

تعیین رفتار اتصالات گویسان به کار رفته در یک شبکه دو لایه با استفاده از بهنگام سازی فرکانس‌های طبیعی آن

سید امین مصطفویان^{۱*}، محمد رضا داودی^۲، جواد واثقی امیری^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: شبکه دو لایه، اتصال گویسان، فرکانس‌های طبیعی، بهنگام سازی مدل، الگوریتم ژنتیک.</p>	<p>به دلیل عدم قطعیت‌های متعدد در زمان ساخت، نصب و برپایی شبکه‌های دو لایه ساخته شده با سیستم اتصالاتی گویسان، رفتار این اتصالات در سازه با رفتار آنها وقتی به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار می‌گیرند، متفاوت است. در تحقیق حاضر، رفتار یک نمونه سیستم اتصال گویسان در شرایط واقعی عملکرد آن در یک شبکه دو لایه به روش حل مسئله معکوس تعیین شده است. برای این منظور، یک شبکه دو لایه با سیستم اتصال گویسان در مقیاس واقعی ساخته شد. این شبکه در شرایط تکیه‌گاهی آزاد تحت آزمایش مودال قرار گرفت و توابع پاسخ فرکانسی (FRF) آن در درجات آزادی مناسب اندازه‌گیری گردید. فرکانس‌های هشت مود اول سازه از توابع پاسخ فرکانسی آن به دست آمد. برای شبیه سازی رفتار اتصال در مدل اجزای محدود شبکه، از یک المان تیری در انتهای هر عضو استفاده شد. فرکانس‌های هشت مود اول شبکه به ازای مشخصات هندسی مختلف برای این المان تیری با استفاده از آنالیز مودال به دست آمد. با انجام فرایند بهنگام سازی برای مدل اجزای محدود شبکه دو لایه از طریق کاهش تفاوت فرکانس‌های طبیعی تجربی و تحلیلی آن، مشخصات هندسی المان تیری جایگزین سیستم اتصال گویسان تعیین گردید. مدل بهنگام شده، ضمن ارائه تقریب بسیار خوب از فرکانس‌های طبیعی شبکه، یک رفتار انعطاف‌پذیر را در درجات آزادی مختلف برای اتصال به دست می‌دهد. بعلاوه، توابع پاسخ فرکانسی تحلیلی شبکه که با در نظر گرفتن مشخصات هندسی به دست آمده برای المان تیری اتصال محاسبه گردید، که با نتایج تجربی آن تطابق خوبی داشتند.</p>

۱- مقدمه

شبکه‌های دو لایه با سیستم اتصالاتی گویسان از جمله سازه‌های فولادی هستند که اعضای آنها به صورت پیش ساخته بوده و توسط پیچ‌ها در محل مونتاژ و اجرا

می‌گردند. مطالعات انجام شده روی رفتار استاتیکی [۱]- [۳] و دینامیکی [۴] این سازه‌ها نشان می‌دهند رفتار اتصالات در پاسخ شبکه‌های دو لایه تأثیر چشم‌گیر داشته و لذا برای حصول دقت کافی در نتایج تحلیلی، باید در مدل‌های عددی لحاظ گردند. به دلیل عدم قطعیت‌های ایجاد شده در سیستم اتصال گویسان پس از مونتاژ سازه، رفتار سیستم اتصال گویسان که با مطالعه یک نمونه تنها و جدای از سازه، چه به صورت تجربی و چه به صورت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: a.mostafavian@stu.nit.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل

۲. استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل

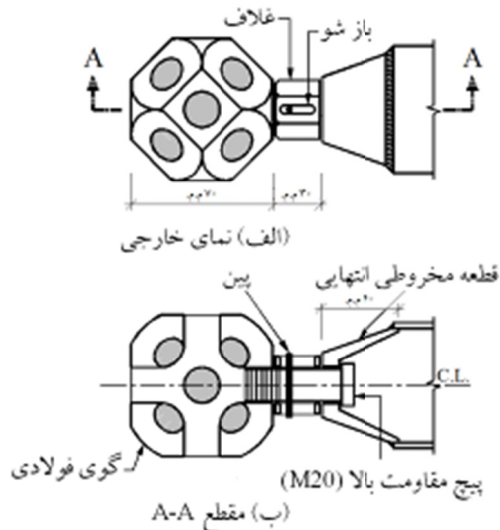
۳. دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل

الگوریتم‌های بر پایه مشتق و نیز الگوریتم‌های تکاملی برای بهینه سازی، رفتار غیرخطی مصالح در مسائل شکل‌دهی فلزات را از طریق بهنگام سازی مدل اجزای محدود و یافتن حداقل یک تابع هدف که شامل تفاوت بین تنش‌های عددی و تجربی بود، تعیین کردند.

در استفاده از روش بهنگام سازی مدل اجزای محدود برای تعیین رفتار سیستم اتصال گویسان، لازم است رفتار اتصال به نحو مناسبی مدل‌سازی گردد. به دلیل اینکه یک سیستم اتصال گویسان از چند قطعه جدا از هم تشکیل می‌شود، رفتار آن پیچیده بوده و مدل‌سازی هندسه این قطعات و اندرکنش بین آنها در مدل‌های تحلیلی بخصوص در کاربردهای عملی که تعداد زیادی از این اتصال در یک شبکه وجود دارد، مناسب نیست. اما معادل سازی رفتار اتصال با یک المان تیری، به طوری که نمایانگر رفتار اتصال در درجات آزادی انتقالی و دورانی باشد، یک راه حل کاربردی ساده و مناسب است. ذکر این مسئله ضروری است که در رفتار استاتیکی شبکه‌های دو یا چند لایه نیروی محوری اعضای حاکم بوده و تلاش‌های غیر محوری اثر ثانویه دارند [۱۳]، به طوری که در مطالعه رفتار اتصالات می‌توان تنها رفتار محوری آن‌ها را مد نظر قرار داد. این در حالی است که رفتار دینامیکی این شبکه‌ها به نحو قابل توجهی تحت تأثیر رفتار دورانی اعضا و اتصالات آنها بوده، و برآورد صحیحی از خصوصیات دینامیکی شبکه‌های دو لایه مانند فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی بدون در نظر گرفتن لنگر در اعضا و اتصالات آن‌ها غیر ممکن است.

در تحقیق حاضر برای تعیین رفتار یک نمونه سیستم اتصال گویسان در درجات آزادی محوری، خمشی و پیچشی تحت شرایط واقعی عملکرد آن در یک شبکه دو لایه، از روش حل معکوس مسئله و مشخصاً تکنیک بهنگام سازی مدل اجزای محدود استفاده شده است. برای این منظور با ساخت یک شبکه دو لایه دارای سیستم اتصال گویسان در مقیاس واقعی و انجام آزمایش‌های مودال روی آن، فرکانس طبیعی هشت مود ارتعاشی اول

تحلیلی به دست آمده باشد، نمایانگر رفتار واقعی آن در شبکه دو لایه نیست و باید رفتار اتصال تحت تأثیر شرایط حاکم بر آن در شبکه مورد مطالعه قرار گیرد [۵ و ۶]. برای این منظور باید مسئله به‌طور معکوس حل شود، یعنی با استفاده از پاسخ‌های کلی یک شبکه دو لایه دارای سیستم اتصال گویسان که به صورت تجربی اندازه‌گیری شده است، رفتار سیستم اتصالات آن تعیین گردد. یکی از روش‌های تعریف مسئله به صورت معکوس تکنیک بهنگام سازی مدل اجزای محدود است. Cunha et al. [۷] سختی‌های خمشی و برشی یک اتصال پیچی تیر به ستون را با استفاده از روش بهنگام سازی مدل اجزای محدود ارزیابی کردند. سازه مورد مطالعه در کار آنها شامل یک تیر و یک ستون ساخته شده از پروفیل‌های GFRP حاصل از روش پالتروژن بود. Türker et al. [۸] نیمه صلبیتی اتصالات در سازه‌های فولادی را از طریق مطالعه دو ستون و یک قاب دو بعدی یک طبقه یک دهانه بررسی کردند. اعضا مستقیماً از طریق جوش به یکدیگر متصل شده و برای بهنگام سازی مدل اجزای محدود، نیمه صلبیت اتصالات با فنرهای الاستیک خطی مدل‌سازی گردید. Wu and Li [۹] از طریق بهنگام سازی مدل اجزای محدود برای یک قاب چهار طبقه فولادی، پارامترهای مختلفی از جمله مدول الاستیسیته فولاد، سختی اتصالات، و طول مؤثر اعضا را در شرایط رفتار خطی سازه به دست آوردند. Kajberg and Lindkvist [۱۰] مدل اجزای محدود دو نمونه ورق فولادی را با مقایسه جابجایی‌ها و کرنش‌های آنها در دو حالت تجربی و تحلیلی بهنگام کرده و از این طریق نمودار غیرخطی تنش-کرنش فولاد استفاده شده در ورق‌ها را به دست آوردند. Schlune et al. [۱۱] از طریق اندازه‌گیری کمیت‌های استاتیکی و دینامیکی مانند کرنش، جابجایی، نیرو، و فرکانس‌های ویژه برای یک پل، و با بهنگام سازی پارامترهایی از قبیل مدول الاستیسیته قوس و شاه‌تیرهای بتنی در مدل اجزای محدود پل، ارزیابی مناسبی از رفتار پل انجام دادند. de-Carvalho et al. [۱۲] با استفاده از



شکل ۲- جزئیات سیستم اتصال گویسان

در موارد عملی با اعمال لنگر سفت شدگی به غلاف، پیچ اتصال سفت می‌گردد. سفت شدگی پیچ اتصال باعث ایجاد پیش کشیدگی در آن و به تبع آن پیش فشردگی در غلاف می‌گردد. نیروی انتقالی توسط اتصال، برآیند نیروی حاصل از این پیش‌تنیدگی و نیروی محوری ناشی از بار خارجی خواهد بود. همچنین در عمل به دلیل وجود بی‌دقتی‌های اجتناب‌ناپذیر در ابعاد، فاصله‌هایی بین سطوح تماس غلاف با مخروط و گوی به وجود خواهد آمد. میزان این فاصله‌ها نیز بر مکانیزم انتقال نیرو تأثیر می‌گذارد. یک شبکه دو لایه تعداد زیادی از این اتصالات را که درجه سفت شدگی و میزان فاصله بین قطعات آن‌ها نامشخص است، شامل می‌شود. در نتیجه رفتار اتصال که از طریق نمونه‌های تنها و جدای از سازه تعیین شده باشد، نمی‌تواند بیانگر رفتار واقعی اتصال در شبکه دو لایه باشد. به همین دلیل در تحقیق حاضر به مطالعه رفتار اتصال در کل سازه پرداخته شده است.

۳- شبکه دو لایه با سیستم اتصال گویسان

یک شبکه دو لایه با پیکربندی استاندارد دو راهه روی دو راهه با ابعاد کلی 424.2 cm در 565.6 cm در پلان و ارتفاع (فاصله دو لایه پایین و بالا) 100.0 cm برای انجام این تحقیق در نظر گرفته شد (شکل ۳). این ابعاد با توجه

آن به صورت تجربی استخراج گردید. از طریق کاهش تفاوت این فرکانس‌های تجربی با فرکانس‌های تحلیلی حاصل از مدل اجزای محدود تهیه شده برای شبکه، مدل بهنگام شده و خصوصیات مقطع المان تیری جایگزین اتصال در مدل به دست آمد. جهت کنترل نتایج، توابع پاسخ فرکانسی شبکه حاصل از آزمایش‌های مودال و مدل اجزای محدود بهنگام شده با یکدیگر مقایسه گردید.

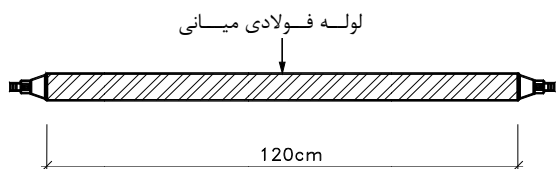
۲- سیستم اتصال گویسان

سیستم اتصال گویسان یکی از سیستم‌های اتصالی است که به صورت گسترده در ساخت شبکه‌های دو لایه پیش ساخته به کار می‌رود. این سیستم که در شکل ۱ نشان داده شده است اجازه می‌دهد تا ۱۴ عضو لوله‌ای در جهات مختلف به یکدیگر متصل گردند.



شکل ۱- اتصال چند عضو در شبکه دو لایه توسط سیستم اتصال گویسان

جزئیات سیستم اتصال گویسان مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. یک گوی فولادی آهنگری شده در محل تقاطع محور طولی اعضای به هم متصل شده واقع می‌شود. قطعه مخروطی انتهایی به انتهای لوله جوش شده است. یک پیچ مقاومت بالا از قطعه مخروطی انتهایی عبور کرده و به کمک یک غلاف به درون گوی پیچ می‌شود. از پین به منظور مقید کردن پیچ به غلاف استفاده می‌شود تا امکان چرخاندن پیچ فراهم آید. بازشوی روی غلاف به پین اجازه حرکت داده و از طریق آن می‌توان میزان ورود پیچ به درون گوی را کنترل کرد.



شکل ۴- یک عضو پیش ساخته شبکه دو لایه

۴- مدل اجزای محدود شبکه دو لایه

یک مدل اجزای محدود مناسب از شبکه دو لایه مورد مطالعه برای فرایند بهنگام سازی مدل و نیز بررسی‌های اولیه تهیه گردید. مدل اجزای محدود باید شامل تمام خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مهم شبکه دو لایه باشد تا قادر به مدل‌سازی رفتار واقعی شبکه و قابل بهنگام سازی باشد. با توجه به تشابه اعضای تشکیل دهنده شبکه، نحوه مدل‌سازی یک عضو شبکه به همراه دو گوی انتهایی مطابق شکل ۵-الف تشریح می‌گردد. این مدل اجزای محدود در نرم‌افزار ANSYS [۱۴] تهیه شده است.

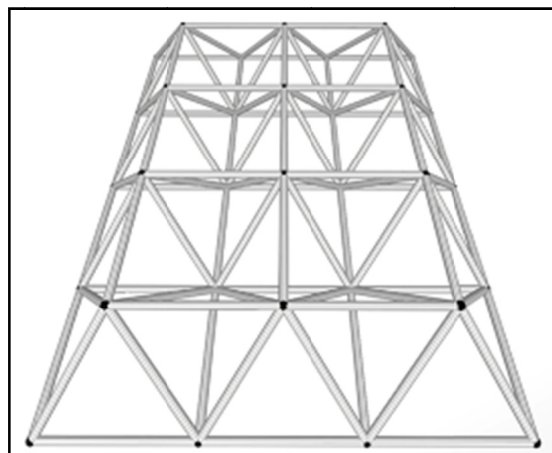
۴-۱- مدل سازی لوله فولادی میانی

با توجه به یکنواختی مشخصات هندسی و مکانیکی لوله فولادی میانی، این قسمت از اعضای شبکه با دقت کافی توسط المان‌های تیری قابل مدل‌سازی است. یک بررسی اولیه نشان داد که استفاده از تنها یک المان تیری برای مدل‌سازی این قسمت کافی نیست، زیرا در این‌صورت به دلیل عدم وجود تعداد کافی از گره‌ها، مدل قادر به برآورد صحیح شکل‌های مودی و فرکانس‌های مربوطه نخواهد بود. اما با استفاده از دو المان تیری دارای طول مساوی، دقت کافی در نتایج به دست خواهد آمد. لذا مطابق شکل ۵-ب این قسمت از لوله توسط دو المان PIPE16 در نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی گردید. PIPE16 یک المان تیری الاستیک تک محوری با شش درجه آزادی در هر یک از دو گره انتهایی خود بوده و مقطع آن لوله‌ای است. هندسه مقطع این دو المان طبق مشخصات اجرایی عبارت

به محدودیت‌های آزمایشگاهی و نزدیک بودن خصوصیات دینامیکی شبکه به سازه‌های مهندسی عمران متعارف انتخاب گردید. سیستم اتصال به کار رفته برای مونتاژ این شبکه سیستم اتصال گویسان نشان داده شده در شکل ۲ می‌باشد. این سازه از طریق مونتاژ ۹۶ عضو مطابق شکل ۴ ساخته شده است که هر عضو دارای یک لوله فولادی میانی به همراه اجزای اتصال دهنده در هر انتها شامل مخروط ناقص، غلاف و پیچ می‌باشد. این اعضا از طریق ۳۲ گوی به یکدیگر متصل شده‌اند. تمامی اعضا و گوی‌های به کار رفته در ساخت شبکه مشابه و به صورت پیش ساخته بوده و از انواعی هستند که در ساخت شبکه‌های دو لایه تمام مقیاس در موارد عملی به کار برده می‌شوند. وزن تقریبی کل سازه برابر 855 kgf (معادل جرم $0.8716 \text{ kgf.s}^2/\text{cm}$) می‌باشد.



(الف)



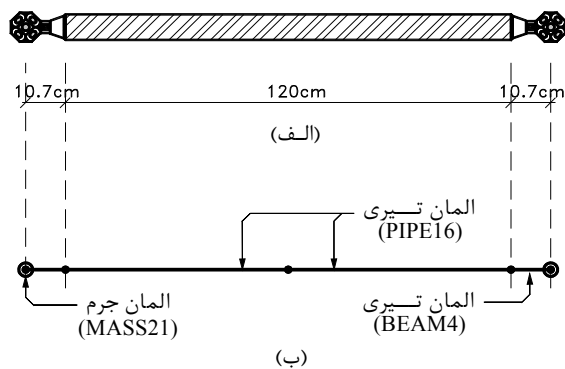
(ب)

شکل ۳- (الف) نمای کلی و (ب) شکل شماتیک از شبکه دو لایه مورد مطالعه

MASS21 یک المان جرم سازه‌ای تک گرهی با شش درجه آزادی بوده که در کار حاضر تنها از سه درجه آزادی انتقالی آن استفاده شده است. جرم‌های اعمال شده به گره‌های متناظر با محل گوی در مدل اجزای محدود متناسب با تعداد اعضای متصل به گوی بوده و مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- جرم اتصالات در مدل اجزای محدود

تعداد اعضای متصل به گوی	3	5	6	7	8
جرم متمرکز ($10^{-3} \text{kgf.s}^2/\text{cm}$)	4.31	5.84	6.60	7.36	8.13



شکل ۵- (الف) مدل فیزیکی یک عضو شبکه به همراه دو گوی انتهایی و (ب) مدل تحلیلی متناظر

۵- آزمایش مودال

توابع پاسخ فرکانسی شبکه دو لایه مورد مطالعه در بازه فرکانسی صفر تا ۱۰۰ هرتز از طریق آزمایش مودال اندازه‌گیری گردید. برای آنکه شرایط تکیه گاهی حداقل تأثیر را بر خصوصیات سازه مورد آزمایش داشته باشد، سازه تحت شرایط تکیه‌گاهی آزاد مورد آزمایش قرار گرفت. ضمن اینکه این شرایط تکیه‌گاهی قابل اطمینان‌ترین عملکرد را حین آزمایش خواهد داشت. برای این منظور سازه توسط چهار فنر آویزان گردید و محل‌های

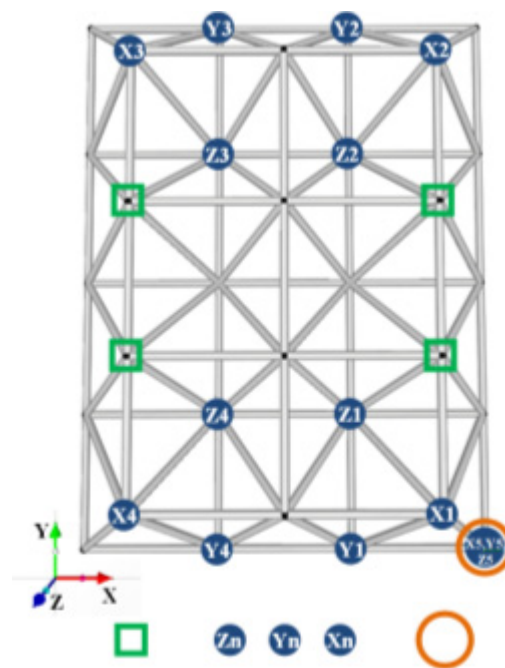
است از قطر خارجی 7.64 cm و ضخامت 0.35 cm، و خصوصیات مصالح آن به صورت مدول الاستیسته $2.05 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ و چگالی جرمی $8.005 \times 10^{-6} \text{ kgf.s}^2/\text{cm/cm}^3$ در نظر گرفته شده است.

۴-۲- مدل سازی اتصالات انتهایی اعضا

هدف اصلی بهنگام سازی در کار حاضر تعیین رفتار سیستم اتصال گویسان در شبکه دو لایه است. مدل سازی این سیستم اتصالی باید شامل سختی آن در درجات آزادی مختلف بوده و در ضمن از سادگی لازم برای استفاده در موارد عملی برخوردار باشد. مناسب‌ترین المانی که این ویژگی‌ها را تأمین نماید، المان تیری است. لذا در مدل اجزای محدود، حد فاصل بین مرکز گوی تا محل جوش قطعه مخروطی انتهایی به لوله فولادی توسط یک المان BEAM4 به طول 10.7 cm مدل سازی شده است (شکل ۵-ب). BEAM4 یک المان قابی الاستیک تک محوری با شش درجه آزادی در هر یک از دو گره انتهایی خود است و چون مقطع آن از شکل مشخصی برخوردار نیست، هر ترکیبی از مشخصات هندسی مقطع (سطح مقطع، ممان اینرسی‌های خمشی و پیچشی) را به طور مستقل می‌تواند مدل‌سازی نماید. در واقع این المان متناظر با قسمتی از گوی بعلاوه پیچ، غلاف و قطعه مخروطی انتهایی در انتهای اعضای شبکه است. تعیین مشخصات هندسی مقطع این المان، هدف بهنگام سازی در کار حاضر است و هر یک از این مشخصات به همراه طول و خصوصیات مصالح المان، نیمه صلبیت اتصال در درجات آزادی مختلف را نشان می‌دهد. خصوصیات مصالح برای این المان به صورت مدول الاستیسته برابر با $2.05 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ در نظر گرفته شده است. جرم اجزای تشکیل دهنده اتصال شامل مخروط انتهایی، غلاف، پیچ و گوی از طریق اندازه‌گیری به دست آمد. همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، این جرم به صورت متمرکز و با استفاده از المان MASS21 در هر یک از گره‌های منطبق با محل گوی در مدل اعمال گردید. المان

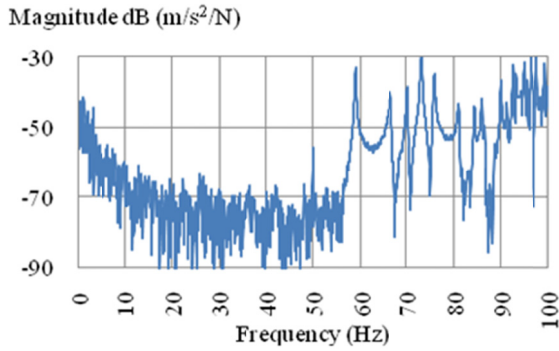
آمد. علت استفاده از این زمان نسبتاً طولانی برای ثبت ارتعاش سازه، حصول دقت کافی در توابع پاسخ فرکانسی $(\Delta f = 1/T = 0.0625 \text{ Hz})$ بود. از آنجایی که هدف از اندازه‌گیری توابع پاسخ فرکانسی، استخراج فرکانس‌های ارتعاش مربوط به تمام شکل مودهای شبکه در محدوده فرکانسی مورد نظر بوده است، اعمال تحریک و اندازه‌گیری پاسخ در هر سه جهت X ، Y و Z انجام گرفت. محل شتاب سنج بر اساس قرارگیری روی آن گوی از شبکه که دارای حداکثر شتاب میانگین شکل‌های مودی در محدوده فرکانسی مورد نظر بود، به تفکیک در سه جهت به کمک زیربرنامه MODPLAN تعیین گردید. گوی‌های واقع در چهار گوشه شبکه دارای این خاصیت در هر سه جهت می‌باشند و به طوری که در شکل ۶ نشان داده شده است، یکی از این گوی‌ها برای نصب شتاب‌سنج‌ها انتخاب گردید. شکل ۷ تصویری از شتاب‌سنج‌های نصب شده در سه جهت روی این گوی شبکه دو لایه را نشان می‌دهد. بهترین محل‌های اعمال ضربه چکش به تفکیک در سه جهت به کمک زیربرنامه MODPLAN و بر اساس عدم قرارگیری بر نقاط گرهی شکل‌های مودی و حداقل سرعت میانگین تعیین گردید. این محل‌ها و جهت مربوطه در شکل ۶ با $X1$ تا $X4$ ، $Y1$ تا $Y4$ و $Z1$ تا $Z4$ نشان داده شده‌اند. علاوه بر این، به دلیل اینکه تابع پاسخ فرکانسی نقطه‌ای (که در آن درجه آزادی اعمال ضربه و اندازه‌گیری پاسخ یکی است) از اهمیت ویژه‌ای در آنالیز مودال تجربی برخوردار است، لازم است در گوی محل نصب شتاب‌سنج‌ها نیز ضربه چکش در سه جهت اعمال شود که این محل‌های اعمال ضربه با $X5$ ، $Y5$ و $Z5$ در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. با ثابت بودن محل شتاب‌سنج‌ها، به نوبت در محل‌های مربوطه ضربه چکش اعمال گردید که با هر ضربه، سه تابع پاسخ فرکانسی ثبت می‌شد. شدت ضربه اعمالی در کمترین حد ممکن برای جلوگیری از ایجاد رفتار غیرخطی در سازه در نظر گرفته شد. در مجموع ۴۵ تابع پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری گردید که شکل ۸ تعدادی از آنها را با درجه

مناسب برای تعلیق سازه، به کمک نتایج آنالیز مودال مدل اجزای محدود در نرم افزار ANSYS و با استفاده از زیر برنامه MODPLAN از بسته نرم افزاری ICATS [۱۵]، بر اساس حداقل جابجایی میانگین شکل‌های مودی در محدوده فرکانسی مذکور به دست آمد. این نقاط در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. با توجه به جرم قابل توجه سازه، فنرهای فولادی با سختی مناسب برای این منظور تهیه شد. سختی فنرهای به کار رفته برای آویزان کردن سازه طوری انتخاب گردید که فرکانس ارتعاش مربوط به اولین شکل مود انعطاف پذیر سازه حداقل پنج برابر فرکانس ارتعاش مربوط به آخرین شکل مود صلب سازه باشد [۱۶].



شکل ۶- محل نصب شتاب‌سنج‌ها، اعمال ضربه و تعلیق سازه

اعمال تحریک توسط یک چکش ضربه دارای نیرو سنج انجام شده و پاسخ حاصله در سازه از طریق سه شتاب سنج متصل به سازه در جهات افقی X ، افقی Y و قائم Z اندازه‌گیری گردید. سیگنال‌های تحریک و پاسخ توسط یک دستگاه آنالیزر طیفی چهار کاناله برای مدت زمان $T=16 \text{ sec}$ ثبت شده و با پردازش این سیگنال‌ها تابع پاسخ فرکانسی متناظر با درجات آزادی مورد نظر به دست



(ج)

شکل ۸- چند نمونه از توابع پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده در درجات آزادی: (الف) X4-Z5، (ب) Y2-X5 و (ج) Z4-X5

۶- بهنگام سازی مدل اجزای محدود

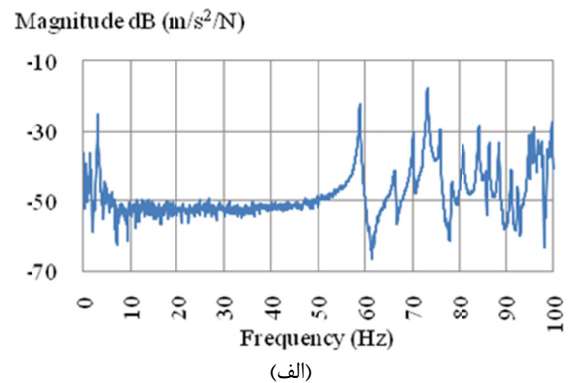
در حالت کلی، روش‌های بهنگام سازی مدل اجزای محدود می‌توانند به سه دسته مستقیم، غیر مستقیم و یادگیری ماشین تقسیم شوند. روش‌های مستقیم شامل روش‌هایی هستند که در آنها یکایک عناصر ماتریس‌های سیستم (سختی و جرم) در مدل اجزای محدود اولیه، برای رسیدن به نتایج تجربی مستقیماً تنظیم می‌شوند [۱۷]. در روش‌های غیر مستقیم که رایج‌ترین روش‌های بهنگام سازی محسوب می‌شوند، مقادیر پارامترهای انتخابی طوری اصلاح می‌گردند که تفاوت بین پاسخ‌های تحلیلی حاصل از مدل اجزای محدود اولیه و پاسخ‌های تجربی اندازه‌گیری شده متناظر، کمینه شود. این روش‌ها اساساً بر تکنیک‌های بهینه سازی استوار هستند [۱۸]. روش‌های یادگیری ماشین مانند: روش شبکه عصبی، روش تحلیل موجک و روش تئوری فازی به عنوان دسته دیگری از روش‌های بهنگام سازی مطرح هستند که در آنها با یادگیری تشخیص الگوهای پیچیده و انجام تصمیمات هوشمند از روی اطلاعات، عمل بهنگام سازی به صورت خودکار قابل انجام است [۱۹].

در تحقیق حاضر، بهنگام سازی مدل اجزای محدود شبکه دو لایه از طریق روش غیر مستقیم انجام شده است. از آنجا که انتخاب پاسخ‌ها و پارامترها و نیز چگونگی تعریف

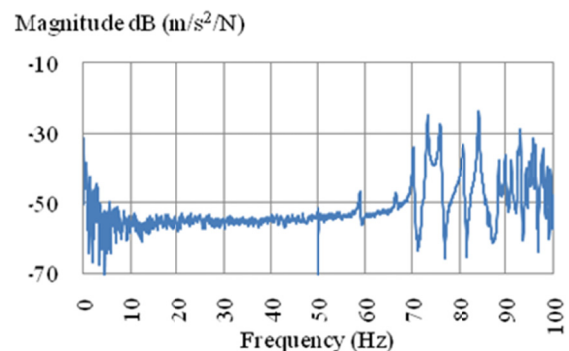
آزادی مربوط به اعمال تحریک و اندازه‌گیری پاسخ نشان می‌دهد. هر تابع پاسخ فرکانسی، میانگین پنج بار اعمال ضربه است که این تعداد بر اساس عدم تغییر قابل توجه در تابع پاسخ فرکانسی میانگین انتخاب گردید. روی این توابع پاسخ فرکانسی کنترل‌های معمول برای اطمینان از صحت اندازه‌گیری‌ها، مانند بررسی تابع Coherence، تکرار پذیری و عمل متقابل انجام گرفت.



شکل ۷- سه شتابسنج برای اندازه‌گیری پاسخ سازه در سه جهت



(الف)



(ب)

جدول ۲- فرکانس‌های ارتعاش هشت مود اول شبکه دو لایه حاصل از آنالیز مودال تجربی

شماره مود ارتعاشی	1	2	3	4	5	6	7	8
فرکانس (Hz)	3.125	58.88	66.06	70.06	72.25	73.06	75.56	78.38

به دلیل وجود عدم قطعیت‌های قابل توجه در فرایند مدل‌سازی ریاضی هر رفتار واقعی، در وهله اول پارامترهای زیادی از مدل می‌توانند برای اصلاح یا تنظیم در فرایند بهنگام سازی در نظر گرفته شوند. اما برای جلوگیری از نامعین شدن مسئله بهنگام سازی، لازم است تعداد پارامترها در حداقل ممکن باشد و انتخاب آنها با توجه به معیارهای زیر صورت گیرد:

- شامل عدم قطعیت‌های مهم در مدل‌سازی باشند،
- متناسب با هدف فرایند بهنگام سازی انتخاب شده باشند، و
- پاسخ‌های مورد استفاده در بهنگام سازی دارای حساسیت مناسب نسبت به آنها باشند.

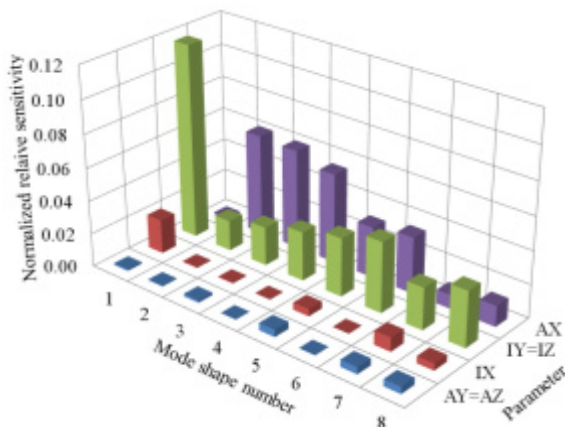
همانطور که قبلاً گفته شد، عمده عدم قطعیت‌های به وجود آمده در یک شبکه دو لایه در ناحیه اتصالات آن رخ می‌دهد و این به دلیل رفتار پیچیده این سیستم اتصال و شرایط ایجاد شده در آن در هنگام مونتاژ و برپایی شبکه است. لذا با توجه به اینکه در کار حاضر تعیین رفتار این سیستم اتصال مد نظر می‌باشد، خصوصیات مربوط به المان تیری جایگزین اتصال در مدل اجزای محدود انتخاب مناسبی بعنوان پارامترهای بهنگام سازی هستند. از آنجایی که جرم اتصال با دقت مطلوب اندازه‌گیری و در مدل اجزای محدود لحاظ گردیده است، خصوصیات تعیین کننده سختی این المان یعنی سطح مقطع کل (AX)، سطح مقطع برشی (AY=AZ)، ممان اینرسی خمشی (IY=IZ) و ممان اینرسی پیچشی (IX) گزینه‌های محتمل به عنوان پارامتر در فرایند بهنگام سازی خواهند بود.

مسئله بهینه سازی و حل آن در این روش حائز اهمیت می‌باشد در ادامه به تشریح آنها پرداخته شده است.

۶-۱- انتخاب پاسخ‌ها و پارامترها

یکی از خصوصیات دینامیکی سازه‌ها که استفاده از آنها در بهنگام سازی مدل اجزای محدود مناسب است، فرکانس‌های طبیعی هستند. فرکانس‌های طبیعی از جمله ویژگی‌های سراسری یک سازه بوده و نیز نسبت به دیگر خصوصیات دینامیکی با سهولت بیشتری قابل اندازه‌گیری می‌باشند. نظر به اهمیت فرکانس‌های طبیعی یک سازه در تعیین رفتار آن در مقابل بارهای دینامیکی، اگر یک مدل اجزای محدود بتواند فرکانس‌های طبیعی مدل فیزیکی متناظر را با دقت مناسبی برآورد نماید، مطلوب خواهد بود. در کار حاضر، فرکانس‌های مربوط به هشت مود ارتعاش اول سازه به عنوان پاسخ مورد استفاده قرار گرفته است تا با مقایسه آنها در دو حالت تجربی و تحلیلی، مدل اجزای محدود بهنگام گردد. برای استخراج فرکانس‌های طبیعی تجربی شبکه دو لایه مورد مطالعه، آنالیز مودال تجربی در زیر برنامه MODNT از بسته نرم افزاری ICATS انجام شد. در ابتدا با بررسی جداگانه چند تابع پاسخ فرکانسی نقطه‌ای و انتقالی و استفاده از روش یکدرجه آزادی CIRCLE-FIT، یک دید کلی از فرکانس‌های طبیعی سازه به دست آمد. سپس با مطالعه همزمان ۴۵ تابع پاسخ فرکانسی (اندازه‌گیری شده در سه جهت انتقالی) به روش چند درجه آزادی GLOBAL-M، مقدار نهایی هشت فرکانس طبیعی اول شبکه دو لایه به دست آمدند که در جدول ۲ ملاحظه می‌شوند. با توجه به تحریک سازه در سه جهت و انتخاب نقاط تحریک و پاسخ به نحوی که تمامی مودها در توابع پاسخ فرکانسی سهیم باشند، انتظار می‌رود فرکانس ارتعاش تمامی مودها در این محدوده فرکانسی ثبت شده باشند.

حساسیت مربوط به پارامترهای مختلف نشان می‌دهد که فرکانس‌های شبکه نسبت به سطح مقطع و ممان اینرسی خمشی المان تیری مربوط به اتصال دارای بیشترین حساسیت بوده و کمترین حساسیت مربوط به سطح مقطع برشی المان تیری اتصال است. لذا در کار حاضر، با توجه به اینکه رفتار تمامی اتصالات موجود در شبکه یکسان فرض شده است، سه پارامتر سطح مقطع کل، ممان اینرسی خمشی و ممان اینرسی پیچشی المان تیری جایگزین اتصال برای بهنگام سازی مدل اجزای محدود شبکه دو لایه در نظر گرفته شده است که به ترتیب متناظر با سختی محوری، سختی خمشی و سختی پیچشی اتصال هستند. این سه پارامتر توسط بردار سه مؤلفه‌ای پارامترهای بهنگام سازی $P = \{P_1, P_2, P_3\}$ نشان داده می‌شوند.



شکل ۹- حساسیت فرکانس‌های طبیعی شبکه نسبت به خصوصیات المان تیری جایگزین اتصال

۲-۶- مسئله بهینه سازی

در تحقیق حاضر، بهنگام سازی مدل اجزای محدود به روش غیر مستقیم و بر اساس بهینه سازی انجام شده است. نحوه فرمول بندی تابع هدف و الگوریتم بکار رفته برای بهینه سازی در این روش بهنگام سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در ادامه به توضیح آنها پرداخته خواهد شد.

برای تعیین میزان حساسیت هر یک از هشت فرکانس طبیعی شبکه دو لایه نسبت به پارامترهای کاندید شده برای بهنگام سازی، یک آنالیز حساسیت انجام شد. حساسیت عبارت است از نرخ تغییر یک پاسخ مشخص سازه به ازای تغییر یک پارامتر مشخص آن. حساسیت نرمال شده نسبی با استفاده از تقریب تفاوت محدود مرکزی از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

که S_{ij} حساسیت نرمال شده نسبی، R_i (برابر ۱ تا ۸) فرکانس‌های طبیعی حاصل از آنالیز مودال تحلیلی شبکه دو لایه، P_j (j برابر ۱ تا ۴) سطح مقطع کل، سطح مقطع برشی، ممان اینرسی خمشی و ممان اینرسی پیچشی المان تیری جایگزین اتصال در مدل اجزای محدود، و ΔP_j مقدار انحراف پارامتر P_j است. برای انجام محاسبات حساسیت از همان مدل تحلیلی مورد استفاده در بهنگام سازی (تشریح شده در بخش ۴) استفاده شد. مقادیر P_j مانند لوله فولادی میانی لحاظ گردید که برای آن سطح مقطع کل، سطح مقطع برشی، ممان اینرسی خمشی و ممان اینرسی پیچشی به ترتیب 8.02 cm^2 ، 4.01 cm^2 ، 53.34 cm^4 و 106.74 cm^4 می‌باشند. مقدار انحراف پارامتر ΔP_j برابر $0.01P_j$ در نظر گرفته شد. از طریق آنالیز مودال مدل اجزای محدود شبکه دو لایه در نرم افزار ANSYS فرکانس‌های طبیعی R_i به ازای مقادیر $P_j - \Delta P_j$ ، P_j و $P_j + \Delta P_j$ به دست آمد و سپس مقادیر حساسیت از رابطه (۱) محاسبه گردید.

شکل ۹ مقادیر حساسیت نرمال شده نسبی فرکانس ارتعاش هشت شکل مود شبکه دو لایه را نسبت به مشخصات مقطع المان تیری جایگزین اتصال نشان می‌دهد. مقادیر حساسیت بر حسب درصد بوده و به عنوان نمونه در صورتی که سطح مقطع کلیه المان‌های تیری جایگزین اتصال ۱٪ افزایش یابد، فرکانس مود ارتعاشی دوم شبکه ۰.۰۶۱٪ افزایش خواهد یافت. مقایسه مقادیر

۶-۲-۱- تابع هدف و متغیرهای بهینه سازی

با توجه به پاسخ‌های در نظر گرفته شده برای بهنگام سازی که فرکانس‌های طبیعی شبکه دو لایه هستند، تابع هدف باید محتوی تفاوت بین فرکانس‌های طبیعی تحلیلی و تجربی متناظر باشد. یک روش مناسب و کارآمد [۲۰] برای فرمول بندی تابع هدف روش حداقل مربعات خطاها است که به یک روش رایج در حل مسائل بهنگام سازی تبدیل شده است. در این تحقیق تابع هدف به صورت زیر تعریف گردید:

$$f(P) = \sum_{i=1}^8 \left(\frac{f_i^{exp} - f_i^{ana}(P)}{f_i^{exp}} \right)^2 \quad (2)$$

که در آن $f(P)$ تابع هدف موضوع کمینه سازی، f_i^{exp} فرکانس طبیعی تجربی i ام شبکه، f_i^{ana} فرکانس طبیعی تحلیلی (حاصل از مدل اجزای محدود) i ام شبکه، و P بردار پارامترهای بهنگام سازی است. بدین ترتیب تابع هدف متشکل از هشت جمله خواهد بود که هر یک نشان‌دهنده مربع خطای فرکانس ارتعاش یکی از مودهای تحلیلی شبکه نسبت به فرکانس ارتعاش مود تجربی متناظر آن است. از آنجا که در کار حاضر توابع پاسخ فرکانسی تجربی در هر سه جهت انتقالی و در نقاط مناسبی از سازه که به طور میانگین از جانب تمام مودها دارای تحریک بوده اندازه‌گیری شده است، می‌توان گفت که تمامی فرکانس‌های طبیعی تجربی شبکه از این توابع پاسخ فرکانسی قابل تشخیص است. لذا بین این فرکانس‌های تجربی و فرکانس‌های طبیعی حاصل از آنالیز مودال مدل اجزای محدود که طبیعتاً شامل همه فرکانس‌های شبکه است، به ترتیب تناظر یک به یک برقرار شده است.

متغیرهای بهینه سازی در واقع همان پارامترهای بهنگام سازی هستند که توسط بردار سه مؤلفه‌ای $P = \{P_1, P_2, P_3\}$ نشان داده شده و به ترتیب سطح مقطع، ممان اینرسی خمشی و ممان اینرسی پیچشی المان تیری جایگزین سیستم اتصال گویسان در مدل اجزای محدود شبکه دو لایه هستند. در فرایند بهینه

سازی لازم است حدود بالا و پایین منطقی و مناسب برای متغیرها تعیین گردد تا جواب‌ها از نظر فیزیکی بی‌معنی یا غیر ممکن نباشند. در صورتی که نسبت حد بالا و پایین خیلی بزرگ باشد، حل مسئله بهینه سازی مشکل خواهد بود. برای تعیین حد بالای متغیرهای بهینه سازی، خصوصیات مقطع لوله فولادی میانی ملاک قرار داده شد، به طوری که حد بالا برای متغیر سطح مقطع برابر 8.02 cm²، متغیر ممان اینرسی خمشی برابر 53.34 cm⁴ و متغیر ممان اینرسی پیچشی برابر 10.67 cm⁴ منظور گردید. نسبت حد بالا و پایین متغیرهای بهینه سازی با توجه به عملکرد انعطاف پذیر اتصال برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شد.

۶-۲-۲- الگوریتم بهینه سازی

برای انجام بهنگام سازی مدل اجزای محدود شبکه دو لایه و تعیین پارامترهای بهنگام سازی، تابع هدف در رابطه (۲) باید کمینه سازی گردد. از آنجایی که مسئله بهینه سازی در کار حاضر از پیچیدگی‌هایی نظیر مشخص نبودن شکل صریح تابع هدف، لزوم یافتن کمینه سراسری تابع هدف و عدم وجود حدس اولیه مناسب برای متغیرهای بهینه سازی برخوردار است، لازم است از روش‌های تکاملی برای این منظور استفاده گردد. یکی از این روش‌ها که در مسائل بهنگام سازی مورد استفاده قرار گرفته است، روش الگوریتم ژنتیک بوده و از کارایی مناسبی در حل مسائل بهینه سازی غیر مقید برخوردار است [۲۱]. از آنجایی که الگوریتم ژنتیک بر پایه قانون طبیعی بقای مناسبترین استوار است، تلاش می‌شود که در آن تابعی به نام تابع برازندگی بیشینه گردد. برای استفاده از الگوریتم ژنتیک در مسائل بهینه سازی که یافتن حداقل تابع هدف دنبال می‌گردد، لازم است تابع هدف به تابع برازندگی تبدیل گردد که یک روش آن عبارت است از [۲۲]:

$$F(P) = \frac{1}{1 + f(P)} \quad (3)$$



شکل ۱۰- فلوچارت کلی مراحل بهنگام سازی



شکل ۱۱- چرخه تکامل در الگوریتم ژنتیک

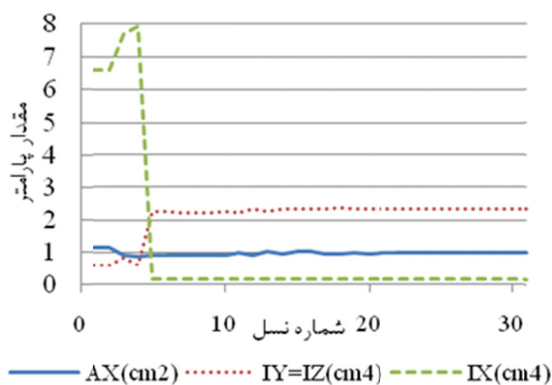
شکل ۱۱ عملیات انجام شده در چرخه تکامل مربوط به الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در مرحله زوج شدن، ابتدا یک زوج به عنوان والدین انتخاب شدند. به این صورت که از بین اعضای نسل دو عضو به صورت اتفاقی انتخاب و از بین آنها هر کدام مقدار برازندگی بزرگتری داشت، به عنوان والد اول انتخاب گردید. با تکرار این عمل والد دوم نیز انتخاب گردید. طی مرحله جفت گیری، دو فرزند از این والدین در طی چهار گام رمز نگاری، تقاطع، جهش و رمزگشایی تولید گردید. در گام رمز نگاری والدین با تغییر مبنا از دهدهی به دودویی، به کروموزم تبدیل شدند. با توجه به اینکه اعداد دودویی شانزده بیتی در نظر گرفته شده‌اند، هر کروموزم شامل شانزده ژن بود. در گام تقاطع کروموزم‌های دو والد از یک محل اتفاقی (بین ژن دوم تا ژن پانزدهم) قطع شده و با تعویض ژن‌های سمت راست محل قطع بین دو والد، کروموزم‌های دو فرزند جدید ایجاد گردیدند. در گام جهش برای هر ژن از کروموزم‌های فرزندان، یک عدد اتفاقی بین صفر و یک تولید گردید. اگر این عدد اتفاقی از مقدار μ کمتر بود،

که در آن تابع هدف و $f(P)$ تابع برازندگی است. بدین ترتیب مقدار تابع برازندگی با افزایش تطابق بین نتایج تحلیلی و تجربی به سمت یک و با کاهش آن به سمت صفر میل می‌کند.

۳-۶- مراحل کلی بهنگام سازی

نحوه انجام بهنگام سازی مدل اجزای محدود به روش غیر مستقیم و با استفاده از الگوریتم ژنتیک در فلوچارت شکل ۱۰ خلاصه شده است. در ابتدا یک جمعیت اولیه از پارامترهای بهنگام سازی به صورت اتفاقی و با توجه به حدود بالا و پایین هر یک از پارامترها تولید گردید. تعداد اعضای جمعیت ۱۰۰ برابر تعداد پارامترهای بهنگام سازی یعنی برابر ۳۰۰ انتخاب شد. به ازای هر عضو (یک بردار سه مؤلفه‌ای از پارامترهای بهنگام سازی $P = \{P_1, P_2, P_3\}$) آنالیز مودال مدل اجزای محدود برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی انجام شده و با استفاده از فرکانس‌های طبیعی تجربی، تابع برازندگی مربوط به هر عضو از رابطه (۳) ارزیابی گردید. از آنجایی که در این مرحله معیار توقف ارضا نمی‌شود، مرحله بعدی چرخه تکامل در فرایند الگوریتم ژنتیک خواهد بود که در آن دو عضو جدید از بردار پارامترهای بهنگام سازی تولید و جایگزین دو عضو با کمترین مقدار برازندگی خواهد شد. مراحل چرخه تکامل، آنالیز مودال مدل و ارزیابی تابع برازندگی تکرار خواهد شد تا معیار توقف ارضا گردد. برای ارضای معیار توقف سه شرط باید توأمان تأمین گردد: (۱) تعداد اعضای جدید تولید شده برابر تعداد اعضای جمعیت اولیه باشد تا یک نسل جدید حاصل شده باشد، (۲) قدر مطلق تفاوت نسبی بین بالاترین مقدار برازندگی حاصل شده در دو نسل متوالی از تلورانس همگرایی η کوچک‌تر باشد و (۳) تعداد وقوع متوالی این شرط همگرایی از L بزرگ‌تر باشد. هنگامی که معیار توقف ارضا گردد، مقدار پارامترهای بهنگام سازی مشخص شده و مدل اجزای محدود بهنگام خواهد شد.

Lanczos انجام گرفت. برای بهنگام سازی مدل اجزای محدود شبکه دو لایه، ابتدا مدل اجزای محدود آن در نرم‌افزار ANSYS ساخته شد و سپس با اجرای برنامه تهیه شده، مراحل مختلف فرایند بهنگام سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک طی گردید. فرایند بهنگام سازی چندین بار در شرایط یکسان انجام شد و بالاترین برازندگی به دست آمده مد نظر قرار گرفت. شکل ۱۲ نحوه همگرایی پارامترها و بهبود برازندگی با افزایش نسل را در فرایند جستجوی اتفاقی انجام شده توسط الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد. به طوری که ملاحظه می‌گردد پس از تولید ۳۱ نسل همگرایی لازم حاصل و معیار توقف ارضا گردید که روی یک کامپیوتر رومیزی با سرعت پردازشگر 2.0 GHz نزدیک به ۳ ساعت به طول انجامید. برازندگی به دست آمده در نسل آخر برابر ۰/۹۹۳ بوده که حاکی از تطابق خوب فرکانس‌های طبیعی تحلیلی و تجربی است. از آنجایی که تعداد اعضای نسل زیاد در نظر گرفته شد، مقدار برازندگی در جمعیت اولیه قابل توجه است. این تعداد زیاد اعضای نسل که با توجه به تجربیات قبلی لحاظ گردید، باعث می‌شود در مسئله مورد مطالعه که تابع هدف پیچیده و دارای کمینه‌های محلی زیادی است، کمینه سراسری راحت‌تر یافت شود و از پراکندگی مقادیر به دست آمده برای پارامترهای بهنگام شده در اجزای مختلف جلوگیری شود (به طور کلی در مسائل معکوس کمینه‌های محلی زیادی ممکن است وجود داشته باشند). از طرف دیگر، تعداد زیاد اعضای نسل باعث ارضای معیار توقف در تعداد کمتری از نسل‌ها می‌گردد.



آن ژن از صفر به یک تبدیل شد و بالعکس. در گام رمز گشایی کروموزم‌های فرزند از مبنای دو به مبنای ده برده شدند. در مرحله جایگزینی که آخرین مرحله از چرخه تکامل است، دو فرزند تولید شده جایگزین دو عضو از اعضای نسل شدند. این دو عضو دارای کمترین مقدار برازندگی در بین عضوهای نسل بودند. در جدول ۳ اطلاعات مرتبط با الگوریتم ژنتیک خلاصه شده است.

جدول ۳- اطلاعات مرتبط با الگوریتم ژنتیک

اندازه جمعیت (تعداد اعضای نسل)	300
تلورانس همگرایی (η)	10^{-6}
تعداد وقوع متوالی همگرایی (λ)	10
نرخ جهش (μ)	0.005
روش تقاطع	Point Crossover
روش رمزنگاری	Binary Encoding
روش زوج شدن	Tournament Paring

۷- نتایج و بحث

در کار حاضر مشخصات مقطع یک المان تیری جایگزین سیستم اتصال گویسان، از روش بهنگام سازی مدل اجزای محدود یک شبکه دو لایه و کاهش خطای بین فرکانس مودهای ارتعاشی شبکه در دو حالت تحلیلی و تجربی تعیین گردید. برای پیاده سازی مراحل مربوط به فرایند بهنگام سازی مدل اجزای محدود مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱، یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار ANSYS از طریق زبان برنامه نویسی آن تحت عنوان APDL (ANSYS Parametric Design Language) تهیه گردید. از آنجایی که مدل سازی اجزای محدود شبکه دو لایه نیز در همین نرم افزار انجام شده است، ارتباط برنامه تهیه شده و مدل اجزای محدود به طور کامل برقرار بوده، و آنالیز مودال مدل و ارزیابی تابع برازندگی که طی فرایند بهنگام سازی به دفعات زیاد انجام گردید، به راحتی امکان پذیر بود. آنالیز مودال در نرم‌افزار ANSYS برای حصول مقادیر ویژه یا همان فرکانس‌های طبیعی به روش Block

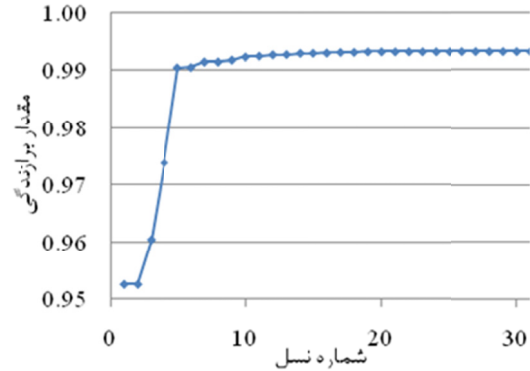
جدول ۴- خصوصیات المان‌ها در مدل بهنگام شده

سطح مقطع (cm ²)	ممان اینرسی خمشی (cm ⁴)	ممان اینرسی پیچشی (cm ⁴)	المان تیری اتصال
0.98	2.35	0.16	المان تیری لوله میانی
8.02	53.34	106.74	نسبت
0.1222	0.0440	0.0015	

جدول ۵- فرکانس‌های طبیعی تحلیلی شبکه دو لایه

شماره مود ارتعاشی	1	2	3	4	5	6	7	8
مدل بهنگام شده فرکانس (Hz)	3.123	58.04	66.74	70.42	75.00	75.03	75.06	75.12
خطا (%)	-0.05	-1.42	1.04	0.51	3.81	2.70	-0.66	-4.16
مدل اولیه فرکانس (Hz)	9.693	84.10	96.49	101.7	114.0	118.1	118.8	119.4
خطا (%)	210.2	46.1	42.8	45.1	57.8	61.6	57.2	52.4

جدول ۵ فرکانس‌های هشت مود اول ارتعاشی حاصل از مدل اجزای محدود بهنگام شده شبکه دو لایه را به همراه خطای آنها نسبت به مقدار تجربی نشان می‌دهد. بعلاوه، در این جدول فرکانس‌های حاصل از مدل اجزای محدود اولیه (قبل از بهنگام سازی) که در آن مشخصات مقطع المان تیری جایگزین اتصال مانند لوله فولادی میانی در نظر گرفته شده است، آمده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، مدل اولیه دارای خطای فاحشی در برآورد فرکانس‌های طبیعی شبکه می‌باشد. اما عملیات بهنگام سازی انجام شده موفق بوده، به طوریکه مدل تحلیلی بهنگام شده با خطای کمتر از ۵٪ قادر به شبیه سازی هشت فرکانس طبیعی واقعی شبکه دو لایه است. یک مقایسه مفیدتر بین فرکانس‌های طبیعی حاصل از مدل بهنگام شده و تجربی در شکل ۱۳ نشان داده شده است که در آن فرکانس‌های تجربی در مقابل فرکانس‌های تحلیلی، به همراه بهترین خط گذرنده از آنها ترسیم شده است. قرار گیری بسیار خوب این دو مجموعه داده بر روی



شکل ۱۲- (الف) نحوه همگرایی پارامترها و (ب) بهبود مقدار برازندگی با افزایش نسل

۷-۱- نتایج بهنگام سازی (پارامترها و پاسخ‌ها)

جدول ۴ خصوصیات مقطع المان تیری جایگزین سیستم اتصال گویسان، حاصل از بهنگام سازی مدل اجزای محدود شبکه دو لایه را نشان می‌دهد. بعلاوه، در این جدول خصوصیات مقطع المان تیری مربوط به لوله فولادی میانی نیز آورده شده است. مقایسه خصوصیات این دو المان نشان می‌دهد که عملکرد سیستم اتصال گویسان به میزان قابل توجهی از لوله میانی انعطاف پذیرتر است. ابعاد هندسی اجزای تشکیل دهنده اتصال و ناپیوستگی‌های موجود بین آنها باعث این رفتار انعطاف پذیر یا نیمه صلب اتصال می‌شود. با توجه به نسبت خصوصیات این دو المان که در جدول ارائه شده است، نیمه صلبیت در رفتار محوری اتصال کمترین، در رفتار خمشی بیشتر و در رفتار پیچشی بیشترین است که این مسئله به تأثیر متفاوت غیر یکنواختی‌ها و پیش تنیدگی موجود در اتصال بر رفتار آن در درجات آزادی مختلف مربوط می‌شود. لازم به توضیح است با وجود اینکه ممان اینرسی پیچشی المان تیری معادل اتصال نسبت به لوله فولادی میانی بسیار کوچک به دست آمده است، اما این ممان اینرسی قابل صرف نظر کردن نیست، زیرا در اینصورت مقدار فرکانس‌های طبیعی شبکه و فاصله بین آنها کاملاً متفاوت خواهد بود.

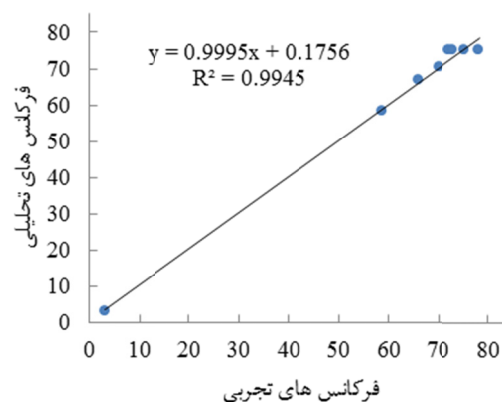
۷-۲- تطابق توابع پاسخ فرکانسی تحلیلی و

تجربی

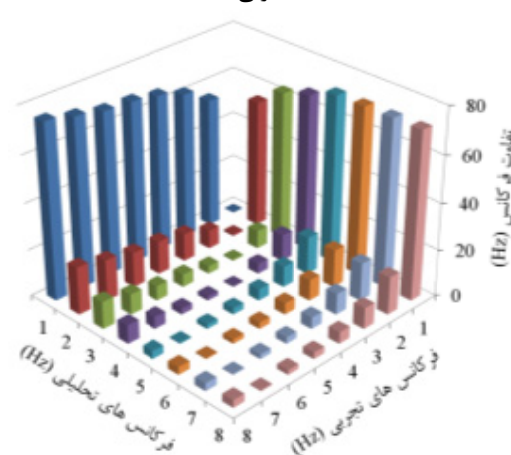
به طور کلی دسته مسائل معکوس مانند بهنگام سازی مدل اجزای محدود که در آن داده‌های اندازه‌گیری شده برای تصحیح یک مدل اجزای محدود به کار برده می‌شوند، اساساً دارای جواب منحصر به فرد نیستند [۲۱]. با این وجود استفاده از این روش برای توجیه پدیده‌های دارای عدم قطعیت که راه حل مستقیم ندارند، اجتناب ناپذیر است [۶]. بنابراین لازم است صحت مدل اجزای محدود بهنگام شده مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور در اینجا توابع پاسخ فرکانسی تحلیلی و تجربی شبکه دو لایه مقایسه می‌شوند. واضح است که در کار حاضر بهنگام سازی با هدف ایجاد انطباق بین این توابع انجام نشده است و تنها فرکانس‌های طبیعی سازه که روی این توابع به صورت بیشینه محلی ظاهر می‌گردند، در بهنگام سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

برای محاسبه توابع پاسخ فرکانسی تحلیلی شبکه دو لایه و نیز محاسبه معیارهای انطباق توابع پاسخ فرکانسی تحلیلی و تجربی، از نرم‌افزار FEMtools [۲۳] استفاده شد. مدل اجزای محدود شبکه دو لایه مشروح در قسمت ۴ با پارامترهای بهنگام شده مطابق جدول ۴ در این نرم-افزار مدل‌سازی گردید و توابع پاسخ فرکانسی شتاب (Accelerance) شبکه دو لایه در درجات آزادی مورد نظر در محدوده فرکانسی 0 تا 71 Hz با گام 0.0625 Hz (برابر با دقت اندازه‌گیری توابع پاسخ فرکانسی تجربی) به دست آمدند. این توابع به روش مستقیم و بدون استفاده از نتایج آنالیز مودال (فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی) محاسبه شدند. یک میرایی مصالح از نوع سازه‌ای به صورت ضریب مقیاس 0.01 در ماتریس سختی، برای المان‌های تیری جایگزین اتصالات در مدل در نظر گرفته شد تا مقادیر توابع پاسخ فرکانسی در محل فرکانس‌های طبیعی محدود و منطقی باشند. توابع پاسخ فرکانسی

یک خط مستقیم، شیب تقریباً برابر با یک این خط و پراکندگی کم داده‌ها حاکی از عدم وجود خصوصیات سراسری (مثل مدول الاستیسیته) نادرست در مدل و قابلیت مناسب مدل اجزای محدود در نشان دادن رفتار واقعی سازه تحت آزمایش می‌باشد. پراکندگی کوچک و توزیع اتفاقی نقاط حول خط مذکور در فرایندهای مدل‌سازی و اندازه‌گیری طبیعی است. همچنین، شکل ۱۴ تفاوت فرکانس بین تمام ترکیبات ممکن از هشت مود ارتعاش تجربی و تحلیلی را نشان می‌دهد. به طوری که ملاحظه می‌گردد مودهایی که متناظر در نظر گرفته شده‌اند، بجز در چند مورد از کمترین تفاوت فرکانس ارتعاش برخوردارند. این می‌تواند ملاکی برای صحت تناظر در نظر گرفته شده بین موده‌های تحلیلی و تجربی در مواردی که داده‌های مربوط به شکل‌های مودی برای کنترل این موضوع در دسترس نیستند، باشد.



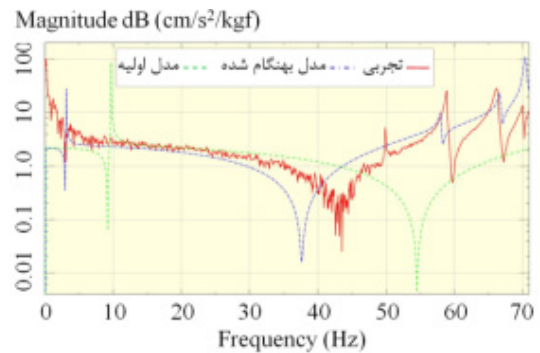
شکل ۱۳- مقایسه ترسیمی فرکانس‌های طبیعی تحلیلی و تجربی



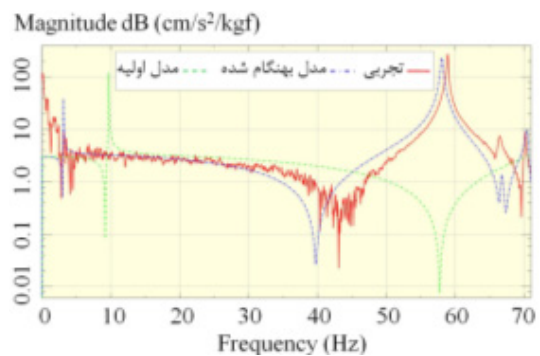
شکل ۱۴- تفاوت فرکانس بین تمام ترکیبات موده‌های تحلیلی و تجربی

تجربی نشان می‌دهند. این موضوع با توجه به اینکه تنها فرکانس‌های طبیعی شبکه دو لایه به عنوان پاسخ در بهنگام سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، قابل توجه است. برای مقایسه بهتر توابع پاسخ فرکانسی تجربی و تحلیلی، معیارهای سراسری و محلی انطباق توابع پاسخ فرکانسی مد نظر قرار داده شده‌اند که اطلاعات بیشتر در مورد آنها و روابط مربوطه در مرجع [۲۳] وجود دارند. معیار سراسری (Signature Assurance Criterion) SAC عبارت است از میزان شباهت بین دو تابع پاسخ فرکانسی، که مقدار ۱۰۰٪ برای آن نشان دهنده یکسان بودن دو تابع پاسخ فرکانسی است. معیار سراسری خطای دامنه میانگین (Average FRF Amplitude Difference) مقادیر متوسط توابع پاسخ فرکانسی را مقایسه کرده و نشان‌دهنده تفاوت نسبی میان مقادیر میانگین بر حسب درصد است. این دو معیار برای هر یک از توابع پاسخ فرکانسی شکل ۱۵ (الف) تا (ج)، قبل و پس از بهنگام سازی در جدول ۶ نشان داده شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود، با وجود اینکه در فرآیند بهنگام سازی انجام شده از توابع پاسخ فرکانسی استفاده نشده است، تا ۳۰٪/۷ انطباق بین توابع تجربی و تحلیلی مدل بهنگام شده وجود دارد و نیز حداکثر خطای دامنه میانگین در توابع ۲۰٪/۸ است. این مقادیر برای مدل اولیه به ترتیب برابر ۶/۴٪ و ۶۶/۳٪ می‌باشد که مقایسه آنها با مقادیر متناظر در مدل بهنگام شده، نشان از بهبود دقت نتایج مدل، حتی در شبیه سازی پاسخ‌هایی از سازه است که در فرآیند بهنگام سازی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. معیار محلی (Cross Signature Assurance Criterion) میزان انطباق شکلی در هر نقطه از محور فرکانس را بین توابع ارزیابی کرده و مقدار آن بین صفر تا ۱۰۰٪ متغیر است. این معیار به تغییرات مدل سازی جرم و سختی بیشترین حساسیت را دارد. معیار محلی CSF (Cross Signature Scale Factor) مقدار تفاوت در دامنه توابع پاسخ فرکانسی را ارزیابی کرده و بین صفر تا ۱۰۰٪ تغییر می‌کند. این معیار به دلیل ارتباط آن با دامنه

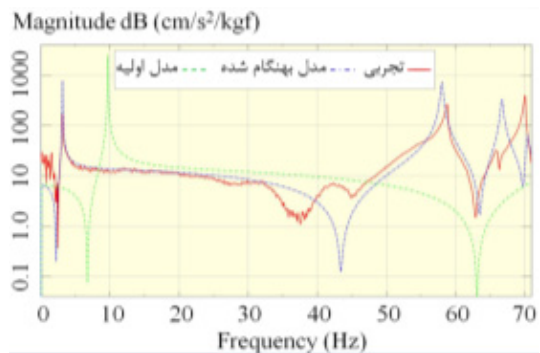
تجربی نیز در این نرم‌افزار وارد و به نحو مناسبی مقیاس شدند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۵- مقایسه چند تابع پاسخ فرکانسی تحلیلی و تجربی شبکه دو لایه (الف) X5-X5، (ب) Y5-Y5 و (ج) Z5-Z5

شکل ۱۵ (الف) تا (ج) سه تابع پاسخ فرکانسی نقطه‌ای شبکه دو لایه را حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی، به همراه همین توابع حاصل از مدل اجزای محدود قبل و پس از بهنگام سازی، در محدوده فرکانسی 0 تا 71 Hz نشان می‌دهد (درجات آزادی مربوطه در شکل ۶ معرفی شده‌اند). در حالی که توابع تحلیلی قبل از بهنگام سازی مدل کاملاً با توابع تجربی متفاوت هستند، توابع پاسخ فرکانسی مدل بهنگام شده شباهت قابل قبولی را با توابع

به طوری که ملاحظه گردید، در شبکه دو لایه مورد مطالعه در صورت صرفنظر از رفتار سیستم اتصال گویسان در مدل سازی تحلیلی، خصوصیات دینامیکی شبکه دو لایه مانند فرکانس‌های طبیعی با خطای زیادی برآورد شده و رفتار دینامیکی شبکه به درستی شبیه سازی نخواهد شد. لذا تعیین رفتار اتصال ضروری بوده و در این کار نشان داده شد که روش بهنگام سازی مدل اجزای محدود شبکه و تنها استفاده از فرکانس‌های طبیعی آن برای تعیین رفتار واقعی اتصال در حین عملکرد آن در سازه کاملاً مؤثر بوده و مدل اجزای محدود بهنگام شده‌ای حاصل گردید که ضمن ارائه تخمین بسیار خوب از فرکانس‌های طبیعی شبکه، تقریب قابل قبولی از توابع پاسخ فرکانسی آنرا نیز به دست می‌دهد.

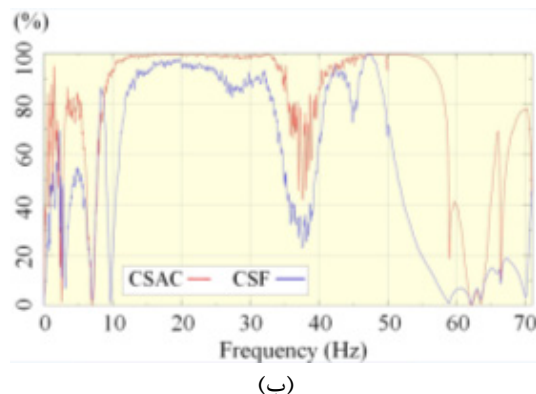
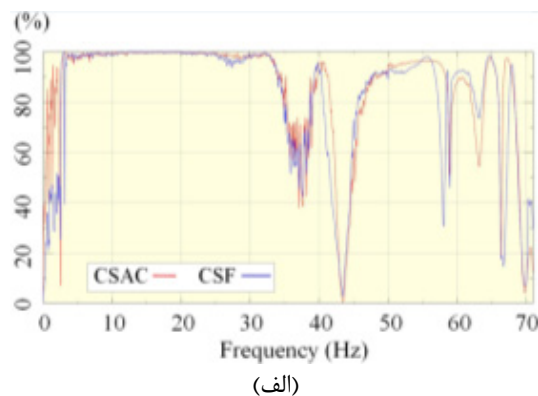
۸- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، رفتار یک نمونه سیستم اتصال گویسان در درجات آزادی مختلف، تحت تأثیر شرایط واقعی حاکم بر آن در یک شبکه دو لایه که شامل عدم قطعیت‌های متعددی است، تعیین گردید. برای این منظور با مد نظر قرار دادن رفتار دینامیکی کل شبکه، از یک روش معکوس برای تعیین رفتار سیستم اتصال استفاده شد. با تهیه یک مدل اجزای محدود برای شبکه که در آن اتصالات با یک المان تیری معادل سازی شده بودند، فرکانس‌های طبیعی سازه از طریق آنالیز مودال تئوری محاسبه شدند. فرکانس‌های طبیعی تجربی از طریق انجام آزمایش‌های مودال روی مدل فیزیکی شبکه دو لایه و انجام آنالیز مودال تجربی به دست آمدند. با کاهش تفاوت بین فرکانس‌های طبیعی تحلیلی و تجربی شبکه دو لایه از طریق الگوریتم ژنتیک، مدل اجزای محدود آن بهنگام شده و مشخصات مقطع المان تیری جایگزین سیستم اتصال در مدل تعیین گردید. مدل بهنگام شده توانست هشت فرکانس طبیعی تجربی شبکه دو لایه را به نحو

توابع، به خطاهای مدل سازی میرایی حساس تر است. دو معیار محلی اخیر که در شکل ۱۶ برای سه تابع پاسخ فرکانسی مورد نظر، در حالت قبل و پس از بهنگام سازی نشان داده شده‌اند، حاکی از بهبود تطابق توابع پاسخ فرکانسی تجربی و تحلیلی مدل بهنگام شده در قسمت اعظم محدوده فرکانسی مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۶- معیارهای سراسری تطابق توابع پاسخ فرکانسی تحلیلی و تجربی

تابع پاسخ فرکانسی	X5-X5	Y5-Y5	Z5-Z5	معدل بهنگام شده
SAC (%)	13.1	25.6	30.7	
AFAD (%)	17.2	-8.9	20.8	
معدل اولیه				
SAC (%)	6.4	1.0	0.3	
AFAD (%)	-55.5	-66.3	-36.0	



شکل ۱۶- دو معیار محلی تطابق برای سه تابع پاسخ فرکانسی شکل ۱۵ (الف) مدل بهنگام شده و (ب) مدل اولیه

پذیرتر بودن رفتار اتصال نسبت به لوله فولادی میانی در رفتار محوری کمتر و در رفتار پیچشی بیشتر مشهود است. بعنوان تأییدی بر صحت نتایج به دست آمده، مدل اجزای محدود بهنگام شده از طریق کاهش تفاوت فرکانس‌های طبیعی تحلیلی و تجربی شبکه دو لایه، توانست توابع پاسخ فرکانسی تجربی شبکه دو لایه را به صورت نسبتاً قابل قبول شبیه سازی نماید.

مطلوب شبیه سازی نماید و این حاکی از قابل بهنگام سازی بودن مدل اجزای محدود تهیه شده و مؤثر بودن روش بکار برده شده برای بهنگام سازی است. پارامترهای بهنگام شده که در واقع سطح مقطع، ممان اینرسی خمشی و ممان اینرسی پیچشی المان تیری معادل سیستم اتصال گویسان هستند، مقادیر کمتری را در مقایسه با لوله فولادی میانی نشان می‌دهند. این انعطاف

مراجع

- [1] Androic, B. (1992), "Deformations observed on systems of long span space trusses". Intl. J. Space Structures, Vol. 7, No. 3, pp. 219-222.
- [2] El-Sheikh, A.I. (1993), "Numerical analysis of space trusses with flexible member-end joints". Intl. J. Space Structures, Vol. 8, No. 3, pp. 189-197.
- [3] Davoodi, M.R., Pashaei, M.H., Mostafavian, S.A. (2007), "Experimental study of the effects of bolt tightness on the behaviour of MERO-type double-layer grids". J. Intl. Assoc. Shell and Spatial Structures, Vol. 48, No. 1, pp. 45-52.
- [4] Pashaei, M.H., Davoodi, M.R., Nooshin, H. (2006), "Effects of tightness of bolts on the damping of a MERO-type double layer grid". Intl. J. Space Structures, Vol. 21, No. 2, pp. 103-110.
- [5] Ghasemi, M., Davoodi, M.R., Mostafavian, S.A. (2010), "Tensile stiffness of MERO-type connector regarding bolt tightness". J. Appl. Sci., Vol. 10, No. 9, pp. 724-730.
- [6] Davoodi, M.R., et al. (2011), "Determination of nonlinear behavior of a ball joint system by model updating". J. Constr. Steel Res., doi:10.1016/j.jcsr.2011.11.011 (Accepted article).
- [7] Cunha, J., Foltete, E., Bouhaddi, N. (2008), "Evaluation of stiffness of semi-rigid joints in pultruded profiles from dynamic and static data by using model updating technique". Eng. Structures, Vol. 30, pp. 1024-1036.
- [8] Türker, T., Kartal, M.E., Bayraktar, A., Muvafik, M. (2009), "Assessment of semi-rigid connections in steel structures by modal testing". J. Constr. Steel Res., Vol. 65, pp. 1538-1547.
- [9] Wu, J.R., Li, Q.S. (2006), "Structural parameter identification and damage detection for a steel structure using a two-stage finite element model updating method". J. Constr. Steel Res., Vol. 62, pp. 231-239.
- [10] Kajberg, J., Lindkvist, G. (2004), "Characterisation of materials subjected to large strains by inverse modelling based on in-plane displacement fields". Intl. J. Solids and Structures, Vol. 41, pp. 3439-3459.
- [11] Schlune, H., Plos, M., Gylltoft, K. (2009), "Improved bridge evaluation through finite element model updating using static and dynamic measurements". Eng. Structures, Vol. 31, pp. 1477-1485.
- [12] de-Carvalho, R., Valente, R.A.F., Andrade-Campos, A. (2011), "Optimization strategies for non-linear material parameters identification in metal forming problems". Comp. and Structures, Vol. 89, pp. 246-255.
- [13] Nooshin, H. (1998), "Space structures and configuration processing". Progress in Structural Eng. Mater., Vol. 1, No. 3, pp. 329-336.
- [14] ANSYS, Release 12.0.1 (2009), SAS IP Inc., www.ansys.com.
- [15] ICATS, (2002), www.icats.co.uk.
- [16] Ewins, D.J. (2000), "Modal Testing: Theory, Practice and Application". Second Edition, Research Studies Press Ltd., Baldock-Hertfordshire, England.

- [17] Yang, Y.B., Chen, Y.J. (2009), "A new direct method for updating structural models based on measured modal data". Eng. Structures, Vol. 31, pp. 32-42.
- [18] Bakhtiari-Nejad, F., Rahai, A., Esfandiari, A. (2005), "A structural damage detection method using static noisy data". Eng. Structures, Vol. 27, pp. 1784-1793.
- [19] Lu, Y., Tu, Z. (2004), "A two-level neural network approach for dynamic FE model updating including damping". J. Sound and Vibration, Vol. 275, pp. 931-952.
- [20] Teughels, A. (2003), "Inverse modeling of civil engineering structures based on operational modal data". PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven.
- [21] Marvala, T. (2010), "Finite-element-model Updating Using Computational Intelligence Techniques". Springer, London.
- [22] Rao, S.S. (2009), "Engineering Optimization-Theory and Practice". 4th Ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [23] FEMtools, Release 3.3.0 (2008), Dynamic Design Solutions N.V., www.femtools.com.

EVALUATION OF BEHAVIOR OF A BALL JOINT SYSTEM IN A DOUBLE LAYER GRID THROUGH UPDATING OF ITS NATURAL FREQUENCIES

S. A. Mostafavian^{1,*}, M. R. Davoodi², J. Vaseghi Amiri³

1. PhD Student, Civil Engineering Department, Babol University of Technology

2. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Babol University of Technology

3. Associate Professor, Civil Engineering Department, Babol University of Technology

*Corresponding Author: a.mostafavian@stu.nit.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords:

Double Layer Grid,
Ball Joint System,
Natural Frequencies,
Model Updating,
Genetic Algorithm.

ABSTRACT

Due to the some uncertainties during manufacture and assembly of double layer grids with ball joint system, the behavior of this jointing system in the structure is different from the behavior of individual and discrete joints. In the present work, the behavior of a ball joint system has been determined in true conditions of its operation in a double layer grid by the general framework of inverse problem. A full scale double layer grid was constructed using ball joint system. A series of modal testing were performed on the double layer grid in free-free support conditions and its FRFs (Frequency Response Functions) were measured in appropriate degrees of freedom. Using the measured FRFs, natural frequencies of the eight vibration modes of the grid were extracted. A beam element was used at each end of members in the finite element model of the grid in order to simulate the ball joint behavior. Through modal analysis of the finite element model, natural frequencies of the eight vibration modes of the grid were calculated for different section properties of the joint beam element. With the finite element model updating of the grid through reduction of difference between its experimental and analytical natural frequencies, section properties of the beam element representing behavior of the ball joint system in the model were obtained. Whilst the updated model resulted in a very good approximation of the natural frequencies of the double layer grid, a flexible behavior in different degrees of freedom was obtained for the ball joint system. Also, the analytical frequency response functions that were calculated using the obtained section properties for the joint beam element, had a good correlation with the experimental ones.
