



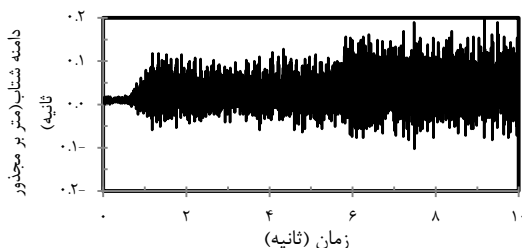
شکل ۱۰- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت کلی



شکل ۹- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت محلی



شکل ۱۱- نمای کلی تجهیزات استفاده شده در مدلسازی تجربی



شکل ۱۲- پاسخ سیستم قاب سه طبقه تحت تحریک تصادفی

در جدول ۶ فرکانس‌های بدست آمده از روش SSI، از سیگنال‌های مختلف نشان داده شده است.

شکل ۱۳ درصد خطای نسبی فرکانس‌های سیگنال‌های مختلف بدست آمده از روش SSI و فرکانس‌های بدست آمده از آنالیز مودال کلاسیک (تست چکش) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۳، فرکانس‌های بدست آمده از سیگنال‌های Pseudo random، تطابق بهتری با فرکانس‌های بدست آمده از آنالیز مودال چکش دارند؛ در نتیجه تنها از این سیگنال در ادامه پژوهش استفاده می‌شود.

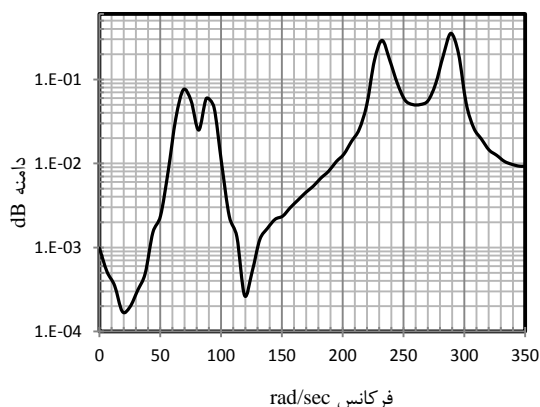
همانگونه که از شکل ۹ مشخص است، بیشترین مقادیر شاخص حساسیت محلی به پارامترهای طول اعضا و خصوصیات فیزیکی سازه اختصاص داشته و کمترین مقادیر به مدول یانگ اتصالات و عرض مقطع المان‌های متصل به اتصالات است؛ همچنین، در بررسی شاخص حساسیت کلی، بیشترین مقادیر نیز اختصاص به طول اعضا و خصوصیات فیزیکی سازه دارد. در حساسیت کلی نیز، تقریباً همان پارامترهای در نظر گرفته شده در حساسیت محلی می‌تواند تاثیر مستقیمی روی فرکانس‌های بدست آمده داشته باشند.

۳-۴- آنالیز مودال محیطی

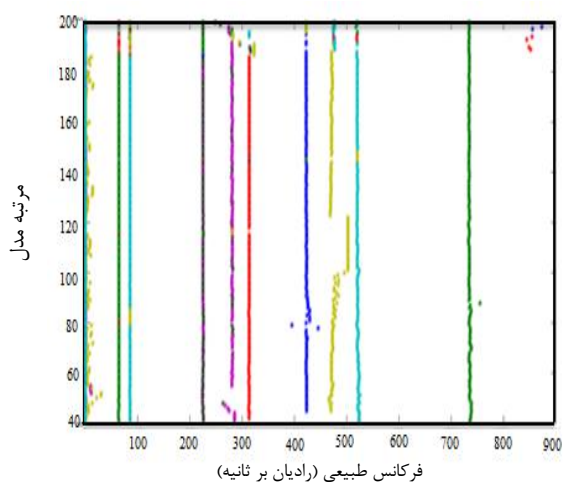
آنالیز مودال عملیاتی بر مبنای محاسبه پارامترهای مودال سازه، فقط با استفاده از پاسخ خروجی سازه است. این پژوهش به بررسی عددی و تجربی شناسایی دینامیکی سازه-ها به کمک روش زیر فضای تصادفی می‌پردازد. از روی پاسخ‌های زمانی سازه، ماتریس هنکل تشکیل شده، به کمک آن ماتریس‌های مشاهده‌پذیر و کنترل‌پذیر محاسبه می‌شود. از روی ماتریس مشاهده‌پذیر فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها محاسبه می‌شوند. تصادفی بودن سیگنال‌های ورودی، یکی از مهمترین فرضیات الگوریتم‌های آنالیز مودال عملیاتی از قبیل SSI است. برای تحریک تصادفی سازه، از یک لرزاننده الکترو دینامیکی استفاده می‌شود که قادر به تولید انواع مختلفی از سیگنال‌ها است. با توجه به آنکه سیگنال ورودی در روش‌های OMA باید از نوع تصادفی باشد، لذا از سیگنال‌های تصادفی، تصادفی متوالی، شبه تصادفی و تصادفی متواتر برای تحریک استفاده شده است. سپس، با نصب شتاب‌سنج‌ها روی سازه، می‌توان پاسخ زمانی سیستم را ثبت کرد. شکل شماره ۱۱، نمای کلی تجهیزات استفاده شده در آزمایش تجربی سازه سه بعدی را نمایش می‌دهد.

در شکل ۱۲ پاسخ بدست آمده از سازه تحت تحریک تصادفی نشان داده شده است. در این آزمایش نرخ فرکانسی ۱۶۳۲۸ در نظر گرفته شده است و از ۵ شتاب‌سنج برای نمونه‌برداری از ارتعاشات سیستم استفاده شده است.

¹ Operational Modal Analysis



شکل ۱۴- نمودار فرکانسی سازه توسط تحریک در جهت y



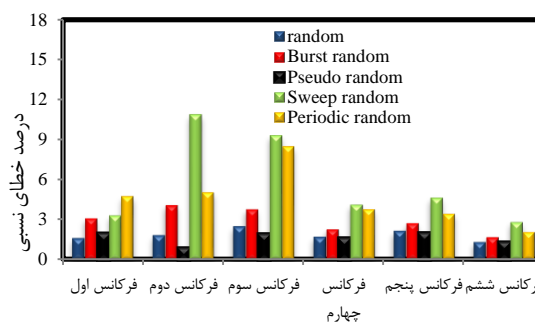
شکل ۱۵- نمودار پایداری روش SSI برای قاب سه طبقه در جهت y

جدول ۷- فرکانس‌های محاسبه شده توسط روش SSI و اجزا محدود - خطای نسبی روش اجزا محدود نسبت به روش SSI

فرکانس	روش SSI	اجزا محدود	خطای نسبی (%)
فرکانس اول	۶۲/۴۵۰	۷۳/۰۵۲	۱۴/۵۱۳
فرکانس دوم	۷۱/۲۱۰	۸۴/۷۰۰	۱۵/۹۲۷
فرکانس سوم	۸۹/۶۴۰	۹۲/۸۶۲	۳/۴۷۰
فرکانس چهارم	۲۰۵/۰۹۰	۲۳۴/۵۶۴	۱۲/۵۶۶
فرکانس پنجم	۲۳۷/۹۰۰	۲۷۶/۰۳۳	۱۳/۸۱۵
فرکانس ششم	۲۹۲/۰۱۰	۳۲۶/۴۸۳	۱۰/۵۵۹

جدول ۶- فرکانس‌های محاسبه شده توسط روش

SSI (rad/sec)			
سیگنال	فرکانس اول	فرکانس دوم	فرکانس سوم
Random	۶۲/۲۳۰	۷۱/۸۳۰	۹۰/۱۲۰
Burst random	۶۳/۱۴۰	۷۳/۴۳۰	۹۱/۲۵۰
Pseudo random	۶۲/۴۵۰	۷۱/۲۱۰	۸۹/۶۴۰
Sweep random	۶۴/۱۷۰	۷۴/۱۲۰	۹۵/۴۲۰
Periodic random	۵۹/۲۳۰	۷۸/۲۳۰	۹۶/۱۵۰
Random	۲۰۵/۲۳۰	۲۳۸/۲۳۰	۲۹۱/۹۷۰
Burst random	۲۰۶/۳۸۰	۲۳۹/۶۴۰	۲۹۳/۰۸۰
Pseudo random	۲۰۵/۰۹۰	۲۳۷/۹۰۰	۲۹۲/۰۱۰
Sweep random	۲۰۹/۴۵۰	۲۴۱/۳۴۰	۲۹۴/۱۴۰
Periodic random	۲۱۰/۱۳۰	۲۴۴/۲۵۰	۲۹۶/۳۴۰



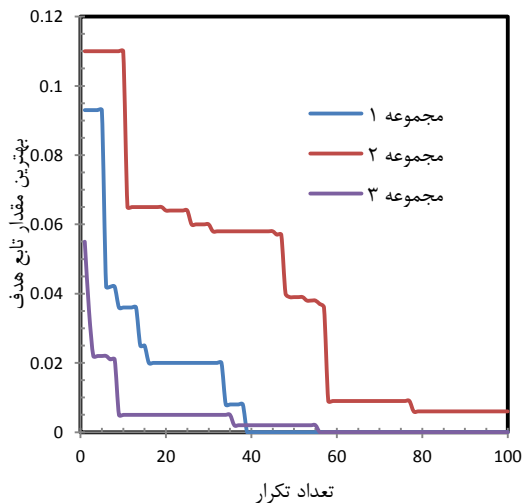
شکل ۱۳- درصد خطای نسبی فرکانس‌های طبیعی روش SSI با فرکانس‌های تجربی آنالیز مودال کلاسیک (چکش)

شکل ۱۴ نمودار FFT بدست آمده از آنالیز مودال کلاسیک را نمایش می‌دهد. همچنین شکل ۱۵، دیاگرام پایداری روش SSI برای سیگنال تحریک Pseudo random در جهت تحریک y را نمایش می‌دهد.

همان‌طور که در بخش (۲-۲) بیان گشت، نقاطی که به صورت ردیفی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، تقریبی از فرکانس طبیعی می‌باشند و در شکل بوضوح قابل دیدن می‌باشند. همان‌طور که از شکل ۱۵ مشخص است، مرتبه سیستم بین ۴۰ تا ۲۰۰ تغییر یافته است. جدول ۷ فرکانس‌های طبیعی سازه سه طبقه که از دو روش اجزا محدود و آنالیز مودال محیطی بدست آمده‌اند، را به همراه خطای نسبی روش اجزا محدود نسبت به روش آنالیز مودال محیطی (روش SSI) نشان می‌دهد.

جدول ۸- سه مجموعه از پارامترهای طراحی مورد استفاده در مساله به روز نمودن اجزا محدود

پارامترهای طراحی	مجموعه ۱	مجموعه ۲	مجموعه ۳
ρ	✓	✓	✓
E	✓	✓	✓
D_{a1}	✓	×	✓
D_{a2}	✓	×	✓
D_{a3}	✓	×	✓
D_{a4}	✓	×	✓
D_{d1}	✓	×	✓
D_{d2}	✓	×	✓
D_{d3}	✓	×	✓
D_{e1}	✓	×	✓
D_{e2}	✓	×	✓
D_{e3}	✓	×	✓
$a_{1...a_{16}}$	×	✓	✓
$b_{1...b_{16}}$	×	✓	✓
Dc	✓	×	✓
Dd	✓	×	✓
$E1...E_{24}$	×	✓	✓
ν	×	✓	✓



شکل ۱۶- نمودار همگرایی پاسخ در مسئله به روز نمودن مدل اجزا محدود قاب سه طبقه با بهره‌گیری از سه مجموعه متفاوت از پارامترهای طراحی

۳-۵- روش بهینه‌سازی زنبور عسل

همان‌طور که از جدول ۷ مشخص است، مقدار خطای نسبی فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده با روش اجزا محدود، نسبت به فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از روش آنالیز مودال محیطی، بسیار زیاد است و این نشان دهنده، نقص در مدل‌سازی اجزا محدود است.

این نقص ممکن است، ناشی از وارد نمودن خصوصیات مواد به نرم‌افزار بوده (چگالی، مدول یانگ سازه، مدول یانگ جوش و غیره) یا نقص هندسی ناشی از ابعاد سازه (ضخامت مقطع، طول اجزا، محل اتصال قطعات و غیره) باشد. برای رفع این مشکل با استفاده سه مجموعه پارامترهای طراحی برای الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل مشخص می‌شوند. مجموعه اول پارامترهای بدست آمده از روش آنالیز حساسیت، مجموعه دوم با استفاده از پارامترهایی که از لحاظ آنالیز حساسیت مهم نبوده و خصوصیات مواد و مجموعه سوم کل پارامترهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند. دسته‌بندی این پارامترها در جدول ۸ آمده است. الگوریتم بهینه‌سازی، آرایه‌ای از متغیرهایی را تعریف می‌کند که می‌بایست بهینه شوند.

در نمودار نشان داده شده در شکل ۱۶، همگرایی پاسخ بهینه در سه حالت نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۶ مشخص است، با بهره‌گیری از مجموعه ۱ و مجموعه ۳، همگرایی سریعتر و بهتری رخ می‌دهد؛ اما این همگرایی توسط مجموعه ۱ با ۱۵ متغیر بدست آمده، ولی در مجموعه ۳ با ۷۴ متغیر حاصل می‌شود؛ همچنین، زمان اجرای فرایند بهینه‌سازی در مجموعه ۱، به مراتب کمتر از مجموعه ۳ است و این نشان می‌دهد که بهینه‌سازی با استفاده از مجموعه ۱، هم دارای دقت مناسب بوده، هم در طول زمان کمتری به پاسخ بهینه دست می‌یابد. با توجه به اینکه پارامترهای مجموعه ۱ همگی با استفاده از آنالیز حساسیت بدست آمدند، نشان می‌دهد که آنالیز حساسیت به خوبی قادر به تشخیص پارامترهای تاثیر گذار در فرایند بهینه‌سازی را دارد.

جدول ۹، پارامترهای کنترل الگوریتم زنبور عسل را بیان می‌نماید که در این تحقیق بکار رفته است. این مقادیر پس از بررسی‌های تجربی بدست آمده است.

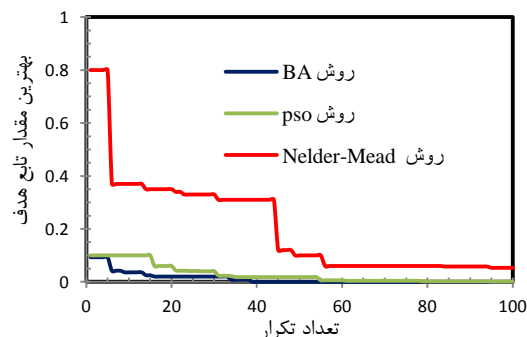
بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۷ مشخص است، روش بهینه‌سازی زنبور عسل سریعتر همگرا شده، تابع هدف آن، کمترین مقدار را بین سه روش بررسی شده دارد.

جدول ۹- پارامترهای کنترل الگوریتم زنبور عسل

پارامتر	نوع آنالیز
۴۰۰۰	تعداد تابع محاسبه شده
۰/۰۱	شعاع همسایگی
۲۰	N_{i1}
۱۲	N_{i2}
۱۰	n_{i1}
۱۵	n_{i2}
۱۰۰	N_i
۱۰۰	تعداد تکرار

جدول ۱۰- مقایسه فرکانس‌های طبیعی حاصل از مدل به روز شده مدل اجزا محدود و مقادیر متناظر تجربی

شماره مود	فرکانس طبیعی (rad/sec)		خطای نسبی (%)
	مدل تجربی	مدل به روز شده اجزا محدود	
۱	۶۲/۴۵۰	۶۲/۴۵۱	۰/۰۰۲
۲	۷۱/۲۱۰	۷۱/۲۱۳	۰/۰۰۴
۳	۸۹/۶۴۰	۸۹/۶۴۷	۰/۰۰۸
۴	۲۰۵/۰۹۰	۲۰۵/۰۹۸	۰/۰۰۴
۵	۲۳۷/۹۰۰	۲۳۷/۹۰۴	۰/۰۰۲
۶	۲۹۲/۰۱۰	۲۹۲/۰۰۸	۰/۰۰۱



شکل ۱۷- نمودار همگرایی پاسخ در مسئله بروز نمودن

جدول ۱۰ فرکانس‌های بدست آمده از مدل اجزای محدود با استفاده از بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. همانطور که از مقایسه جداول ۷ و ۱۰ دیده می‌شود، مقدار خطای نسبی فرکانس‌های بدست آمده مدل اجزا محدود بعد از بروز رسانی مدل به مقدار چشمگیری کاهش یافته است. مجموع خطای نسبی قبل از بروز رسانی، ۷۰/۸۵۰ درصد بوده که بعد از بروز رسانی، این مقدار به ۰/۰۲۱ درصد کاهش یافته است. به منظور صحت سنجی روش بهینه‌سازی زنبور عسل در بروز رسانی مدل اجزا محدود، از روش‌های PSO و Nelder-Mead برای بهینه‌سازی سازه سه طبقه استفاده می‌شود. هدف از مقایسه روش BA با این دو روش، در آن است که روش PSO، روشی بهینه‌سازی تکاملی قدرتمند و روش Nelder-Mead، روشی بر مبنای مشتق‌گیری و کلاسیک بوده و مقایسه با این دو روش، کارایی روش BA را مشخص می‌نماید. روش PSO توسط کندی و آبرهانت [۲۴] طراحی شده است. الگوریتم PSO بر اساس دسته‌ای از حرکت ذرات عمل می‌کند که در آن هر ذره، یک جواب بهینه احتمالی است. ذرات در PSO، از یک رفتار بسیار ساده پیروی می‌کنند که آن تلاش برای موفقیت ذرات همسایه و موفقیت خود است. نتیجه این رفتار دسته‌جمعی، یافتن ناحیه جواب بهینه در یک فضای جست‌وجو با تعداد بعد زیاد است. ذرات در یک فضای جست‌وجوی چند بعدی به پرواز در می‌آیند، به گونه‌ای که موقعیت هر ذره با توجه به تجربیات شخصی خود و همسایه‌ها و یا تمامی ذرات تنظیم می‌شود؛ همچنین، الگوریتم Nelder-Mead، یک روش مستقیم برای یافتن کمینه تابع هدف n بعدی نامقید است که توسط نلدر و مید [۲۵] ارائه شد. این روش بر اساس مقایسه مقدار تابع در $n+1$ رأس یک سیمپلکس و تعویض بدترین رأس از نظر مقدار تابع هدف با یک نقطه جدید عمل می‌کند. روش Nelder-Mead سعی بر مینیمم‌سازی تابع هدف اسکالر غیرخطی n متغیره دارد. Nelder-Mead، تنها با استفاده از مقادیر تابع و بدون نیاز به مشتق تابع عمل می‌کند. این روش همچون سایر روش‌های سیمپلکس در هر تکرار، یک هندسه محدب n بعدی با حجم غیر صفر و $n+1$ رأس تولید می‌کند.

شکل ۱۷ نمودار همگرایی سه روش بهینه‌سازی زنبور عسل، روش دسته ذرات و روش Nelder-Mead برای بروز رسانی سازه سه طبقه و با استفاده از مجموعه اول پارامترهای

به منظور محاسبه کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی، از شاخصی به نام قابلیت اعتماد عملی استفاده شده که به صورت احتمال به جواب صحیح منجر شدن الگوریتم تعریف می‌شود. باید توجه داشت که قابلیت اعتماد عملی، به صورت احتمال دست یافتن به جواب بهینه در محدوده ۰.۱٪ جواب بهینه نهایی تعریف می‌شود. در این پژوهش بهترین مقدار تابع هدف، پس از ۲۰۰ مرحله تکرار محاسبه شده است؛ بنابراین از این مقدار جهت تعریف قابلیت اعتماد عملی استفاده گردیده است. شاخص دیگری که در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارزش نرمال شده نامیده می‌شود و شامل، اطلاعاتی پیرامون کارایی محاسبات و تعداد دفعات محاسبه تابع هدف توسط الگوریتم است که به صورت نسبت تعداد تابع هدف محاسبه شده، به قابلیت اعتماد عملی تعریف می‌شود.

جدول ۱۲ دو پارامتر ارزش نرمال شده و قابلیت اعتماد عملی را برای سه الگوریتم بهینه‌سازی BA، PSO و Nelder-Mead را نشان می‌دهد. از جدول ۱۲ مشخص است که روش BA، با صرف هزینه کمتری به جواب بهینه دست می‌یابد. همچنین شکل ۱۹، شکل مودهای بدست آمده از سازه بروز رسانی شده اجزا محدود توسط روش BA و آنالیز مودال محیطی SSI را نشان می‌دهد.

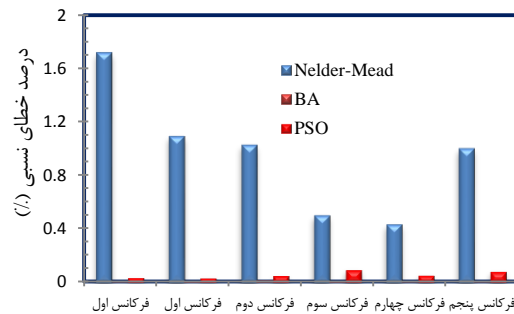
جدول ۱۲- کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای بروز رسانی مدل اجزا محدود سازه سه طبقه

روش	قابلیت اعتماد عملی	ارزش نرمال شده
BA	۰/۹	۴۴۴۴/۴
PSO	۰/۷	۵۷۱۴۲/۹
Nelder-Mead	۰/۶	۶۶۶۶/۷

به منظور مقایسه شکل مودهای بدست آمده از مدل اجزا محدود بروز رسانی شده و شکل مودهای بدست آمده از روش آنالیز مودال SSI، از معیار^۱ MAC استفاده می‌شود. معیار MAC، توسط رابطه (۲۲) تعریف می‌شود [۱۲].

¹ Modal Assurance Criterion

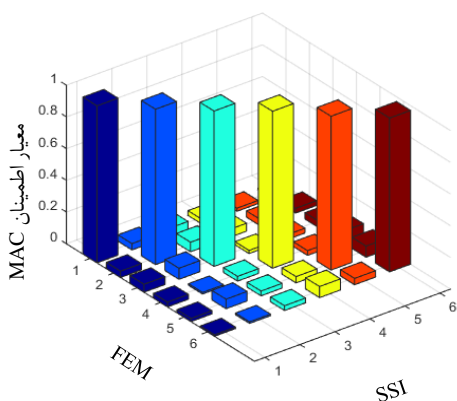
شکل ۱۸ خطای نسبی فرکانس‌های بدست آمده از مدل اجزا محدود بهینه شده توسط روش‌های بهینه‌سازی بیان شده و فرکانس‌های بدست آمده از روش تجربی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۸ مشخص است، فرکانس‌های بدست آمده از سازه که توسط روش BA بهینه‌سازی شده است، دقت بهتری نسبت به روش‌های دیگر بهینه‌سازی با فرکانس‌های تجربی دارند. پارامترهای بهینه شده سازه سه طبقه، از هر سه روش بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مجموعه اول بدست آمده از آنالیز حساسیت، در جدول ۱۱ آورده شده است.



شکل ۱۸- خطای نسبی فرکانس‌های طبیعی روش SSI

جدول ۱۱- پارامترهای سازه‌ی سه طبقه بهینه شده توسط روش‌های بهینه‌سازی

پارامترهای طراحی	PSO	BA	Nelder-Mead
ρ (kg/m ³)	۷۷۶۵	۷۷۱۰	۷۶۵۰
E (Gpa)	۲۰۱	۱۹۸	۲۰۳
D _{a1}	۱/۶۵	۱/۶۱	۱/۶۳
D _{a2}	۱/۶۵	۱/۶۱	۱/۶۳
D _{a3}	۱/۶۵	۱/۶۱	۱/۶۲
D _{a4}	۱/۶۴	۱/۶۱	۱/۶۲
D _{d1}	۰/۶۰	۰/۵۹	۰/۶۱
D _{d2}	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۱۳
D _{d3}	۱/۶۳	۱/۶۴	۱/۶۳
D _{e1}	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۵۸
D _{e2}	۱/۰۹	۱/۰۹	۱/۱۱
D _{e3}	۱/۶۴	۱/۶۴	۱/۶۳
D _c	۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۴۸
D _d	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۸



شکل ۲۰- مقایسه شکل مودهای سیستم پنج درجه آزادی توسط معیار MAC

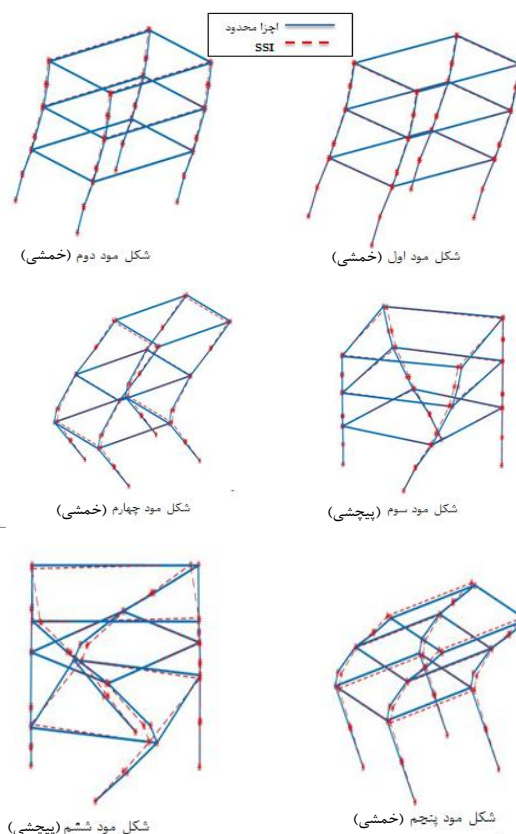
محیطی و فرکانس‌های عددی، از روش اجزا محدود محاسبه شدند. با کمینه کردن این تابع هدف، مقادیر بهینه برای پارامترهای طراحی محاسبه گشتند. به منظور صحت سنجی این روش، پارامترهای طراحی یک قاب سه طبقه توسط این روش بهینه شدند. فرکانس‌های عددی، از تحلیل مقدار ویژه نرم‌افزار Ansys و فرکانس‌های تجربی، از روش زیر فضای تصادفی محاسبه گردیدند. نتایج نشان دادند که مجموع خطا بین فرکانس‌های بدست آمده از روش‌های تجربی و عددی، از مقدار ۰/۷۰/۸۵۰٪ قبل از بهینه‌سازی به مقدار ۰/۲۱٪ بعد از بروزرسانی کاهش یافت؛ همچنین، شکل مودهای بدست آمده از این دو روش، تطابق مناسبی را با یکدیگر داشته و معیار MAC برای مودهای یکسان آن‌ها، بیشتر از ۰/۹ است. همچنین، برای بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل، از روش‌های PSO و Nelder-Mead نیز برای بروزرسانی سازه سه طبقه استفاده گشت. از مقایسه سه روش مذکور مشخص شد که روش BA، سرعت و دقت بالاتری در بروزرسانی مدل اجزا محدود دارد.

۵- مراجع

- [1] He J, Fu ZF (2001) Modal analysis. 1st edn. Oxford, London.
- [2] Brincker R, Zhang L, Andersen P (2000) Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. 28th International Modal Analysis Conference, San Antonio, TX, USA.
- [3] Zaghbani I, Songmene V (2009) Estimation of machine-tool dynamic parameters during

$$MAC(i, j) = \frac{|\{\phi\}_{SSI}^T \{\phi\}_{FEM}^T|^2}{|\{\phi\}_{SSI}^T \{\phi\}_{SSI}^T| \times |\{\phi\}_{FEM}^T \{\phi\}_{FEM}^T|} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، ϕ شکل مود است. معیار MAC برای مقایسه شکل مودهای مذکور، در شکل ۲۰ آمده است. همانطور که از شکل ۲۰ مشخص است، شکل مودهای بدست آمده از دو روش SSI و اجزا محدود، تطابق خوبی با هم دارند و معیار MAC آن‌ها برای مودهای یکسان، بالاتر از ۰/۹ است.



شکل ۱۹- شکل مودهای سازه سه طبقه توسط روش SSI و مدل اجزا محدود بروزرسانی شده

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، روشی کاربردی به منظور بروزرسانی مدل اجزا محدود بر اساس آنالیز مودال محیطی و الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل تعریف شده است. تابع هدفی بر مبنای مجذور خطا بین فرکانس‌های بدست آمده از روش عددی و تجربی بیان گشت. فرکانس‌های تجربی، از روش آنالیز مودال

- [15] Moradi S, Alimouri P (2013) Crack detection of plate using differential quadrature method. *J Mech Eng Sci* 227(7): 1495-1504.
- [16] Benveniste A, Fuchs JJ (1985) Single sample modal identification of a nonstationary stochastic process. *IEEE Trans Autom Control* AC 30 (1): 66-74.
- [17] Peeters B, Roeck G De (1999) Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. *Mech Syst Signal Process* 13(6): 855-878.
- [18] Benveniste A, Mevel L (2007) Nonstationary consistency of subspace methods. *IEEE Trans Autom Control* AC 52(6): 974-984.
- [19] Van der Auweraer H, Leurs, Mas P, Hermans L (2000) Modal parameter estimation from inconsistent data sets. *Proceeding of the 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, TX, USA.*
- [20] Cruz A, Vélez W, Thomson P (2010) Optimal sensor placement for modal identification of structures using genetic algorithms – a case study: the olympic stadium in Cali, Colombia. *Annals of Operations Research* 181(1):769-781.
- [21] Cara OS (2012) Nondestructive evaluation of constructed facilities using vibration testing. *Mech Syst Signal Process* 39: 691-715.
- [۲۲] موسویان س (۱۳۹۴) استخراج مشخصه‌های دینامیکی و ارتعاشی شفت‌های دمی بالگرد شاهد ۲۷۸ به همراه کوپلینگ‌های انعطاف‌پذیر آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [۲۳] فتاحی ل (۱۳۹۳) تشخیص ترک در قاب‌ها با بهره‌گیری از مدل المان کوادراتور دیفرانسیلی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [24] Kennedy J, Eberhart RC (1995) Particle swarm optimization. In: *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks* 4: 1942-1948.
- [25] Nelder J.A, Mead R, (1965) A simplex method for function minimization. *Comput J* 7: 308-313.
- [4] Ebrahimi R, Esfahanian M, Ziaei-rad S (2013) Vibration modeling and modification of cutting platform in a harvest combine by means of operational modal analysis (OMA). *J Meas* 46: 3959-3967.
- [5] Van Overschee P, De Moor B (1990) Subspace identification for linear system. *Mech Syst Signal Process* 5: 101-135.
- [6] Noel J, Kerchen G (2014) Frequency-domain subspace identification for nonlinear mechanical systems. *J Mech Sys Signal Proces* 40: 701-717.
- [7] Dohler M, Mevel L (2010) Crystal Clear SSI for Operational Modal Analysis of Aerospace Vehicles. 28th International Modal Analysis Conference. Berlin, Germany.
- [8] Goursat M, Dohler M, Mevel L, Anderson P (2011) Crystal Clear SSI for Operational Modal Analysis of Aerospace Vehicles. *Structural Dynamics* 3.
- [9] Kompalka AS, Reese S, Bruhns OT (2007) Experimental investigation of damage evolution by data-driven stochastic subspace identification and iterative finite element model updating. *J Appl Mech* 77: 559-573.
- [10] Collins JD, Hart GC, Hasselman TK, Kennedy B, (1974) Statistical identification of structures. *AIAA J* 12: 185-190.
- [11] Dunn S, Peucker S, Perry J (2005) Genetic algorithm optimisation of mathematical models using distributed computing. *Appl Intell* 23: 21-32.
- [12] Moradi S, Fatahi L, Razi P (2010) Finite element model updating using bees algorithm. *Struct Multidiscip Opt* 42: 283-291.
- [13] Malekzhehtab H, Golafshani AA (2013) Damage detection in an offshore jacket platform using genetic algorithm based finite element model updating with noisy modal data. *Procedia Engineering* 54: 480-490.
- [14] Chouksey M, Dutt JK, Modak SV (2013) Model updating of rotors supported on ball bearings and its application in response prediction and balancing. *J Meas* 46: 4261-4273.