

میزان سازی دقیق شکل مودهای آنالیز مودال محیطی با استفاده از آنالیز حساسیت

محمد مهدی خطیبی^{۱*}، محمد رضا آشوری^۲، علیرضا آلبویه^۳

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|--|
| دریافت مقاله: اسفند ۱۳۸۷ پذیرش مقاله: شهریور ۱۳۸۸ | |
| واژگان کلیدی: آنالیز ارتعاش محیطی روش تجزیه بسامدی میزان سازی شکل مود تغییر جرم | <p>امروزه با اندازه گیری پاسخ سازه هایی نظیر پل ها، برج ها و ساختمان ها که امکان تحریک و یا اندازه گیری نیروهای وارد به آن ها وجود ندارد، می توان خصوصیات دینامیکی آن ها را شناسایی کرد. بدلیل اندازه گیری پاسخ سازه، این روش ها با عنوان آنالیز مودال فقط پاسخ یا آنالیز مودال محیطی شناخته می شوند. یکی از مشکلات مهم این روش ها، میزان نبودن شکل مودهای حاصل از آنالیز است. شکل مودهای میزان شده برای اجرای تکنیک هایی مانند تشخیص خرابی و یا بروز رسانی مدل مورد نیاز می باشند. در این مقاله با استفاده از آنالیز حساسیت، راهکارهایی برای افزایش دقت میزان سازی شکل مودها ارائه شده است. در اینجا از روش تغییر جرم برای میزان سازی استفاده شده است. به منظور بررسی پارامترهای موثر در دقت میزان سازی، از مدل اجزاء محدود یک ساختمان ده طبقه استفاده شده است. بسامدهای طبیعی و شکل مودهای نامیزان به کمک روش تجزیه بسامدی، محاسبه شده اند. در ادامه شکل مودها، به روش تغییر جرم میزان شده اند و حساسیت نتایج نسبت به میزان تغییر جرم، مکان جرم، تعداد جرم و تعداد شکل مودها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی نشان می دهند به منظور افزایش دقت باید ابتدا میزان تغییر جرم با سعی و خطا بر روی مدل اجزاء محدود به دست آید و سپس به منظور کاهش خطا، جرم در تمام نقاط سازه پخش شود. همچنین برای میزان سازی از رابطه ای استفاده شود، که خطای کمتری را به دنبال داشته باشد.</p> |

۱- مقدمه

حاصل از به کارگیری فرضیات و تئوری های نامناسب، خطا در مدل کردن جزئیات سازه های پیچیده و عدم اطلاع صحیح از خواص مواد، مدل های تقریبی عددی نظیر روش اجزاء محدود^۱ نیز با مشکلاتی مواجه خواهند بود. از این رو آزمون مودال، ابزار مناسبی برای دستیابی به خواص دینامیکی سازه، شناخته می شود. در سازه های بزرگ و پیچیده، آزمون مودال کلاسیک با دو مشکل اساسی مواجه است:

یکی از ابزارهای طراحی و تعمیر و نگهداری سازه ها، تحلیل دینامیکی می باشد. به جهت در دسترس نبودن جواب تحلیلی برای سازه های پیچیده، با بارگذاری ها و شرایط مرزی مختلف و نیز وجود خطاهایی نظیر خطاهای

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.m.khatybi@gmail.com

۱. مدرس، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

¹ Finite Element Method (FEM)

اجباری بر روی برخی نقاط سازه ارائه شده است [۱۰]. ولی در تمامی این روش‌ها از داده‌ها و اطلاعاتی علاوه بر نتایج آزمون استفاده شده است. در چند سال اخیر روش‌هایی ارائه شده است که صرفاً با استفاده از نتایج آزمون، به میزان‌سازی شکل مودها پرداخته‌اند [۱۱-۱۳]. در این روش‌ها با تغییر جرم سازه و تکرار آزمون و مقایسه نتایج، ضرایب مرتب‌سازی محاسبه می‌شوند. اولین بار، پارلو و همکارانش به کمک آنالیز حساسیت، این روش را ارائه کرده‌اند که در آن با قرار دادن یک یا چند جرم در برخی نقاط سازه و استفاده از تغییرات بسامدهای طبیعی و شکل مودهای نامیزان، شکل مودها مرتب می‌شوند [۱۱]. پس از آن برینکر روشی بر مبنای روش پارلو ارائه کرد و با اعمال تغییراتی در روابط آن نتایج بهتری را به دست آورد [۱۲]. روش‌هایی که بعد از آن ارائه شده‌اند همگی بر مبنای روش پارلو هستند و فقط سعی در بهبود نتایج داشته‌اند [۱۳-۱۵].

در این مقاله، با استفاده از آنالیز حساسیت، راهکارهایی برای افزایش دقت میزان‌سازی شکل مودها ارائه شده‌است. بدین منظور ابتدا روش میزان‌سازی جرمی بیان شده است و سپس با بهره‌گیری از مدل اجزاء محدود یک ساختمان ده طبقه، عوامل موثر در دقت میزان‌سازی، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مدل ساختمان در محیط سیمولینک نرم‌افزار مطلب^۹، تحت تحریک اتفاقی قرار گرفته و شکل مودها با استفاده از روش تجزیه بسامدی^{۱۰} محاسبه شده‌اند. سپس با به کارگیری روش میزان‌سازی جرمی، شکل مودها میزان شده‌اند. در ادامه اثر تعداد، مقدار و موقعیت جرم و همچنین نوع نرمال‌سازی شکل مودها در بهبود نتایج بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل، راهکارهایی برای افزایش دقت فرآیند میزان‌سازی ارائه شده است.

۱. دشوار بودن تحریک سازه‌های بزرگ، در سازه‌هایی مانند پل‌ها و ساختمان‌ها.

۲. وجود نویز در محیط اندازه‌گیری.

بنابراین محققان در چند دهه اخیر روش‌هایی ارائه کرده‌اند که در آن‌ها، تحریک سازه، به کمک اغتشاشات محیطی صورت می‌گیرد و با اندازه‌گیری پاسخ سازه، خصوصیات دینامیکی آن به دست می‌آید. این روش‌ها با عناوین مختلف: آنالیز ارتعاش محیطی^۱، آنالیز مودال در حین کار^۲ یا آنالیز مودال فقط پاسخ^۳ شناخته می‌شوند [۱]. اولین موارد کاربرد این روش‌ها، در زمینه بررسی ارتعاشات پل معلق [۲] و ارتعاشات سازه‌ها [۳] صورت گرفته است که نتایج مطلوبی به دنبال نداشته است [۴]. با پیشرفت کامپیوترها و روش‌های محاسباتی در دهه‌ی اخیر، فعالیت گسترده‌تری صورت گرفته و روش‌های مختلفی در این زمینه ارائه شده است. همچنین آزمایش‌های متعددی بر روی ساختمان‌ها [۵]، پل‌ها [۶] و ترن‌ها [۷] صورت گرفته است.

در نتیجه اجرای این روش‌ها، متغیرهای مودال سازه شامل بسامدهای طبیعی، ضرایب دمپینگ و شکل مودهای نامیزان^۴ به دست خواهند آمد. یکی از مشکلات مهم روش‌های آنالیز ارتعاش محیطی، عدم دستیابی به شکل مودهای میزان شده است که موجب محدودیت کاربرد نتایج حاصل در مسائل کاربردی نظیر بررسی وضعیت سازه^۵، پیش‌بینی پاسخ^۶، اصلاح سازه^۷ و بهبود مدل^۸ می‌شود. تاکنون چندین روش برای میزان‌سازی شکل مودها ارائه شده است. برخی از این روش‌ها از روش اجزاء محدود استفاده کرده‌اند [۸] و یا فرضیات محدود کننده‌ای برای تحریک قائل شده‌اند [۹]. همچنین روش‌های دیگری نیز به کمک انجام آزمون ارتعاش

¹ Ambient Vibration Analysis

² Operational Modal Analysis (OMA)

³ Output Only Modal Analysis (OOMA)

⁴ Unscaled mode shapes

⁵ Condition Monitoring

⁶ Response prediction

⁷ Structural Dynamic Modification (SDM)

⁸ Model updating

⁹ Matlab

¹⁰ Frequency Domain Decomposition (FDD)

۲- روش میزان سازی جرمی

در آنالیز مودال کلاسیک، شکل مودها نسبت به ماتریس جرم متعامدند (رابطه ۱).

$$\{\phi\}^T [M] \{\phi\} = 1 \quad (1)$$

که در آن $\{\phi\}$ بردار شکل مود میزان شده و $[M]$ ماتریس جرم می باشد. شکل مودهای میزان و نامیزان مطابق رابطه (۲) با یکدیگر در ارتباط هستند.

$$\{\phi\} = \frac{\{\psi\}}{\sqrt{\{\psi\}^T [M] \{\psi\}}} \quad (2)$$

که در آن $\{\phi\}$ شکل مود میزان شده و $\{\psi\}$ شکل مود نامیزان است. بنابراین ضریب میزان سازی مطابق رابطه (۳) خواهد بود.

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\{\psi\}^T [M] \{\psi\}}} \quad (3)$$

که:

$$\{\phi\} = \alpha \{\psi\} \quad (4)$$

مقدار ضریب میزان سازی به نوع نرمال سازی شکل مودها وابسته است. اگر ضریب میزان سازی با شکل مودهای نرمال شده نسبت به واحد $\{\psi_u\}$ ، به دست آید، ضریب میزان سازی به صورت α_u نمایش داده می شود. همچنین ضریب میزان سازی برای شکل مودهای نرمال شده نسبت به طول به صورت رابطه (۵) تعریف می شود.

$$\alpha_L = \alpha_u \sqrt{\{\psi_u\}^T \cdot \{\psi_u\}} \quad (5)$$

معادله حرکت سیستم تحت تحریک، به صورت رابطه (۶) نوشته می شود.

$$[M]\{\ddot{Z}\} + [C]\{\dot{Z}\} + [K]\{Z\} = \{F(t)\} \quad (6)$$

همچنین معادله کلاسیک مقادیر ویژه در حالت بدون دمپینگ به صورت رابطه (۷) می باشد.

$$[M]\{\phi_1\}\omega_{n1}^2 = [K]\{\phi_1\} \quad (7)$$

اگر جرم سازه تغییر داده شود، رابطه (۸) به دست خواهد آمد.

$$([M] + [\Delta M])\{\phi_2\}\omega_{n2}^2 = [K]\{\phi_2\} \quad (8)$$

با توجه به روابط (۷) و (۸)، رابطه (۹) به دست خواهد آمد.

$$[M]\{\phi_1\}\omega_{n1}^2 - \{\phi_2\}\omega_{n2}^2 - [\Delta M]\{\phi_2\}\omega_{n2}^2 = [K]\{\phi_1\} - \{\phi_2\} \quad (9)$$

اگر تغییر جرم سازه کم باشد، تغییرات شکل مود ناچیز در نظر گرفته می شود (رابطه ۱۰).

$$\{\phi_2\} \cong \{\phi_1\} = \{\phi\} \quad (10)$$

با ترکیب روابط (۹) و (۱۰)، رابطه ی (۱۱) به دست خواهد آمد.

$$[M]\{\phi\}(\omega_{n1}^2 - \omega_{n2}^2) = [\Delta M]\{\phi\}\omega_{n2}^2 \quad (11)$$

با پیش ضرب رابطه (۱۱) در $\{\phi\}^T$ و با توجه به تعامد مدها $(\{\phi\}^T [M] \{\phi\} = 1)$ رابطه ی (۱۲) به دست می آید.

$$(\omega_{n1}^2 - \omega_{n2}^2) = \{\phi\}^T [\Delta M] \{\phi\} \omega_{n2}^2 \quad (12)$$

سپس، با توجه به رابطه (۴) و با استفاده از رابطه (۱۲) رابطه (۱۳) حاصل شده است.

$$(\omega_{n1}^2 - \omega_{n2}^2) = \alpha^2 \{\psi\}^T [\Delta M] \{\psi\} \omega_{n2}^2 \quad (13)$$

در نهایت ضریب میزان سازی به صورت رابطه (۱۴) به دست آمده است.

$$\alpha = \sqrt{\frac{(\omega_{n1}^2 - \omega_{n2}^2)}{\omega_{n2}^2 \{\psi\}^T [\Delta M] \{\psi\}}} \quad (14)$$

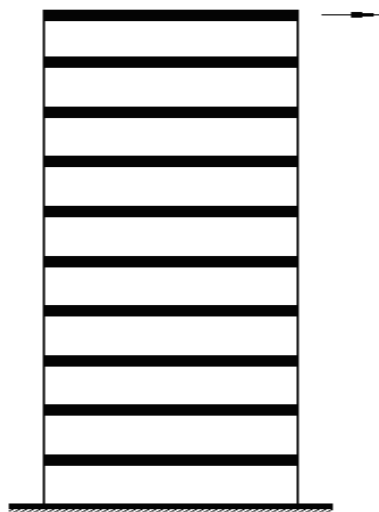
با توجه به رابطه (۱۰)، روابط (۱۵-۱۷) از رابطه (۱۴) به دست آمده اند.

$$\alpha_{11} = \sqrt{\frac{(\omega_{n1}^2 - \omega_{n2}^2)}{\omega_{n2}^2 \{\psi_1\}^T \cdot [\Delta M] \cdot \{\psi_1\}}} \quad (15)$$

$$\alpha_{22} = \sqrt{\frac{(\omega_{n1}^2 - \omega_{n2}^2)}{\omega_{n2}^2 \{\psi_2\}^T \cdot [\Delta M] \cdot \{\psi_2\}}} \quad (16)$$

$$\alpha_{12} = \sqrt{\frac{(\omega_{n1}^2 - \omega_{n2}^2)}{\omega_{n2}^2 \{\psi_1\}^T \cdot [\Delta M] \cdot \{\psi_2\}}} \quad (17)$$

به کمک روابط (۱۵-۱۷) می توان ضرایب میزان سازی شکل مودها را محاسبه نمود. البته نوع نرمال سازی شکل مودها در دقت نتایج موثر است. شکل مودها را می توان بدون نرمال سازی، نرمال شده نسبت به واحد (همه ی عناصر یک شکل مود بر بزرگترین عنصر آن تقسیم شود)



شکل ۱- مدل ده درجه آزادی استفاده شده در روش اجزاء محدود یک ساختمان ده طبقه

۴- آنالیز مودال ساختمان با اندازه‌گیری

فقط پاسخ به روش تجزیه بسامدی

به منظور شبیه‌سازی آنالیز ارتعاش محیطی، مدل اجزاء محدود ساختمان در محیط سیمولینک نرم‌افزار مطلب، به کمک سیگنال اتفاقی در تمام درجات آزادی تحریک و فقط پاسخ سازه اندازه‌گیری شده است. سپس با استفاده از روش تجزیه بسامدی، پارامترهای مودال شامل بسامدهای طبیعی و شکل مودها محاسبه شده‌اند. در روش تجزیه بسامدی ابتدا طیف چگالی توان^۱ پاسخ سازه محاسبه شده و سپس به مقادیر و بردارهای تکین آن تجزیه می‌شود. قله‌های نمودار مقادیر تکین، معادل با بسامدهای طبیعی و بردارهای تکین متناظر با مقادیر تکین قله‌ها، معادل با شکل مودهای سازه خواهند بود [۷].

در شکل‌های ۲ تا ۵ به ترتیب نمودار مقادیر تکین، نمودار مقایسه بسامدهای طبیعی، نمودار مقایسه شکل مودها و نمودار مک^۲ بین شکل مودها، برای پنج مود اول سازه ارائه شده است.

و نرمال شده نسبت به طول (همه‌ی عناصر یک شکل مود بر طول آن تقسیم شود) در روابط (۱۵) تا (۱۷) به کار گرفت، که نتایج متفاوتی به دنبال خواهد داشت.

۳- مدل اجزاء محدود ساختمان ده طبقه

در این بخش یک ساختمان ده طبقه به کمک روش اجزاء محدود مدل شده است (شکل ۱). بدین منظور با فرض صلب بودن کف طبقات، برای هر طبقه یک درجه آزادی در جهت جانبی در نظر گرفته شده است. بنابراین یک مدل ده درجه آزادی برای این ساختمان به دست آمده است. مدل ساختمان، ده درجه آزادی انتخاب شده است، تا هم تعداد شکل مودهای بیشتری را در اختیار بگذارد و هم تعداد نقاط بیشتری برای تغییر جرم، در اختیار باشد، تا بتوان روش میزان‌سازی را دقیق‌تر بررسی نمود.

برای مدل فوق با استفاده از روش ضرایب تاثیر سختی، عناصر ماتریس سختی محاسبه شده است (رابطه ۱۸). همچنین با فرض توزیع یکنواخت جرم در هر المان، ماتریس جرم به دست آمده است (رابطه ۱۹) [۱۶].

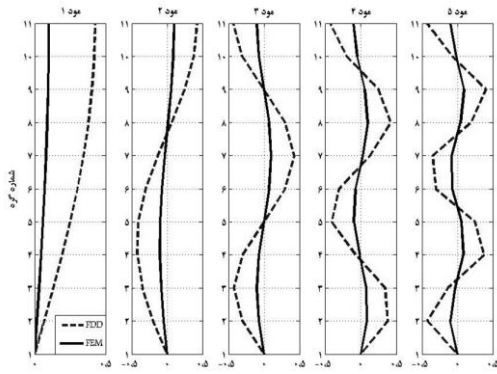
$$K = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 24 & -12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -12 & 24 & -12 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -12 & 24 & -12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -12 & 12 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$M = \beta \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

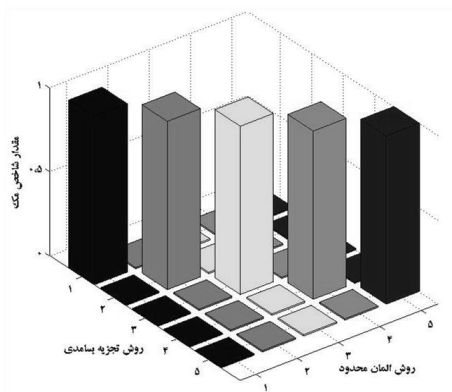
که در آن EI سختی خمشی، L ارتفاع هر طبقه و 2β جرم هر طبقه می‌باشد. با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹)، بسامدهای طبیعی (جدول ۱) و شکل مودهای ساختمان محاسبه شده‌اند.

¹ Power Spectral Density (PSD)

² Modal Assurance Criterion (MAC)



شکل ۴- نمودار مقایسه شکل مودهای دو روش اجزاء محدود و روش تجزیه بسامدی



شکل ۵- نمودار مک بین شکل مودهای روش اجزاء محدود و روش تجزیه بسامدی

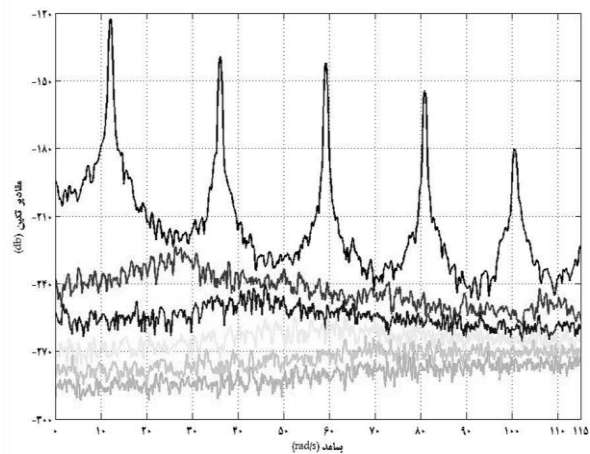
۵-میزان سازی شکل مودها

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، شکل مودهای محاسبه شده به روش تجزیه بسامدی با شکل مودهای روش اجزاء محدود اختلاف دارند و اصطلاحاً نامیزان هستند. این در حالی است که این شکل مودها با شکل مودهای روش اجزاء محدود کاملاً مرتبط هستند (شکل ۵).

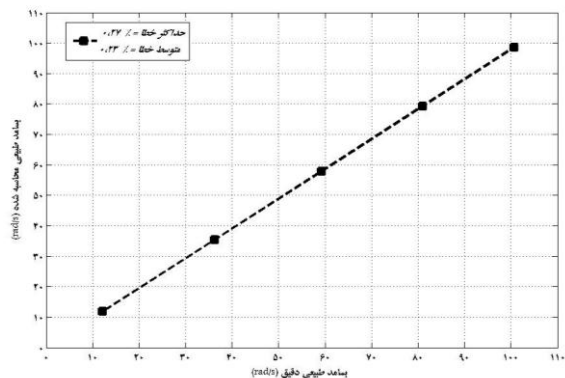
به منظور میزان سازی شکل مودهای نامیزان به دست آمده از روش تجزیه بسامدی، از روش تغییر جرم استفاده شده است. بدین منظور شبیه سازی های متعددی بر روی مدل ساختمان صورت گرفت و شکل مودها با تعداد و مقادیر جرم مختلف به کمک روابط (۱۵) تا (۱۷) میزان

جدول ۱- بسامدهای طبیعی - روش اجزاء محدود

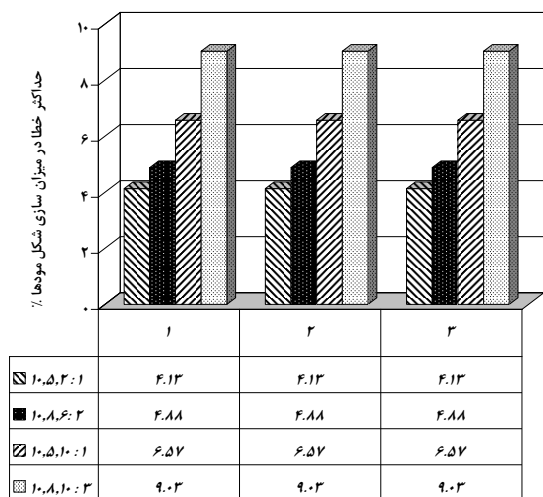
| شماره مود | بسامد (rad/s) |
|-----------|---------------|
| ۱ | ۱۲/۱۵ |
| ۲ | ۳۶/۱۶ |
| ۳ | ۵۹/۲۸ |
| ۴ | ۸۰/۹۴ |
| ۵ | ۱۰۰/۶۱ |
| ۶ | ۱۱۷/۸۰ |
| ۷ | ۱۳۲/۰۹ |
| ۸ | ۱۴۳/۱۲ |
| ۹ | ۱۵۰/۶۳ |
| ۱۰ | ۱۵۴/۴۴ |



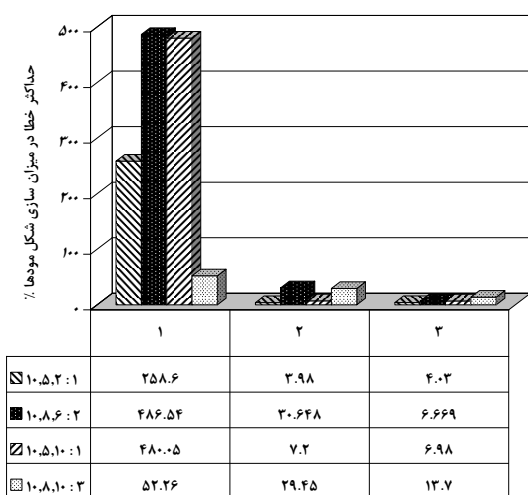
شکل ۲- نمودار مقادیر تکین طیف چگالی توان پاسخ



شکل ۳- نمودار مقایسه بسامدهای طبیعی دو روش اجزاء محدود و تجزیه بسامدی



شکل ۶- حساسیت نتایج رابطه ۱۵ نسبت به نوع نرمال سازی شکل مودها



شکل ۷- حساسیت نتایج رابطه ۱۶ نسبت به نوع نرمال سازی شکل مودها

همانطور که در شکل‌های ۶ تا ۸ مشاهده می‌شود، رابطه ۱۵ نسبت به نوع نرمال سازی شکل مودها حساس نمی‌باشد (شکل ۶). نتایج حاصل از روابط (۱۶) و (۱۷) در حالت بدون نرمال سازی، از دقت بسیار کمی برخوردار است. همچنین نرمال سازی طولی نتایج بهتری را نسبت به نرمال سازی نسبت به واحد ارائه می‌کند. در نهایت نتایج حاصل از رابطه (۱۷) با نرمال سازی طولی، نتایج بهتری را نسبت به حالات دیگر ارائه می‌کند. بنابراین در ادامه این بررسی از رابطه (۱۷) با نرمال سازی طولی استفاده شده است.

شده‌اند. در طی فرآیند بررسی، جرم‌ها در نقاط مختلف سازه قرار گرفته‌اند که در جدول ۲، موقعیت قرارگیری جرم‌ها با شماره وضعیت مربوطه ارائه شده است.

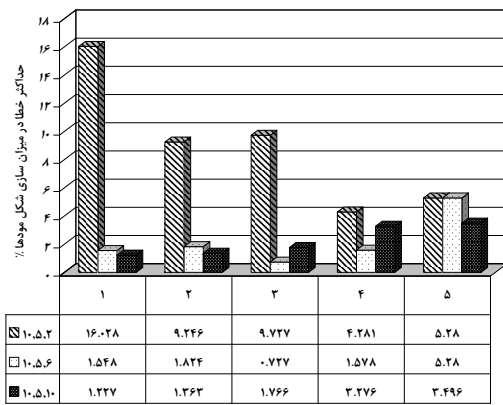
جدول ۲- موقعیت‌های مختلف قرار گیری جرم‌ها

| شماره وضعیت | مکان جرم‌ها (درجه آزادی) |
|-------------|--------------------------|
| ۱ | ۱، ۳، ۵ |
| ۲ | ۷، ۸، ۹ |
| ۳ | ۱، ۳، ۵، ۷، ۹ |
| ۴ | ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ |
| ۵ | ۱-۱۰ |

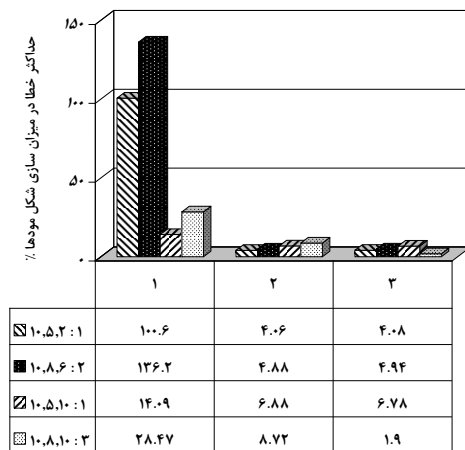
۵-۱- بررسی اثر نوع نرمال سازی شکل مودها

در این مرحله، حساسیت نتایج نسبت به نوع نرمال سازی شکل مودها در روابط (۱۵) تا (۱۷) مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل‌های ۶ تا ۸ حساسیت نتایج حاصل از روابط (۱۵) تا (۱۷) نسبت به نوع نرمال سازی شکل مودها ارائه شده است.

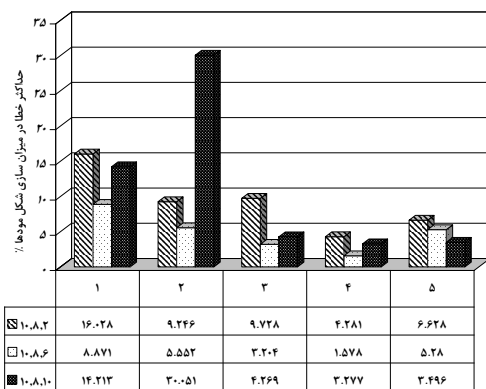
در این نمودارها محور قائم بیشینه‌ی خطای حاصل در شکل مودها و محور افقی که با شماره‌های ۱، ۲ و ۳ مشخص شده است به ترتیب بیانگر حالات بدون نرمال سازی، نرمال سازی نسبت به واحد و نرمال سازی طولی می‌باشد. همچنین حالتی که در ستون اول سمت چپ جدول پایین نمودارها ارائه شده است، بیانگر وضعیت جرم گذاری روی سازه می‌باشد. به عنوان نمونه حالت ۱:۲، ۵، ۱۰، بیانگر حالتی با ده درجه آزادی، پنج شکل مود، ۲٪ تغییر جرم سازه و وضعیت قرارگیری ۱ (جدول ۲) می‌باشد. همچنین اعدادی که در داخل جدول زیر هر نمودار ارائه شده بیانگر مقدار عدد هر نمودار میله‌ای متناظر با آن ستون می‌باشد. که به ترتیب از بالا به پایین متناظر با نمودارهای میله‌ای همان ستون، از چپ به راست می‌باشد.



شکل ۹- حساسیت نتایج نسبت به میزان و محل تغییر جرم سازه در میزان سازی پنج شکل مود اول



شکل ۸- حساسیت نتایج رابطه ۱۷ نسبت به نوع نرمال سازی شکل مودها



شکل ۱۰- حساسیت نتایج نسبت به میزان و محل تغییر جرم سازه در میزان سازی هشت شکل مود اول

نتایج نشان می‌دهند که اگر جرم‌ها بر روی سازه پخش شوند، نتایج بهتری را به دنبال خواهند داشت، همچنین با افزایش مقدار تغییر جرم، تا حد معینی، میزان خطا به مراتب کاهش می‌یابد. بنابراین اگر جرم‌ها در تمام نقاط سازه پخش شود و میزان تغییر جرم با چند مرحله سعی و خطا تعیین شود، نتایجی با دقت مناسب به دست خواهد آمد.

۳-۵- بررسی اثر تعداد شکل مود

نتایج بررسی مقدار و محل تغییر جرم، در بخش قبل، نشان می‌دهند که تعداد شکل مود مد نظر برای میزان سازی در دقت نتایج موثر است. بنابراین در این مرحله اثر تعداد شکل مود مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، از آنجا که کمترین خطاها به ازای ۶٪ تغییر

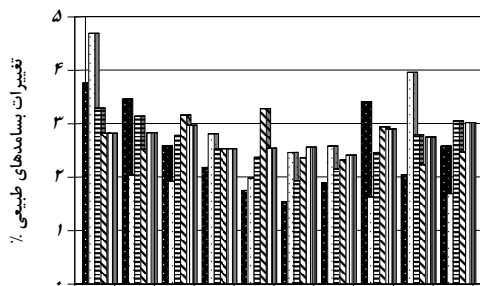
۲-۵- بررسی اثر مقدار و محل تغییر جرم

در این مرحله حساسیت نتایج نسبت به میزان تغییر جرم و محل قرار دادن جرم مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، همانطور که در قبل اشاره شد، از رابطه (۱۷) با نرمال سازی طولی استفاده شده است.

بررسی برای دو حالت مختلف با تعداد پنج و هشت شکل مود صورت گرفته است. در هر مرحله جرم سازه ۲٪، ۶٪ و ۱۰٪ تغییر کرده و جرم‌ها در وضعیت‌های ۱ تا ۵، مطابق جدول ۲، بر روی سازه قرار گرفته‌اند. پس از تغییر جرم با تکرار آزمون ارتعاش محیطی و با استفاده از رابطه (۱۷) با نرمال سازی طولی، شکل مودها میزان شده‌اند. شکل‌های ۹ و ۱۰، به ترتیب، بیشینه‌ی خطای میزان سازی را برای پنج شکل مود و هشت شکل مود به ازای تغییرات فوق نشان می‌دهند.

در این نمودارها، محور قائم، بیشینه‌ی خطای حاصل در شکل مودها و محور افقی که با شماره‌های ۱ تا ۵ مشخص شده است، به ترتیب بیانگر وضعیت قرارگیری جرم مطابق جدول ۲ می‌باشد. همچنین اعدادی که در داخل جدول زیر هر نمودار ارائه شده بیانگر مقدار عدد هر نمودار میله‌ای متناظر با آن ستون می‌باشد که به ترتیب از بالا به پایین متناظر با نمودارهای میله‌ای همان ستون، از چپ به راست، می‌باشد.

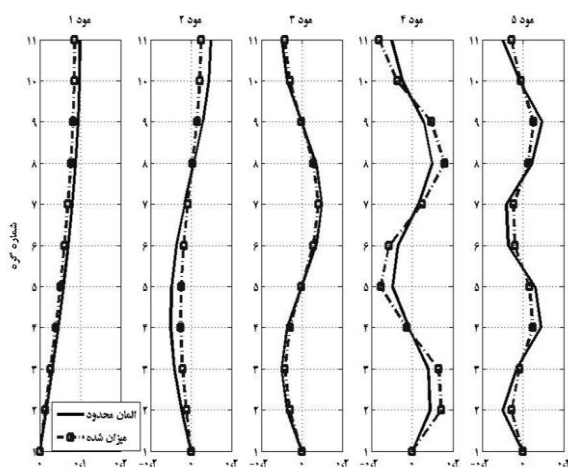
متناظر با نمودارهای میله‌ای همان ستون از چپ به راست می‌باشد.



| | | | | | | | | | | |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| State ۱ | ۳.۷۶ | ۳.۴۶ | ۳.۵۹ | ۳.۱۸ | ۱.۷۵ | ۱.۵۴ | ۱.۸۹ | ۳.۴۱ | ۳.۰۴ | ۳.۵۸ |
| State ۲ | ۴.۶۹ | ۳.۰۴ | ۱.۹۲ | ۳.۸۱ | ۱.۹۸ | ۳.۴۶ | ۳.۵۸ | ۱.۶۲ | ۳.۹۶ | ۱.۶۹ |
| State ۳ | ۳.۲۹ | ۳.۱۴ | ۳.۷۸ | ۳.۵۲ | ۳.۲۷ | ۱.۹۲ | ۳.۱۵ | ۳.۴۶ | ۳.۷۹ | ۳.۰۵ |
| State ۴ | ۳.۸۲ | ۳.۵۲ | ۳.۱۶ | ۳.۵۲ | ۳.۲۸ | ۳.۳۶ | ۳.۲۲ | ۳.۹۴ | ۳.۲۲ | ۳.۴۷ |
| State ۵ | ۳.۸۲ | ۳.۸۲ | ۳.۹۷ | ۳.۵۲ | ۳.۵۴ | ۳.۵۶ | ۳.۴۱ | ۳.۹ | ۳.۷۵ | ۳.۰۲ |

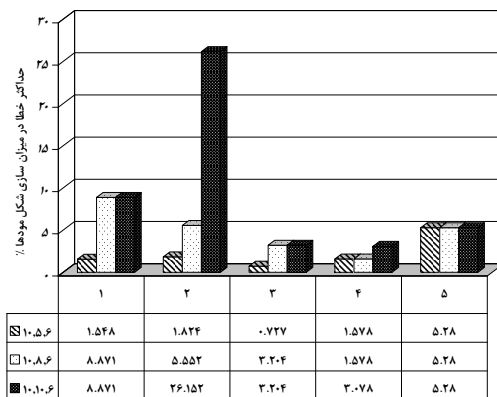
شکل ۱۲- تغییرات بسامد طبیعی سازه در اثر اعمال ۶ درصد تغییر جرم، به ازای موقعیت‌های مختلف قرارگیری جرم‌ها

در نهایت به منظور بررسی بهتر نتایج به دست آمده، دو نمونه از شکل مودهای میزان شده در دو حالت مختلف ۱۰.۸،۶:۲ (رابطه ۱۷ بدون نرمال‌سازی) - ده درجه آزادی، هشت شکل مود، ۶ درصد تغییر جرم سازه و وضعیت قرارگیری ۲ (جدول ۲) - و ۱۰.۸،۶:۴ (رابطه ۱۷) با نرمال‌سازی طولی) - ده درجه آزادی، هشت شکل مود، ۶ درصد تغییر جرم سازه و وضعیت قرارگیری ۴ در جدول ۲ - به ترتیب در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ ارائه شده است.



شکل ۱۳- مقایسه پنج شکل مود اول برای حالت ۱۰.۸،۶:۲ (رابطه ۱۷ بدون نرمال‌سازی)

جرم به دست آمده است (شکل‌های ۹ و ۱۰)، بنابراین بیشینه‌ی خطای میزان‌سازی به ازای ۶٪ تغییر جرم سازه و برای تعداد شکل مود مختلف (۵، ۸ و ۱۰)، به ازای قرارگیری جرم در نقاط مختلف سازه (مطابق جدول ۲)، محاسبه شده است که نتایج آن در شکل ۱۱ ارائه شده است (شایان ذکر است که شکل مودها به کمک رابطه (۱۷) با نرمال‌سازی طولی میزان شده‌اند). شکل ۱۱ مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰ ترسیم شده است.



شکل ۱۱- حساسیت نتایج نسبت به محل تغییر جرم سازه و تعداد شکل مود

بررسی فوق نشان می‌دهد که با افزایش تعداد شکل مود، دست یابی به نتایج دقیق مشکل و یا غیرممکن می‌شود.

۵-۴- بررسی تغییرات بسامد طبیعی

همانطور که اشاره شد، در اثر تغییر جرم سازه بسامدهای طبیعی کاهش می‌یابند. این تغییرات به ازای ۶ درصد تغییر جرم سازه، که بهترین نتایج را به دنبال داشته است، به ازای موقعیت‌های مختلف قرارگیری جرم در سازه، در شکل ۱۲ ارائه شده است.

واژه‌ی "State" در شکل ۱۲ بیانگر وضعیت قرارگیری جرم مطابق جدول ۲ بوده و شماره‌های محور افقی بیانگر شماره مود است. همچنین اعدادی که در داخل جدول زیر نمودار ارائه شده، بیانگر مقدار عدد هر نمودار میله‌ای متناظر با آن ستون می‌باشد. که به ترتیب از بالا به پایین

جرم میزان شده‌اند. این میزان‌سازی در حالات مختلف به ازای نوع نرمال‌سازی شکل مودها، مقدار و محل اعمال جرم و تعداد شکل مودها تکرار شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از بررسی صورت گرفته نشان می‌دهد که رابطه (۱۵) نسبت به نوع نرمال‌سازی شکل مودها حساس نیست و نتایج یکسانی در هر سه حالت ارائه می‌کند (شکل ۶). روابط (۱۶) و (۱۷) نسبت به نوع نرمال‌سازی حساس هستند و در حالت نرمال‌سازی طولی، نتایج بهتری را ارائه می‌کنند (شکل‌های ۷ و ۸). علاوه بر این رابطه (۱۷) در مقایسه با دیگر روابط از دقت بهتری برخوردار است، بنابراین برای میزان‌سازی شکل مودها بهتر است از رابطه (۱۷) با نرمال‌سازی طولی استفاده شود.

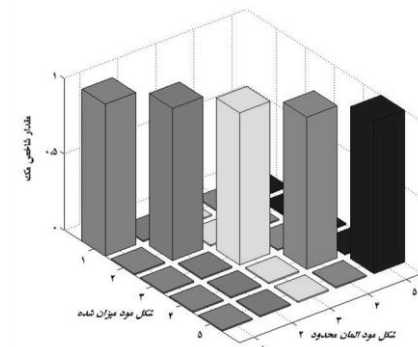
همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش تغییر جرم سازه، تا حد معینی، خطای حاصل در میزان‌سازی شکل مودها را کاهش می‌دهد. علاوه بر این در صورتی که تغییر جرم اعمال شده بر روی سازه پخش شود و جرم‌ها در نقاط بیشتری قرار گیرند، خطای میزان‌سازی کاهش می‌یابد (شکل‌های ۹ و ۱۰).

در ادامه اثر تعداد شکل مود مد نظر برای میزان‌سازی در دقت نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد شکل مودها دستیابی به دقت مناسب، با روش به کار گرفته شده در این مقاله، مشکل یا غیر ممکن می‌باشد.

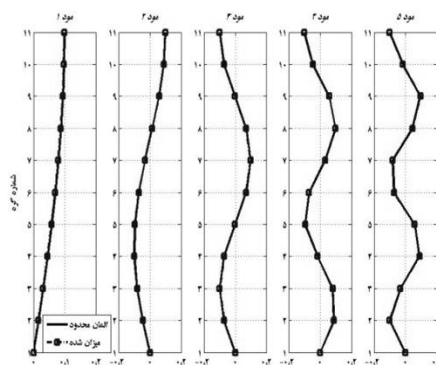
بنابراین بررسی صورت گرفته نشان می‌دهد که برای میزان‌سازی شکل مودهای یک سازه در ابتدای امر باید با استفاده از یک مدل اجزاء محدود شرایط سازه مد نظر بررسی شود و بهترین مقدار تغییر جرم و موقعیت جرم‌ها، با توجه به تعداد شکل مود مد نظر انتخاب شود و نهایتاً شکل مودها میزان شوند.

تقدیر و تشکر

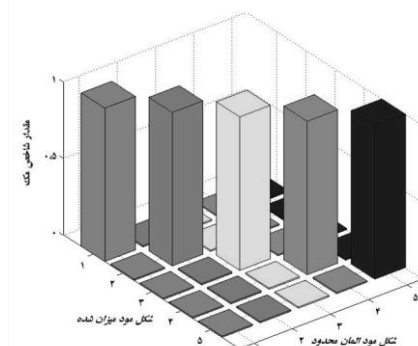
این تحقیق تحت حمایت دفتر استعدادهای درخشان دانشگاه سمنان می‌باشد.



شکل ۱۴- نمودار مک برای پنج شکل مود اول در حالت $۱۰,۸,۶:۲$ (رابطه ۱۷ بدون نرمال‌سازی)



شکل ۱۵- مقایسه پنج شکل مود اول برای حالت $۱۰,۸,۶:۴$ (رابطه ۱۷ نرمال‌سازی طولی)



شکل ۱۶- نمودار مک برای پنج شکل مود اول در حالت $۱۰,۸,۶:۴$ (رابطه ۱۷ نرمال‌سازی طولی)

۶- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، روش میزان‌سازی جرمی شکل مودهای حاصل از آنالیز ارتعاش محیطی، بر روی یک ساختمان ده طبقه با ده درجه آزادی، اجرا و مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی شکل مودهای نامیزان ساختمان به روش تجزیه بسامدی محاسبه و سپس به روش تغییر

مراجع

- [1] Zhang, L., Brincker, R., Andersen, R. (2005), "An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues", 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), Copenhagen, Denmark, April 26-27.
- [2] Abel-Ghaffer, A.M., Housner, G.W. (1978). Ambient Vibration Test of Suspension Bridge, Journal of the Engineering Mechanics Division (ASCE), Vol. 104(5), pp. 983-999.
- [3] Begg, R.D., Mackenzie, A.C., Dodds, C.J., Loland, O. (1976), "Structural Integrity Monitoring Using Digital Processing of Vibration Signals", 8th Annual Offshore Technology Conference (OTC), Texas, USA.
- [4] Wenzel, H., Pichler, D. (2005), *Ambient Vibration Monitoring* (1st Ed.), John Wiley & Sons, Ltd, England.
- [5] James, G. H., Crane, T. G., Laufer, J. P. (1995). The natural Excitation Technique (NexT) for Modal Parameter Extraction from Operating Structures, Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol. 10(4), pp. 260-277.
- [6] Asmussen, J.C., Brincker, R., Rytter, A. (1998), "Ambient Modal Testing of the VESTVEJ Bridge Using Random Decrement", 16th International Modal Analysis Conference (IMAC), California, USA.
- [7] Hanson, D. (2006), "Operational Modal Analysis and Model Updating with a Cyclostationary Input", Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Australia.
- [8] Doebling, S.W., Farrar, C.R. (1996), "Computation of Structural Flexibility for Bridge Health Monitoring using Ambient Modal Data", 11th ASCE Engineering Mechanics Conference, Florida, USA.
- [9] Randall, R.B., Gao, Y., Swevers, J. (1998), "Updating Modal Models from Response Measurements", 23th International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA), Leuven, Belgium.
- [10] Deweer, J., Dierckx, B. (1999), "Obtaining a Scaled Modal Model of Panel Type Structures using Acoustic Axcitation", 17th International Modal Analysis Conference (IMAC), Florida, USA, February 8-11.
- [11] Parloo, E., Verboven, P., Guillaume, P., Van Overmeire, M. (2002). "Sensitivity- Based Operational Mode Shape Normalization", Mechanical Systems and Signal Processing (Elsevier), Vol. 16(5), pp. 757-767.
- [12] Brincker, R., Andersen, P. (2003), "A Way of Getting Scaled Mode Shapes in Output Only Modal Analysis", 21th International Modal Analysis Conference (IMAC), Florida, USA, February 3-6.
- [13] López Aenlle, M., Brincker, R., Fernández Canteli, A. (2005), "Some Methods to Determine Scaled Mode Shapes in Natural Input Modal Analysis", 23th International Modal Analysis Conference (IMAC), Florida, USA, Jan. 31-Feb. 3.
- [14] López Aenlle, M., Brincker, R., Fernández Canteli, A., Villa, L. M. (2005), "Scaling Factor Estimation by the Mass Change Method", 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), Copenhagen, Denmark, April 26-27.
- [15] López Aenlle, M., Fernández, P., Brincker, R., Fernández Canteli, A. (2007), "Scaling Factor Estimation Using an Optimized Mass Change Strategy, Part 1: Theory", 2th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), Copenhagen, Denmark, May 1-2.
- [16] Thomson, W.T., Dahleh, M.D. (1998) *Theory of Vibration with Applications* (5th Ed.), Prentice Hall.

SCALING OF OPERATIONAL MODE SHAPES USING SENSITIVITY ANALYSIS

M. M. Khatibi^{1,*}, M. R. Ashory², A. R. Albooyeh³

1. Department of Mechanical Engineering, Semnan branch, Islamic Azad University, Semnan
2. Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan
3. PhD. Student, School of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan

*Corresponding Author: m.m.khatybi@gmail.com

ARTICLE INFO

Keywords:

Ambient Vibration
Analysis,
Frequency Domain
Decomposition
Method,
Scaling,
Mode Shape,
Mass Change.

ABSTRACT

Recently, identification of dynamic properties of structures such as bridges, towers and building, which are not easy to excite, is possible by measuring only the output responses. Due to measuring only the responses when the structure is excited only by ambient or operational forces, these methods are referred as output-only modal analysis or operational modal analysis (OMA). One drawback of OMA is that the mode shapes are not scaled. However the scaled mode shapes are required for some important applications such as damage detection or model updating. In this paper, a procedure is proposed for precise scaling of the operational mode shapes. The method is based on the sensitivity analysis of the effective parameters in the accuracy of scaling. The finite element model of a ten storey building is used to present the capability of the method. The natural frequencies and unscaled mode shapes have been estimated using FDD method and the mass change method is applied for scaling the mode shapes. The sensitivity of the results to the amount, location and the number of added masses and the number of modes under investigation have been evaluated. It is shown that the amount of added masses can be estimated by try and error of the FE model of structure and the masses should be distributed all over the structure to decrease the scaling error.
