

اصلاح مدل اجزای محدود یک سیستم لوله‌ی Z شکل با استفاده از آزمایش مودال تجربی

لااله فتاحی (دانشجوی دکتری)

شاپور موادی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

پژمان رازی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه دال هاوزی، کانادا

در این پژوهش، مدل اجزای محدود یک سیستم لوله‌ی انتقال گاز Z شکل با بهره‌گیری از داده‌های تجربی حاصل از آزمایش مودال و با استفاده از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات با هدف کمیته‌سازی اختلاف بین پارامترهای مودال مدل اجزای محدود و مدل تجربی اصلاح می‌شود. با استفاده از آزمایش مودی پارامترهای شش مود اول سیستم شامل فرکانس‌های طبیعی، شکل مودال‌ها و نسبت‌های استهلاک استخراج می‌گردد. برای اصلاح ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی در مدل اجزای محدود، ۲۸ پارامتر طراحی در نظر گرفته شده است که با اعمال روش بهینه‌سازی ذکر شده، یافتن مقادیر بهینه برای این پارامترها میسر می‌شود. با بهره‌گیری از این مقادیر بهینه در مدل اجزای محدود، پارامترهای مودال حاصل از این مدل — شامل فرکانس‌های طبیعی نامیرا، فاکتورهای میرایی و شکل مودها — تطابق بیشتری با مقادیر متناظر تجربی خواهند داشت.

واژگان کلیدی: سیستم لوله، ارتعاشات، تحلیل مودال تجربی، روش اجزای محدود، اصلاح مدل تحلیلی، روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات.

l-fatahi@scu.ac.ir
moradis@scu.ac.ir
pejman.razi@dal.ca

مقدمه

روش اجزای محدود یکی از پرکاربردترین روش‌های مدل‌سازی سیستم‌هاست. با انجام آزمایش مودال روی سیستم می‌توان به بررسی صحت مدل اجزای محدود و اصلاح آن پرداخت. در دهه‌های اخیر روش‌های زیادی برای اصلاح مدل تحلیلی ارائه شده که در آن‌ها با بهره‌گیری از داده‌های تجربی به اصلاح مدل تحلیلی سیستم می‌پردازند. برخی از این روش‌ها، روش‌های مستقیمی هستند که به تکرار نیازی ندارند اما صحت نتایج مدل اصلاح شده در خارج از محدوده‌ی فرکانسی داده‌های تجربی مورد تردید است. همچنین تقارن ماتریس‌های سیستم نیز لزوماً حفظ نمی‌شود.^[۵-۷] از دیگر نقاط ضعف این روش‌ها می‌توان به ضرورت کامل بودن درجات آزادی مدل تجربی اشاره کرد. با توجه به این که در عمل درجات آزادی مدل تجربی کم‌تر از مدل تحلیلی است و اندازه‌گیری پارامترهای مودال برخی درجات آزادی — نظیر درجات آزادی چرخشی — بسیار مشکل است، لازم است با استفاده از روش‌های بسط^۱ درجات آزادی اندازه‌گیری نشده در شکل مودهای تجربی تعیین شود که این امر موجب وارد شدن خطای اعمال این روش‌ها نیز می‌شود.^[۴] علاوه بر روش‌های مستقیم، روش‌های مبتنی بر تکرار نیز در اصلاح مدل اجزای محدود کاربرد گسترده‌ی دارند. مثلاً، از داده‌های تجربی تابع پاسخ فرکانسی^۲ و مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر متناظر مدل تحلیلی، برای اصلاح آن مدل استفاده می‌شود.^[۶]

از مزایای این روش می‌توان به عدم ضرورت استخراج پارامترهای مودال که محاسبه‌ی آن‌ها با فرض‌های ساده‌شونده و تقریب همراه بوده، و نیز به امکان انتخاب تعداد زیادی پارامتر طراحی به دلیل عدم محدودیت در تعداد نقاط فرکانسی انتخابی در تابع پاسخ اشاره کرد. البته این روش به نقاط فرکانسی انتخابی حساس بوده و در صورت انتخاب نقاط فرکانسی نامناسب ممکن است، هم‌گرایی حاصل نشود.^[۷] روش «حساسیت ویژه معکوس» نیز از جمله روش‌های مبتنی بر تکرار است که در اصلاح مدل‌های تحلیلی به‌کار می‌رود.^[۸] در این روش، با محاسبه‌ی ماتریس حساسیت مقادیر ویژه و بردارهای ویژه با بهره‌گیری از روش تکرار به اصلاح مدل تحلیلی پرداختند. به دلیل حل مسئله‌ی مقدار ویژه در هر بار تکرار ممکن است حجم محاسبات در مورد سیستم‌های پیچیده با تعداد درجات آزادی زیاد، بالا باشد.^[۹] از جمله مزایای این دو روش اخیر، می‌توان به عدم نیاز به بسط شکل مودهای تجربی و عدم نیاز به کامل بودن درجات آزادی مدل تجربی اشاره کرد. برخی از محققین به بررسی برخی از محدودیت‌های روش حساسیت پرداخته^[۱۰] و عده‌ی دیگری نیز روش حساسیت را با روش استفاده‌ی مستقیم از داده‌های تابع فرکانسی مقایسه کرده‌اند.^[۷] مشکل عمده‌ی روش‌های اخیر، وابستگی و هم‌گرایی به مدل اولیه و نیز امکان محاسبه‌ی بهینه‌های محلی است که از آن‌ها به عنوان نقاط ضعف این روش‌ها یاد می‌شود.

از سوی دیگر، الگوریتم‌های تکاملی^[۱۱] به دلیل برخورداری از مزایایی چون

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۱/۲۴، اصلاحیه ۱۳۸۹/۶/۳۰، پذیرش ۱۳۹۰/۳/۲۷

ماهیت سرعت، ضرایب شتاب در اعداد تصادفی R_1 و R_2 ضرب شده‌اند. مقادیر ضریب اینرسی و ضرایب شتاب وابسته به مسئله است.^[۱۷] در این پژوهش نیز با بهره‌گیری از روش سعی و خطا، مقادیر ضریب اینرسی و ضرایب شتاب به ترتیب 0.7 و 1 انتخاب شده‌اند.

اصلاح مدل اجزای محدود سیستم لوله

در اصلاح مدل اجزای محدود یک سازه با بهره‌گیری از پارامترهای مودال تجربی -- یعنی فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای تجربی -- و با تغییر در برخی پارامترهای فیزیکی مدل اجزای محدود، سعی می‌شود تا این مدل به مدل تجربی نزدیک‌تر شود. در واقع هدف کمیته‌سازی اختلاف بین مقادیر تجربی و مقادیر تحلیلی است. به این منظور، بردارهای خطای نسبی $\{r_1\}^T$ و $\{r_2\}^T$ که به ترتیب متشکل از اختلاف نسبی مقادیر ویژه (فرکانس‌های طبیعی) تجربی و تحلیلی و نیز اختلاف نسبی بردارهای ویژه تجربی و تحلیلی است، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\{r_1\} = \frac{\{\lambda_X\} - \{\lambda_A\}}{\{\lambda_X\}} \quad (3)$$

$$\{r_2\}^T = \frac{\{\alpha_X\}^T - \{\alpha_A\}^T}{\{\alpha_X\}^T} \quad (4)$$

که در آن:

$$\{\alpha\}^T = \frac{\{\phi\}^T}{\phi_j^T} \quad (5)$$

برای بیان بهتر بردار خطا، از رابطه‌ی ۴ استفاده می‌شود:

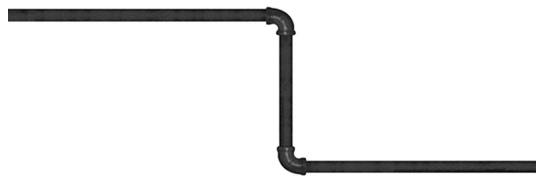
$$\{\Delta e\} = \left\{ \{r_1\}^T \{r_2\}^T \dots \{r_m\}^T \right\}^T \quad (6)$$

در نتیجه می‌توان یک تابع هدف به صورت رابطه‌ی ۵ و بر مبنای اختلاف بین مقادیر تحلیلی و مقادیر تجربی تعریف کرد که تابعی غیرخطی از پارامترهای طراحی سیستم است:

$$f(\{p\}) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^{m(n+1)} \omega_i (\Delta e_i)^2 \quad (7)$$

در این رابطه ω_i ضرایب وزنی و $\{p\}$ بردار در بردارنده‌ی پارامترهای طراحی است. با اعمال روش اجتماع ذرات، می‌توان به محاسبه‌ی مقادیر بهینه‌ی پارامترهای طراحی -- که به‌زای آن‌ها تابع هدف داده شده در رابطه‌ی ۷ کمیته خواهد شد -- پرداخت. سیستم لوله‌ی مورد بررسی یک سیستم Z شکل است که در شکل ۲ نشان داده شده است. مدل اجزای محدود سیستم لوله متشکل از المان‌های لوله مستقیم و خمیده‌ی دوگانه‌ی است. با محاسبه‌ی ماتریس جرم و سختی المان‌ها^[۱۸-۲۰] و برهم‌نهی آن‌ها، ماتریس‌های سختی و جرم کل سیستم محاسبه می‌شوند. با فرض میرابودن تناسبی سازه، ماتریس میرایی سیستم نیز عبارت خواهد بود از:

$$[D_A] = \beta[K_A] + \gamma[M_A] \quad (8)$$



شکل ۲. سیستم لوله‌ی مورد آزمایش.

انجام جست‌وجوی سراسری^۲ و عدم حساس بودن به مدل اولیه، در اصلاح مدل اجزای محدود سیستم‌ها^[۱۴-۱۲] کاربرد روزافزونی یافته است. این روش‌ها به دلیل ماهیت تصادفی ممکن است حجم محاسباتی بالایی داشته باشند اما، سادگی این الگوریتم‌ها از نظر برنامه‌نویسی و در عین حال جواب‌های مناسب حاصله از نقاط قوت این روش‌هاست.

در این پژوهش نیز به منظور اصلاح مدل اجزای محدود یک سیستم لوله‌ی Z شکل از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات^۳ استفاده شده است. به این منظور ابتدا با انجام آزمایش تجربی روی سیستم، پارامترهای مودال سیستم را به دست آورده و سپس یک مدل تجربی از سیستم مورد نظر تهیه می‌شود. آنگاه به کمک برنامه‌ی که به منظور مدل‌سازی اجزای محدود سیستم نوشته شده، یک مدل اجزای محدود از سیستم مورد نظر تهیه می‌شود. در نهایت، با بهره‌گیری از مدل تجربی و با استفاده از روش بهینه‌سازی ذکر شده، مدل اجزای محدود اصلاح می‌شود.

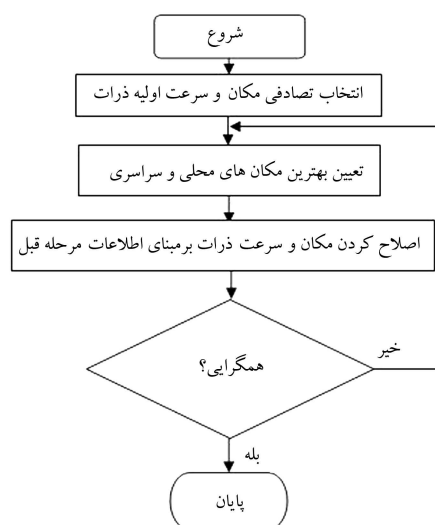
روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات

روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات یکی از الگوریتم‌های تکاملی است که از رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان و ماهی‌ها الگوبرداری شده است.^[۱۵] در این روش، حرکت ذرات در فضای جست‌وجو، تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگان‌شان است. به این ترتیب، هر ذره با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، در هر لحظه مکان خود را در فضای جست‌وجو تنظیم می‌کند.^[۱۶] (شکل ۱). روابط مورد استفاده برای محاسبه‌ی مکان و سرعت هر ذره نیز در روابط ۱ و ۲ آمده است:^[۱۵]

$$\{x\}_{k+1} = \{x\}_k + \{v\}_{k+1} \quad (1)$$

$$\{v\}_{k+1} = C_1\{v\}_k + C_2R_1(\{L\}_k - \{x\}_k) + C_2R_2(\{G\}_k - \{x\}_k) \quad (2)$$

$\{x\}_k$ و $\{v\}_k$ به ترتیب بردارهای مکان و سرعت ذرات در تکرار k ام هستند. $\{L\}_k$ و $\{G\}_k$ نیز به ترتیب بردارهای بهترین مکان شخصی و گروهی ذرات در تکرار k ام هستند. C_1 ضریب اینرسی و C_2 و C_2 ضرایب شتاب‌اند. برای تصادفی کردن



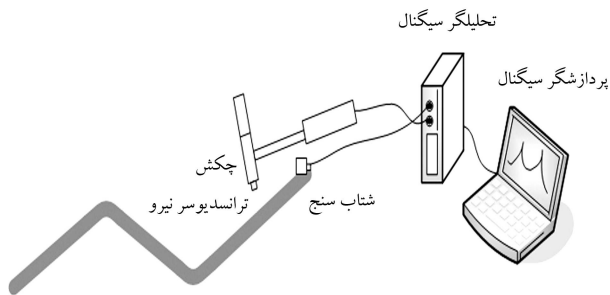
شکل ۱. فلوجارت روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات.



شکل ۴. اندازه‌گیری ارتعاشات برون صفحه‌یی.



شکل ۵. اندازه‌گیری ارتعاشات درون صفحه‌یی.

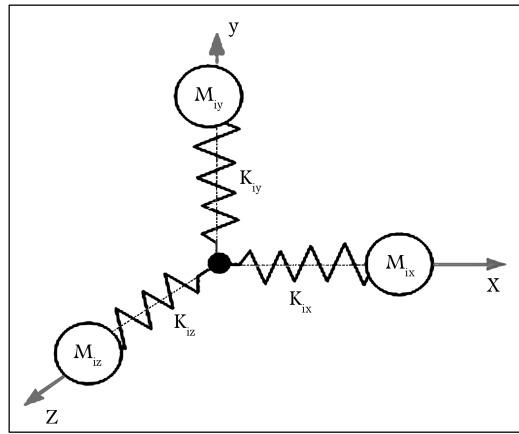


شکل ۶. مجموعه‌ی لازم برای انجام آزمایش مودال.

استفاده شده است. استخراج پارامترهای مودال از توابع پاسخ فرکانسی تجربی نیز توسط نرم‌افزار^[۲۳] ICATS انجام شده است.

نتایج

با بهره‌گیری از هشت مود اول تجربی حاصل از آزمایش مودال سیستم لوله و با استفاده از روش اجتماع ذرات، مدل اجزای محدود سیستم لوله اصلاح شده است. لازم به ذکر است، با توجه به ماهیت تصادفی حدس اولیه در این روش، هم‌گرایی این روش به حدس اولیه حساس نیست. در جدول ۱ نتایج حاصل از اصلاح مقادیر پارامترهای طراحی که با انتخاب ۱۰ ذره و بعد از ۳۰ بار تکرار به دست آمده‌اند، ارائه شده است. همچنین، با دوبرابر کردن تعداد ذرات (۲۰ ذره) در مقادیر بهینه‌ی حاصله برای پارامترهای طراحی تغییر محسوسی مشاهده نشد. از این رو، با بهره‌گیری از این مقادیر بهینه‌ی پارامترهای طراحی مقدار تابع هدف کمینه می‌شود. در حقیقت، این مقدار طی یک فرایند تکاملی (شکل ۷) به دست آمده است. با در نظر گرفتن این مقادیر بهینه، پارامترهای مودال حاصل از مدل اجزای محدود محاسبه شده‌اند. به منظور بررسی نتایج به دست آمده، از پارامترهای درصد خطای نسبی فرکانسی



شکل ۳. مدل‌سازی اتصال ۴ام.

در مدل اجزای محدود سیستم ۲۸ پارامتر طراحی در نظر گرفته شده که عبارت‌اند از: مدول یانگ لوله E ، چگالی لوله ρ ، دو ضریب تناسب β و γ مربوط به میرایی تناسبی سیستم، و نیز ۲۴ پارامتر برای مدل‌سازی سختی و جرم اتصالات رزوه. یادآور می‌شود که هر اتصال رزوه بین لوله‌ی خمیده و لوله‌ی مستقیم، به کمک سه فنر خطی با سختی K_{ix} ، K_{iy} ، K_{iz} در راستای x ، y و z و همچنین سه جرم متمرکز M_{ix} ، M_{iy} ، M_{iz} در این راستاها، برای در نظر گرفتن اثر افزایش ضخامت لوله‌ی خمیده در محل اتصال به لوله‌ی مستقیم، مدل‌سازی شده است (شکل ۳). شرایط تکیه‌گاهی سیستم لوله‌ی مورد نظر نیز از نوع آزاد است.

آزمایش مودال تجربی

به منظور استخراج داده‌های کامل‌تر و دقیق‌تر از آزمایش مودال تجربی باید در انتخاب نقاط تعلیق، نقاط تحریک و نقاط نصب شتاب‌سنج ملاحظات خاصی صورت گیرد که از آن تحت عنوان طرح‌ریزی پیش از آزمایش^۵ یاد می‌شود.^[۲۱، ۲۲] این امر خصوصاً در آزمایش تک‌ورودی - تک‌خروجی (SISO)^۶ اهمیت بیشتری دارد.^[۲۳] هنگامی که هدف مدل‌کردن شرایط مرزی آزاد برای سیستم است، باید توجه داشت که در حالت نظری چنین شرطی با در نظر گرفتن شش درجه آزادی برای هر گره، سبب به وجود آمدن شش مود جسم صلب با فرکانس صفر می‌شود. اما برآوردن شرط مرزی کاملاً آزاد در عمل بسیار مشکل است و جز در محیط‌های بدون جاذبه یا با اعمال نیروهای غیرتماسی مانند نیروی مغناطیسی اعمال شده بر سیستم در یک میدان مغناطیسی امکان‌پذیر نیست. در عمل فرکانس‌های طبیعی موده‌های جسم صلب سیستم کمی بیش از صفر شده، اما نباید به هیچ روی از ۱۰ تا ۲۰ درصد فرکانس اولین مود کشسان فراتر روند.^[۲۳] در آزمایش انجام شده برای شبیه‌سازی شرایط مرزی آزاد، سیستم لوله توسط کش‌هایی معلق شده است. یادآور می‌شود که برای تداخل کم‌تر سیستم تعلیق با موده‌های ارتعاشی سیستم باید کش‌های به کار رفته برای آویزان کردن سیستم بر صفحه‌ی ارتعاش آن عمود باشند. از این رو ارتعاشات درون صفحه‌یی و برون صفحه‌یی سیستم لوله به صورت مجزا بررسی شده‌اند. در شکل‌های ۴ و ۵ نحوه‌ی آویزان کردن سیستم نشان داده شده است.

در شکل ۶ مجموعه‌ی لازم برای انجام آزمایش مودال در محیط آزمایشگاه نشان داده شده است. در آزمایش انجام شده روی سیستم لوله، تحریک سیستم با استفاده از چکش^۲ AU° و اندازه‌گیری پاسخ سیستم با بهره‌گیری از شتاب‌سنج $V/120/A$ صورت گرفته است. به منظور تحلیل سیگنال‌های نیرو و شتاب از تحلیل‌گر پالس

جدول ۱. مقادیر اولیه و اصلاح شده پارامترهای طراحی.

مقدار اصلاح شده	مقدار اولیه	پارامترهای طراحی
۱۷۱,۷۰	۲۰۰	$E (N/m^2) \times 10^9$
۷۷۰۶	۷۵۰۰	$\rho (kg/m^3)$
۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۰۳	β
۳,۷۷	۲	$\gamma \times 10^4$
۰,۰۵۸۷	۰,۰۳	$M1x (kg)$
۰,۰۵۸۷	۰,۰۳	$M2x (kg)$
۰,۰۵۸۷	۰,۰۳	$M3x (kg)$
۰,۰۵۷۷	۰,۰۳	$M4x (kg)$
۰,۰۶	۰,۰۳	$M1y (kg)$
۰,۰۵۷۷	۰,۰۳	$M2y (kg)$
۰,۰۵۷۷	۰,۰۳	$M3y (kg)$
۰,۰۵۷۷	۰,۰۳	$M4y (kg)$
۰,۰۵۹۴	۰,۰۳	$M1z (kg)$
۰,۰۵۸۳	۰,۰۳	$M2z (kg)$
۰,۰۵۸۴	۰,۰۳	$M3z (kg)$
۰,۰۵۷۴	۰,۰۳	$M4z (kg)$
۴,۹۳	۰,۴	$K1x (N/m) \times 10^9$
۶,۸۷	۰,۴	$K2x (N/m) \times 10^9$
۶,۸۷	۰,۴	$K3x (N/m) \times 10^9$
۵,۰۳	۰,۴	$K4x (N/m) \times 10^9$
۶,۸۷	۰,۴	$K1y (N/m) \times 10^9$
۴,۹۷	۰,۴	$K2y (N/m) \times 10^9$
۴,۹۷	۰,۴	$K3y (N/m) \times 10^9$
۶,۸۷	۰,۴	$K4y (N/m) \times 10^9$
۶,۳۸	۴	$K1z (N/m) \times 10^8$
۶,۵۱	۴	$K2z (N/m) \times 10^8$
۶,۵۱	۴	$K3z (N/m) \times 10^8$
۶,۵۱	۴	$K4z (N/m) \times 10^8$

(e_{ω}^r) و درصد خطای نسبی میرایی (e_{η}^r) برای هر مود و نیز از پارامترهای درصد خطای میانگین فرکانس‌های طبیعی نامیرا ($APENF$), درصد خطای میانگین فاکتورهای میرایی $(APELF)$ و درصد خطای میانگین شکل مودها ($APEMS$) استفاده شده است. معیار اطمینان مود (MAC) نیز پارامتری دیگر برای بررسی میزان تطابق شکل مودهای تجربی و تحلیلی است. مقادیر بالاتر از ۰,۷ تطابق خوب و مقادیر پایین‌تر از ۰,۵ نشان‌گر تطابق ضعیف است.^[۲۵] این شش پارامتر در روابط ۹ تا ۱۶ تعریف شده‌اند.

$$e_{\omega}^r = |(\bar{\omega}_X^r - \bar{\omega}_A^r) / \bar{\omega}_X^r| \times 100 \quad (9)$$

$$e_{\eta}^r = |\eta_X^r - \eta_A^r| / \eta_X^r \times 100 \quad (10)$$

$$\omega^r = \bar{\omega}^r \sqrt{1 + j\eta_A^r} \quad (11)$$

$$\eta_A^r = \beta + \frac{\gamma}{(\bar{\omega}_A^r)^2} \quad (12)$$

$$APENF = \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m e_{\omega}^r \quad (13)$$

$$APELF = \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m e_{\eta}^r \quad (14)$$

$$APEMS = \frac{100}{m \times n} \sum_{r=1}^m \sum_{t=1}^n \left| \frac{\alpha_{Xtr} - \alpha_{Atr}}{\alpha_{Xtr}} \right| \quad (15)$$

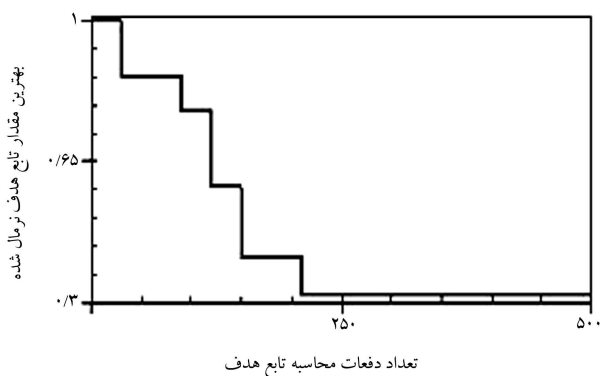
$$MAC(X, A) = \frac{|\{\alpha_X\}^T \{\alpha_A\}|^2}{(\{\alpha_X\}^T \{\alpha_X\})(\{\alpha_A\}^T \{\alpha_A\})} \quad (16)$$

لازم به ذکر است، چنان‌که از روابط ۱۱ و ۱۲ مشخص است، فرکانس طبیعی از دو بخش فرکانس طبیعی نامیرا و ضرایب میرایی تشکیل شده است. فرکانس‌های طبیعی نامیرا و ضرایب میرایی حاصل از مدل‌های اجزای محدود اصلاح شده و مدل تجربی به‌همراه مقادیر خطای فرکانسی و خطای میرایی در جداول ۲ و ۳ ذکر شده‌اند.

بیشترین میزان خطای نسبی فرکانس‌های طبیعی نامیرا مربوط به مود هشتم و بیشترین میزان خطای نسبی ضرایب میرایی نیز مربوط به مود سوم و پنجم است. به‌منظور نمایش میزان کاهش خطای پارامترهای مودال مدل اجزای محدود طی فرایند بهینه‌سازی، درصد خطای نسبی فرکانس‌های طبیعی نامیرا و ضرایب میرایی مدل

جدول ۲. مقایسه‌ی فرکانس‌های طبیعی نامیرا در مدل تجربی و مدل اجزای محدود اصلاح شده.

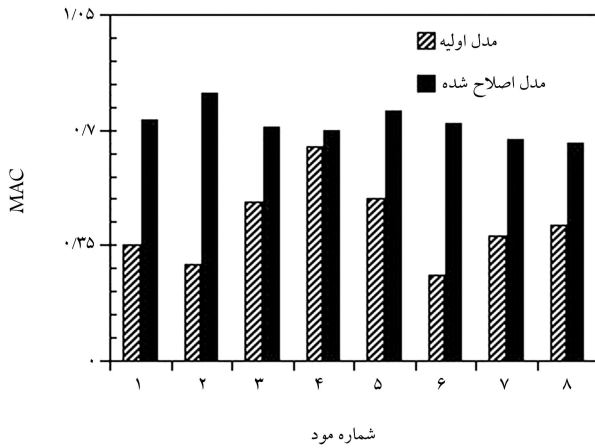
e_{ω}	فرکانس‌های طبیعی نامیرا (هرتز)		شماره‌ی مود
	مدل اجزای محدود	مدل تجربی	
۱,۷۹	۱۴۸,۲۷	۱۵۰,۹۸	۱
۱,۴۴	۱۵۶,۶۷	۱۵۸,۹۶	۲
۰,۵۵	۲۵۹,۶۷	۲۶۱,۱۰	۳
۸,۲۰	۸۰۷,۲۷	۸۷۹,۳۸	۴
۲,۷۲	۹۰۳,۴۵	۹۲۸,۷۴	۵
۷,۲۸	۱۰۱۲,۴۳	۹۴۳,۷۵	۶
۷,۶۹	۱۰۷۱,۵۲	۹۹۴,۹۹	۷
۱۱,۱۶	۱۲۷۲,۵۱	۱۴۳۲,۵۰	۸



شکل ۷. روند تکامل مقدار بهینه‌ی تابع هدف.

جدول ۴. مقادیر خطای میانگین پارامترهای مودال.

خطای میانگین	مدل اجزای محدود	
	اولیه	اصلاح شده
<i>APENF</i>	۲۲٫۶۴	۵٫۰۷
<i>APELF</i>	۴۸	۱۴٫۸۵
<i>APEMS</i>	۵۶٫۳۹	۱۴٫۱۳



شکل ۱۰. مقایسه‌ی مقادیر *MAC* حاصل از مدل اجزای محدود اولیه و اصلاح شده.

که برای شش شکل مود اول مدل اصلاح شده، مقادیر *MAC* همواره بیش از ۰٫۷ است که خود نشانگر تطابق خوب شکل مودهای تحلیلی با شکل مودهای متناظر تجربی آنهاست. مقادیر *MAC* برای شکل مودهای هفتم و هشتم نیز بسیار نزدیک به ۰٫۷ و قابل قبول است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات، مدل اجزای محدود یک سیستم لوله‌ی Z شکل اصلاح شده است. از مزایای این روش انجام یک جست‌وجوی سراسری و عدم حساسیت نسبت به مدل اولیه است که به صورت تصادفی در این الگوریتم تعیین می‌شود. با اعمال این روش، خطای پارامترهای مودال مدل اجزای محدود اصلاح شده نسبت به مدل اولیه به طرز مناسبی کاهش یافته، به‌گونه‌ی که فرکانس‌های طبیعی نامیری مدل اجزای محدود تطابق بسیار خوبی با مقادیر متناظر تجربی نشان می‌دهند. ضرایب میرایی نیز تطابق خوبی با مقادیر تجربی دارند. بررسی معیار اطمینان مودهای مدل تجربی و مدل اجزای محدود نیز نشان از تطابق خوب شکل مودهای مدل تجربی و مدل اجزای محدود اصلاح شده دارد.

فهرست علائم

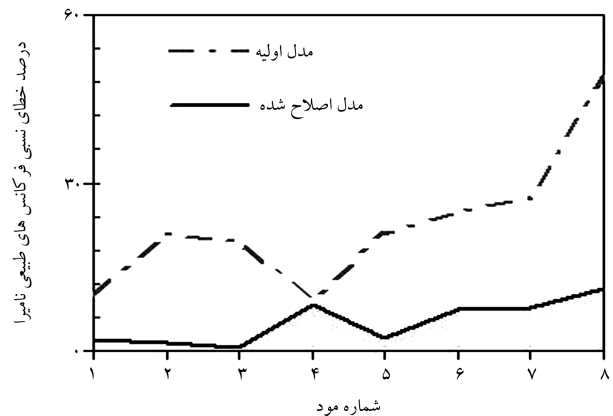
- C_1 : ضریب اینرسی
- C_2, C_3 : ضریب شتاب
- $[D]$: ماتریس میرایی سازه‌ی
- E : مدول یانگ
- $\{G\}_k$: بردار بهترین مکان در گروه ذرات در تکرار k ام

اجزای محدود اولیه و اصلاح شده در شکل‌های ۸ و ۹ با هم مقایسه شده‌اند. مقادیر خطای میانگین پارامترهای مودال مدل اجزای محدود اصلاح شده نیز از مقادیر متناظر اولیه کم‌تر است (جدول ۴).

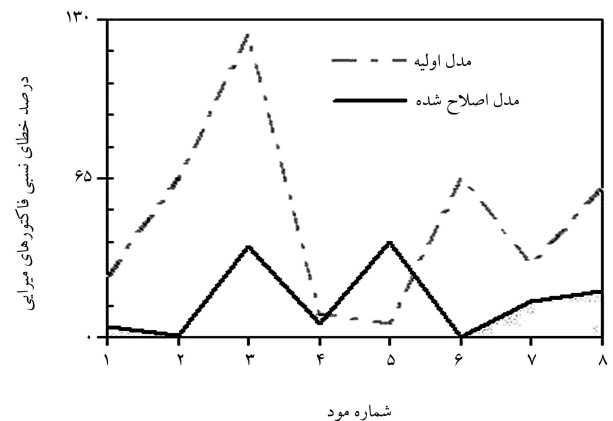
نمودار *MAC* نیز برای هشت شکل مود اول متناظر تجربی و تحلیلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که از این نمودار مشخص است، مقادیر *MAC* مدل اصلاح شده به مراتب بیشتر از مقادیر متناظر در مدل اولیه‌اند، به‌گونه‌ی

جدول ۳. مقایسه‌ی ضرایب میرایی مدل تجربی با مدل اجزای محدود اصلاح شده.

e_{η}	ضرایب میرایی		شماره‌ی مود
	مدل اجزای محدود	مدل تجربی	
۴٫۱۳	۰٫۰۲۵۲	۰٫۰۲۴۲	۱
۰٫۶۴	۰٫۰۴۶۸	۰٫۰۴۷۱	۲
۳۶٫۹۲	۰٫۰۰۸۹	۰٫۰۰۶۵	۳
۵٫۲۳	۰٫۰۲۲۱	۰٫۰۲۱۰	۴
۳۸٫۸۹	۰٫۰۰۵۰	۰٫۰۰۳۶	۵
۰	۰٫۰۰۹۶	۰٫۰۰۹۶	۶
۱۴٫۲۸	۰٫۰۰۵۶	۰٫۰۰۴۹	۷
۱۸٫۶۷	۰٫۰۰۸۹	۰٫۰۰۷۵	۸



شکل ۸. مقایسه‌ی درصد خطای نسبی فرکانس‌های طبیعی نامیری مدل اجزای محدود اولیه و مدل اصلاح شده.



شکل ۹. مقایسه‌ی درصد خطای نسبی ضرایب میرایی مدل اجزای محدود اولیه و اصلاح شده.

ρ : چگالی
 ω : فرکانس طبیعی Hz
 $\bar{\omega}$: فرکانس طبیعی نامیرا Hz

بالانویس
 r : شماره مود
 T : ترانهاده

زیرنویس
 A : تحلیلی
 X : تجربی

$[K]$: ماتریس سختی
 $\{L\}_k$: بردار بهترین مکان شخصی ذرات در تکرار k ام
 $[M]$: ماتریس جرم
 M_{ij} : جرم اتصال i ام در جهت j
 K_{ij} : سختی اتصال i ام در جهت j
 R_1, R_2 : اعداد تصادفی
 $\{v\}_k$: بردار سرعت ذرات در تکرار k ام
 $\{p\}$: بردار پارامترهای طراحی
 β : ضریب تناسب میرایی تناسبی
 γ : ضریب تناسب میرایی تناسبی
 η : فاکتور میرایی
 $\{\phi\}$: بردار شکل مود
 λ : مجذور فرکانس طبیعی

پانویس

1. expansion methods
2. frequency response function (FRF)
3. global search
4. particle swarm optimization (PSO)
5. pretest planning
6. single input single output

منابع

1. Baruch, M. and Bar-Itzhack, I.Y. "Optimal weighted orthogonalization of measured modes", *AIAA J.*, **16**(4), pp. 346-351 (1978).
2. Berman, A. "Mass matrix correction using an incomplete set of measured modes", *AIAA J.*, **17**(10), pp. 1147-1148 (1979).
3. Berman, A. and Nagy, E.J. "Improvement of a large analytical model using test data", *AIAA J.*, **21**(8), pp. 1168-1173 (1983).
4. Marco-Gómez, V.; López-Díez, J. and Luengo, P. "Error localization method based on direct updating of finite element models", *Proceeding of a European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing*, Braunschweig, Germany, **428**, pp. 511-516 (1999).
5. Lin, R.M., *Identification of the Dynamic Characteristics of Non-Linear Structures*, Ph.D. Thesis, Dept. Mech. Eng., Imperial College (1991).
6. Lin, R.M. and Zhu, J. "Model updating of structures using FRF data", *Mech. Syst. Signal Proc.*, **20**(8), pp. 2200-2218 (2006).
7. Modak, S.V.; Kundra, T.K. and Nakra, B.C. "Comparative study of model updating methods using simulated experimental data", *J. Comp. Struct.*, **80**(5-6), pp. 437-447 (2002).
8. Aoki, T.; Sabia, D. and Rivella, D. "Influence of experimental data and FE model on updating results of a brick chimney", *Advanc. Eng. Soft.*, **39**(4), pp. 327-335 (2008).
9. Jung, H., *Structural Dynamic Model Updating Using Eigensensitivity Analysis*, Ph.D. Thesis, Dept. Mech. Eng., Imperial College (1992).
10. Gola, M.M.; Soma, A. and Botto, D. "On theoretical limits of dynamic model updating using a sensitivity-based approach", *J. Sound Vib.*, **244**(4), pp. 583-595 (2001).
11. Ashlock, D., *Evolutionary Computation for Modeling and Optimization*, New York:Springer (2006).
12. Tu, Z. and Lu, Y. "FE model updating using artificial boundary conditions with genetic algorithms", *J. Comp. Struct.*, **86**(7-8), pp. 714-727 (2008).
13. Dunn, S.; Peucker, D. and Perry, J. "Genetic algorithm optimisation of mathematical models using distributed computing", *Appl. Intell.*, **23**(1), pp. 21-32 (2005).
14. Moradi, S.; Fatahi, L. and Razi, P. "Finite element model updating using bees algorithm", *Struct. Multidisc. Optim.*, **42**(2), pp. 283-291 (2010).
15. Kennedy, J. and Eberhart, R.C. "Particle swarm optimization", *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, **4**, pp. 1942-1948 (1995).
16. Marwala, T. "Finite element model updating using particle swarm optimization", *Int. J. Eng. Simul.*, **6**(2), pp. 25-30 (2005).
17. Shi, Y. and Eberhart, R.C. "Parameter selection in particle swarm optimization", Porto, V.W., Saravanan, N., Waagen, D.E., Eiben, A.E. (eds) *The 7th Annual Conference on Evolutionary Programming*, Lect. Notes Comp. Sci. 1447, Springer-Verlag, New York, pp. 591-600 (1998).

18. Yokoyama, T. "Vibrations of a hanging Timoshenko beam under gravity", *J. Sound Vib.*, **141**(2), pp. 245-258 (1990).
19. Wu, J.S. and Chiang, L.K. "Free vibration of a circularly curved Timoshenko beam normal to its initial plane using finite curved beam elements", *J. Comp. Struct.*, **82**(29-30), pp. 2525-2540 (2004).
20. Wu, J.S. and Chiang, L.K. "Free vibrations analysis of arches using curved beam elements", *Int. J. Numer. Methods Eng.*, **58**, pp. 1907-1936 (2003).
21. Imamovic, N., *Validation of Large Structural Dynamics Models Using Modal Test Data*, Ph.D. Thesis, Dept. Mech. Eng., Imperial College (1998).
22. Aluri, S., *Updating Low-Profile FRP Deck FE Model Using Experimental Modal Analysis*, M.Sc. Thesis, Dept. Mech. Eng., West Virginia (2006).
23. Ewins, D.J., *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2nd ed., Research Studies Press LTD (2000).
24. ICATS Software: <<http://www.icats.co.uk>> (Feb 19 2009)
25. Saarenheimo, A.; Haapaniemi, H.; Luukkanen, P.; Nurkkala, P. and Rostedt, J. "Testing for modal analysis of a feed water pipeline", *Transaction of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Prague, Czech Republic (2003).