



## بررسی اثر شل شدگی اتصالات غیر دائمی پیچی در سازه‌ی فلنج نبشی بر روی ویژگی‌های ارتعاشی آن

مهرداد متوسل‌الحق<sup>۱</sup>، رضا انصاریان<sup>۱</sup>، علی رضایی<sup>۱</sup>، روح‌الله طالبی توتی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [rtalebi@iust.ac.ir](mailto:rtalebi@iust.ac.ir)

### چکیده

در این پژوهش در ابتدا شبیه‌سازی اجزاء محدود اتصالات غیر دائمی پیچی در سازه‌ی ورق با اتصال فلنج نبشی صورت گرفته است. روش شبیه‌سازی پیچ و مهره شامل شبیه‌سازی به کمک لایه رابط مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این بررسی، ارزیابی دقیق‌تر رفتار ارتعاشی سازه است. برای ارزیابی و به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود، آزمایش مودال با 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 پیچی بر روی فرکانس‌های طبیعی سازه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که پس از به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود، تقریب لایه رابط برای اتصال پیچ و مهره از دقت خوبی برخوردار است. همچنین، گشتاور پیچشی سفت کردن پیچ اثر کاملاً مستقیم بر روی تمامی فرکانس‌های طبیعی سازه ندارد و برخی فرکانس‌ها دچار رفتار معکوس می‌شوند ولی در حالت کلی، شل شدگی پیچ و مهره در فرکانس‌های طبیعی بالاتر اثر تخریبی بیشتری را از خود نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** گشتاور سفت کردن پیچ؛ لایه‌ی رابط؛ فلنج نبشی تخت؛ به‌روزرسانی مدل.

### ۱- مقدمه

در کاربردهای عملی، با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف خرابی از جمله شل شدن خودبه‌خود، لغزش، تکان خوردن، ترک‌های خستگی و شکستگی در اتصالات پیچ و مهره‌ای می‌توان به بررسی رفتار ارتعاشی سازه‌ها پرداخت. 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 بر عملکرد سازه‌ها تأثیر منفی بگذارد. بنابراین، نظارت بر پیش‌بار اعمال شده بر پیچ برای اطمینان از ایمنی و قابلیت اطمینان سازه بسیار مهم است. 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.

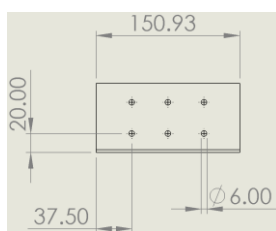
همانگونه که در بخش قبلی عنوان شد، امروزه مدل‌های اجزاء محدود به صورت گسترده برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی سازه‌ها در شرایط بارگذاری مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزاء محدود به شدت وابسته به دقت مدل است و به علت خطاهای موجود در مدل‌های اولیه، نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود اولیه یک سازه از دقت لازم برخوردار نیست. بنابراین به منظور رسیدن به نتایج دقیق‌تری از مدل لازم است مدل اجزاء محدود تصحیح شود. برای این منظور از نتایج حاصل از آزمایش مودال استفاده می‌شود که می‌توان به پژوهش‌های [۲۰] 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 شده‌است. بدین صورت که با تغییر پارامترهای مدل اجزاء محدود سعی می‌شود نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود به نتایج حاصل از آزمایش نزدیک شود.

## ۱-۱ تاریخچه

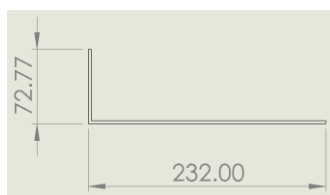
محققین مختلفی در حوزه‌ی مدل‌سازی اتصالات پیچی با استفاده از لایه رابط، لایه واسط و لایه‌ی مجازی و بررسی اثر شل‌شدگی اتصالات بر رفتار ارتعاشی سازه فعالیت داشته‌اند که می‌توان به پژوهش مذهب و همکاران [۳] اشاره نمود که در آن تغییر گشتاور پیچشی معادل سفت کردن پیچ بر فرکانس‌های طبیعی سازه‌ی ورق لب‌به‌لب مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، 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 [۴]. احمدیان و جلالی [۵] با استفاده از ماتریس‌های سفتی و ضرایب میرایی مدل اتصال عمومی‌تری را برای شناسایی مقادیر بهینه پارامترهای سفتی و میرایی یک اتصال خطی با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده مودال ارائه کرده‌اند. گانت و همکاران [۶] از فنرهای ساده برای شبیه‌سازی سطوح اتصال در مراحل اولیه‌ی طراحی استفاده کرده‌اند. برخی تحقیقات بر روی رفتار استاتیکی اتصالات پیچی تمرکز کرده‌اند [۷] 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. یان و همکاران [۸] 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 [۹] با استفاده از مدل ریاضی به آنالیز مودال سازه‌های دارای اتصال پیچی پرداخت. پارک و همکاران [۱۰] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به ارائه روش به‌روزرسانی مدل به منظور مطالعه رفتار مکانیکی سازه با استفاده از روش المان محدود پرداختند.

## ۲- مدل اجزاء محدود

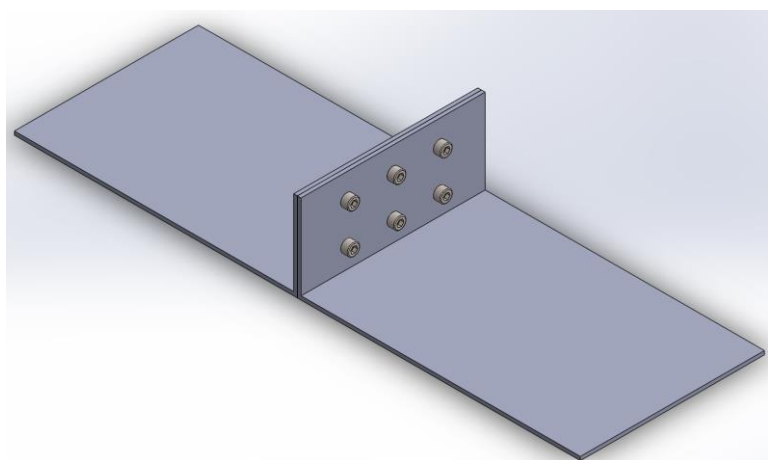
در این پژوهش سازه‌ی اتصال دو پنل فلنج نبشی از جنس فولاد St37 که به وسیله‌ی شش عدد پیچ و مهره سایز M6 به یکدیگر متصل شده‌اند در شکل (۲) نشان داده شده‌است.



(ب)



(ج)



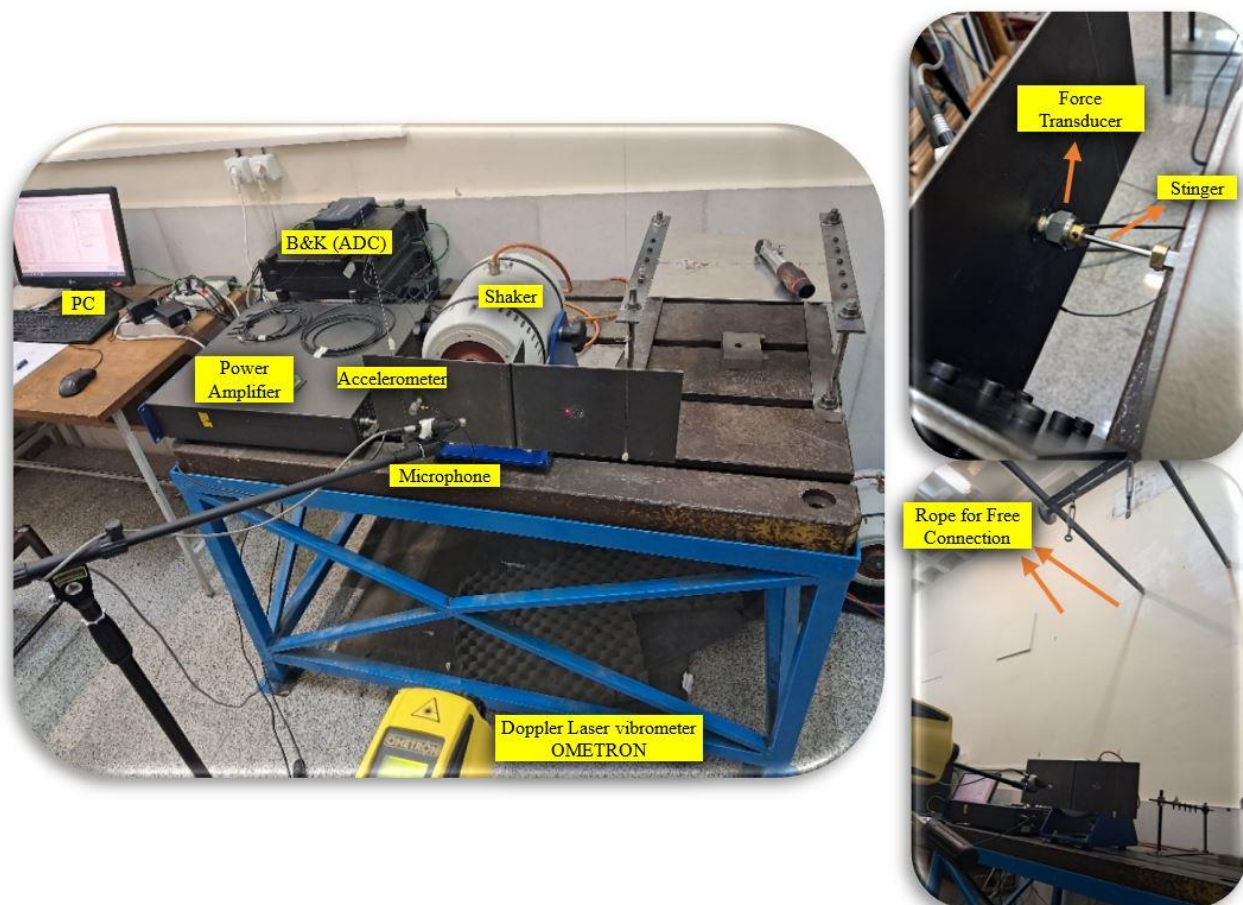
(الف)

شکل ۲. شماتیک و ابعاد هندسی سازه‌ی فلنج نبشی تخت: (الف) نمای سه‌بعدی، (ب) دید از بالا و (ج) دید جانبی

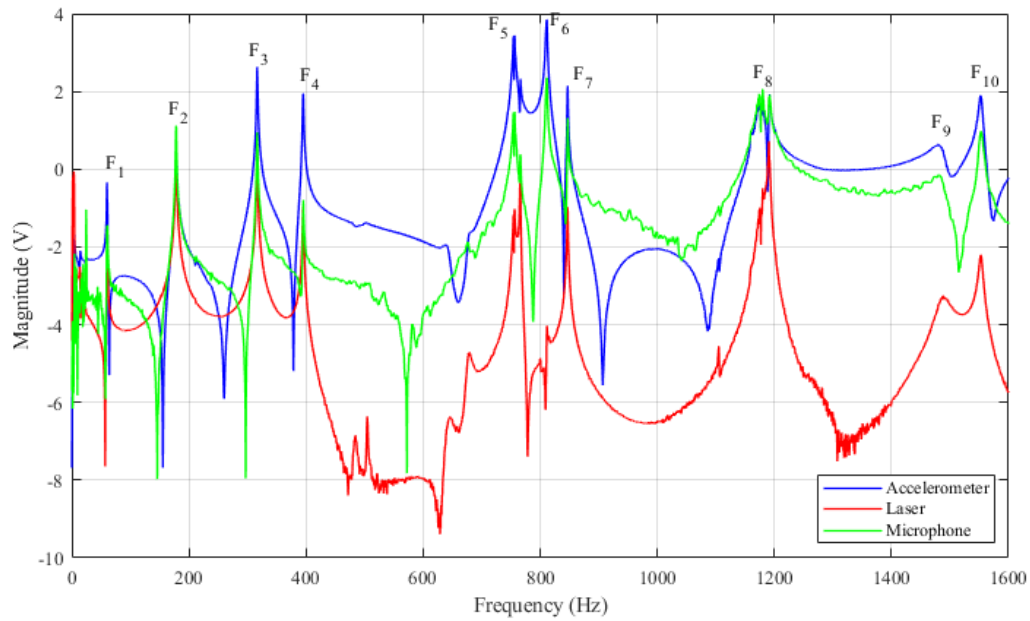
هدف اصلی از این پژوهش، بررسی تأثیر میزان شل‌شدگی اتصال پیچ و مهره بر روی فرکانس طبیعی در سازه‌ی فلنج نبشی است، همچنین روشی جایگزین برای مدل‌سازی ناحیه اتصال مورد بررسی قرار گرفته‌است تا بتوان به‌طور دقیق‌تر خواص ناحیه‌ی اتصال و ویژگی‌های دینامیکی سازه را مورد بررسی قرار داد. برای مدل‌سازی اتصالات پیچ 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. برای ناحیه‌ی لایه رابط دو خاصیت نامعلوم مدول الاستیسیته و ضریب پواسون وجود دارد که با توجه به نتایج آزمایشگاهی به‌صورت متغیرهای بهینه تعریف شده و به‌دست می‌آید.

### ۳- آزمایش تجربی مودال

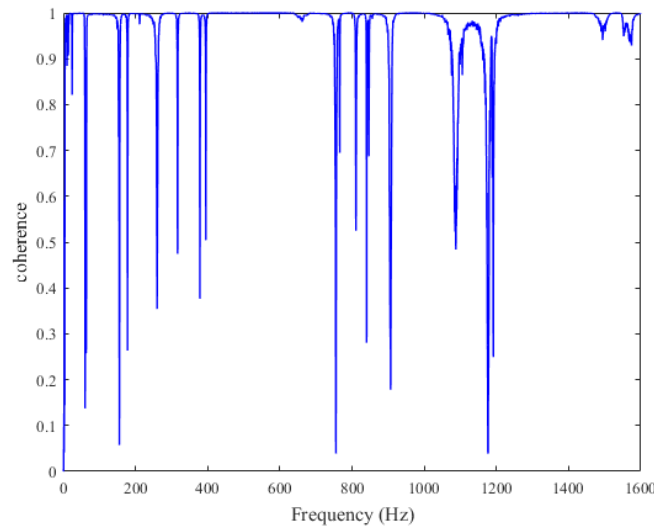
مطابق با شکل (۳)، سازه‌ی مورد آزمایش توسط یک لرزاننده مدل TV52110-GMBH TIRA به‌صورت آزاد-آزاد (با استفاده از نخ نامرئی) و به‌وسیله‌ی استینگر فولادی که در خط تقارن عرضی سازه بر روی یکی از ورق‌ها قرار گرفته‌است تحریک می‌شود. یک نیروسنج پیزوالکتریک مدل 8200 B&K با حساسیت ۴ میلی‌ولت بر نیوتن بین سازه (اتصال در وسط سازه) و استینگر جهت اندازه‌گیری نیروی تحریک قرار گرفته‌است. پاسخ سازه در ورق مقابل که تحریک می‌گردد، با یک دستگاه لیزری سرعت‌سنج مدل 8338 B&K با حساسیت با دقت ۵ میلی‌متر بر ثانیه بر ولت، یک شتاب‌سنج مدل با حساسیت ۱۰ میلی‌ولت بر شتاب گرانش و یک میکروفون فروسوت مدل با حساسیت ۵۰ میلی‌ولت بر پاسکال اندازه‌گیری می‌شود. نتایج پاسخ فرکانسی سازه در شکل (۴) نشان داده شده‌است. دلیل استفاده از سه حسگر شتاب‌سنج، لیزر و میکروفون بررسی عملکرد و دقت حسگرها در استخراج نتایج در حوزه‌ی فرکانس است. همچنین نمودار انسجام اندازه‌گیری آزمایش تجربی در شکل (۵) رسم شده‌است؛ 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 ۳. تجهیزات و چیدمان آزمایش مودال



شکل ۴. پاسخ فرکانسی به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی مودال بر روی سازه‌ی فلنج نبشی



شکل ۵. نمودار دقت آزمایش تجربی (شتاب‌سنج)

#### ۴- به‌روزرسانی مدل

##### ۴-۱ الگوریتم بهینه‌سازی

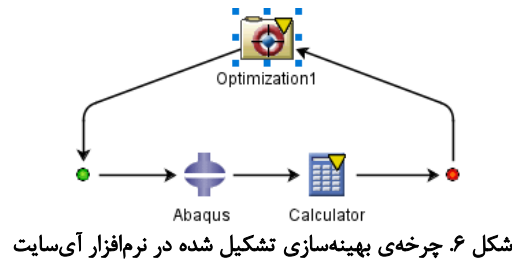
شناسایی پارامترها با کمینه‌کردن اختلاف بین نتایج تجربی و عددی انجام می‌شود. معمول‌ترین روش استفاده از کمینه‌کردن مجموع مربعات اختلاف نتایج تجربی و عددی است. در بهینه‌سازی، الگوریتم ازدحام ذرات دو هدفه با تعداد ۲۴ ذره، اینرسی ۰.۹، حداکثر سرعت ۰.۱ و با تکرار ۱۵۰ مرتبه اجرا شده‌است. توابع هزینه‌ی انتخاب شده شامل اختلاف خطای مربعات فرکانس طبیعی اول تا چهارم سازه از نتایج تجربی و عددی است. برای به‌روزرسانی مدل از نرم‌افزار آیسایت<sup>۱</sup> به علت سادگی اتصال به نرم‌افزار آباکوس و

<sup>۱</sup> isight

استفاده از الگوریتم‌های مختلف برای انجام بهینه‌سازی استفاده شده‌است. 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 شده‌است:

(۱)

در رابطه فوق  $\omega_i^n$  به ترتیب فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده توسط آزمایش و تعیین شده توسط مدل عددی هستند. با کمینه‌شدن تابع  $F$  مدل اجزاء محدود به‌روزرسانی می‌شود. برای به‌روزرسانی مدل از چهار فرکانس طبیعی خمشی اول سازه استفاده شده و از بقیه فرکانس‌های خمشی جهت بررسی صحت و دقت مدل به‌روزرشده استفاده می‌شود. حلقه‌ی بهینه‌سازی در نرم‌افزار آی‌سایت در شکل (۶) قابل مشاهده است.



## ۵- تحلیل نتایج

### ۱-۵ خواص به‌روزشده ورق فولادی

خواص فولاد مورد استفاده به‌روزشده و پارامترهای بهینه‌شده برای ضریب پواسون و مدول الاستیسیته مطابق با رابطه‌ی (۲) به‌دست آمده است.

$$v = 0.299, E = 225.6 \text{ GPa} \quad (۲)$$

مطابق با جدول (۱)، به‌روزرسانی خواص فلنج نبشی 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 ۰.۵۹۷ درصدی نسبت به نتایج آزمایشگاهی وجود داشت؛ میانگین خطا زیر ۱ درصد بوده که برای چنین مسئله‌ای مناسب است.

جدول ۱. مقایسه نتایج اجزاءمحدود و آزمایشگاهی ورق فولادی

شماره فرکانس طبیعی	فرکانس طبیعی مودال (Hz)	فرکانس طبیعی مدل به‌روزشده (Hz)	خطا (%)
۱	۱۹۲.۵	۱۹۲.۴۸۱	۰.۰۱
۲	۴۰۳.۵	۴۰۳.۴۴۸	۰.۰۱
۳	۷۶۶	۷۶۱.۸۸۳	۰.۵۳
۴	۸۶۶.۵	۸۵۰.۵۵۴	۱.۸۴
		میانگین خطا	۰.۵۹۷

### ۲-۵ مدل نهایی با لایه رابط

طبق نتایج به‌دست‌آمده در بخش به‌روزرسانی مدل تک ورق، به‌روزرسانی مدل اصلی با سفتی کامل و با لایه رابط در نرم‌افزار آی‌سایت انجام می‌شود. خواص به‌روزشده‌ی لایه رابط در جدول (۲) ارائه شده‌است.

جدول ۲. خواص به‌روزشده‌ی لایه رابط

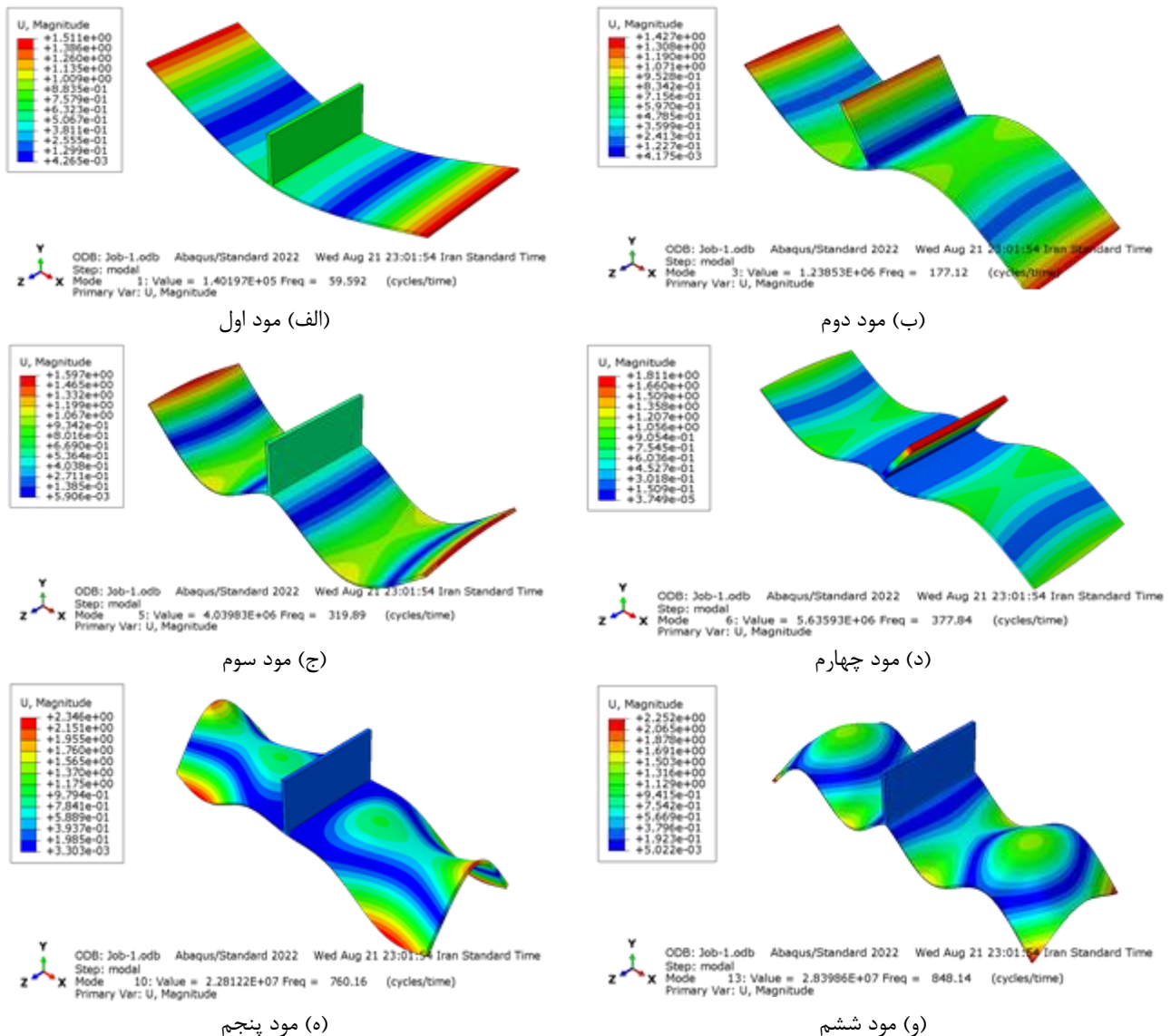
شماره ناحیه تماس	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)
۱	۰.۲۳۹	۷.۸۸

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 ۱.۳۲ 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 با سفتی کامل (اتصال با ۶ پیچ)

شماره فرکانس طبیعی	فرکانس طبیعی آزمایش مودال (Hz)	فرکانس طبیعی مدل به‌روزرشده (Hz)	خطا (%)
۱	۶۰	۵۹.۵۹۲	۰.۶۸
۲	۱۷۸.۵	۱۷۷.۱۲	۰.۷۷
۳	۳۱۸	۳۱۹.۸۹	۰.۵۹
۴	۳۹۶	۳۷۷.۸۴	۴.۵۸
۵	۷۵۹	۷۶۰.۱۶	۰.۱۵
۶	۸۵۹	۸۴۸.۱۴	۱.۲
		میانگین خطا	۱.۳۲

شش مود حرکتی خمشی اول فلنج نبشی با اتصالات غیردائمی پیچی با خواص به‌روزرشده در شکل (۷) نشان داده شده‌است.



شکل ۷. شش مود حرکتی اول خمشی ورق فلنج نبشی با اتصالات غیردائمی پیچی

### ۳-۵ اثر شل‌شدگی پیچ و مهره

در این بخش با در نظر گرفتن سازه با شش عدد پیچ و مهره‌ی نوع M6 مطابق شکل (۲)، 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 شده‌است.

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

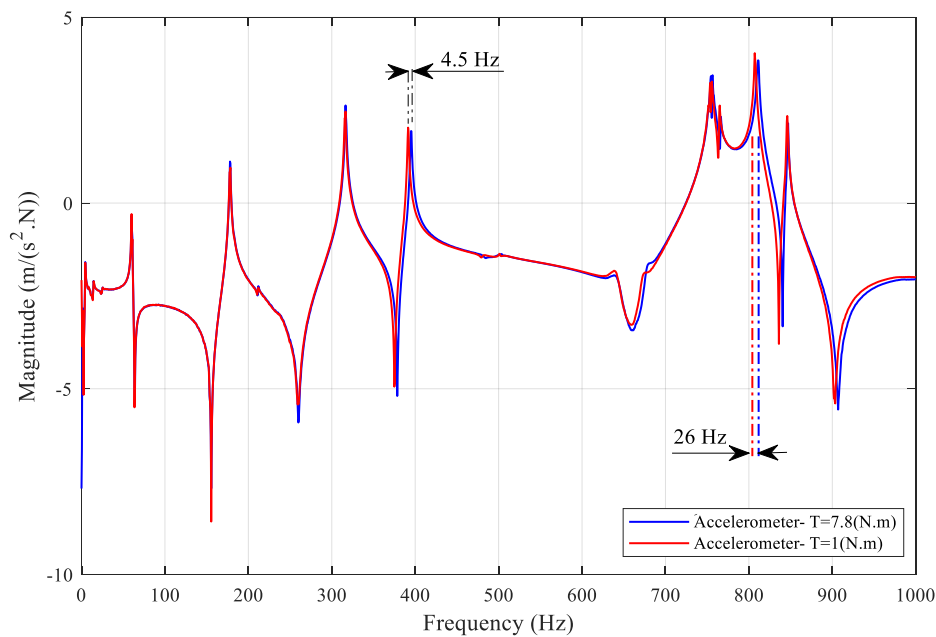
جدول ۵. نتایج آزمایش تجربی مودال با مقدار گشتاور پیچشی مختلف

نتایج آزمایش ۵ (Hz)	نتایج آزمایش ۴ (Hz)	نتایج آزمایش ۳ (Hz)	نتایج آزمایش ۲ (Hz)	نتایج آزمایش ۱ (Hz)	شماره فرکانس طبیعی
۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۱
۱۷۸.۵	۱۷۷.۵	۱۷۷.۵	۱۷۷.۵	۱۷۷	۲
۳۱۸	۳۱۶	۳۱۶	۳۱۵.۵	۳۱۸	۳
۳۹۶	۳۹۶.۵	۳۹۶	۳۹۵	۳۹۱.۵	۴
۷۵۹	۷۵۶.۵	۷۶۰	۷۵۸.۵	۷۵۷.۵	۵
۸۵۹	۸۵۶.۵	۸۴۶.۵	۸۴۰.۵	۸۳۳	۶

نتایج نشان می‌دهد که گشتاور پیچشی سفت کردن پیچ بر روی فرکانس طبیعی سازه تقریباً اثر مستقیم دارد و این تأثیر به خصوص در فرکانس‌های طبیعی بالاتر مشهود است. همچنین در مقایسه‌ی فرکانس‌های طبیعی آزمایش شماره‌ی 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 (۸) پاسخ فرکانسی سازه برای دو مقدار کمترین و بیشترین گشتاور پیچشی مورد آزمایش نشان داده شده است که برای فرکانس‌های چهارم و ششم به ترتیب به مقدار ۴.۵ هرتز و ۲۶ هرتز کاهش فرکانس ایجاد می‌شود.

### ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل مودال تجربی و به‌روزرسانی مدل اجزاء محدود در حالت ورق نبشی و مدل ورق فلنج نبشی، تغییرات 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. در برخی فرکانس‌های طبیعی رفتار معکوس در تغییرات آن با کاهش میزان شل‌شدگی پیچ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی عدم رفتار مستقیم مابین تغییرات گشتاور پیچشی و فرکانس طبیعی است که می‌تواند از عوامل دیگر همچون رفتار غیرخطی اتصالات اثر بپذیرد. بیشترین کاهش فرکانس طبیعی در تغییر گشتاور پیچشی سفت کردن پیچ از مقدار ۷.۸ نیوتن متر به ۱ نیوتن متر، در فرکانس ششم مشاهده می‌شود که برابر با ۲۶ هرتز است. همچنین مدل کردن لایه رابط به جای در نظر گرفتن اتصال مستقیم پیچ و مهره، می‌تواند نتایج خوبی را ارائه دهد.



شکل ۸. مقایسه پاسخ فرکانسی سازه در دو مقدار مختلف گشتاور سفت‌کردن پیچ (شتابسنج)

## مراجع

۱. 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.
۲. 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.
۳. مذهب، حسین و متوسل‌الحق، مهرداد و طالبی توتی، روح‌الله، "بررسی و تحلیل اثر شل‌شدگی اتصالات غیر دائمی پیچی در سازه‌ی ورق بر روی ویژگی‌های ارتعاشی"، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی آکوستیک و ارتعاشات، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۴۰۲.
۴. پیردیر، ابودر و محمدی، مهرداد و کاظم زاده پارسی، محمد جواد و رجبی، مجید، "مطالعه تحلیلی تأثیر شل‌شدگی بر رفتار ارتعاشات غیرخطی اتصالات پیچ و مهره‌ای"، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱۲، سال ۱۴۰۰.
5. H. Ahmadian, H. Jalali, "Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(2), 1041-1050, (2007).
6. 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).
7. 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).
8. D.D. Quinn, "Modal analysis of jointed structures", *Journal of Sound and Vibration*, 331(1), 81-93, (2012).
9. G. Park, K.-N. Hong, H. Yoon, "Vision-based structural FE model updating using genetic algorithm", *Applied Sciences*, 11(4), 16-32, (2021).
10. 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).