مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1395، دوره 16، شماره 3، ص‌ص 35-42

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

توسعه‌ی یک الگوی جدید برای به‌روزرسانی مدل المان محدود اتصالات پیچی و مقایسه کارآیی آن با رویکرد لایه واسط

سعید شکراللهی[1*]، حمید احمدیان[2]، فرهاد عادل[3]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوافضا، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
3- دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
* تهران، 143/14665 ، s_shokrollahi@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 آبان 1394
پذیرش: 12 بهمن 1394
ارائه در سایت: 05 اسفند 1394

کلید واژگان:
دینامیک خطی
اتصال پیچی
لایه رابط
شناسایی پارامتر
به‌روزرسانی مدل

چکیده

در این مقاله، الگوی جدیدی تحت عنوان لایه رابط برای شبیه‌سازی رفتار دینامیک خطی اتصالات پیچی و به‌روزرسانی مدل المان محدود آنها در حالت سه‌بعدی ارائه شده است. لایه رابط، نواحی مجاور در طرفین سطوح مشترک اتصال در زیرسازه‌ها را یکپارچه‌سازی کرده و روابط ساختاری المان‌های آن با مولفه‌های نرمال و برشی تعریف شده است. در ادامه خواص الاستیک نامعلوم و متفاوتی از المان‌های سه‌بعدی مجاور به آن‌ها نسبت داده شده و پارامتر(های) نامعلوم مدل با فرایند به‌روزرسانی با استفاده از نتایج آزمون مودال شناسایی می‌شوند. تحریک سازه و اندازه‌گیری تابع پاسخ فرکانسی آن با استفاده از روش تحریک با چکش صورت گرفته است. با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی در نرم‌افزار انسیس، اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی حاصل از آزمون و پیش‌بینی شده با مدل پارامتری، به عنوان تابع هدف کمینه شده است. کارآیی مدل لایه رابط با اعمال آن به یک سازه واقعی متشکل از دو تیر آلومینیومی مشابه از جنس آلیاژ 7075-T651 و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از مدل متداول لایه واسط اثبات شده است. نتایج حاصل از مدل ارائه شده انطباق بسیار خوبی با فرکانس‌های تجربی متناظر دارد. پیش‌بینی این مدل برای فرکانس‌های بالاتر که در فرایند به روزرسانی مشارکتی ندارند، در مقایسه با نتایج حاصل از مدل المان واسط دارای خطای کمتری است. به دلیل سادگی، دقت و سرعت در محاسبات، این مدل را می‌توان در شبیه‌سازی اتصالات پیچی در سازه‌های بزرگ و پیچیده با نرم‌افزارهای المان محدود تجاری به کار گرفت.

A New Approach for Finite Element Model Updating of Bolted Joints and Comparison with Interface Layer Method

Saeed Shokrollahi[1*], Hamid Ahmadian[2], Farhad Adel[3]

1- Department of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
3- Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 14665/143 Tehran, Iran, s_shokrollahi@mut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 November2015
Accepted 01 February 2016
Available Online 24 February 2016

Keywords:
Linear Dynamics
Bolted Joint
Connective Layer
Parameter Identification
Model Updating

ABSTRACT

In this paper, a new model called connective layer is developed for simulation of linear dynamical behavior of bolted lap joints and model updating in 3D models. Connective layer unifies neighboring zones on sides of common surfaces of substructures in joint region. The constitutive relation of connective elements is defined by decomposing it into its normal and shear components. Unknown and different elastic properties with respect to the neighboring solid elements are defined for connective layer and the unknown parameters of the model are identified by a finite element model updating technique using modal test data. The frequency response of the structure is measured by exciting the structure using an impact hammer. Using an optimization algorithm in ANSYS, the difference between the experimentally measured frequencies and the predictions of the parametric model is minimized as objective function. The connective element performance is demonstrated by application to an actual structure containing a single lap bolted joint coupling two identical aluminum alloy 7075-T651 beams and, finally, comparison of results to those of interface elements. The outcomes of presented model have good correlation with the experimental results. The proposed method predicts the higher mode frequencies which do not participate in model updating process with minimum error in comparison to those of interface element. Due to simplicity, accurate and computationally efficient manner, this model can be incorporated into commercial finite element codes to simulate bolted joints in large and complex structures.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
S. Shokrollahi, H. Ahmadian, F. Adel, A New Approach for Finite Element Model Updating of Bolted Joints and Comparison with Interface Layer Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 35-42, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.28.5]

1- مقدمه

با وجود گذشت بیش از 250 سال از شروع انقلاب صنعتی در اروپا که پس از آن پیچ و مهره‌ها به عنوان یکی از اعضای کلیدی ماشین‌آلات صنعتی و سازه‌های گوناگون اهمیت روزافزونی پیدا کردند، هنوز مجهولات زیادی در خصوص فیزیک مرتبط با سطوح مشترک اتصالات پیچی، به صورت حل نشده باقی‌مانده است. در دنیای مدرن امروزی، اتصالات پیچی یکی از عمومی‌ترین روش‌های مورد استفاده در مونتاژ قطعات در سازه‌های مختلف مهندسی از جمله سازه‌های هوایی بوده و تاثیر زیادی در کیفیت پاسخ ارتعاشی و رفتار دینامیکی آن‌ها دارند. زیرا که پاسخ این سیستم‌ها در برابر بارهای دینامیکی، وابسته به مکانیک این اتصالات و سطوح مشترک آنها می‌باشد.

باوجود پیشرفت‌های زیادی که در حیطه قدرت محاسباتی پردازنده‌ها و قابلیت‌های شبیه‌سازی نرم‌افزارهای المان محدود حاصل شده است، در حال حاضر المان خاصی که بتواند مدل دقیقی از اتصالات پیچی در شرایط دینامیکی ارائه کند وجود ندارد. علت این امر آن است که هنوز فیزیک حاکم بر سطوح مشترک اتصالات پیچی و یا مکانیزم‌های مؤثر در رفتار آنها به خوبی شناسایی نشده است. مدل‌سازی دقیق اتصالات پیچی، شرط لازم برای ایجاد یک مدل دینامیکی دقیق از سازه‌های مونتاژ شده می‌باشد. امروزه به دلیل عدم توانایی در محاسبه مکانیک سطوح مشترک اتصالات، دست‌یابی به چنین مدلی امکان‌پذیر نیست [1].

درک صحیح از فیزیک پیچیده متناظر با سطوح اتصالات پیچی در سازه‌ها و مدل‌سازی عملکرد و پاسخ آنها در شرایط بارگذاری دینامیکی، محققین را برای چندین دهه مشغول کرده است. به دلیل عدم‌قطعیت‌های زیاد در بحث مدل‌سازی اتصالات پیچی [2]، و نیز به دلیل تاثیر شدید اتصالات در رفتار دینامیکی سازه‌ها، محققان از دیرباز به دنبال ارائه مدل‌های مناسبی برای شبیه‌سازی اتصالات پیچی بوده‌اند. استفاده از فنر و میراگر [3-5]، ابعاد جبرانی[1] [6]، المان ژنریک[2] [7]، المان واسط[3] [8]، المان جنکینز یا مدل ایوان[4] [10,9] نمونه‌هایی از رویکردهای پارامتری مورد استفاده در مدل‌سازی اتصالات پیچی هستند که توسط محققین مختلف در طی سال‌های گذشته توسعه یافته‌اند.

مفهوم المان (یا لایه) واسط، نخستین بار برای مدل‌سازی سطوح تماس در مسائل مرتبط با زمین‌شناسی (نظیر لغزش صخره‌ها) و حفاری (ارتباط مته با خاک اطراف) مطرح گردیده است [11]. این رویکرد به دو روش عمده تقسیم می‌شود که عبارتند از المان‌های واسط با ضخامت صفر[5] و المان‌های واسط با ضخامت نازک[6]. در روش المان واسط با ضخامت نازک [12]، رفتار اتصال با ایجاد لایه نازکی از المان‌هایی با خواص ماده‌ای نامعلوم، مابین دو زیرسازه کنترل می‌شود. رفتار این المان‌ها همانند سایر المان‌های مجاور می‌باشد. ولی در روش المان واسط با ضخامت صفر [13]، فرض می‌شود که لایه واسط دارای ضخامت صفر بوده و یک رابطه سازگاری، معمولا بین مقادیر سفتی برشی و سفتی نرمال، تعریف می‌شود.

استفاده از لایه واسط با ضخامت اندک برای شناسایی سطوح اتصالات مکانیکی در مباحث مرتبط با دینامیک سازه‌ها، نخستین بار توسط احمدیان و همکارانش [14] پیشنهاد شده است و در حال حاضر به عنوان روش موثری برای مدل‌سازی اتصالات در مباحث به‌روزرسانی مدل المان محدود[7] با استفاده از نتایج آزمون مودال مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض اساسی در این روش این است که سطوح اتصال بین دو قطعه را می‌توان با لایه نازکی از موادی با جنس و خواص الاستیک نامعلوم مدل‌سازی نمود. سپس مقادیر نامعلوم پارامترها را به کمک داده‌های تجربی شناسایی نمود. نتایج رضایت‌بخشی از اعمال این روش در شناسایی اتصالات در سازه‌های با سطوح بزرگ [8]، اتصالات پیچی [14] و جوش نقطه‌ای [15] منتشر شده است. در تمامی این مقالات از نرم‌افزار نسترن[8] برای بهینه‌سازی و کمینه‌کردن تابع هدف استفاده شده است. این روش برای محاسبه میرایی اتصالات نیز مورد استفاده قرار گرفته است [16].

یکی از مباحث مهم در استفاده از روش المان واسط تعیین ضخامت آن است. در حال حاضر رابطه تئوری دقیقی برای یافتن ضخامت لایه واسط وجود ندارد و مقدار بهینه آن وابسته به پارامترهایی نظیر میزان صافی سطوح اتصال، نحوه توزیع زبری‌ها، ابعاد اتصال، مقدار پیش‌بار و تاثیر المان‌های مجاور بر این لایه می‌باشد [17]. جلالی و همکارانش [18] و ایران‌زاد و احمدیان [19] در شناسایی پارامترهای یک اتصال پیچی لب‌به‌لب با مدل‌سازی دوبعدی، ضخامت لایه واسط را برابر با مقدار ثابت فاصله تارهای خنثی دو تیر گرفته‌اند. اما مقدار مناسب برای ضخامت این لایه در مدل‌های سه بعدی، مبهم است. پانده و شارما نشان داده‌اند [20] که نسبت ضخامت المان واسط به میانگین ابعاد اتصال می‌تواند تا 0.001 برسد، بدون اینکه مشکلی در محاسبات به وجود آید. اما دسای و همکارانش [12] با انجام یک مطالعه پارامتری پیشنهاد کرده‌اند که این نسبت در محدوده 0.01 تا 0.1 باشد. بنابراین با توجه به محدوده‌های ذکر شده لازم است تا یک فرایند سعی و خطا برای یافتن ضخامت بهینه لایه واسط در مدل‌های سه‌بعدی، صورت پذیرد. این امر منجر به افزایش میزان محاسبات در فرایند به‌روزرسانی می‌شود. همچنین اختصاص چگالی به المان‌های واسط، باعث افزایش جرم مدل در قیاس با سازه واقعی می‌گردد. این مشکل به خصوص در مدل‌سازی اتصالات در سازه‌های بزرگ پیش می‌آید. در نتیجه استفاده از المان واسط در مدل‌های سه‌بعدی مناسب به نظر نمی‌رسد.

هدف اصلی این مقاله، ارائه‌ی یک الگوی جدید، ساده و موثر تحت عنوان لایه‌ی رابط در شبیه‌سازی سه‌بعدی سطوح مشترک اتصالات در شرایط بارگذاری دینامیکی و تصحیح پیش‌بینی‌های مدل عددی است. هدف دیگر ارزیابی امکانات و قابلیت‌های نرم‌افزار انسیس[9] در فرایند به‌روزرسانی مدل المان محدود سازه‌ها است.

2- مدل المان محدود اتصال

در یک اتصال پیچی سفت شده با گشتاور استاندارد و تحت بارهای تحریک با دامنه کم، لغزشی در سطوح اتفاق نمی‌افتد و می‌توان از اثرات غیرخطی اتصال چشم‌پوشی نمود. در این مقاله اتصال پیچی به قدر کافی سفت شده (تحت گشتاور پیچشی بیشینه پیشنهاد شده در مراجع) و در معرض بارهای دینامیکی با دامنه کم قرار دارد. در نتیجه از یک مدل خطی برای بیان فیزیک غالب در رفتار دینامیکی اتصال پیچی استفاده شده است.

سازه مورد بررسی از دو تیر آلومینیومی مشابه از جنس آلیاژ 7075-T651 که یکی از مهم‌ترین مواد مورد استفاده در سازه‌های هوایی به شمار می‌رود تشکیل شده و در شکل 1 نشان داده شده است. اتصال با استفاده از

[1] Offset Dimension
[2] Generic Element
[3] Interface Element
[4] Jenkins Element (Iwan Model)
[5] Zero-Thickness Interface Element
[6] Thin-Layer Interface Element

[7] Finite Element Model Updating
[8] MSC/NASTRAN
[9] ANSYS 14.0

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.28.5]

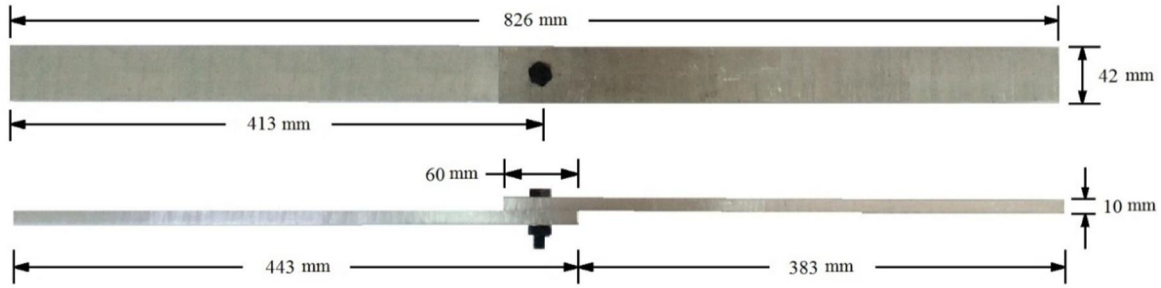


Fig. 1 Dimensions of the investigated structure (AL Alloy 7075-T651)

شکل 1 ابعاد هندسی سازه بررسی شده در تحقیق (آلیاژ آلومینیوم 7075)

یک عدد پیچ و مهره به قطر 10 میلی‌متر و تحت گشتاور پیچشی 50 نیوتن‌متر صورت گرفته است. در مدل المان محدود اولیه که با استفاده از نرم‌افزار انسیس و المان‌های سه‌بعدی 8 گره‌ای[1] ایجاد شده است، گره‌های ناحیه اتصال در یکدیگر ادغام شده و پیچ و مهره با جرم متمرکز جایگزین شده است. این مدل در شکل 2 نشان داده شده است. پنج فرکانس طبیعی اول خمشی حاصل از این مدل اولیه در جدول 1، آورده شده است. این نتایج در مقایسه با نتایج حاصل از آزمون مودال مقادیر بزرگتری را نشان می‌دهند. این امر بیانگر آن است که استفاده از روش ادغام گره‌های متناظر، سازه را بیش از مقدار واقعی آن سفت کرده است و اثر نرم‌شدگی در ناحیه اتصال در این مدل لحاظ نمی‌شود.

برای در نظر گرفتن اثرات نرم‌کنندگی اتصال، راهکار موثری در این مقاله تحت عنوان لایه رابط معرفی شده است. تفاوت این روش با روش المان واسط در شکل 3، نشان داده شده است. همانطور که در شکل 3-a مشاهده می‌شود، در روش المان (یا لایه) واسط، لایه‌ای جدا از زیرسازه‌ها با جنس نامعلوم در سطوح مشترک ایجاد می‌شود، اما در روش لایه رابط، بخشی از المان‌های تشکیل‌دهنده زیرسازه‌ها در دو طرف سطوح اتصال مورد استفاده قرار می‌گیرند. امتیاز این روش نسبت به روش المان واسط در پرهیز از اعمال هرگونه جرم اضافی به سیستم به خصوص در سازه‌های بزرگ است. زیرا که چگالی این المان‌ها همانند چگالی المان‌های مجاور (زیرسازه‌ها) در نظر گرفته می‌شوند.

در این مقاله، علی‌رغم ماهیت پیچیده‌ی اتصالات پیچی، بررسی مشخصه‌های مهم و غالب در رفتار دینامیکی آنها مورد نظر بوده است. المان‌های مورد استفاده در الگوی لایه‌ی رابط از نوع المان‌های 8 گره‌ای بوده و رفتار آن همانند سایر المان‌های موجود در مدل است. فقط خواص الاستیک آنها در مقایسه با المان‌های مجاور متفاوت است. این مدل را که در شکل 4 نشان داده شده است، می‌توان به آسانی در نرم‌افزارهای المان محدود مورد استفاده قرار داد. همانگونه که در شکل 4 دیده می‌شود، برای شروع مساله، فرض بر این است که ناحیه متاثر از اتصال تا صفحات خنثای دو تیر گسترش می‌یابد. ضخامت این ناحیه می‌تواند کمتر یا بیشتر از این باشد. چگالی این ناحیه متناظر با چگالی المان‌های مجاور (چگالی آلومینیوم) می‌باشد.

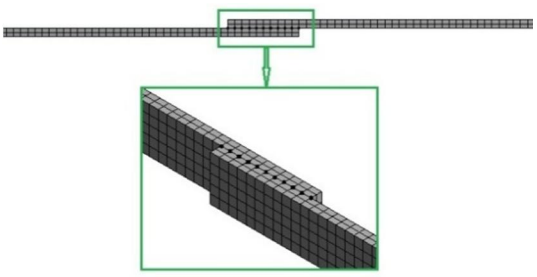


Fig. 2 Initial FE model with merged nodes

شکل 2 مدل اولیه با ادغام گره‌های متناظر ناحیه اتصال

[1] Solid185

3- روابط ساختاری

برای مدل‌سازی اتصالات با استفاده از لایه رابط، لازم است تا روابط ساختاری مناسبی به کار گرفته شوند. معادلات ساختاری را نمی‌توان به عنوان قوانین بنیادی طبیعت برشمرد. اما می‌توان آن‌ها را به عنوان تعریفی از مواد ایده‌آل در نظر گرفت که معمولا تحت عنوان مدل‌های ساختاری از آن‌ها یاد می‌شود. مدل‌های ساختاری ارائه شده برای شبیه‌سازی سطوح اتصالات، باید شرایط زیر را ارضا کنند [9]؛

1- قادر به بیان فیزیک غالب در رفتار اتصال و شبیه‌سازی خصوصیات مهم و ویژگی‌های کلیدی در پاسخ اتصال باشد.

2- پارامترهای مدل به روشی سیستماتیک از نتایج تجربی قابل استخراج باشند.

3- یکپارچه‌سازی و به کارگیری مدل مورد نظر در نرم‌افزارهای تجاری المان محدود، امکان‌پذیر باشد.

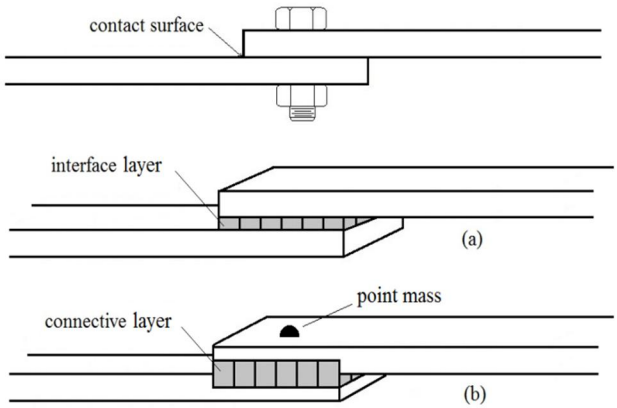


Fig. 3 Comparison of interface layer (a) and connective layer (b)

شکل 3 مقایسه شماتیک روش لایه واسط (a) با روش لایه رابط (b)

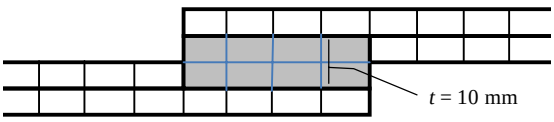


Fig. 4 Total thickness of the connective layer is taken equal to the neutral planes offset of two bolted beams

شکل 4 ضخامت لایه رابط، برابر با فاصله صفحات خنثی دو تیر انتخاب شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.28.5]

اگر بردارهای تنش و کرنش به صورت روابط (2,1) در نظر گرفته شوند؛

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}\}^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}\}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

شکل کلی روابط ساختاری را می‌توان به صورت روابط (4,3) درنظر گرفت:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \tag{3}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} [C_{nn}] & [C_{ns}] \\ [C_{sn}] & [C_{ss}] \end{bmatrix} \tag{4}$$

رابطه (3)، بیانگر قانون هوک بوده و تنها برای کرنش‌های کوچک معتبر است. در رابطه (4)، $[C]_{6x6}$ ماتریس ساختاری المان‌های لایه رابط بوده و ارتباط بین تنش‌ها و کرنش‌ها را برقرار می‌سازد. $[C_{nn}]_{3x3}$ زیرماتریس نرمال، $[C_{ss}]_{3x3}$ زیرماتریس برشی و $[C_{ns}]_{3x3}$ و $[C_{sn}]_{3x3}$ بیانگر اثرات کوپلینگ بین رفتار نرمال و برشی در سطوح اتصال می‌باشند. در این مقاله از اثرات کوپلینگ صرفنظر شده است. در نتیجه رابطه (4) به صورت (5) بازنویسی می‌شود:

$$[C] = \begin{bmatrix} [C_{nn}] & [0] \\ [0] & [C_{ss}] \end{bmatrix} \tag{5}$$

با توجه به رابطه (5)، ماتریس ساختاری لایه رابط برای رفتار الاستیک خطی را می‌توان تنها با دو پارامتر مستقل E و ν (مدول یانگ و ضریب پواسون) به صورت رابطه (6) تعریف نمود:

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2}-\nu & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{2}-\nu & 0 \\ sym & & & & & \frac{1}{2}-\nu \end{bmatrix} \tag{6}$$

رابطه (6)، در واقع ماتریس سفتی برای یک ماده ایزوتروپیک (جنس المان‌های لایه رابط) بوده و مقادیر مناسب پارامترهای E و ν که مرتبط با سفتی‌های نرمال و برشی این المان‌ها هستند، ناشناخته بوده و با فرایند به‌روزرسانی مدل المان محدود شناسایی می‌شوند. با تنظیم این پارامترها می‌توان مقادیر مناسب برای سفتی نرمال و سفتی برشی المان‌های لایه رابط را استخراج نمود. برای اجتناب از نامفهوم شدن و نامتناهی شدن درایه‌های ماتریس $[C]$، محدوده مجاز برای پارامترهای فوق در رابطه (7) آمده است.

$$E > 0, \quad -1 < \nu < 0.5 \tag{7}$$

این نتیجه فقط برای مواد الاستیک ایزوتروپیک صادق است. ضریب پواسون منفی معادل با انبساط جانبی در جسم تحت کشش می‌باشد. چنین موادی را در عمل می‌توان تولید نمود و معروف به مواد آکستیک[1] هستند. محدوده دیگر برای ضریب پواسون در حالت حدی یعنی $\nu = 0.5$ متناظر با مواد تراکم‌ناپذیر می‌باشد.

با اینکه مدل‌های ساختاری تنها بخشی از خواص واقعی مواد را مدل می‌کنند، چیزی از ارزش آنها کاسته نمی‌شود. زیرا مدلی ریاضی از یک سیستم فیزیکی - بر اساس داده‌های محدود از مشاهدات تجربی - ایجاد می‌کنند که امکان پیش‌بینی رفتار آن سیستم را در شرایط مختلف می‌دهد. بدیهی است که کیفیت پیش‌بینی‌ها وابستگی زیادی به مهارت فرد برای ایده‌آل‌سازی مناسب از مواد واقعی دارد که از دیدگاه کمی، قادر به تبیین خصوصیات مشاهده شده تجربی باشد.

4- آزمون مودال

برای تعیین فرکانس‌های طبیعی، سازه‌ی واقعی تحت آزمون مودال قرار گرفته و توابع پاسخ فرکانسی آن اندازه‌گیری شده است. شکل 5 تحلیل‌گر مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد که یک تحلیل‌گر 36 کاناله با نام تجاری وای‌ای6268-36[2] می‌باشد. وضعیت قرارگیری سازه در آزمون مودال در شکل 6، نشان داده شده است. این سازه از دو تیر آلومینیومی مشابه تشکیل شده و با استفاده از دو عدد ریسمان به طول حدود یک متر شرایط تکیه‌گاهی آزاد برای آن شبیه‌سازی شده است. تیرهای آلومینیومی از آلیاژ 7075-T651 بوده و جرم کل سازه در حدود 1.075 کیلوگرم است.

تحریک سازه با چکش مودال انجام شده و نیروی اعمالی با استفاده از نیروسنج موجود در سر چکش اندازه‌گیری می‌شود. برای دست‌یابی به دقت بیشتر، 5 عدد ضربه در نقاط تحریک اعمال شده است. از نظر تئوری فرکانس‌ها را می‌توان تنها با یک شتاب‌سنج به دست آورد، ولی چون جرم سنسورها در قیاس با جرم سازه اندک است، برای قابلیت اطمینان بیشتر در ثبت داده‌ها از چهار عدد شتاب‌سنج استفاده شده است. جرم هر شتاب‌سنج 9 گرم (کلا 36 گرم) بوده و نسبت جرم آنها به جرم کل سازه (1075 گرم) در حدود 3.4% است که از محدود مجاز 10% فاصله دارد [21]. همچنین، جرم این سنسورها به صورت جرم‌های متمرکز در مدل المان محدود در نظر گرفته شده است. داده‌های ثبت شده در حوزه زمان، با استفاده از نرم‌افزار وای‌ای7600[3] جمع‌آوری شده و با استفاده از نرم‌افزار ان‌مودال-5[4] به حوزه فرکانس منتقل می‌شوند. با تقسیم پاسخ سازه به تحریک ورودی در حوزه فرکانس، تابع پاسخ فرکانسی سازه محاسبه می‌شود.

شکل 7، پاسخ فرکانسی سازه را در بازه‌ی 0 تا 1100 هرتز نشان می‌دهد که حاصل از تقسیم شتاب سازه در نقطه‌ی B بر تحریک سازه در همان نقطه است. پنج فرکانس طبیعی اول خمشی سازه در بازه‌ی فوق‌الذکر در جدول 1 آورده شده‌اند. بر اساس داده‌های جدول 1، در مودهای زوج (مود دوم و چهارم)، حداقل خطا بین نتایج آزمون و مدل مشاهده می‌شود. دلیل این امر، تشکیل گره (نقطه ساکن مود) در مکان اتصال در مودهای زوج خمشی است که اثر اتصال در دینامیک سازه را به حداقل می‌رساند.

رفتار المان‌های لایه رابط متاثر از پارامترهای الاستیک ناشناخته‌ای است که بر پاسخ خطی سازه اثرگذار هستند. با فرایند به روزرسانی مدل با استفاده از نتایج تجربی، مقادیر مناسب این پارامترها شناسایی شده و رفتار دینامیکی مدل، مشابه با رفتار مشاهده شده از سازه واقعی می‌گردد.



Fig. 5 YE6268-36 analyzer

شکل 5 تحلیل‌گر مورد استفاده در آزمون مودال

[1] Auxetic

[2] YE6268-36
[3] YE7600
[4] N-modal 5.0

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.28.5]

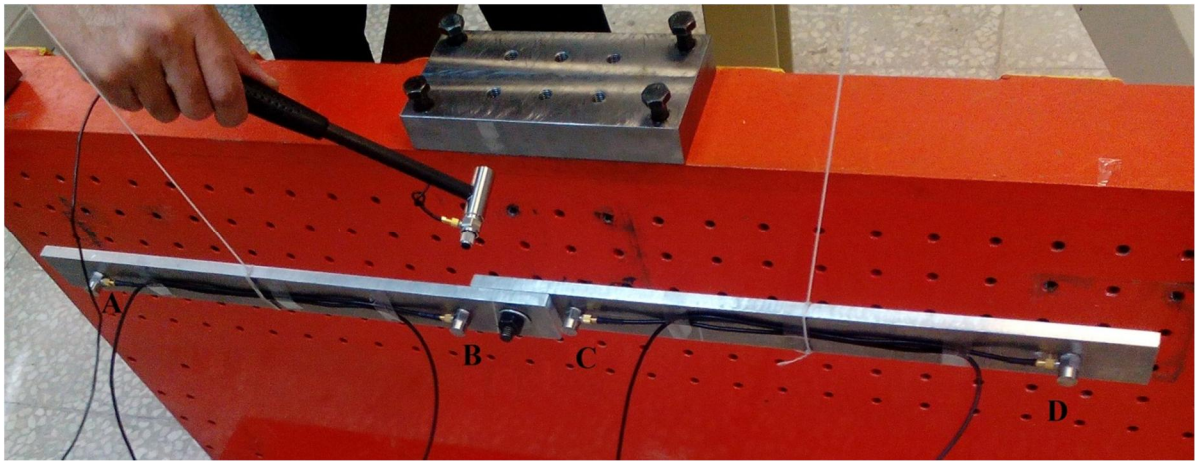


Fig. 6 Test set-up

شکل 6 وضعیت سازه در آزمون مودال

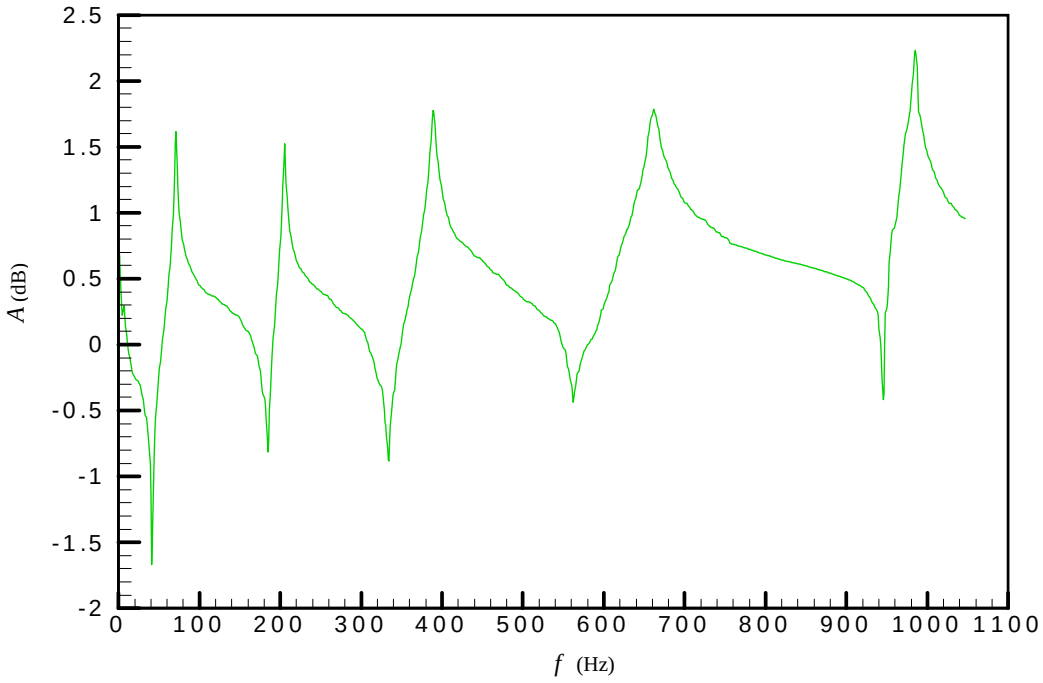


Fig. 7 Frequency response function

شکل 7 تابع پاسخ فرکانسی

جدول 1 مقایسه فرکانس‌های طبیعی حاصل از آزمون مودال و مدل به‌روزشده المان محدود در دو حالت (لایه رابط و لایه واسط)

Table 1 A comparison of natural frequencies observed from Test and predicted by updated FE model (Connective and interface layers)

شماره مود	فرکانس حاصل از آزمون (هرتز)	مدل اولیه المان محدود		مدل به‌روز شده با لایه رابط [شناسایی مدول یانگ]		مدل به‌روز شده با لایه واسط [شناسایی مدول یانگ]	
		فرکانس (هرتز)	خطا (%)	فرکانس (هرتز)	خطا (%)	فرکانس (هرتز)	خطا (%)
1	71.81	78.61	6.80	71.62	-0.26	72.71	1.41
2	205.86	209.02	1.54	207.36	0.73	208.26	1.17
3	389.68	417.27	7.08	389.71	0.01	387.09	-0.66
4	660.69	671.93	1.70	659.69	-0.15	653.18	-1.14
5	984.52	1041.40	5.78	982.29	-0.23	974.95	-0.97
میانگین قدر مطلق خطاها			4.58		0.28		1.07

5- شناسایی پارامترها

فرایند شناسایی پارامترهای اتصال با استفاده از ماژول بهینه‌سازی هدف‌مند[1] در نرم‌افزار انسیس انجام شده است. پس از تعریف پارامترهای مطلوب در این نرم‌افزار، تابع هدف در نرم‌افزار اکسل[2] به عنوان حل‌کننده تعریف شده و

[1] Goal Driven Optimization

[2] MS Excel

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.28.5]

ارتباط بین این دو نرم‌افزار از طریق پارامترهای موجود در تابع هدف برقرار می‌گردد. این ارتباط در شکل 8، نشان داده شده است. در این مرحله یک فرایند بهینه‌سازی صورت می‌گیرد. تابع هدف در این فرایند، اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی سه مود اول خمشی سازه بین مدل المان محدود و آزمون مودال می‌باشد که باید کمینه گردد. فرکانس‌های خمشی چهارم و پنجم، رزرو می‌شوند تا در پایان فرایند بهینه‌سازی برای ارزیابی میزان دقت پیش‌بینی مدل برای فرکانس‌های بالاتر، مورد استفاده قرار گیرند. رابطه (8)، این تابع هدف را تعریف کرده است.

$$\min \sum_{j=1}^{3} W_j \left[\frac{\omega_j^{(a)}}{\omega_j^{(e)}} - 1 \right]^2 \qquad (8)$$

در رابطه (8)، $\omega_j^{(a)}$ و $\omega_j^{(e)}$ به ترتیب فرکانس‌های طبیعی تحلیلی (حاصل از مدل المان محدود) و تجربی (حاصل از آزمون مودال) بوده و W_j ضریب وزنی متناظر با هر مود است. چون در این تحقیق، هیچ مودی بر مود دیگر ارجحیت ندارد، تمامی ضرایب وزنی برابر با واحد انتخاب می‌شوند. نرم‌افزار انسیس در هر تکرار از فرایند بهینه‌سازی، مقادیر ویژه‌ی سازه را محاسبه کرده و با ارسال آن به نرم‌افزار اکسل، مقدار تابع هدف محاسبه می‌گردد. مقدار محاسبه شده تابع هدف به ماژول بهینه‌سازی انسیس ارسال شده و با مقادیر قبلی مقایسه می‌شود. این فرایند تکرار می‌گردد تا تابع هدف کمینه گردد. نرم‌افزار انسیس مقادیر ویژه را با استفاده از رابطه (9) محاسبه می‌کند:

$$(K - \lambda_i M)\phi = 0\,, \qquad \lambda_i = \omega_i^2\,, \quad i = 1,2,\ldots,5 \qquad (9)$$

که K و M به ترتیب ماتریس سفتی و جرم کل سازه بوده و λ و ϕ به ترتیب مقادیر ویژه و بردارهای ویژه می‌باشند.

مقادیر اولیه برای پارامترهای به‌روز شونده در المان‌های لایه رابط برابر با مقادیر متناظر در المان‌های مجاور انتخاب شده است. چون اتصال پیچی باعث ایجاد یک کاهش موضعی در سفتی می‌گردد، محدوده مجاز تغییرات برای مدول یانگ از 0.01 تا 1.1 مقادیر آلومینیوم (E = 72 GPa) انتخاب شده است. به دلیل اجتناب از مواد نامتعارف، محدوده تغییرات ضریب پواسون در بازه مثبت یعنی $0 < \nu < 0.5$ در نظر گرفته می‌شود.

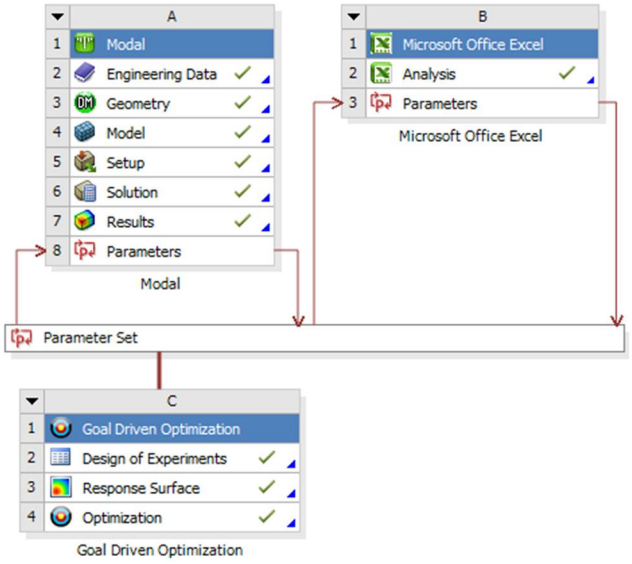


Fig. 8 ANSYS/Excel interplay in joint identification process

شکل 8 ارتباط نرم‌افزارهای انسیس و اکسل در فرایند شناسایی پارامترهای اتصال

در مرحله به‌روزرسانی مدل، فقط مدول یانگ المان‌های لایه رابط به عنوان پارامتر به‌روز شونده انتخاب گردید. در این حالت ضریب پواسون و چگالی این المان‌ها برابر با مقادیر متناظر در آلیاژ آلومینیوم (به ترتیب 0.33 و 2.81 گرم بر سانتی‌مترمکعب) انتخاب شده است. نتایج حاصل از به‌روزرسانی در جدول 1، آورده شده است. مشاهده می‌گردد که از سه فرکانس اول که در فرایند به‌روز رسانی مدل مشارکت داشتند، همگی به خوبی تصحیح شده‌اند. علاوه بر این، پیش‌بینی این مدل برای فرکانس‌های به روز نشده سازه (فرکانس‌های چهارم و پنجم) بسیار مناسب است و با مقادیر واقعی آن دارای اختلاف ناچیزی است. نکته قابل ذکر این است که نتایج فوق تنها با به‌روزرسانی یک پارامتر (مدول یانگ) حاصل شده است و این مساله در به‌روزرسانی سازه‌های بزرگ حائز کمال اهمیت است. زیرا باعث کاهش قابل توجهی در زمان و هزینه محاسبات می‌گردد.

مقدار شناسایی شده برای مدول یانگ (و مدول برش) در این حالت در جدول 2 آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدول یانگ المان‌های لایه رابط در حدود 8.5 برابر نسبت به مقدار متناظر آن در المان‌های مجاور کاهش یافته است.

برای ارزیابی کارآیی الگوی ارائه شده، اتصال مورد بحث با الگوی المان لایه‌ی واسط نیز مدل‌سازی گردید. مدل مورد نظر در شکل 9 نشان داده شده است. در این مرحله، ضخامت لایه‌ی واسط برابر با 10 میلی‌متر (مشابه ضخامت لایه‌ی رابط) و چگالی آن همانند چگالی آلومینیوم است. نتایج حاصل از به‌روزرسانی این مدل در ستون آخر از جدول 1 آورده شده است. مشاهده می‌شود که خطاهای این روش در مقایسه با روش لایه رابط قابل ملاحظه بوده و میانگین قدر مطلق خطاها در حدود 4 برابر بزرگ‌تر شده است. ضمن اینکه در حدود 71 گرم جرم اضافی (جرم المان‌های رابط) به مدل تحمیل شده است. هر چند با انتخاب مقادیر بسیار کوچک برای چگالی این لایه می‌توان اثرات افزایش جرم را به حداقل رساند یا ضخامت لایه واسط را به عنوان یک پارامتر به‌روزرسانی تعریف نمود. با این حال نتایج مطلوبی حاصل نمی‌شود. شکل 10 نتایج حاصل از لایه رابط را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل 10 مشاهده می‌شود، بهینه‌سازی در نرم‌افزار منجر به سه نقطه‌ی طراحی پیشنهادی شده است که اولین نقطه پیشنهاد شده، بهینه بوده و دارای کمترین مقدار برای تابع هدف می‌باشد.

6- بحث و نتیجه‌گیری

تعریف مدلی ساده که فیزیک غالب در رفتار یک اتصال پیچی را شبیه‌سازی کند، در مدل‌سازی سازه‌های بزرگ و پیچیده اهمیت زیادی دارد. در این

جدول 2 مقادیر پارامترهای لایه رابط در مدل به‌روز شده

Table 2 Optimum values of connective layer parameters

پارامتر	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	مدول برشی (GPa)
مقدار بهینه	8.37	0.33	3.15

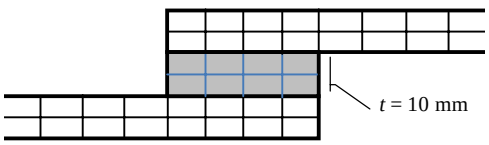


Fig. 9 Thickness of the interface layer elements is equal to the neutral planes offset of two bolted beams

شکل 9 ضخامت لایه واسط برابر با فاصله صفحات خنثی دو تیر است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.28.5]

Table of Schematic C4: Optimization

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		P12 - Young's Modulus (Pa)	P3 - Total Deformation Reported Frequency (Hz)	P4 - Total Deformation 2 Reported Frequency (Hz)	P5 - Total Deformation 3 Reported Frequency (Hz)	P6 - Total Deformation 4 Reported Frequency (Hz)	P7 - Total Deformation 5 Reported Frequency (Hz)	P11 - WB_ObjectiveFunction
2	Optimization Domain							
3	Lower Bound	7.2E+08						
4	Upper Bound	7.92E+10						
5	Optimization Objectives							
6	Objective	No Objective	Seek Target	Seek Target	Seek Target	No Objective	No Objective	Minimize
7	Target Value		71.81	205.86	389.68			
8	Importance		Higher	Higher	Higher			Higher
9	Constraint Handling							
10	Candidate Points							
11	Candidate A	8.3718E+09	71.617	207.36	389.71	659.69	982.29	5.95962E-05
12	Candidate B	1.5513E+10	75.793	208.05	405.83	667.88	1017.4	0.004456
13	Candidate C	2.2655E+10	77.636	208.35	413.21	671.34	1034	0.009017

Fig. 10 ANSYS output for optimization of connective layer model

شکل 10 نتایج حاصل از فرایند بهینه‌سازی در نرم‌افزار انسیس در حالت استفاده از مدل لایه رابط

مقاله، الگوی جدیدی تحت عنوان لایه رابط برای شبیه‌سازی سطوح مشترک اتصالات پیچی معرفی شد. رفتار دینامیک خطی یک اتصال پیچی با المان‌های تشکیل دهنده‌ی این لایه مدل‌سازی شده و پارامترهای این مدل در قیاس با نتایج تجربی، با کمینه کردن تابع هدف شناسایی شدند. برای سنجش پنج فرکانس طبیعی اول خمشی، سازه‌ی فیزیکی تحت آزمون مودال قرار گرفته و توابع پاسخ فرکانسی آن در محدوده 0 تا 1100 هرتز اندازه‌گیری گردید. پاسخ اندازه‌گیری شده با پاسخ پیش‌بینی شده از مدل که حاوی پارامترهای المان‌های رابط است، مقایسه می‌شود. مدل المان محدود به‌روز شده، قادر به بازتولید نتایج تجربی با دقت بالایی می‌باشد. اهم نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- در این تحقیق با انتخاب ضخامت لایه رابط برابر با فاصله صفحات خنثی، با به‌روزرسانی یک پارامتر (مدول یانگ المان‌های لایه رابط)، تمامی فرکانس‌های عددی به انطباق خوبی با فرکانس‌های متناظر تجربی می‌رسند. در صورتی که در روش المان واسط در مدل سه‌بعدی، هیچ بینشی در خصوص مقدار ضخامت این لایه وجود نداشته و مقدار بهینه آن به ناچار با در نظر گرفتن آن به عنوان یک پارامتر به‌روزشونده باید محاسبه شود. این امر سبب افزایش حجم محاسبات می‌گردد.
- مدول یانگ المان‌های لایه رابط در حدود 8.5 برابر نسبت به مقدار متناظر در المان‌های مجاور خود کاهش نشان می‌دهد. این امر بیانگر اثرات یک اتصال پیچی مبنی بر کاهش سفتی سازه در موضع اتصال است.
- چگالی المان‌های لایه رابط همانند چگالی المان‌های مجاور (در این مقاله آلومینیوم) در نظر گرفته می‌شود و بنابراین تغییری در وزن سازه به وجود نمی‌آید. ولی در مدل المان واسط چون یک لایه جداگانه مابین زیرسازه‌ها در محل فصل مشترک ایجاد می‌شود، به ناچار جرمی را به خود اختصاص خواهد داد. هر چند با انتخاب مقادیر بسیار کوچک برای چگالی این لایه می‌توان اثرات افزایش جرم را به حداقل رساند. ولی با این کار با افزایش سفتی در این ناحیه بدون افزودن جرم، سازه سفتی موضعی پیدا کرده و انطباق فرکانس‌ها به خوبی صورت نمی‌پذیرد. این ویژگی به خصوص در سازه‌های هوایی که دارای اتصالات زیادی هستند، حائز اهمیت است.
- نتایج حاصل از مدل متداول لایه واسط در قیاس با مدل پیشنهاد شده خطاهای بزرگتری را به خصوص در فرکانس‌های بالاتر نشان می‌دهد. بنابراین الگوی جدید ارائه شده در این مقاله، در پیش‌بینی فرکانس‌های متناظر با مودهای بالاتر که در فرایند به‌روزرسانی مدل مشارکت ندارند، کارآیی خوبی دارد. به عبارت دیگر نتایج حاصل از مدل لایه رابط به‌روز شده و پیش‌بینی‌های آن، انطباق بسیار خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی دارد.
- به دلیل کارآیی و دقت بالا، مدل ارائه شده در این مقاله را می‌توان به راحتی در شبیه‌سازی و به‌روزرسانی مدل سه‌بعدی اتصالات در سازه‌های بزرگ و پیچیده با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود نظیر انسیس مورد استفاده قرار داد.

7- فهرست علائم

A	تابع پاسخ فرکانسی اکسلرانس (dB)
C	ماتریس سفتی المان‌های لایه رابط
E	مدول یانگ (Nm^{-2})
f	فرکانس طبیعی (s^{-1})
G	مدول برشی (Nm^{-2})
K	ماتریس سفتی سازه
M	ماتریس جرم سازه
t	ضخامت (mm)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.28.5]

W	ضریب وزنی

علائم یونانی

γ	کرنش برشی مهندسی
ε	کرنش نرمال
λ	مقدار ویژه 2^$(rads^{-1})$
ν	ضریب پواسون
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	تنش نرمال (Nm^{-2})
τ	تنش برشی (Nm^{-2})
ϕ	بردار ویژه
ω	فرکانس طبیعی دورانی $(rads^{-1})$

8- مراجع

[1] J. L. Dohner, On the development of methodologies for constructing predictive models of structures with joints and interfaces, US Department of Energy, Sandia National Laboratories, White Paper, 2000.

[2] R. A. Ibrahim, C. L. Pettit, Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 279, No. 3-5, pp. 857-936, 2005.

[3] K. T. Yang, Y. S. Park, Joint structural parameter identification using a subset of frequency response function measurements, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 7, No. 6, pp. 509-530, 1993.

[4] H. Ahmadian, H. Jalali, Identification of bolted lap joints parameters in assembled structures, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, No. 2, pp. 1041-1050, 2007.

[5] F. Gant, P. Rouch, F. Louf, L. Champaney, Definition and updating of simplified models of joint stiffness, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No. 5, pp. 775-784, 2011.

[6] J. E. Mottershead, M. I. Friswell, G. H. T. Ng, Geometric Parameters for Finite Element Model Updating of Joints and Constraints, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 10, No. 2, pp. 171-182, 1996.

[7] H. Ahmadian, H. Jalali, Generic element formulation for modelling bolted lap joints, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, No. 5, pp. 2318-2334, 2007.

[8] H. Ahmadian, J. E. Mottershead, S. James, M. I. Friswell, C. A. Reece, Modeling and updating of large surface-to-surface joints in the AWE-MACE structure, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, No. 4, pp. 868-880, 2006.

[9] D. J. Segalman, A four-parameter Iwan model for lap-type joints, *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 72, No. 5, pp. 752-760, 2005.

[10] I. I. Argatov, E. A. butcher, On the Iwan models for lap-type bolted joints, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 46, No. 2, pp. 347-356, 2011.

[11] R. E. Goodman, R. L. Taylor, T. L. Brekke, A model for the mechanics of jointed rock, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 94, No. 3, pp. 637-659, 1968.

[12] C. S. Desai, M. M. Zaman, J. G. Lightner, H. J. Siriwardane, Thin-layer elements for inter-faces and joints, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 8, No. 1, pp. 19-43, 1984.

[13] G. Beer, An isoparametric joint interface element for finite element analysis, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 585-600, 1985.

[14] H. Ahmadian, M. Ebrahimi, J. E. Mottershead, M. I. Friswell, Identification of bolted-joint in-terface models, *International Conference on Noise and Vibration Engineering* (*ISMA*), Katholieke University, Leuven, Belgium, 2002.

[15] H. Ahmadian, H. Jalali, J. E. Mottershead, M. I. Friswell, Dynamic modelling of spot welds using thin-layer interface theory, *10th International Congress on Sound and Vibration* (*ICSV10*), Stockholm, Sweden, 2003.

[16] S. Bograd, A. Schmidt, L. Gaul, Joint damping prediction by thin-layer elements, *Proceedings of IMAC XXVI: A Conference and Exposition on Structural Dynamics*, Orlando, FL, 2008.

[17] K. G. Sharma, C. S. Desai, Analysis and implementation of thin-layer element for interfaces and joints, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118, No. 12, pp. 2442-2462, 1992.

[18] H. Jalali, A. Hedayati, H. Ahmadian, Modelling mechanical interfaces experiencing micro-slip/slap, *Inverse Problems in Science and Engineering*, Vol. 19, No. 6, pp. 751-764, 2011.

[19] M. Iranzad, H. Ahmadian, Identification of nonlinear bolted lap joint models, *Computers and Structures*, Vol. 96-97, pp. 1-8, 2012.

[20] G. N. Pande, K. G. Sharma, On joint/interface elements and associated problems of ill-conditioning, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 3, No. 3, pp. 293-300, 1979.

[21] J. Wagner, J. Burgemeister. *Piezoelectric Accelerometers: Theory and Application, MMF – Technical paper, 6th revised edition, 2012.* Accessed 10 November 2015; http://www.mmf.de/manual/transducermane.pdf.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.28.5]