

بررسی رفتار اتصال پیچی با ورق انتهایی در قاب سه طبقه فولادی با روش اجزای محدود

سید محمدرضا مرتضوی^{۱*}، بهروز زعیم‌دار^۲

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۶۷۸۸۱۵۸۱۱، mortazavi@srttu.edu

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۳)

چکیده

به دلیل عدم قطعیت‌های متعدد در زمان ساخت، نصب اتصالات فلنجی و پیچیدگی‌های رفتار نیمه‌گیرداری آنها، رفتار این اتصالات در سازه با رفتار آنها وقتی بصورت جداگانه مورد مطالعه قرار می‌گیرند، متفاوت است. در تحقیق حاضر، رفتار یک نمونه سیستم اتصالات فلنجی در شرایط واقعی در یک قاب سه طبقه فولادی سه بعدی به روش حل مسئله معکوس تعیین شده است. برای شبیه‌سازی رفتار اتصال در مدل اجزای محدود قاب سه طبقه فولادی سه بعدی، از شش المان خطی در میان دو صفحه اتصال که با فاصله کوچکی از یکدیگر قرار دارند استفاده شد. فرکانس‌های شش مود اول سازه به ازای مدول یانگ‌های مختلف برای المان تیر با استفاده از آنالیز مودال به دست آمد. با انجام فرایند بهنگام‌سازی برای مدل اجزای محدود قاب سه طبقه فولادی سه بعدی از طریق کاهش تفاوت فرکانس‌های طبیعی تجربی و تحلیلی آن، المان تیر با مدول یانگ مشخص جایگزین سیستم اتصال فلنجی تعیین گردید. مدل بهنگام شده، ضمن ارائه تقریب بسیار خوب از فرکانس‌های طبیعی قاب سه طبقه فولادی سه بعدی، یک رفتار انعطاف‌پذیر را در درجات آزادی مختلف برای اتصال به دست می‌دهد و می‌تواند رفتار نیمه‌گیرداری اتصال را در سازه به خوبی نشان دهد. تعیین فرکانس طبیعی به عنوان یکی از پارامترهای مهم تحلیل دینامیکی یک سازه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. کارهای انجام شده در زمینه تعیین فرکانس‌های طبیعی یک سازه نشان می‌دهد که تفاوت قابل توجهی بین نتایج تجربی و تحلیلی متعارف سازه‌ها وجود دارد که یکی از دلایل این تفاوت به نحوه ساده سازی مدل مسئله برمی‌گردد.

واژگان کلیدی

اتصالات پیچی با ورق انتهایی، قاب سه طبقه فولادی سه بعدی، بهنگام‌سازی، روش معکوس، فرکانس طبیعی

Finite Element Model of a Three Story Steel Frame with Bolted Connections and End Plates

S.M.R. Mortazavi, B. Zaeimdar

Abstract

Due to uncertainties manufacture of flange connections and complexity of their semi-rigid behavior, the behavior of such joints in the structure and the behavior of them when they are studied separately is different. In the present study, the behavior of a flanged joint system in real condition in a three story steel frame, three dimensional inverse problem solving method has been determined. To simulate the behavior of such a joint (beam elements and two plates with small gap from each other), a three story steel frame was modeled using finite element method. Frequencies vibration modes of structure for different modulus of elasticities were obtained using modal analysis. For the updating process for the three story steel frame, three dimensional finite element model by reducing the differences between experimental and analytical natural frequencies, the element beam flange connection system was replaced with specified Young's modulus. Updated model, while providing a good approximation of natural frequencies in three story steel frame, a flexible behavior in different degrees of freedom could be attained to demonstrate the semi-rigid behavior in the structure.

Keywords

Bolted connections with end plate, Three story model, Updating method, Inverse method, Natural frequencies

به منظور طراحی ایمن و اقتصادی سازه‌ها در مهندسی عمران، پیش‌بینی رفتار آن‌ها تحت بارهای وارده ضروری است. این پیش‌بینی عمدتاً از طریق مطالعه مدل‌های تحلیلی که مدل فیزیکی مورد نظر را به صورت ریاضی شبیه سازی می‌کنند، انجام می‌شود. در این ارتباط به جرأت می‌توان گفت روش اجزای محدود به عنوان بهترین روش برای حصول مدل‌های تحلیلی در مهندسی سازه بکار برده می‌شود. در برخی از مدل‌سازی اجزای محدود سازه‌ها نیز وجود عدم قطعیت‌ها و پارامترهای مختلف منجر به عدم همخوانی رفتار مدل‌های اجزای محدود و سازه واقعی می‌گردد که می‌تواند سرمنشا تخمین‌های اشتباه در مورد سازه باشد. بنابراین همواره محققین برای پیش‌بینی بهتر رفتار سازه در شرایط مختلف نیاز به مدلی دارند که بتواند به خوبی توصیف‌کننده سازه‌ی مد نظر باشد. از طرفی اتصالات فلنجی بکار رفته در این نوع قاب نه یک اتصال صلب کامل و نه یک اتصال مفصلی کامل است؛ به عبارت دیگر سختی اتصال یکی از عدم قطعیت‌های موجود در رفتار اتصالات در جزء و کل سازه در مقیاس بزرگ‌تر هست که یکی از دلایل به وجود آمدن تفاوت‌ها میان نتایج مدل اجزای محدود و مدل تجربی می‌باشد. در نتیجه اقدام به بهبود رفتار سازه با بهنگام‌سازی مدل اجزای محدود با توجه به رفتار اتصالات شده است. برای تحلیل دینامیکی یک سازه لازم است پاسخ آن را تحت بارهای دینامیکی مختلف به صورت مناسب به دست آورد. بهنگام‌سازی روشی است که با استفاده از آن مدل تحلیلی توأم با خطا، عیب‌یابی و اصلاح می‌گردد. یک مدل اجزای محدود بهنگام‌شده، پاسخ‌هایی به دست می‌دهد که در مقایسه با پاسخ‌های مدل اولیه، با تقریب بسیار بهتری رفتار واقعی سازه را مدل می‌کند. تهیه چنین مدلی، با وجود اینکه تنها پس از مرحله طراحی و ساخته‌شدن یک سازه مهندسی عمران می‌تواند انجام شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مسئله به طور خاص در مورد قاب‌های ساخته‌شده از سیستم اتصال فلنجی که شامل عدم قطعیت‌های زیادی بوده و تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای بین نتایج تحلیلی و تجربی آن‌ها وجود دارد، نمود بیشتری می‌یابد. از سوی دیگر از نقطه نظر دینامیکی، دانستن مشخصات اصلی دینامیکی یک سازه به صورت دقیق می‌تواند به پیش‌بینی دقیق رفتار آن سازه تحت بارهای وارده دینامیکی منجر گردد. یکی از مهمترین پارامترهای دینامیکی سازه فرکانس طبیعی می‌باشد که هم در بحث طراحی و هم در بحث پیش‌بینی رفتار

و کنترل سازه کاربرد فراوان و اهمیت ویژه‌ای دارد. در روش‌های تحلیل دینامیکی متعارف سازه سعی می‌شود از روش‌های تحلیل طیفی و استاتیکی معادل بدلیل سهولت که نسبت به روش تاریخچه زمانی دارند استفاده شود [۱]. تعیین هرچه دقیق‌تر فرکانس طبیعی در دقت این روش‌ها نقش بسزایی دارد. برای بدست آوردن فرکانس طبیعی روش‌های تجربی و تحلیلی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله روش‌های تحلیلی استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود به عنوان یک روش مدل‌سازی کامپیوتری فراگیر و انجام آنالیز مودال تحلیلی بر روی آن است [۲]. پژوهش‌های پیشین انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که نتایج بدست آمده از روش‌های تجربی با نتایج حاصل از مدل‌های روش‌های تحلیلی متعارف تفاوت قابل توجه دارند. برای حل یک مسئله تحلیلی به روش عددی ابتدا یک مدل ریاضی از مدل واقعی تحت عنوان مرحله‌ی ایده‌آل‌سازی ایجاد می‌شود، سپس مدل ریاضی بر اساس یک روش عددی مثلاً اجزای محدود گسسته سازی شده و در مرحله‌ی آخر یعنی حل کردن، با حل مدل اجزای محدود نتایج بدست خواهند آمد. در حین این مراحل خطاهایی به وجود می‌آید که اجتناب ناپذیر می‌باشند. یکی از این خطاها، خطای گسسته سازی می‌باشد که به نحوه ساده‌سازی مدل مسئله برمی‌گردد. در پژوهش حاضر به بررسی چگونگی کاهش این خطا می‌پردازیم. Türker و Bayraktar (۲۰۱۰) [۳] یک قاب سه طبقه سه بعدی را به دو صورت تجربی و اجزای محدود با روش آنالیز مودال مورد بررسی قرار دادند. مدل اجزای محدود متعارف برای هر کدام از مدل‌های بادنبدی خطایی قابل‌توجه در حدود ۴۰٪ را نشان داد. Trombetti و همکارانش (۲۰۰۴) [۴] یک قاب سه طبقه فولادی با جرم متمرکز در سقف را نیز به صورت تجربی و اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند که تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین نتایج تحلیلی و تجربی مشاهده گردید. Loh و همکارانش (۲۰۰۹) [۵] نیز بر روی مدل واقعی و مدل اجزای محدود یک قاب شش طبقه، مطالعات گسترده‌ای انجام و تفاوت قابل توجهی را برای سه مود اول گزارش کرده است. در سازه‌هایی که از اتصالات نیمه صلب و پیچیده استفاده‌شده این تفاوت به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در این زمینه انجمن مهندسی عمران آمریکا با انجمن سازه‌های فولادی آمریکا و کادر علمی دانشگاه بریتیش کلمبیای کانادا (۲۰۰۳) یک سازه قابی فولادی سه طبقه دو دهانه در دو جهت با اتصالات نیمه صلب را مورد بررسی قرار داده و فرکانس‌های طبیعی آن را در دو حالت تجربی و اجزای محدود با استفاده از روش آنالیز مودال به



دست آوردند. نتایج مدل اجزای محدود خطایی حدود ۹۵٪ را نشان داد [۶]. Mahdavi و همکارانش (۲۰۱۲) [۷] یک قاب سه طبقه سه بعدی فولادی با اتصالات فلنجی تیر به تیر را مورد مطالعه قرار دادند که بررسی‌های انجام‌شده بر روی این قاب نشان می‌دهد که نتایج آنالیز مودال تجربی و اجزای محدود متعارف تفاوت قابل توجهی دارند.

بررسی انجام شده بر روی یک قاب سه طبقه فولادی سه بعدی در مقیاس یک به سه واقعی در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل توسط Davoodi و همکارانش (۲۰۱۲) [۸ و ۹] نشان داد که نتایج آنالیز مودال تجربی و آنالیز مودال تحلیلی مدل متعارف اجزای محدود در نرم افزار ANSYS Classic تفاوت قابل توجهی دارند. بدلیل این تفاوت قابل توجه در پژوهش حاضر برای کاهش خطای مدل‌سازی، مدل اجزای محدود با جزئیات و دقت بیشتر در نرم افزار ANSYS Workbench مدل شد. با توجه به ویژگی و پیچیدگی‌های اتصالات فلنجی و رفتار نیمه صلب و غیرخطی آنها و از آنجایی که برای تعیین فرکانس طبیعی از روش آنالیز مودال استفاده شده و آنالیز مودال در محدوده خطی قابل استفاده می‌باشد به همین دلایل این اتصالات را به دو شکل خطی مدل‌سازی کردیم. در مدل اول رفتار اتصالات فلنجی یکبار به صورت جوش و کاملاً گیردار در نظر گرفته شده و در مدل دوم این رفتار با تعریف شش المان خطی بین دو صفحه فلنج اتصال شبیه سازی شد. با روش آنالیز مودال شش فرکانس طبیعی مدل در دو حالت ذکر شده بدست آمد و نتایج حاصله با نتایج تجربی و تحلیلی مدل متعارف مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. این بررسی‌ها تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از این دو مدل به خصوص در حالت استفاده از المان تیر برای بیان رفتار اتصالات فلنجی بکار برده شده در سازه را نشان می‌دهند.

۲- تشریح مدل آزمایشگاهی

۲-۱- قاب سه طبقه فولادی سه بعدی

قاب مورد استفاده در پژوهش حاضر همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، یک قاب سه طبقه فولادی است. این قاب در هر دو جهت دارای یک دهانه و سیستم سازه‌ای آن در هر دو جهت قاب خمشی است. طبقات این سازه به ارتفاع ۹۵ سانتی متر و در پلان یک مستطیل به ابعاد ۲ در ۱/۵ متر می‌باشند. هر سقف قاب با استفاده از بادبندهای ضربدری مهار شده است و دهانه‌ی بزرگتر قاب نیز با استفاده از بادبندهای

جفت در یک جهت در هر طبقه مهار شده‌اند. قاب مورد نظر از ستون‌هایی با مقطع IPE 140 تیرهایی با مقطع IPE 120 ساخته شده است. بادبندهای سقف و بادبندهای جانبی قاب در دهانه‌ی بزرگتر (۲ متری) با استفاده از میل گردهایی به قطر ۱۰ میلی‌متر و به صورت جفت اجرا شده‌اند. اتصالات مورد استفاده در این سازه از نوع فلنجی و به صورت تیر به تیر می‌باشند که دارای رفتار پیچیده، غیرخطی و متفاوت تحت بارهای رفت و برگشتی می‌باشد. اتصالات به علت مسائل اجرایی و آچارخور بودن پیچ و مهره‌ها و محدودیت بال ستون‌ها و از سویی دیگر به دلیل قرارگیری ورق اتصال بادبندها کمی جلوتر از محل اتصال تیر به ستون و به صورت تیر به تیر اجرا گردیدند. صفحات زیر ستون اجرا شده در قاب مورد بررسی با استفاده از سیستم رول بولت به کف صلب آزمایشگاه سازه متصل شده و پس از اتصال سازه به کف آزمایشگاه زیر تمامی صفحه ستون‌ها با استفاده از گروت پر شده است.



شکل ۱- قاب سه طبقه فولادی [۹]

۳- نحوه مدل‌سازی در ANSYS Workbench

۳-۱- نرم افزار مورد استفاده

برای مدل‌سازی هرچه دقیق‌تر مدل از ANSYS Workbench نسخه ۱۲/۱ استفاده شده است. این نرم افزار شکل پیشرفته‌تر و بروزتر نرم افزار ANSYS Classic است که دارای محیطی با ویژگی بهتر نمایشی است و امکان استفاده‌ی نسبتاً ساده تر را فراهم می‌آورد [۱۰].

۳-۲- مصالح مصرفی

برای این مدل سه نوع مصالح استفاده شده است. مصالح نوع اول فولاد ST37 می باشد که مشخصات مکانیکی این نوع فولاد در جدول (۱) بیان شده که برای ستون ها و ورق های اتصال مورد استفاده قرار گرفته است. مصالح نوع دوم برای بادبندها مورد استفاده قرار گرفته که به جهت ناچیز فرض کردن وزن بادبندها چگالی آن با نوع اول و سوم متفاوت است. مصالح نوع سوم نیز مشابه با نوع اول برای المان های تیر مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱- مصالح مورد استفاده در مدل

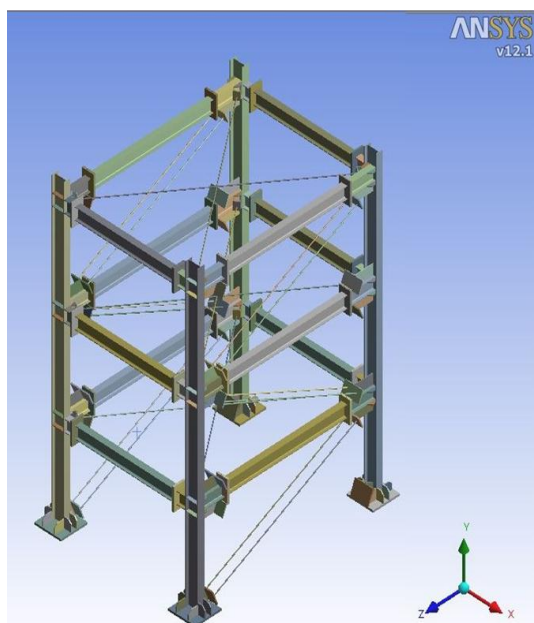
پارامترهای مصالح	نوع اول	نوع دوم	نوع سوم
چگالی (kg/m ³)	۷۸۵۰	1×10^{-20}	۷۸۵۰
مدول الاستیسیته (N/m ²)	$2/1 \times 10^{11}$	$2/1 \times 10^{11}$	$2/1 \times 10^{11}$
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۳	۰/۳
تنش تسلیم (N/m ²)	$2/4 \times 10^8$	$2/4 \times 10^8$	$2/4 \times 10^8$
تنش نهایی (N/m ²)	$3/7 \times 10^8$	$3/7 \times 10^8$	$3/7 \times 10^8$

۳-۳- هندسه مدل

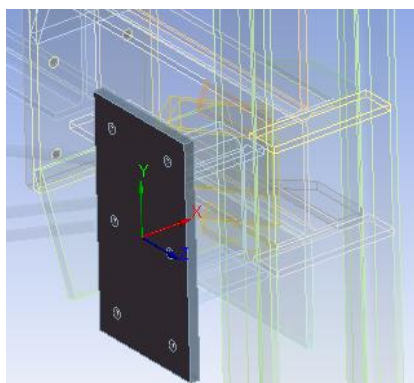
هندسه سازه مدل سازی شده در نرم افزار ANSYS Workbench در شکل (۲) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ملاحظه می شود مدل با جزئیات کامل می باشد. تمام سخت کننده های کف ستون و سخت کننده های اتصالات تیر و ستون و همه ی اعضا با ابعاد واقعی مدل شده و محل قرارگیری بادبند های کف و جانبی کاملاً دقیق و منطبق با سازه واقعی می باشد.

۳-۴- مدل سازی اتصالات فلنجی

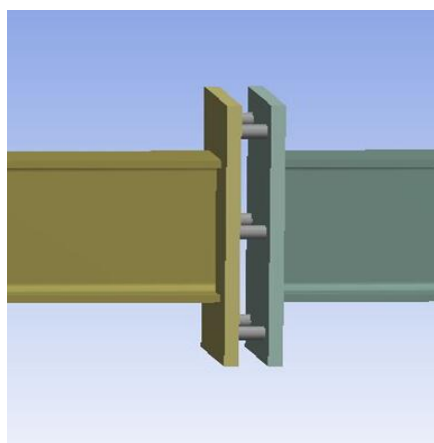
با توجه به ویژگی و پیچیدگی های بیان شده در مورد اتصالات فلنجی به ویژه در بارهای رفت و برگشتی و از آنجایی که برای تعیین فرکانس طبیعی از روش آنالیز مودال استفاده شده که آنالیز مودال در محدوده خطی قابل استفاده می باشد به همین دلایل برای مدل اتصالات فلنجی از ۶ المان تیر در میان دو صفحه فلنج برای معادل سازی مکانیزم انتقال نیرو توسط صفحات فلنج و پیچ، مطابق شکل (۳) استفاده شده است. درجات آزادی دو صفحه در دو جهت Y و Z مقید شده اند.



شکل ۲- مدل سازه در ANSYS Workbench



الف) المان های تیری در اتصالات فلنجی



ب) مدل جایگزین اتصال فلنجی با المان های تیری با بزرگنمایی در ابعاد المان

شکل ۳- نمایش مدل سازی اتصالات فلنجی

۳-۵- معرفی المان‌های مورد استفاده

در مدل‌سازی قاب از المان Solid 186 استفاده شده است. این المان دارای ۲۰ گره بوده و هر گره دارای ۳ درجه آزادی انتقالی می‌باشد. در مدلی که بین صفحات اتصال فلنجی از المان تیر استفاده شده است، در صفحات اتصال علاوه بر المان Solid 186 از المان Solid 187 نیز استفاده شده است. این المان دارای ۱۰ گره بوده و هر گره دارای ۳ درجه آزادی انتقالی می‌باشد [۱۰].

۳-۶- بادبندها

با توجه به اینکه در آنالیز مودال این مدل، مدهای محلی اضافی به خاطر وجود بادبندها بوجود می‌آید، برای کاهش محاسبات و زمان انجام تحلیل توسط نرم افزار یکبار به جای جرم بادبندها از جرم متمرکز در دو انتهای بادبند استفاده شده و فقط سختی بادبند مورد استفاده قرار گرفت و در حالت بعدی از جرم بادبندها که کمتر از سه درصد جرم کل سازه را شامل می‌شود صرف نظر شد. با توجه به نتایج نزدیک بهم در دو حالت بیان شده و اجتناب از حجم بالای محاسبات و زمان زیاد، از جرم بادبندها در مدل اصلی صرفه‌نظر شده است که برای این منظور همانگونه که در جدول (۱) نشان داده شده، چگالی مواد مصرفی برای بادبندها مقدار ناچیزی برابر $\rho = 1 \times 10^{-20} \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شده است.

۳-۷- تعیین شرایط مرزی

اتصال تمام قطعات به یکدیگر اعم از تیر و ستون و سخت کننده‌ها با توجه به جوش شدن درسازه آزمایشگاهی به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. همچنین تمام درجات آزادی پای ستون به صورت کامل بسته شده است.

۴- بهنگام‌سازی مدل

برای مسئله بهنگام‌سازی مدل، تعاریف مختلفی در ادبیات فنی وجود داشته و از جنبه‌های متفاوتی به آن نگریسته شده است. بهنگام‌سازی مدل اجزای محدود به صورت فرآیند کمی سازی تفاوت بین نتایج تحلیل مدل و یکسری داده‌های مرجع، و سپس اصلاح مقادیر عددی پارامترهای ورودی مدل یا خود مدل، برای کاهش این تفاوت و حصول یک مدل صحیح تعریف می‌شود (Dascotte, ۲۰۰۷) [۱۱]. مسئله بهنگام‌سازی مدل از جمله مسائل معکوس در مهندسی دانسته شده است (۲۰۰۷ Dascotte). در مسائل معکوس، با داشتن مجموعه‌ای از ورودی و خروجی‌های اندازه‌گیری شده، باید یک مدل برای سیستم ساخته‌شده یا اصلاح گردد. این خصوصیات دینامیکی سازه که

در فرآیند بهنگام‌سازی مدل در دو حالت تجربی و تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفته و تفاوت آن‌ها به حداقل رسانده می‌شود، فرکانس‌های طبیعی سازه مورد نظر هستند. نیاز به انجام بهنگام‌سازی مدل، ریشه در عدم قطعیت یا تردیدهایی دارد که در هر گونه تلاشی برای مدل‌سازی ریاضی یک رفتار واقعی نهفته است. عدم قطعیت اساساً به دلیل نقصان معلومات ایجادشده و می‌تواند در همه جنبه‌های فرآیند مدل‌سازی وجود داشته باشد. در سازه مورد بررسی یکی از ویژگی‌های خاص این سازه که می‌تواند در بررسی نتایج موثر باشد، رفتار اتصالات و عدم قطعیت‌های موجود در رفتار آن‌ها تحت بار دینامیکی هست. از طرفی این اتصالات به علت پیچی بودن و اتصال دو سر تیر با استفاده از صفحات فلنج به یکدیگر دچار ناپیوستگی‌هایی است و از طرف دیگر نه یک اتصال صلب کامل است و نه یک اتصال مفصلی کامل؛ به عبارت دیگر سختی اتصال یکی از عدم قطعیت‌های موجود در رفتار اتصالات در جزء و کل سازه در مقیاس بزرگ‌تر هست. در بهنگام‌سازی این سازه همین رفتار اتصالات و سختی آن‌ها به عنوان یک پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است.

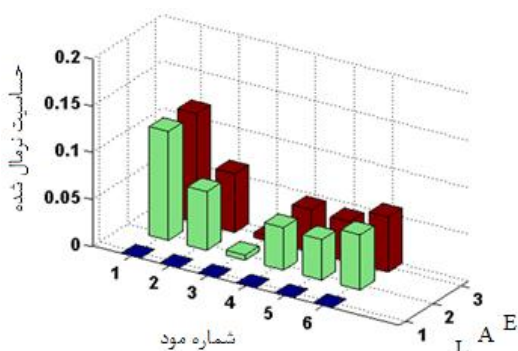
۴-۱- تحلیل حساسیت و انتخاب پارامترها

بطوریکه ملاحظه گردید، در مدل اجزای محدود تهیه شده برای قاب، در اتصال فلنجی هر پیچ اتصال توسط یک المان تیری بین صفحات فلنج جایگزین شد. با توجه به اینکه عمده عدم قطعیت‌های ایجادشده در رفتار شبکه ناشی از سیستم اتصالاتی آن است، لذا خصوصیات تعیین‌کننده سختی این المان، یعنی سطح مقطع (A)، طول المان (فاصله دو صفحه فلنج) (L) و مدول یانگ (E) گزینه‌های کاندید برای استفاده به عنوان پارامتر در فرآیند بهنگام‌سازی مدل بودند. انتخاب قطعی این خصوصیات به عنوان پارامترهای بهنگام‌سازی منوط به وجود حساسیت کافی پاسخ‌های انتخاب شده (فرکانس‌های طبیعی شبکه) نسبت به آن‌ها است. در این بهنگام‌سازی از روش تفاوت محدود برای هر ترکیبی از پاسخ‌ها و پارامترها استفاده شده است. حساسیت نرمال شده به روش تقریب تفاوت محدود مرکزی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Sn_{ij} = \frac{\partial R_i P_j}{\partial P_j R_i} \approx \frac{R_i(P_j + \Delta P_j) - R_i(P_j - \Delta P_j)}{2\Delta P_j} \frac{P_j}{R_i(P_j)} \quad (1)$$

که در آن P_j پارامتر i ام، $R_i(P_j)$ پاسخ i ام به ازای مقدار پارامتر P_j ، $R_i(P_j + \Delta P_j)$ پاسخ i ام به ازای مقدار پارامتر $P_j + \Delta P_j$ ،





شکل ۴- مقادیر حساسیت نرمال شده فرکانس‌های طبیعی شش مود اول قاب نسبت به تغییرات مدول یانگ (E)، سطح مقطع (A) و طول المان (L).

به عبارت دیگر، فرض شده است که خصوصیات مدول یانگ المان تیری جایگزین در اتصالات فلنجی، حداکثر می‌تواند برابر خصوصیات حالت کامل صلب اتصال باشد، که در مدل اولیه این فرض در نظر گرفته شده بود، که یک فرض منطقی است. پس از بررسی انجام شده و تأثیر اندک این متغیر در بهنگام‌سازی حد بالای آن برابر $E=2/1 \times 10^{11}$ (N/m²) در فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. حد پایین این متغیرها با توجه به عملکرد انعطاف‌پذیر اتصال برابر یک دهم مقدار فوق در نظر گرفته شد.

۴-۳- پیاده‌سازی نرم‌افزاری مراحل بهنگام‌سازی مدل

فرآیند بهنگام‌سازی مدل اجزای محدود خود شامل دو زیر فرآیند اصلی تحلیل مدل اجزای محدود و بهینه‌سازی است. تحلیل مدل اجزای محدود لازم است بارها انجام شده تا با استفاده از نتایج آن، در هر بار مقادیر مناسب‌تری برای پارامترهای بهنگام‌سازی جستجو شده و تابع هدف رفته‌رفته کمینه گردد. بنابراین، برای پیاده‌سازی نرم‌افزاری این فرآیند بهنگام‌سازی مدل باید ارتباط کاملی به صورت خودکار بین دو زیر فرآیند مذکور وجود داشته باشد. در حالت کلی، روش‌های ممکن برای پیاده‌سازی بهنگام‌سازی مدل را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

- استفاده از نرم‌افزارهای مخصوص بهنگام‌سازی مدل.
- به‌کارگیری دو محیط نرم‌افزاری مستقل برای انجام دو زیر فرآیند تحلیل مدل و بهینه‌سازی.
- انجام هر دو زیر فرآیند تحلیل مدل و بهینه‌سازی در یک محیط نرم‌افزاری واحد.

در روش دوم، دو نرم‌افزار مستقل تحلیل مدل و بهینه‌سازی باید از طریق به اشتراک‌گذاری پردازشگر و حافظه کامپیوتر بین آن‌ها با یکدیگر پیوند داده شوند. بطوریکه هر نرم‌افزار قادر به

$R_i(P_j - \Delta P_j)$ پاسخ i ام به ازای مقدار پارامتر $P_j - \Delta P_j$ و ΔP_j مقدار انحراف پارامتر است. این پاسخ‌ها با استفاده از تحلیل مدل اجزای محدود به دست می‌آیند.

با استفاده از رابطه بالا حساسیت شش فرکانس طبیعی اول شبکه نسبت به پارامترهای کاندید شده برای بهنگام‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. در این رابطه P_j (j برابر ۱ تا ۳) طول و مدول یانگ المان تیری قرار داده شده میان دو صفحه فلنج اتصال در مدل اجزای محدود، R_i (i برابر ۱ تا ۶) فرکانس‌های طبیعی اول تا ششم حاصل از تحلیل مودال مدل اجزای محدود قاب و $\Delta P_j = 0.01 P_j$ می‌باشند.

شکل (۴) مقادیر حساسیت نرمال شده فرکانس ارتعاش شش مود اول قاب را نسبت به پارامترهای المان تیری قرار داده شده میان دو صفحه فلنج اتصال را نشان می‌دهد. مقادیر حساسیت بر حسب درصد بوده و به عنوان نمونه، در صورتی که سطح مقطع (A) کلیه المان‌های تیری جایگزین اتصال ۱٪ افزایش یابد، فرکانس مود ارتعاشی اول شبکه ۰/۱۱٪ افزایش خواهد یافت. این مقدار افزایش اگرچه چشمگیر نیست ولی از آن جا که مقادیر حساسیت نشان می‌دهد، فرکانس‌های قاب فولادی نسبت به پارامتر طول المان حساسیتی نداشته لذا پارامتر طول در فرآیند بهنگام‌سازی ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به مدل هندسی اتصال و محدودیت نرم‌افزار مقدار انتخاب شده برای پارامتر طول کمترین مقدار قابل استفاده برابر ۰/۰۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. دو پارامتر دیگر کاندید شده از نظر حساسیت کاملاً یکسان می‌باشند. به نحوی که تغییرات یکی از این پارامترها با یک نسبت مشخص می‌تواند تغییرات این دو پارامتر به طور همزمان را پوشش دهد. با توجه به این نکته که تغییرات مدول یانگ برخلاف سطح مقطع نیاز به تغییرات کمتر در مدل اجزای محدود دارد و باعث کاهش زمان و حجم محاسبات بهنگام‌سازی می‌شود، در نتیجه مدول یانگ به عنوان پارامتر بهنگام‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات هندسی سطح مقطع المان برابر مشخصات پیچ بکار برده شده در اتصال قرار داده شده است.

۴-۲- متغیرهای بهینه‌سازی و حدود آن‌ها

برای اینکه مقدار به دست آمده از حل مسئله بهینه‌سازی برای متغیرها منطقی و از نظر فیزیکی امکان‌پذیر باشد، لازم است حد بالا و پایین مناسبی برای آن‌ها در نظر گرفته شود. برای تعیین حد بالای متغیر بهینه‌سازی در بهنگام‌سازی مدل دینامیکی، صلبیت و گیرداری کامل اتصالات ملاک قرار داده شد

دریافت اطلاعات از نرم‌افزار دیگر و نیز ارسال اطلاعات به آن باشد. به عنوان مثال از دو نرم‌افزار ANSYS و MATLAB می‌توان به ترتیب برای تحلیل مدل و بهینه‌سازی استفاده کرد. در این پژوهش از این روش بهره گرفته شده است.

۴-۴- تابع هدف

تابع هدف در بهنگام‌سازی مدل دینامیکی به صورت یک مسئله حداقل مربعات معمولی فرمول‌بندی شده و شامل مجموع مربعات تفاوت نسبی بین فرکانس‌های طبیعی تجربی و مدل اجزای محدود قاب فولادی است. در حالت بهنگام‌سازی مدل دینامیکی به صورت زیر در خواهد آمد:

$$h_d(P_d) = \sum_{n=1}^6 \left(\frac{R_{d_n}^{exp} - R_{d_n}^{ana}(P_d)}{R_{d_n}^{exp}} \right)^2 \quad (2)$$

در رابطه فوق $h_d(P_d)$ تابع هدف در بهنگام‌سازی مدل دینامیکی، $R_{d_n}^{exp}(P_d)$ مؤلفه n م بردار پاسخ‌های تجربی، $R_{d_n}^{ana}(P_d)$ مؤلفه n م بردار پاسخ‌های تحلیلی و P_d پارامتر بهنگام‌سازی است. بدین ترتیب تابع هدف متشکل از شش جمله خواهد بود که جمله اول نشان‌دهنده مربع تفاوت نسبی اولین فرکانس طبیعی تجربی شبکه و اولین فرکانس طبیعی تحلیلی آن است و به همین ترتیب تا جمله هشتم. بطوریکه این رابطه نشان می‌دهد، بین مودهای تجربی و تحلیلی شبکه به ترتیب رابطه یک به یک برقرار شده است و یا به عبارت دیگر مودها به ترتیب زوج شده‌اند. عمل زوج کردن معمولاً با مقایسه شکل مودهای تجربی و تحلیلی صورت می‌گیرد.

۴-۵- فرآیند بهنگام‌سازی

ابتدا چندین تحلیل در نرم‌افزار ANSYS Workbench در بازه مشخص که در بخش قبل بیان شد، انجام گرفته است و نتایج به دست آمده به نرم‌افزار MATLAB انتقال داده شد. این فرآیند بهنگام‌سازی در شکل (۵) نشان داده شده است. داده‌های شش مود اول فرکانسی بر حسب پارامتر بهنگام‌سازی (مدول یانگ) رسم شده است و سپس هر یک از نمودارها به طور جداگانه با استفاده از یک تابع درجه سه با دقت بسیار بالایی برازش شد که در هر یک از این برازش‌ها خطای برازش کمتر از ۱٪ می‌باشد. برای تعیین m_i که بیانگر ضریب تأثیر مود i ام بر روی پارامتر بهنگام‌سازی هست، از شیب خطی که از برازش داده‌های فرکانسی به دست آمده، استفاده شده است. مقدار m_i در طول فرآیند بهنگام‌سازی برای شش مود اول مورد بررسی ثابت می‌باشد. برای تعیین مقدار مدول یانگ بهینه، در گام اول از فرکانس‌های تجربی برای ورودی اولیه استفاده شده و برای هر

فرکانس یک E بر اساس تابع درجه سه که در مرحله اولیه برازش شده است، تعیین می‌شود. سپس E^* با توجه به رابطه مشخص می‌شود.

$$E^* = \frac{\sum_{i=1}^6 m_i E_i}{\sum_{i=1}^6 m_i} \quad (3)$$

با قرار دادن E^* به دست آمده از این مرحله در هر یک از شش توابع برازش شده، شش فرکانس جدید حاصل خواهد شد و میزان خطا بین هر فرکانس جدید بهینه‌شده و فرکانس تجربی متناظر محاسبه می‌شود. در گام بعدی میانگین اختلاف فرکانس تجربی و فرکانس بهینه‌شده به دست آمده از مرحله قبل به عنوان ورودی برای تعیین E_i ها و E^* در نظر گرفته می‌شود. این فرآیند تا زمانی که تابع هدف همگرا شود ادامه پیدا می‌کند. در این تحقیق معیار همگرایی اختلاف مقدار بدست آمده در دو مرحله متوالی کمتر از ۰/۰۱ اختیار شده است.

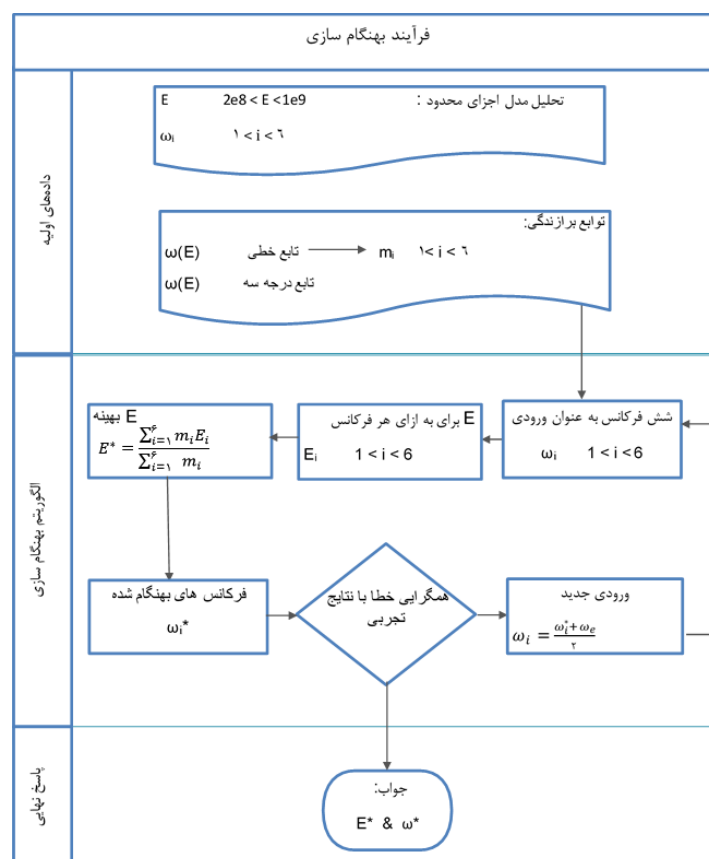
نمودار برازش درجه سه و خطی به عنوان نمونه برای فرکانس طبیعی متناظر با فرکانس اول در شکل (۶) نشان داده شده است.

پس از انجام بهنگام‌سازی و فرآیند همگرایی، شش فرکانس طبیعی و مقدار مدول یانگ بهینه مطابق جدول (۲) مشخص شد.

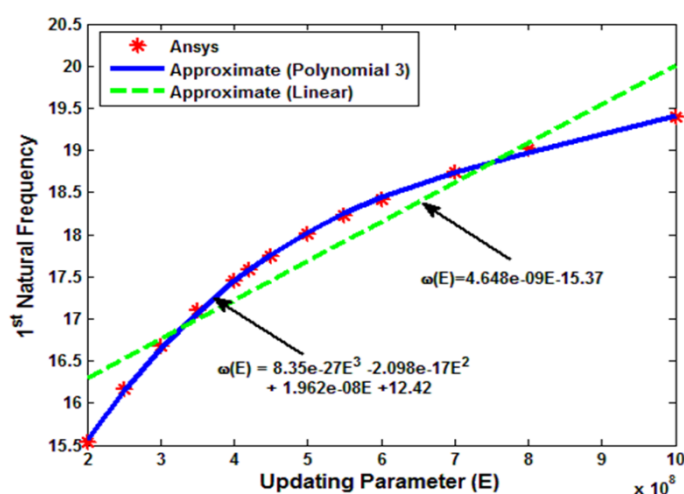
۵- پاسخ‌های مدل بهنگام شده

جدول (۳) فرکانس‌های هشت مود اول ارتعاشی حاصل از مدل اجزای محدود بهنگام شده شبکه را به همراه خطای آن‌ها نسبت به مقدار تجربی نشان می‌دهد. به علاوه، در این جدول فرکانس‌های حاصل از مدل اجزای محدود اولیه که در بخش‌های قبل ارائه شده، آمده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد، مدل اجزای محدود اولیه دارای خطای متوسط ۱۳٪ می‌باشد که در فرآیند بهنگام‌سازی سعی در کاهش این خطا شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مدل تحلیلی بهنگام شده با متوسط خطای تقریباً ۳/۸٪ قادر به حصول تمامی شش فرکانس طبیعی تجربی شبکه در محدوده فرکانسی صفر تا ۲۰۰ Hz قرار دارد. لازم به ذکر است که تنها هشت فرکانس طبیعی اول به عنوان پاسخ در فرآیند بهنگام‌سازی مدل مورد استفاده قرار گرفته است و لذا انطباق مطلوب چهار فرکانس بعدی تأیید بیشتری بر صحت مدل بهنگام شده است. همچنین با توجه به مطالب گفته شده از جرم بادهندها صرف نظر شده است. نکته‌ی دیگر ترتیب وقوع مودهای مختلف در مدل واقعی و مدل بهنگام شده هست. ترتیب رخداد مودهای ارتعاشی قاب مورد بررسی در جدول (۴) ارائه شده است.





شکل ۵- الگوریتم مورد استفاده در فرآیند بهنگام سازی



شکل ۶- نمودار برازش درجه سه و خطی فرکانس طبیعی اول

جدول ۲- خصوصیات هندسی المان جایگزین اتصال در مدل بهنگام شده

المان	سطح مقطع کل ($\times 10^{-4} \text{ m}^2$)	طول ($\times 10^{-2} \text{ m}$)	مدول الاستیسیته E ($\times 10^8 \text{ N/m}^2$)
خصوصیات المان جایگزین اتصال (BEAM4)	۷۸۵۰	1×10^{-2}	۷۸۵۰

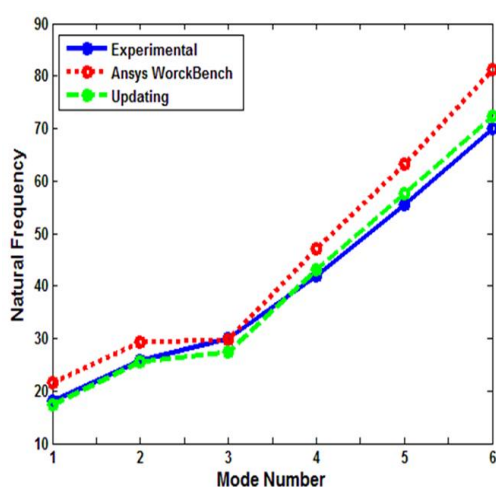


جدول ۳- فرکانس‌های طبیعی مدل اولیه و بهنگام شده قاب و خطا نسبت به مقدار تجربی

شماره مود	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
مدل بهنگام شده	فرکانس (Hz)	۱۷/۴۱	۲۵/۵۵	۲۷/۴	۴۳/۰۲	۵۷/۵۲	۷۲/۴۱	۱۵۰/۷۲
	خطا (%)	۳/۸	۱/۱	۸/۱	۲/۸	۳/۵	۳/۳	۴/۷
مدل اولیه	فرکانس (Hz)	۲۱/۶۸	۲۹/۷۶	۲۹/۳	۴۷/۱	۶۳/۲	۸۱/۳	۱۶۹/۸
	خطا (%)	۱۹/۸	۱۵/۲	۱/۸۴	۱۲/۵	۱۳/۷	۱۵/۹	۷/۳

جدول ۴- ترتیب وقوع مودهای ارتعاشی در مدل‌های واقعی و بهنگام شده

ردیف	مدل بهنگام شده	مدل واقعی
۱	مود اول خمشی - جهت X	مود اول خمشی - جهت X
۲	مود اول پیچشی	مود اول پیچشی
۳	مود اول خمشی - جهت Z	مود اول خمشی - جهت Z
۴	مود دوم خمشی - جهت X	مود دوم خمشی - جهت X
۵	مود دوم خمشی - جهت Z	مود دوم خمشی - جهت Z
۶	مود دوم پیچشی	مود دوم پیچشی
۷	مود سوم خمشی - جهت Z	مود سوم خمشی - جهت Z
۸	مود سوم خمشی - جهت X	مود سوم خمشی - جهت X



شکل ۷- فرکانس‌های طبیعی شش مود بهنگام شده

همان طور که در جدول (۴) دیده می‌شود برای هر دو مدل مورد استفاده، مودهای مختلف در مراتب کلی به صورت متوالی اتفاق می‌افتند. به عبارت دیگر در هر دو مدل، ابتدا همه‌ی مودهای اول اتفاق افتاده و مجموعه‌ی مودهای دوم پس از آن‌ها و مودهای سوم در گام آخر شکل می‌گیرند. همچنین نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که ترتیب وقوع مودها نیز همچون فرکانس طبیعی متناظر آن‌ها به رفتار اتصال وابسته است و این پدیده می‌تواند باعث جابجایی در مودها در هر سطح گردد.

مقایسه فرکانس‌های طبیعی حاصل از نتایج تجربی و مدل اولیه و مدل بهنگام شده که در شکل (۷) نشان داده شده بیانگر این موضوع است که مقادیر فرکانس‌های طبیعی در نتایج بهنگام شده (رنگ سبز) به صورت مناسبی به نتایج تجربی (رنگ آبی) نزدیک است. لذا فرآیند بهنگام سازی مدل اولیه (قرمز) را به واقعیت نزدیک‌تر می‌گرداند.

۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر یک قاب سه طبقه فولادی سه بعدی با استفاده از نرم افزار Ansys Workbench با دقت و جزئیات کامل و با استفاده از المان‌های سه بعدی Solid مدل‌سازی و شش فرکانس طبیعی اول با استفاده از روش آنالیز مودال بدست آورده شد.

با توجه به اینکه روش آنالیز مودال در محدوده خطی قابل استفاده می‌باشد و رفتار اتصالات فلنجی موجود در سازه‌ی مورد بررسی دارای رفتار پیچیده و غیرخطی می‌باشد، رفتار این اتصالات به دو صورت خطی مدل‌سازی شد. در مدل اول صفحات فلنج اتصال به یکدیگر جوش شده و رفتار اتصال کاملاً گیردار در نظر گرفته شد. در مدل دوم اتصالات فلنجی با شش المان تیر در بین دو صفحه فلنج مدل‌سازی شد. در ادامه شش

- [7] Mahdavi, M., Davoodi, M. and Mostafavian, A. (2012), "Determination of Joint Stiffness of a Three Story Steel Frame by Finite Element Model Updating", In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisbon, Portugal.
- [8] Davoodi, M.R., Mahdavi, M. and Mostafavian, A. (2012), "Dynamic Identification of a Three Story Steel Frame with Bolted Flange Joints", 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan.
- [9] Davoodi, M.R., Mahdavi, M. and Mostafavian, A. (2012), "Determination of Joint Stiffness of a Three Story Steel Frame by Finite Element Model Updating", 15th International Conference on Earthquake Engineering.
- [10] ANSYS Workbench User's manual version 12.1, 2009.
- [11] Dascotte, E. (2007), "Model Updating for Structural Dynamics: Past, Present, and Future Outlook", International Conference on Engineering Dynamics (ICED), Carvoeiro, Algarve, Portugal.

فرکانس طبیعی بدست آمده با نتایج تجربی و تحلیلی متعارف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. مدل تحلیلی متعارف که در آن همه اتصالات کاملاً گیردار در نظر گرفته شده و خطای قابل توجهی در حدود ۹۲٪ را بطور متوسط برای شش فرکانس طبیعی با نتایج تجربی نشان می‌دهد. در مدل اول ایجاد شده این خطا به حدود ۱۲/۵٪ رسیده است. با توجه به اینکه در مدل اول نیز اتصالات فلنجی به مانند مدل تحلیلی متعارف کاملاً گیردار در نظر گرفته شده‌اند، نتایج اهمیت مدل‌سازی همه اعضای قاب اعم از سخت کننده‌ها و غیره را نشان می‌دهد که این اهمیت در مود اول کمتر و در موده‌های بالاتر بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در مدل دوم بررسی نتایج با نتایج تجربی خطایی به مراتب کمتر در حدود ۳/۹٪ را نشان می‌دهد. همانگونه که نتایج نشان می‌دهند نحوه مدل‌سازی اتصالات فلنجی در رفتار سازه برای تعیین فرکانس‌های طبیعی بصورت قابل ملاحظه‌ای اهمیت دارد.

جرم بادی‌ها در تعیین فرکانس طبیعی تاثیر قابل توجه‌ای نداشته و می‌توان برای جلوگیری از ایجاد موده‌های محلی ناشی از بادی‌ها در آنالیز مودال از این جرم‌ها صرفه نظر کرده و تنها سختی آنها را مدنظر قرار داد.

میزان گیرداری اتصالات فلنجی در مدل‌سازی در دهانه‌هایی که بادی‌ها وجود دارد به دلیل وجود بادی‌ها تاثیر کمی دارند و نقش بادی‌ها در تعیین فرکانس طبیعی در این جهت پررنگ‌تر می‌باشد.

۷- مراجع

- [۱] پورزینلی، س.، فصیحی، ع. و قویدل، ر. (۱۳۸۷)، "مقایسه نتایج حاصل از روش‌های تحلیل تاریخچه زمانی، طیفی و استاتیکی ساختمان‌ها و بررسی تاثیر متغیرهای مختلف بر آن"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران.
- [2] He, J., Fu, Z.-F. (2001), "Modal Analysis," Publisher: Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- [3] Türker, T. and Bayraktar, A. (2011), "Experimental and Numerical Investigation of Brace Configuration Effects on Steel Structures", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, pp. 854-865.
- [4] Trombetti, T., Barrasso, P., Crewe, A. and De Stefano, M. (2004), "Shaking Table Testing of Symmetric and Asymmetric three-Storey Steel Frame Structures", 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, pp. 1-6.
- [5] Loh, C.-H., Weng, J.-H. and Yang, J.N. (2009), "Finite Element-Based Damage Detection from Experimental Modal Analysis Results", Materilas Foru, Vol. 33.
- [6] Tureker, M. and Ventura, C. (2005), "Finite Element Model Updating of a Scale-Model Steel Frame Building", In

