

بررسی و تحلیل اثر شل شدگی اتصالات غیر دائمی پیچی در سازه‌ی ورق بر روی ویژگی‌های ارتعاشی

حسین مذهب^۱، مهرداد متوسل‌الحق^۱، روح‌الله طالبی توتی^{۱*}

^۱ ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rtalebi@iust.ac.ir

چکیده

در این پژوهش در ابتدا شبیه‌سازی اجزاء محدود اتصالات غیردائمی پیچی در سازه‌ی ورق با اتصال لب‌به‌لب به کمک لایه واسط یا لایه رابط مورد بررسی قرار گرفته است تا بتوان رفتار ارتعاشی سازه را به بهترین شکل ارزیابی کرد. برای ارزیابی و به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود، آزمایش تجربی ارتعاشی با در نظر گرفتن شرایط مرزی آزاد-آزاد انجام شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته تا دقت روش شبیه‌سازی اتصال پیچ و مهره ارائه شود. در انتها با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی مودال، اثر شل شدگی اتصالات پیچ و مهره بر روی فرکانس طبیعی سازه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که پس از به‌روزرسانی مدل المان محدود، تقریب لایه رابط برای اتصال پیچ و مهره از دقت مناسبی برخوردار است و همچنین، گشتاور پیچشی سفت کردن پیچ اثر مستقیم بر روی فرکانس طبیعی سازه دارد و شل شدگی پیچ و مهره در فرکانس‌های طبیعی بالاتر اثر تخریبی بیشتری را از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: اتصالات غیر دائمی پیچی؛ شل شدگی پیچ؛ فرکانس طبیعی؛ به‌روزرسانی مدل.

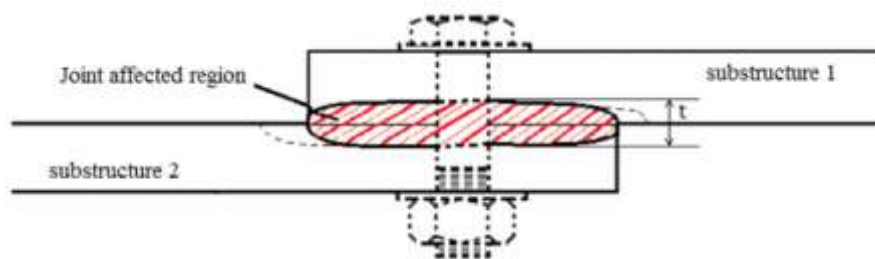
۱- مقدمه

در کاربردهای عملی، اتصالات پیچ و مهره‌ای در معرض انواع حالت‌های خرابی از جمله شل شدن خودبه‌خود، لغزش، تکان خوردن، ترک‌های خستگی و شکستگی قرار می‌گیرند. از رایج‌ترین مشکل‌های اتصالات پیچ و مهره‌ای، شل شدن خودبه‌خود به دلیل اعمال پیش‌بار نامناسب در حین نصب، بارهای خارجی متغیر با زمان در حین سرویس‌دهی و یا سایر عوامل محیطی است و شل شدن پیچ‌ها ممکن است منجر به شکست کل سازه شود و یا بر عملکرد آن‌ها تأثیر منفی بگذارد. بنابراین، نظارت بر پیش‌بار اعمال شده بر پیچ برای اطمینان از ایمنی و قابلیت اطمینان سازه بسیار مهم است. با توجه به اینکه این سازه‌ها اغلب تحت بارهای دینامیکی هستند، بنابراین احتمال شل شدگی و کاهش کیفیت این اتصالات بیشتر بوده و اگر به موقع تشخیص داده نشوند، می‌توانند منجر به خرابی و

خسارات فاجعه باری شوند [۱]. بر این اساس، مطالعه و بررسی روش‌هایی که بتواند به راحتی و با دقت مناسبی رفتار دینامیکی اتصالات پیچی را پیش‌بینی کنند مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.

مدل‌سازی دقیق برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی سازه‌ها یک ابزار ضروری در هر دو مرحله طراحی و عملیات است [۲]. مدل‌سازی خواص اتصالات پیچی مشکل بزرگی در تحلیل‌های ارتعاشی بوده و یکی از موانع کلیدی برای پیش‌بینی دینامیک سازه‌ها است. بنابراین، به منظور مدل‌سازی اتصالات پیچی، ابتدا باید مشخصه‌های دینامیکی آن مورد مطالعه قرار گیرد [۳]. مرحله بعدی، شناسایی پارامترها در مدل پیشنهادی است. به‌طور کلی، روش‌های مدل‌سازی اتصالات پیچی به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم می‌شود [۴]. رفتار دینامیکی سازه‌ها را می‌توان با استفاده از روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی مورد مطالعه قرار داد. برای سازه‌های ساده مانند تیرهای ساده و صفحات معادلات تحلیلی موجود پیش‌بینی خوبی از رفتار دینامیکی سازه ارائه می‌دهند. در سازه‌های نسبتاً پیچیده‌تر جهت مطالعه رفتار دینامیکی سازه از روش‌های عددی و به خصوص روش اجزاءمحدود استفاده می‌شود.

رویکرد که اخیراً برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سطوح اتصالی پیشنهاد شده است، مدل لایه‌ی متصل‌کننده است [۵]. این مدل بر اساس مفهوم ناحیه تحت تأثیر اتصال است که در شکل (۱) شماتیکی از این مدل نشان داده شده است. فرض بر این است که اثر سفتی کاهنده اتصال پیچی به ناحیه مشخصی از زیرسازه‌ها گسترش می‌یابد. بنابراین، یک ناحیه معادل در همسایگی منطقه واسط به‌عنوان ناحیه تحت تأثیر اتصال در نظر گرفته می‌شود. ضخامت این ناحیه به پارامترهای مختلفی از جمله پیش‌بار اتصال، زبری سطح، جنس زیرسازه‌ها و غیره بستگی دارد.



شکل ۱. ناحیه تحت تأثیر اتصال پیچی [۶]

همانگونه که در بخش قبلی عنوان شد، امروزه مدل‌های اجزاءمحدود به‌صورت گسترده برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی سازه‌ها در شرایط بارگذاری مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزاءمحدود به شدت وابسته به دقت مدل است و به علت خطاهای موجود در مدل‌های اولیه، نتایج حاصل از مدل اجزاءمحدود اولیه یک سازه از دقت لازم برخوردار نیست. بنابراین به منظور رسیدن به نتایج دقیق‌تری از مدل لازم است مدل اجزاءمحدود تصحیح شود. برای این منظور از نتایج حاصل از آزمایش مودال استفاده می‌شود که می‌توان به پژوهش‌های [۷ و ۸] اشاره نمود که در آن‌ها، خواص لایه‌های فرضی در محل اتصال و مدل ناحیه‌ی اتصال با استفاده از مدل المان محدود و آزمایش تجربی مودال تعیین شده است. بدین صورت که با تغییر پارامترهای مدل اجزاءمحدود سعی می‌شود نتایج حاصل از مدل اجزاءمحدود به نتایج حاصل از آزمایش نزدیک شود. مدل اجزاءمحدود حاصل از این روش که به‌هنگام نمودن مدل موسوم است دارای مرتبه‌ای همبستگی با نتایج آزمایش است و از آن می‌توان برای تحلیل‌های دینامیکی سازه استفاده کرد.

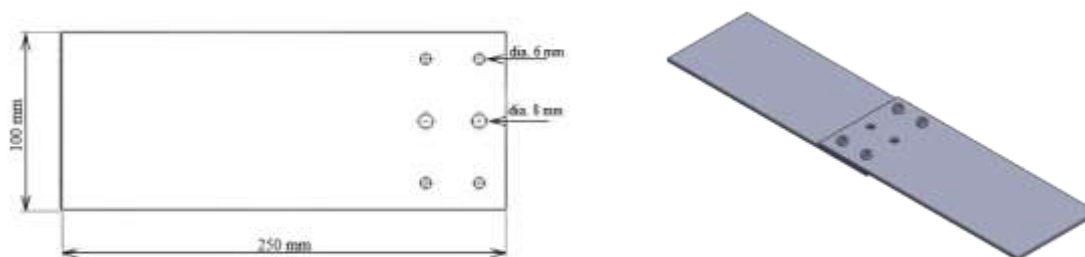
۱-۱ تاریخچه

محققین مختلفی نشان داده‌اند که اتصالات پیچی را می‌توان با روشی مشابه سایر قطعات سازه‌ای به شکل جرم-فنر-میراگر مدل نمود [۹]. نخستین بار در دهه ۷۰ میلادی یک مدل تحلیلی ساده فنر-میراگر موازی برای اتصالات پیچی پیشنهاد گردید [۱۰]. سفتی فنرها و ضریب میرایی میراگرها به‌عنوان سفتی و میرایی معادل اتصال در نظر گرفته شده و مقادیر آن‌ها به روشی تکراری و با استفاده از فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی دو مود اول به‌دست‌آمده است. احمدیان و جلالی [۱۱] با استفاده از ماتریس‌های سفتی و ضرایب میرایی مدل اتصال عمومی‌تری را برای این نوع اتصالات پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها روشی را برای شناسایی مقادیر بهینه پارامترهای سفتی و میرایی یک اتصال خطی با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده مودال (فرکانس تشدید و ضریب میرایی) ارائه

کرده‌اند. گانت و همکاران [۱۲] از فنرهای ساده برای شبیه‌سازی سطوح اتصال در مراحل اولیه طراحی استفاده کرده‌اند. اویانگ و همکاران [۱۳] یک مطالعه تجربی در مورد رفتار دینامیکی یک تک اتصال پیچی که لغزش‌هایی را در سطوح مختلف پیش بار پیچ و تحریک‌ها تحمل می‌کند، ارائه کرده‌اند. برخی تحقیقات بر روی رفتار استاتیکی اتصالات پیچی تمرکز کرده‌اند [۱۴] در حالی که دیگر تحقیقات اثرات اتصالات پیچی در پاسخ دینامیکی سازه را در نظر گرفته‌اند. در رفتار دینامیکی، پدیده غیرخطی اصطکاک اتصالات پیچی بر پاسخ‌ها تأثیر می‌گذارد. لی و همکاران [۱۵] اصطکاک مماسی را به عنوان یک نیروی غیرخطی در مدل المان محدود معرفی کرده‌اند تا میرایی ناشی از اتصالات پیچی و یا پرچی را تخمین بزنند و پاسخ دینامیکی این نوع اتصالات را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. یان و همکاران [۱۶] یک چارچوب بازرسی برای تشخیص زودهنگام شل شدن پیچ در یک اتصال را ارائه نموده، و ارزیابی کمی از گشتاور باقی مانده یک پیچ شل را مطالعه کردند. گیون [۱۷] با استفاده از مدل ریاضی به آنالیز مودال سازه‌های دارای اتصال پیچی پرداخت. پارک و همکاران [۱۸] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به ارائه روش به‌روزرسانی مدل به منظور مطالعه رفتار مکانیکی سازه با استفاده از روش المان محدود پرداختند. ابوذر پیردیر و همکاران به ارائه مدل غیرخطی اتصالات در سازه‌ای با شش اتصال پرداختند و یک مدل دو درجه آزادی با فنر غیرخطی از درجه سه ارائه کردند [۱۹].

۲- مدل اجزاء محدود

در این پژوهش سازه‌ی اتصال لب‌به‌لب دو ورق فولادی St304 که به وسیله‌ی شش عدد پیچ و مهره به یکدیگر متصل شده‌اند در شکل (۲) نشان داده شده است. چهار پیچ و مهره کناری با سایز M6 و دو پیچ و مهره وسط با سایز M8 انتخاب شده‌اند تا در پژوهش‌های آینده تأثیر نوع پیچ نیز مورد بررسی قرار گیرد.



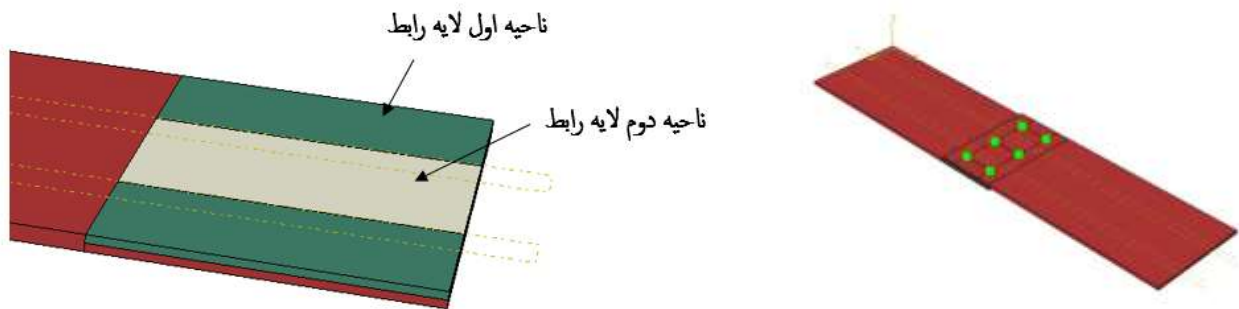
شکل ۲. شماتیک و ابعاد هندسی سازه

هدف اصلی از این پژوهش، بررسی تأثیر میزان شل‌شدگی اتصال پیچ و مهره بر روی فرکانس طبیعی در سازه ورق است، همچنین روشی جایگزین برای مدل‌سازی ناحیه اتصال مورد بررسی قرار گرفته است تا بتوان به‌طور دقیق‌تر خواص ناحیه اتصال و ویژگی‌های دینامیکی سازه را مورد بررسی قرار داد. برای مدل‌سازی اتصالات پیچ و مهره در سازه‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که پس از بررسی روش‌های مدل‌سازی مستقیم اتصال، استفاده از فنر و دمپر، المان لایه واسط و لایه‌ی رابط، در این پژوهش اتصال لایه‌ی رابط مورد استفاده قرار گرفت.

۱-۲ مدل‌سازی ناحیه اتصال

در روش المان رابط، یک لایه از زیرسازه‌ها با جنس نامعلوم در سطوح مشترک ایجاد می‌شود این لایه مجازی است و در حقیقت وجود ندارد و تنها کاربرد آن این است که نقش اتصال پیچ و مهره را به گونه‌ای دیگر ایفا کند تا نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی هم‌خوانی داشته باشد. خواص المان رابط نامشخص است و هدف دستیابی به خواصی است که به ازای آن نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی تطبیق خوبی داشته باشند. برای دستیابی به خواص این ناحیه، دو خاصیت مکانیکی الاستیک یعنی مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به عنوان متغیرهای مسئله تعریف می‌شوند. برای تعریف المان لایه رابط از سه لایه مجزا استفاده شده است، در واقع برای ناحیه زیر پیچ‌های M6 یک ماده و برای ناحیه زیر پیچ‌های M8 یک ماده جدا تعریف می‌شود تا خواص ناحیه اتصال را به‌صورت دقیق‌تر مدل‌سازی کند. به علت اینکه در این پژوهش پیش‌بار پیچ‌های M6 برابر و همچنین پیش‌بار پیچ‌های M8

برابر هستند، مطابق با شکل (۳) در مجموع دو ناحیه سبز رنگ و سفید رنگ که به ترتیب متنابر با ناحیه تماس پیچ‌های M6 و M8 هستند به عنوان نواحی با خواص ناشناخته تعریف شده‌اند. همچنین جرم پیچ و مهره حذف شده به صورت نقطه‌ای به سازه اضافه شده‌اند.



شکل ۳. مدل سازه شش پیچ با سه لایه رابط

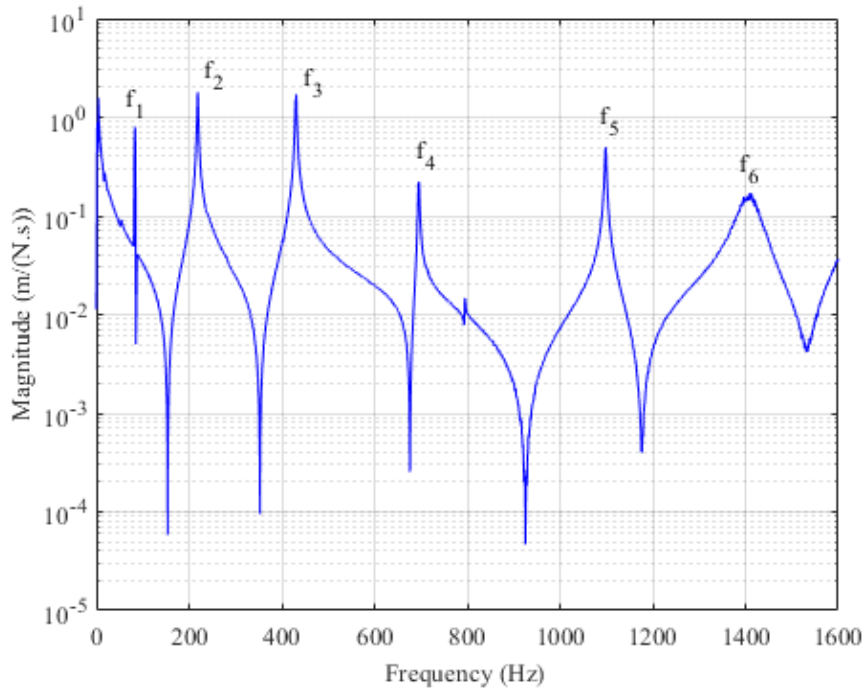
برای هر یک از نواحی سبز و سفید رنگ لایه رابط شکل (۳) دو خاصیت نامعلوم مدول الاستیسیته و ضریب پواسون وجود دارد که در مجموع این چهار خاصیت نامعلوم با توجه به نتایج آزمایشگاهی به صورت پارامترهای بهینه به دست می‌آید.

۳- آزمایش تجربی مودال

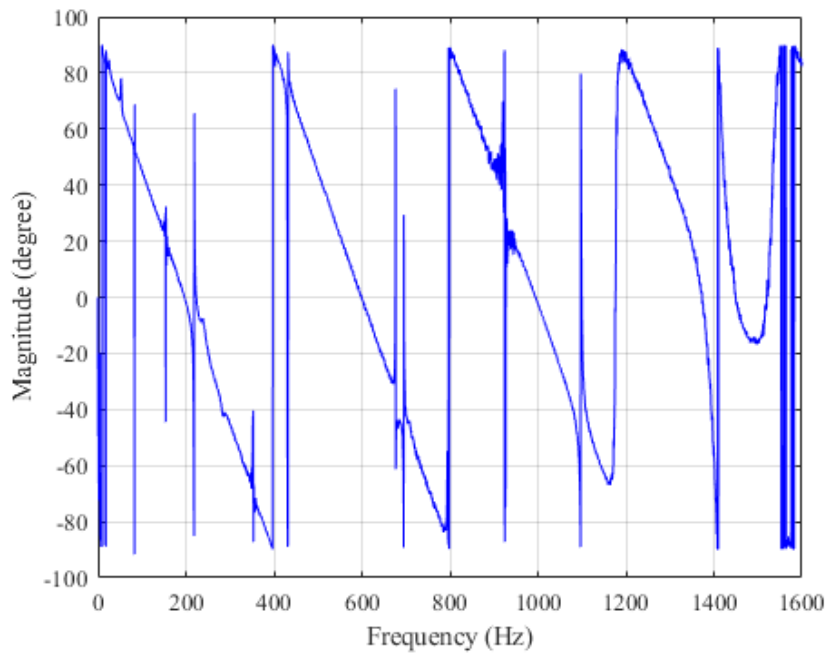
مطابق با شکل (۴)، سازه‌ی مورد آزمایش توسط یک لرزاننده مدل TV52110-GMBH TIRA به صورت آزاد-آزاد و به وسیله‌ی استینگر فولادی که در خط تقارن عرضی سازه بر روی یکی از ورق‌ها قرار گرفته است تحریک می‌شود. یک نیروسنج پیزوالکتریک مدل 8200 B&K بین سازه و استینگر جهت اندازه‌گیری نیروی تحریک قرار گرفته است. پاسخ سازه در ورق مقابل که تحریک می‌گردد، با یک دستگاه لیزری سرعت‌سنج مدل 8338 B&K اندازه‌گیری می‌شود. نتایج پاسخ فرکانسی و فاز اندازه‌گیری شده به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. نمودار فاز در محدوده $-\frac{\pi}{2}$ تا $\frac{\pi}{2}$ ترسیم شده است.



شکل ۴. تجهیزات و چیدمان آزمایش مودال

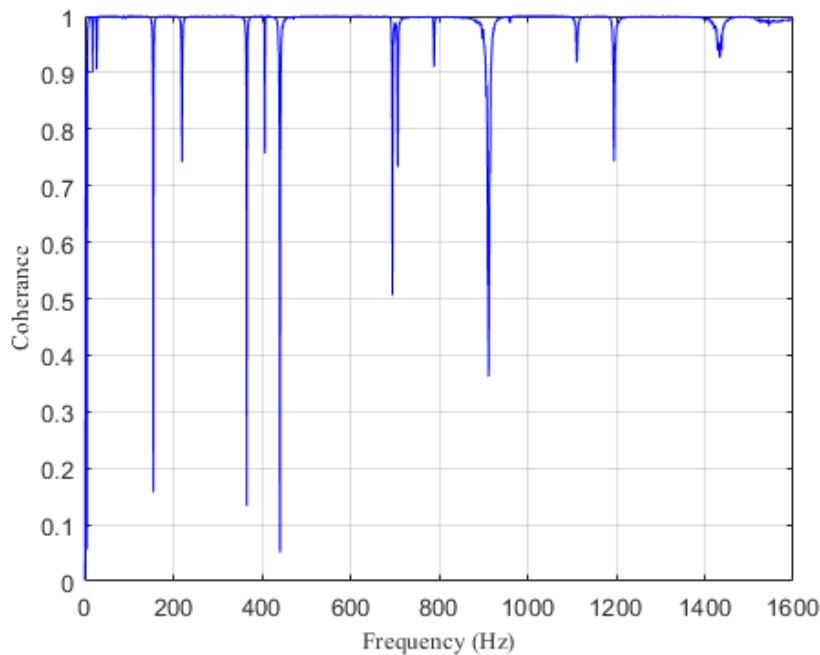


شکل ۵. پاسخ فرکانسی به دست آمده از آزمایش تجربی



شکل ۶. پاسخ فاز به دست آمده از آزمایش تجربی

همچنین نمودار دقت اندازه‌گیری آزمایش تجربی در شکل (۷) رسم شده است؛ در واقع هرچه نویز و خطای اندازه‌گیری خروجی نسبت به تحریک ورودی کمتر باشد مقدار نمودار به ۱ نزدیک‌تر است و در نقاطی که آنتی رزونانس قرار دارد نمودار مایل به مقدار صفر خواهد بود.



شکل ۷. نمودار دقت آزمایش تجربی

۴- به‌روزرسانی مدل

۱-۴ الگوریتم بهینه‌سازی

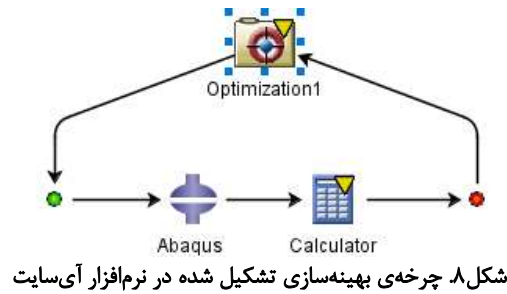
شناسایی پارامترها با کمینه‌کردن اختلاف بین نتایج تجربی و عددی انجام می‌شود. معمول‌ترین روش استفاده از کمینه‌کردن مجموع مربعات اختلاف نتایج تجربی و عددی است. در بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک دو هدفه با ورودی‌های جمعیت با ۱۲ نمونه، میزان جهش ۰،۳، هم‌گذاری ۰،۸ و با تکرار ۱۵۰ مرتبه اجرا شده است. توابع هزینه‌ی انتخاب شده شامل اختلاف خطای مربعات فرکانس طبیعی اول، دوم و سوم سازه از نتایج تجربی و عددی است. برای به‌روزرسانی مدل از نرم‌افزار آیسایت^۱ به علت سادگی اتصال به نرم‌افزار آباکوس^۲ و استفاده از الگوریتم‌های مختلف برای انجام بهینه‌سازی استفاده شده است. با توجه به بخش قبل فرکانس‌های طبیعی سازه به صورت دقیق در آزمایشگاه مودال استخراج شده‌اند و از مقادیر آن‌ها برای بهینه‌سازی تابع هدف مطابق با رابطه‌ی (۱) استفاده شده است:

$$F = \min \left| \frac{\omega_i^n}{\omega_i^e} - 1 \right| \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

در رابطه فوق ω_i^e و ω_i^n و به ترتیب فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده توسط آزمایش و تعیین شده توسط مدل تحلیلی هستند. با کمینه‌شدن تابع F مدل اجزاء محدود به‌هنگام می‌شود. برای به‌روزرسانی مدل از سه فرکانس طبیعی خمشی اول سازه استفاده شده و از بقیه فرکانس‌های خمشی جهت بررسی صحت و دقت مدل به‌روز شده استفاده می‌شود. حلقه‌ی بهینه‌سازی در نرم‌افزار آیسایت در شکل (۸) قابل مشاهده است.

¹ isight

² Abaqus



۵- تحلیل نتایج

۱-۵ خواص به‌روز شده ورق فولادی

خواص فولاد مورد استفاده به عنوان ورق به‌روز شده و پارامترهای بهینه شده برای ضریب پواسون و مدول الاستیسیته مطابق با رابطه‌ی (۲) به‌دست آمده است.

$$\nu = 0.249, E = 206.43 \text{ GPa} \quad (2)$$

مطابق با جدول (۱)، به‌روزرسانی خواص ورق بر روی دو فرکانس طبیعی اول صورت پذیرفت و دو فرکانس بعدی برای بررسی دقت حل مورد ارزیابی قرار گرفتند که در مجموع به‌طور میانگین خطای ۰٫۶۶ درصدی نسبت به نتایج آزمایشگاهی وجود داشت؛ میانگین خطا زیر ۱ درصد بوده که برای چنین مسئله‌ای مناسب است.

جدول ۱. مقایسه نتایج اجزاء محدود و آزمایشگاهی ورق فولادی

شماره فرکانس طبیعی	فرکانس طبیعی آزمایش مودال (Hz)	فرکانس طبیعی مدل به‌روز شده (Hz)	خطا (%)
۱	۲۴۸	۲۴۹٫۶۵	۰٫۶۴
۲	۶۹۳	۶۸۷٫۹۷	۰٫۷۳
۳	۱۳۲۳	۱۳۳۸٫۸	۱٫۱۹
۴	۱۵۸۶٫۵	۱۵۸۵٫۱	۰٫۰۸۸
میانگین خطا			۰٫۶۶۲

۲-۵ مدل نهایی با سه لایه رابط

طبق نتایج به‌دست‌آمده در بخش به‌روزرسانی مدل تک ورق، به‌روزرسانی مدل اصلی با سه لایه رابط مطابق با شکل (۹) در نرم‌افزار آیسایت انجام می‌شود.

		PoissonRatio_layer1	PoissonRatio_layer2	YoungModulus_layer1	YoungModulus_layer2	obj1	obj2	obj3	Design Feasibility
1	226	0.23499	-0.48596	2.305E+10	2.193E+10	0.0033962	0.0033379	0.033371	7
1	227	0.22029	-0.41967	2.0512E+10	1.9284E+10	0.0066379	0.0046941	0.03074	7
1	228	-0.26967	-0.48584	2.3906E+10	2.023E+10	0.001832	0.0039	0.034809	7
1	229	-0.1743	0.42485	1.5824E+10	2.6388E+10	0.051312	0.005	0.0044811	7
1	230	0.38791	0.35726	1.0799E+10	2.1023E+10	0.038979	0.0023379	0.019164	7
1	231	0.17157	-0.41987	6.3251E+9	1.9278E+10	0.030631	3.653E-5	0.0084605	7
1	232	0.23499	-0.48596	2.305E+10	2.193E+10	0.0033962	0.0033379	0.033371	7
1	233	0.14889	-0.44674	6.3251E+9	1.9612E+10	0.029742	2.5571E-4	0.0091	7
1	234	-0.25169	0.41273	1.4938E+10	1.929E+10	0.0119	0.0037763	0.02593	7
1	235	-0.2104	-0.41763	1.3813E+10	1.9629E+10	0.019737	0.0031461	0.02208	7
1	236	-0.38413	-0.48694	3.0257E+9	2.1449E+10	0.039533	0.0014475	5.7732E-4	7
1	237	-0.28984	-0.48584	2.3906E+10	2.1703E+10	7.3728E-4	0.0060274	0.0287	7
1	238	-0.069607	-0.48596	3.0257E+9	2.1332E+10	0.040785	0.0028	0.0017205	7
1	239	-0.29097	0.42485	1.5824E+10	4.9286E+9	0.040828	0.0026	0.0033265	7
1	240	-0.23536	0.41273	1.4397E+10	1.9624E+10	0.022583	0.0036464	0.025281	7
1	241	-0.28984	-0.42248	2.3906E+10	2.1703E+10	0.001729	0.0058128	0.034809	7
1	242	0.17157	-0.48284	7.8014E+9	1.8013E+10	0.01498	0.0012	0.017436	7
1	243	0.38461	-0.48988	6.3251E+9	1.9278E+10	0.028936	4.2922E-4	0.009709	7
1	244	-0.23091	-0.39392	2.3906E+10	2.1332E+10	0.001817	0.0055114	0.033664	7
1	245	-0.27637	-0.38979	1.9933E+10	1.8629E+10	0.0059053	0.004668	0.0324	7
1	246	0.23499	0.358	1.6138E+10	2.1496E+10	0.011761	0.0036256	0.006167	7
1	247	0.38413	-0.48596	5.5093E+9	2.193E+10	0.027693	9.4973E-4	0.010346	9

شکل ۹. تغییر پارامترهای به‌روزرسانی مدل

خواص به‌روز شده لایه‌های رابط در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. خواص به‌روز شده لایه‌های رابط

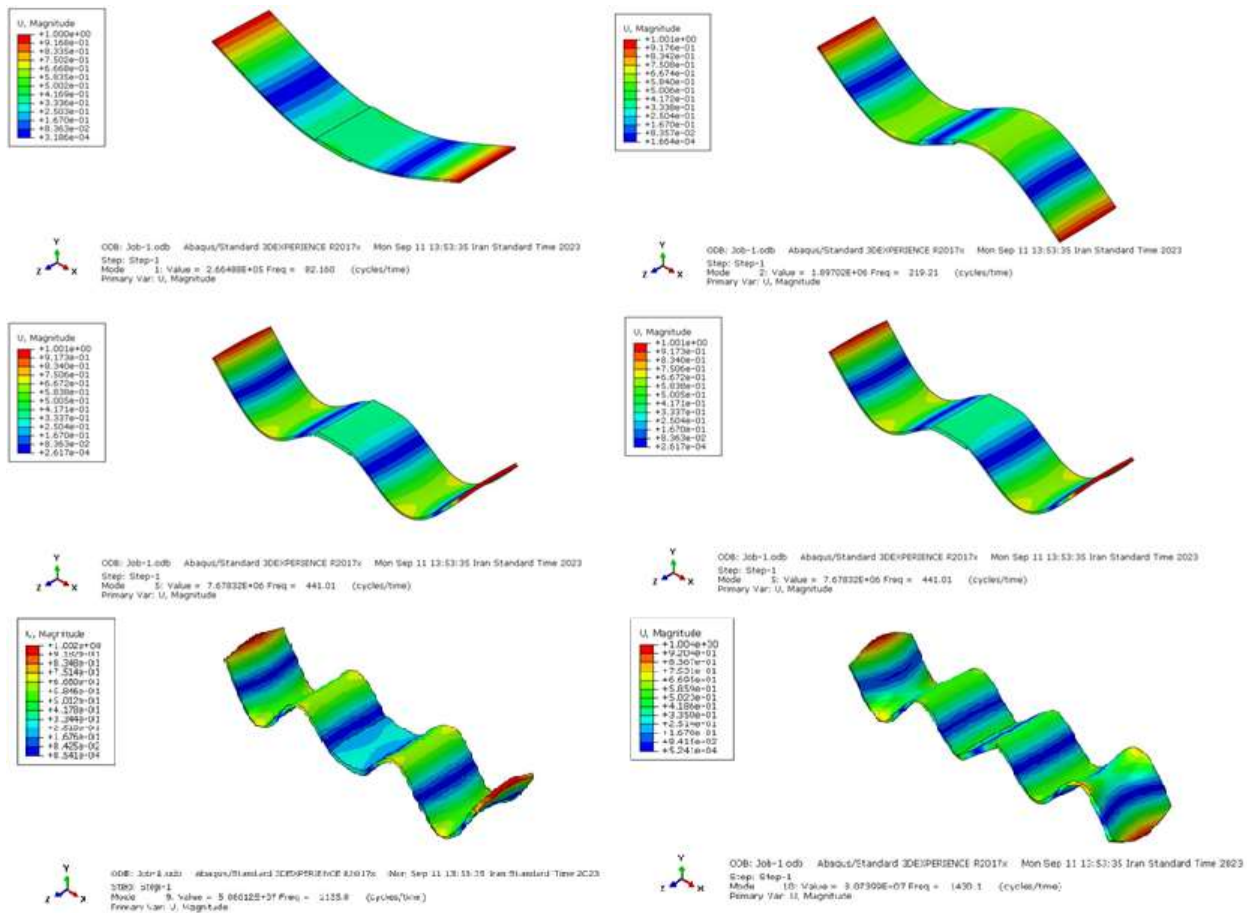
شماره ناحیه تماس	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)
۱	۰,۱۸۴	۵,۵
۲	-۰,۴۸۶	۲۱,۹۳

مطابق با جدول (۳)، به‌روزرسانی خواص لایه رابط بر روی سه فرکانس طبیعی اول صورت پذیرفت و سه فرکانس بعدی برای بررسی دقت حل مورد ارزیابی قرار گرفتند که به‌طور میانگین خطای ۱,۴۹ درصدی نسبت به نتایج آزمایشگاهی وجود داشت. از این رو روش انتخابی برای پیش‌بینی ویژگی‌های ارتعاشی سازه‌ی مورد بحث از دقت مناسبی برخوردار است.

جدول ۳. نتایج مدل نهایی

شماره فرکانس طبیعی	فرکانس طبیعی آزمایش مودال (Hz)	فرکانس طبیعی مدل به‌روز شده (Hz)	خطا (%)
۱	۸۴,۵	۸۲,۱۶	۲,۷۸
۲	۲۱۹	۲۱۹,۲۱	۰,۰۹
۳	۴۳۶,۵	۴۴۱,۰۱	۱,۰۳
۴	۶۹۶	۶۹۵,۰۷	۰,۱۳
۵	۱۰۹۹	۱۱۳۵	۳,۲۷
۶	۱۴۰۷	۱۴۳۰,۱	۱,۶۳
		میانگین خطا	۱,۴۹

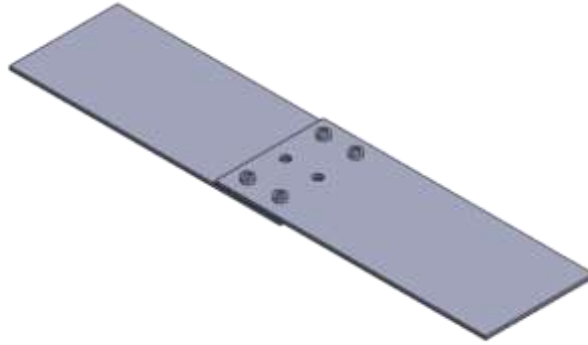
شش مود حرکتی خمشی اول ورق با اتصالات غیردائمی پیچی با خواص به‌روز شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰. مدهای حرکتی خمشی ورق با اتصالات غیردائمی پیچی

۳-۵ اثر شل‌شدگی پیچ و مهره

در این بخش با در نظر گرفتن سازه با چهار عدد پیچ و مهره نوع M6 مطابق شکل (۱۱)، اثر شل‌شدگی پیچ و مهره بر روی فرکانس طبیعی سازه مورد بررسی قرار گرفت از این رو، آزمایش تجربی با در نظر گرفتن پنج مقدار متفاوت گشتاور پیچشی برای سفت کردن پیچ و مهره مطابق با جدول (۴) انجام شده و نتایج برای شش فرکانس طبیعی اول در جدول (۵) ارائه شده است.



شکل ۱۱. شماتیک سازه با چهار عدد پیچ و مهره

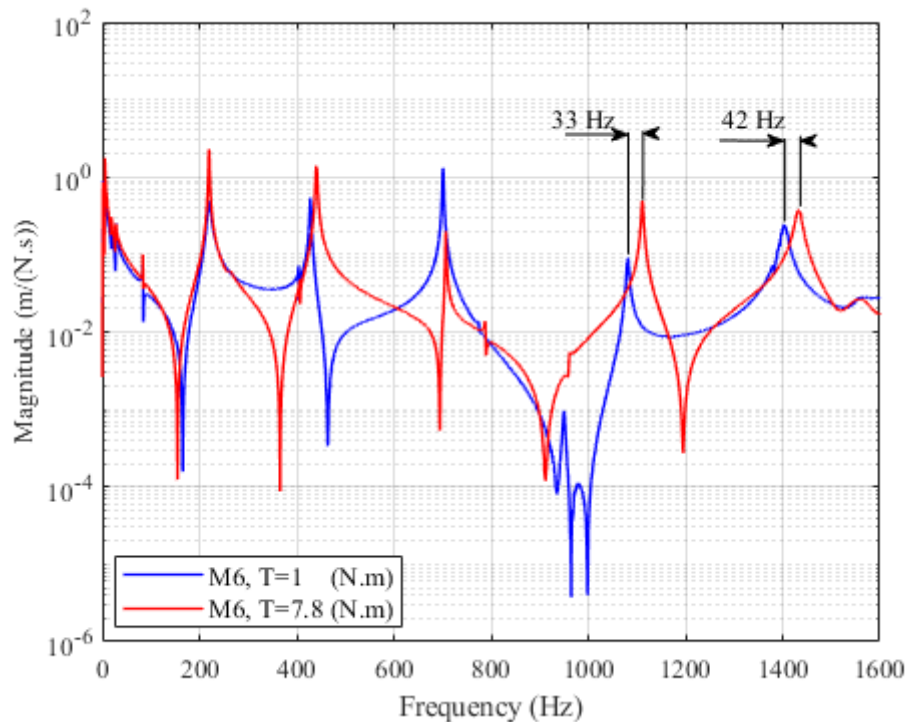
جدول ۴. مقادیر مختلف گشتاور پیچشی سفت کردن پیچ در آزمایش مودال

شماره آزمایش	گشتاور خمشی (N.m)
۱	۱
۲	۲
۳	۴
۴	۶
۵	۷,۸

جدول ۵. نتایج آزمایش تجربی مودال با مقدار گشتاور پیچشی مختلف

شماره فرکانس طبیعی	نتایج آزمایش ۱ (Hz)	نتایج آزمایش ۲ (Hz)	نتایج آزمایش ۳ (Hz)	نتایج آزمایش ۴ (Hz)	نتایج آزمایش ۵ (Hz)
۱	۸۳	۸۳,۵	۸۴	۸۶	۸۷
۲	۲۱۹,۵	۲۱۹	۲۱۹	۲۲۰	۲۲۰
۳	۴۲۷,۵	۴۲۷,۵۷	۴۳۰,۵	۴۴۲	۴۴۲
۴	۷۰۱	۷۰۱,۵	۷۰۲	۷۰۷,۵	۷۰۸
۵	۱۰۸۱	۱۰۸۱	۱۰۸۸	۱۱۱۴	۱۱۱۴
۶	۱۴۰۱	۱۴۱۱,۵	۱۴۱۴	۱۴۳۱	۱۴۴۳

نتایج نشان می‌دهد که گشتاور پیچشی سفت کردن پیچ بر روی فرکانس طبیعی سازه اثر مستقیم دارد و این تأثیر به خصوص در فرکانس‌های طبیعی بالاتر مشهود است. همچنین در مقایسه‌ی فرکانس‌های طبیعی آزمایش شماره ۴ و ۵ به ترتیب با گشتاور پیچشی ۶ و ۷,۸ نیوتن متر در این سازه، می‌توان دریافت که پیچ‌های M6 گرید ۶,۸ با گشتاور پیچشی کمتر از حد ماکزیموم ۷,۸ نیوتن متر نیز می‌تواند سفت‌شدگی کامل را از خود نشان دهد. در شکل (۱۲) پاسخ فرکانسی سازه برای دو مقدار کمترین و بیشترین گشتاور پیچشی مورد آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۱۲. مقایسه پاسخ فرکانسی سازه در دو حالت مختلف گشتاور پیچشی سفت کردن پیچ

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل مودال و به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود، تغییرات نیروی پیش‌بار یا به عبارتی گشتاور لازم در سفت کردن پیچ در فرکانس‌های بالا اثر بیشتری بر رفتار ارتعاشی سیستم خواهد داشت به‌گونه‌ای که با شل شدن پیچ، از سفتی معادل سازه کاسته شده و فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابد. همچنین مدل کردن لایه رابط به جای در نظر گرفتن اتصال مستقیم پیچ و مهره، نتایج خوبی را ارائه خواهد داد.

مراجع

1. M. Rezaee, V. Maleki, "A New Nonlinear Model for Flexural Vibration Analysis of a Cracked Beam with a Fatigue Crack", *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 22(2), 35-52, (2011).
2. M. Ghaderi, H. Ghaffarzadeh, V.A. Maleki, "Investigation of vibration and stability of cracked columns under axial load", *Earthquakes and Structures*, 9(6), 1181-1192, (2015).
3. Q. Sun, B. Yuan, X. Mu, W. Sun, "Bolt preload measurement based on the acoustoelastic effect using smart piezoelectric bolt", *Smart Materials and Structures*, 28(5), 23-45, (2019).
4. N. Jamia, H. Jalali, J. Taghipour, M. Friswell, H.H. Khodaparast, "An equivalent model of a nonlinear bolted flange joint", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 153, 67-89, (2021).
5. Cao, J., & Grenestedt, J. L. "Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls", *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 35(9), 1091-1105, (2004).
6. Petrov, E. P. "A method for use of cyclic symmetry properties in analysis of nonlinear multiharmonic vibrations of bladed disks", *J. Turbomach*, 126(1), 175-183, (2004).

۷. عینی، شایان و متوسل‌الحق، مهرداد و طالبی توتی، روح‌الله، "شناسایی تجربی پارامترهای ناحیه‌ی تحت تأثیر اتصال میراگر زیر سکو"، دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی آکوستیک و ارتعاشات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۴۰۱.

۸. عینی، شایان و متوسل‌الحق، مهرداد و طالبی توتی، روح‌الله، "مدل‌سازی و به‌روزرسانی مدل نقطه جوش در اتصالات سازه‌ی بدنه خودرو"، نهمین کنگره‌ی انجمن علوم صوتی ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۴۰۲.
9. D.J. Segalman, *A four-parameter Iwan model for lap-type joints*, (2005).
10. M. Yoshimura, K. Okushima, "Measurement of dynamic rigidity and damping property for simplified joint models and simulation by computer", *Annals of the CIRP*, 25(1), 193-198, (1977).
11. H. Ahmadian, H. Jalali, "Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(2), 1041-1050, (2007).
12. F. Gant, P. Rouch, F. Louf, L. Champany, "Definition and updating of simplified models of joint stiffness", *International Journal of Solids and Structures*, 48(5), 775-784, (2011).
13. H. Ouyang, M. Oldfield, J. Mottershead, "Experimental and theoretical studies of a bolted joint excited by a torsional dynamic load", *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(12), 1447-1455, (2006).
14. D. Li, C. Xu, J. Kang, Z. Zhang, "Modeling tangential friction based on contact pressure distribution for predicting dynamic responses of bolted joint structures", *Nonlinear Dynamics*, 101(1), 255-269, (2020).
15. E.S. Buice, D. Otten, R.H. Yang, S.T. Smith, R.J. Hocken, D.L. Trumper, "Design evaluation of a single-axis precision controlled positioning stage", *Precision engineering*, 33(4), 418-424, (2009).
16. D.D. Quinn, "Modal analysis of jointed structures", *Journal of Sound and Vibration*, 331(1), 81-93, (2012).
17. G. Park, K.-N. Hong, H. Yoon, "Vision-based structural FE model updating using genetic algorithm", *Applied Sciences*, 11(4), 16-32, (2021).
18. F. Adel, S. Shokrollahi, M. Jamal-Omidi, H. Ahmadian, "A model updating method for hybrid composite/aluminum bolted joints using modal test data", *Journal of Sound and Vibration*, 396(4), 172-185, (2017).
۱۹. پیردیر، ابودر و محمدی، مهرداد و کاظم زاده پارسی، محمد جواد و رجیبی، مجید، "مطالعه تحلیلی تأثیر شل‌شدگی بر رفتار ارتعاشات غیرخطی اتصالات پیچ و مهره‌ای"، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱۲، سال ۱۴۰۰.