

# مروری بر روش‌های مدل‌سازی اتصالات پیچی در تحلیل‌های ارتعاشی

فرهاد عادل<sup>۱</sup> و\*، سعید شکراللهی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

\*مسئول مکاتبات: fad@mut.ac.ir

## چکیده

هدف از این مقاله بررسی و مطالعه روش‌های مختلف مدل‌سازی اتصالات مکانیکی جهت استفاده در تحلیل‌های ارتعاشی است. در این راستا تلاش‌های محققین مختلف در خلال سال‌های گذشته مرور شده است. عملکرد و کارایی هر روش به همراه نقاط ضعف و قوت مورد بررسی و بحث قرار گرفته است تا جایگاه و پتانسیل هر یک جهت استفاده در سازه‌های بزرگ صنعتی مورد ارزیابی قرار گیرد.

## واژگان کلیدی

اتصال پیچی  
مدل‌سازی  
تحلیل ارتعاشی  
شبیه‌سازی

## تاریخچه مقاله

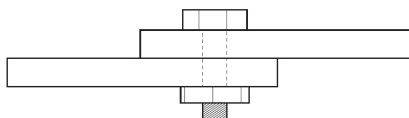
تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۶/۳۱

## ۱ مقدمه

تمرکز مقاله نیز در این راستاست. مدل‌سازی غیرخطی اتصال کمتر مورد بررسی و تحقیق بوده است. یکی از دلایل این امر سختی‌ها و تنگناهای موجود در فهم مکانیزم‌های موثر در آنهاست و دیگری نیاز کمتر به چنین دقتی در کاربردهای عملی است. یکی از موارد بسیار نادر نیاز عملی به مدل‌های دقیق غیرخطی در مرجع [۳] ذکر شده است. "اتصالات پیچی لب‌به‌لب" یکی از پرکاربردترین انواع اتصالات بوده و شامل قرارگیری دو قطعه بر روی همدیگر تحت نیروهای نرمال فشاری ناشی از پیچ و مهره است. (شکل ۱)

در اکثریت قریب به اتفاق مقالات منتشر شده در پیشینه موضوع، نمونه مورد مطالعه شامل سطوح اتصال تک‌لبه با یک عدد پیچ و مهره می‌باشد.



شکل ۱: یک اتصال پیچی لب‌به‌لب

این مقاله رویکرد یک‌پارچه‌ای به منظور مرور مدل‌های موجود جهت شبیه‌سازی سطوح اتصالات ارائه می‌کند که با معرفی مدل‌های ساده شروع شده و تا مدل‌های پیچیده‌تر ادامه می‌یابد.

مدل‌سازی دقیق برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی سازه‌ها یک ابزار ضروری در هر دو مرحله طراحی و عملیات است. در طول این مراحل، سازه فیزیکی جهت آزمون‌های عملی در دسترس نیست و یک مدل تحلیلی به جای آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه رویکرد غالب در تحلیل ارتعاشی سازه‌ها، روش المان محدود است. هر چند در تئوری می‌توان این روش را برای هر سازه‌ای بکار برد، ولی در عمل این کار چندان آسان نبوده و در بسیاری از این موارد پیش‌بینی‌های مدل، نمایانگر رفتار واقعی سازه نیست. یکی از دلایل اصلی این امر وجود اتصالات و اثرات قابل توجه آنها در رفتار دینامیکی سازه‌ها است. اتصالات مکانیکی نظیر پیچ و مهره باعث افزایش میرایی و کاهش سفتی در سازه شده و مشخصه‌های دینامیکی آن را تغییر می‌دهند [۱]. مدل‌سازی خواص اتصال مشکل بزرگی در تحلیل‌های ارتعاشی بوده و یکی از موانع کلیدی برای پیش‌بینی دینامیک سازه‌ها، عدم توانایی برای دخیل کردن اثر اتصالات مکانیکی در پاسخ‌های سازه‌ای است. استفاده از آزمون‌های عملکردی به دلایل هزینه‌ای، محدود می‌شود. در نتیجه شبیه‌سازی‌های محاسباتی از اهمیت روزافزونی برخوردار شده‌اند.

## ۲ روش‌های مدل‌سازی اتصالات

برای مدل‌سازی یک اتصال، ابتدا باید مشخصه‌های دینامیکی آن مطالعه شود [۲]. مرحله دوم توسعه یک مدل ریاضی از رفتار اتصال است که چالش برانگیزترین مرحله می‌باشد. مرحله نهایی شناسایی پارامترها در مدل پیشنهادی است. روش‌های مدل‌سازی اتصالات را می‌توان به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم نمود. مدل‌های خطی اغلب در اتصالات محکم و سفت و تحت بارهای اندک استفاده می‌شوند و

در این روش درجات آزادی گره‌های متناظر در سطوح اتصال با یکدیگر هم‌گیر<sup>۱</sup> می‌شوند (شکل ۲الف). رفتار سازه در این حالت همانند سازه یک‌پارچه‌ای است که فاقد هر نوع گسستگی است (شکل ۲ب). با این روش ناپیوستگی در مسیر انتقال بار از بین رفته و سازه همانند یک سازه بدون اتصال رفتار می‌کند. بنابراین سازه رفتار صلب‌تر و سفت‌تری از حالت واقعی

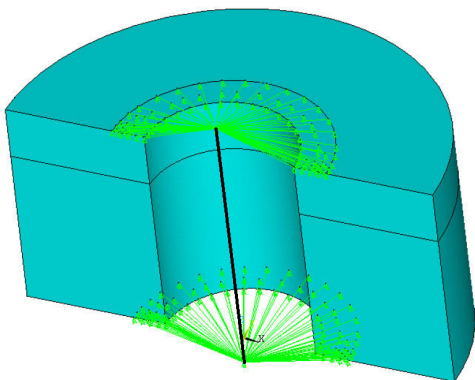
<sup>1</sup>Couple

۱. به دلیل صلب‌سازی سطوح و نبود محاسبات در این ناحیه، اطلاعات معنی‌داری در خصوص تنش حاصل نمی‌شود.
۲. از دست رفتن ارتباط بین اتصال و زیرسازه‌های پیرامون
۳. عدم توانایی در شبیه‌سازی تمامی پیچیدگی‌های متناظر با مکانیک سطوح اتصال.

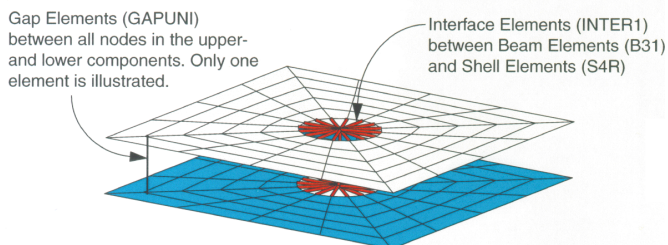
### ۳.۲ پیچ هم‌گیر

در روش پیچ هم‌گیر<sup>۲</sup> از المان تیر برای نمایش بدنه پیچ و از گره‌های هم‌گیر برای نمایش ناحیه تماس در مهره و کلگی استفاده می‌شود. (شکل ۴). برای غلبه بر نواقص این رویکرد نظیر عدم توانایی در انتقال بارهای خمشی، در برخی موارد به جای گره‌های هم‌گیر، از المان‌های خطی نظیر تیر یا فنر استفاده می‌گردد که با این عمل تعداد المان‌ها نیز افزایش می‌یابد. برای جزئیات بیشتر می‌توان به [۹] مراجعه نمود.

المان تیر (و فنر) جزو اولین انتخاب‌ها در تحلیل‌های دینامیکی از روزگار گذشته بوده است. اما در روزگار اخیر نیز این روش خصوصاً در تحلیل‌های تنش مورد توجه بوده است [۱۰، ۱۲]. (شکل ۵) مدلی را نشان می‌دهد که در کمپانی SAAB توسعه داده شده و به المان ماکروی ساب معروف است. [۱۳]



شکل ۴: مدل‌سازی اتصال پیچی با المان تیر و گره‌های هم‌گیر [۹]

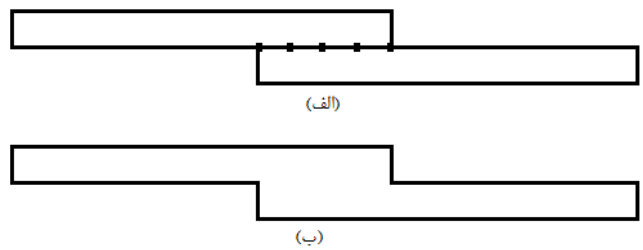


شکل ۵: مدل‌سازی سطوح اتصال با SME [۱۳]

### ۴.۲ ابعاد هندسی جبرانی

این رویکرد که نخستین بار در سال ۱۹۹۴ معرفی گردید [۱۴]، روشی است بر پایه تحلیل حساسیت مقادیر ویژه برای به‌روزرسانی سازه‌هایی شامل اتصالات چسبی، جوشی و پیچی. بر حسب نوع و ماهیت اتصال، پارامترهای

بروز می‌دهد. نتایج حاصل از این روش به علت در نظر نگرفتن انعطاف‌پذیری موجود در محل اتصال از اعتبار کافی برخوردار نیست [۴].

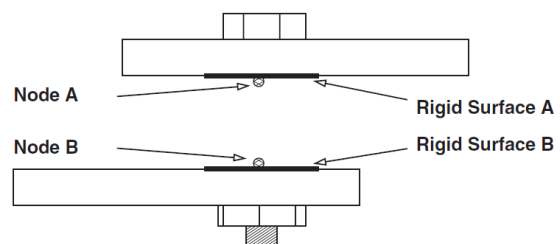


شکل ۲: مدل‌سازی سطوح اتصال با روش ادغام (الف) و سازه یک‌پارچه معادل با آن (ب)

روش ادغام<sup>۱</sup>، روشی غالب در صنعت برای برآورد رفتار استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها می‌باشد. اعمال آن به مدل بسیار راحت بوده و نیازی نیست که کاربر تنظیمات خاصی را انجام دهد. به همین دلیل گزینه پیش‌فرض بسیاری از نرم‌افزارها جهت شبیه‌سازی سطوح اتصال می‌باشد (نظیر گزینه bonded در نرم‌افزار ANSYS). این روش برای برآورد و تخمین رفتار دینامیکی سازه در مراحل اولیه طراحی مناسب است، ولی برای مدل‌سازی پارامتری سطوح اتصال مناسب نیست.

### ۲.۲ اتصال یک‌تکه

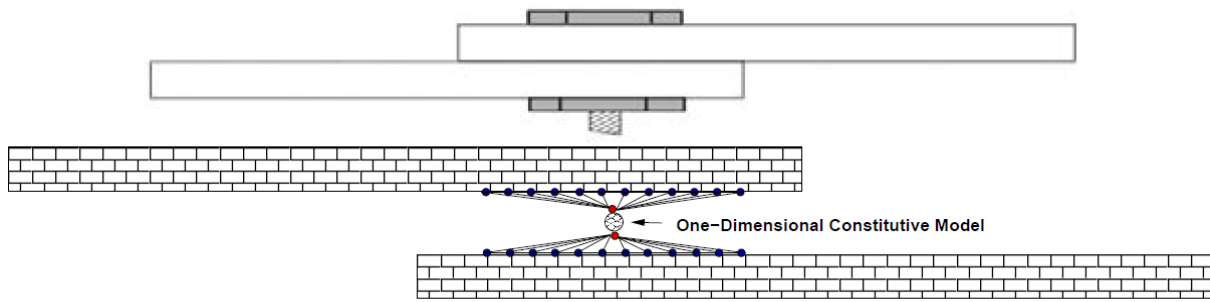
در اتصال یک‌تکه<sup>۲</sup> تمامی درجات آزادی سطوح اتصال در یک گره مقید می‌شوند طوری که سطح به صورت صلب حرکت کند. به بیان دیگر همانگونه که در (شکل ۳) نشان داده شده است یک رویه صلب در هر سطح اتصال تعریف شده و رفتار آن با یک گره یا یک نقطه محاسباتی شبیه‌سازی می‌شود [۵]. بنابراین سطوح اتصال با دو گره نمایش داده می‌شود. این مدل به صورت دقیق‌تری در (شکل ۶) نشان داده شده است [۶].



شکل ۳: مدل‌سازی سطوح اتصال با رویکرد اتصال یک‌تکه [۵]

در این رویکرد می‌توان به کمک یک مدل ساختاری<sup>۳</sup>، درجات آزادی شش‌گانه متناظر با هر سطح را با روابط سینماتیکی به یکدیگر مرتبط کرد. اینکه کدام معادله ساختاری مفید است، موضوع تحقیق بسیاری از محققین بوده است [۸، ۹]. مدل اتصال یک‌تکه در نرم‌افزار، با المان‌های صلب انجام می‌شود (نظیر المان MPC184 در ANSYS). اعمال این روش ساده بوده و رویکرد بهتری نسبت به ادغام گره‌ها محسوب می‌شود، اما معایب زیر را دارد [۵]:

<sup>1</sup>Merge <sup>2</sup> Whole-joint <sup>3</sup>Constitutive model <sup>4</sup>Constitutive model



شکل ۶: نمایش دقیق تری از مدل اتصال یک تکه [۶]

$$[M]_{j^2} = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 156l + 22a & 54 & -13l \\ 156a^2 + 44al + 4a^3 & 54a + 13l & -13al - 2l^2 & \\ \text{sym} & 156 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

سفتی اتصال با تنظیم پارامتر  $a$  کنترل می‌شود. به نظر می‌رسد که تغییرات پارامتر  $a$  اثرات کوچکی بر ماتریس سفتی داشته باشد در حالی که انعطاف‌پذیری - که مودهای پایین ارتعاشی به آن حساس هستند - تغییرات بسیار زیادی می‌کنند.

پارامترهای این روش دارای تفسیر فیزیکی معنی‌داری است [۲۰]. این مفهوم بیشتر برای شبیه‌سازی سطوح اتصالات جوشی و همچنین مدل‌سازی اتصالات در سازه‌های خرابایی مناسب است. زیرا سفتی ناحیه گرده جوش بزرگتر از نواحی اطراف است و استفاده از المان‌های تیر اوپلر-برنولی برای کل ناحیه اتصال چندان مناسب به نظر نمی‌رسد.

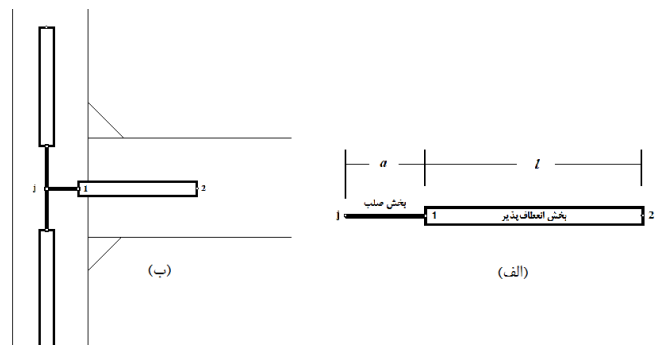
## ۵.۲ مدل‌سازی سه‌بعدی با جزئیات

مدل‌سازی اتصالات با تمامی جزئیات سه‌بعدی (شکل‌های ۸ و ۹) رویکرد دیگری است که در برخی مقالات مورد توجه بوده است [۲۱، ۲۲] واضح است که کارایی این روش‌ها تنها در سازه‌های ساده قابل حصول است و برای سازه‌های بزرگ و پیچیده به دلیل افزایش فوق‌العاده در هزینه و زمان تحلیل توجیه مناسبی ندارند.

در مرجع [۲۲]، علی‌رغم حصول نتایج دقیق تر با مدل سه‌بعدی در قیاس با نتایج تجربی، برای صرفه‌جویی در هزینه و زمان تحلیل‌ها مدل تیر هم‌گیر پیشنهاد شده است.

برای پیش‌بینی دقیق رفتار اتصالات پیچی در مباحث تنش، مدل‌سازی دقیق سه‌بعدی لازم است تا ملاحظات مرتبط با سطوح تماس اصطکاکی، پیش‌بار و رفتار غیرخطی اتصالات در نظر گرفته شود. اما این مدل‌های دقیق ممکن است در هم‌گرا شدن نتایج در سازه‌های پیچیده مشکلاتی داشته باشند و بکارگیری آنها در تحلیل‌های دینامیکی مناسب نیست [۲۴]. این روش برای بررسی اثرات لقی، پیش‌بار و تنش در سطوح اتصال [۲۵، ۲۷]، اصطکاک بین زیرسازه‌ها [۲۸]، توزیع بار در اتصالات [۲۹] و بررسی تخریب مواد [۳۰، ۳۱] استفاده شده است.

مدل می‌تواند متفاوت باشند. به عنوان مثال در مطالعه اتصال چسبی بین دو صفحه، سفتی المان‌های ناحیه اتصال و در مطالعه اتصال پیچی بین دو تیر با فلانچ‌های جوشکاری شده، جرم و سفتی پیچ‌ها و ابعاد جبرانی<sup>۱</sup> در هر دو ناحیه تیر و فلانچ به عنوان پارامتر انتخاب شده است. اساس این روش استفاده از ویژگی‌های هندسی المان‌ها برای شناسایی رفتار اتصالات است [۱۴]. این روش تحت عنوان "المان تیر پاره‌ای صلب" نیز نام‌گذاری می‌شود [۱۶]. همانگونه که در (شکل ۷ الف) مشاهده می‌شود این المان از یک بخش صلب با طول  $a$  یک بخش منعطف (تیر اوپلر-برنولی) با طول  $l$  تشکیل شده است.



شکل ۷: شماتیکی از المان تیر پاره‌ای صلب (الف) و مدل‌سازی یک اتصال جوشی T شکل با آن (ب) [۱۷]

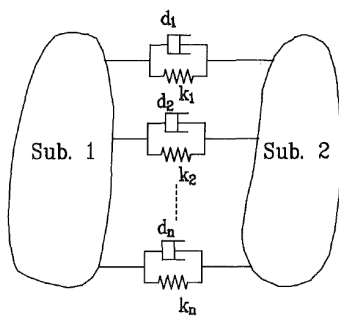
دیدگاه اصلی این است که اتصالات به عنوان منبع محتمل خطا در مدل المان محدود هستند. بنابراین المان‌های خاصی توسعه یافته و فرمولاسیون آنها طوری تغییر داده شده است تا شامل پارامترهای سازه‌ای نیز بشود. تاثیر این پارامتر را می‌توان با استخراج ماتریس سفتی المان تیر پاره‌ای صلب مشاهده نمود. اگر بردار درجات آزادی بخش انعطاف‌پذیر به صورت  $\{y_1 \ \theta_1 \ y_2 \ \theta_2\}$  در نظر گرفته شود، در آن صورت بردار درجات آزادی کل المان به صورت  $\{y_j \ \theta_j \ y_2 \ \theta_2\} = \{(y_1 - a\theta_1) \ \theta_1 \ y_2 \ \theta_2\}$  درآمده [۱۷] و ماتریس‌های سفتی و جرم آن به ترتیب به صورت معادلات (۱) (۲) بیان می‌شوند [۱۸، ۱۹].

$$[K]_{j^2} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l + 12a & -12 & 6l \\ 6l + 12a & 12a^2 + 12al + 4l^2 & -12a - 6l & 6al + 2l^2 \\ \text{sym} & -12 & 12 & -6l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

<sup>1</sup>Geometric offset dimension

تعیین توزیع بار با شناسایی خواص سفتی اتصال بوده و از میرایی صرف نظر شده است.

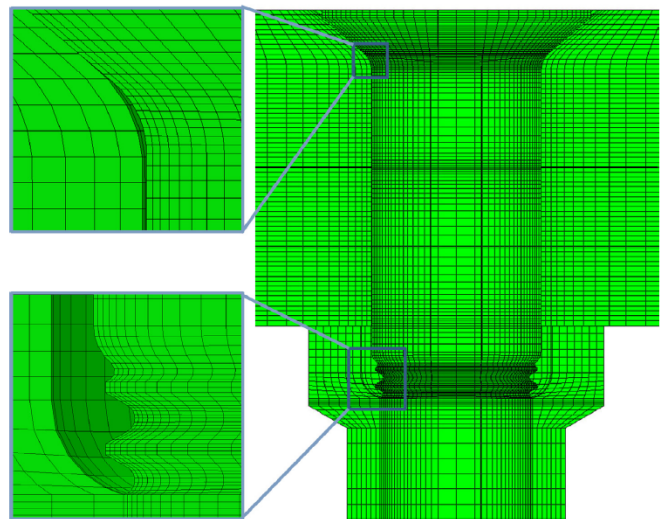
محققین مختلفی نشان داده‌اند که اتصالات را می‌توان با روشی مشابه سایر قطعات سازه‌ای به شکل فنر-جرم-میراگر مدل نمود. یک مدل تحلیلی ساده شامل فنر و میراگر موازی برای اتصالات پیچی و جوشی نخستین بار در دهه ۷۰ میلادی پیشنهاد گردید [۴۰]. سفتی فنرها و ضریب میرایی میراگرها به عنوان سفتی و میرایی معادل اتصال در نظر گرفته شده و مقادیر آنها به روشی تکراری و در قیاس با فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی دو مود اول به دست آمده است. مدل پیشنهادی در نمونه مورد مطالعه، ساده و قابل اطمینان است، اما الگوریتم مورد استفاده چندان موثر نیست. محققان دیگری نیز از همان مدل استفاده کردند، با این تفاوت که روشی برای شناسایی مستقیم پارامترها توسعه دادند [۴۱]. پارامترهای اتصال شامل سفتی و ضرایب میرایی با روش حداقل مربعات و با تابع پاسخ فرکانسی زیرسازه‌ها و سازه مونتاژ شده، شناسایی شده است (شکل ۱۰) این الگوریتم در مقایسه با روش [۴۰] موثرتر و عمومی‌تر است. پارامترهای دینامیکی عایق ارتعاشی در ماشین‌آلات نیز با همان مدل و الگوریتم را شناسایی کرده است [۴۲].



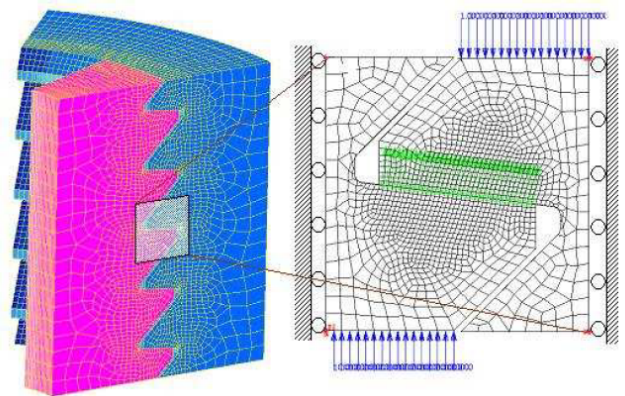
شکل ۱۰: شماتیکی از مدل‌سازی سطوح اتصال دو زیرسازه با فنر و میراگر [۴۱]

مدل اتصال عمومی‌تری با ماتریس‌های سفتی و ضرایب میرایی، پیشنهاد شده است [۴۳]. در این مقاله، روشی 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. اساس الگوریتم این نویسندگان، تبدیل سیستم مونتاژ شده به چندین سیستم یک درجه آزادی به کمک بردارهای ویژه منتخب می‌باشد. این بردارهای ویژه باید نسبت به پارامترهای شناسایی شونده حساس باشند. واضح است که مفید بودن این روش وابسته به دسترس‌پذیری و دقیق بودن شکل‌مادهای سازه می‌باشد و استفاده از آن در کاربردهای عملی چندان امیدوارکننده نیست.

مدل‌سازی سطوح اتصال توسط المان‌های متمرکز فنر و میراگر توسط احمدیان و جلالی [۴۴] انجام شده است. آنها رفتار سطوح اتصال را با فنرهای محوری و پیچشی خطی و غیرخطی به همراه میراگر خطی (شکل ۱۱) شبیه‌سازی نموده و پارامترهای آنها را با داده‌های تجربی شناسایی کردند. گانت و همکارانش [۴۵] از فنرهای ساده برای شبیه‌سازی سطوح اتصال در مراحل اولیه طراحی استفاده کرده‌اند. روشی برای شناسایی پارامترهای دینامیکی المان فنر-میراگر در اتصالات پیچی به کمک خواص مودال ارائه شده است [۴۶]. در رویکردی جالب دیگری، یک مدل دینامیکی برای



شکل ۸: مدل‌سازی سطوح اتصالات رزوه‌ای به صورت سه‌بعدی با جزئیات [۲۱]



شکل ۹: مدل‌سازی سطوح تماس رزوه‌ها با تمامی جزئیات به صورت سه‌بعدی [۲۳]

## ۶.۲ فنر-میراگر

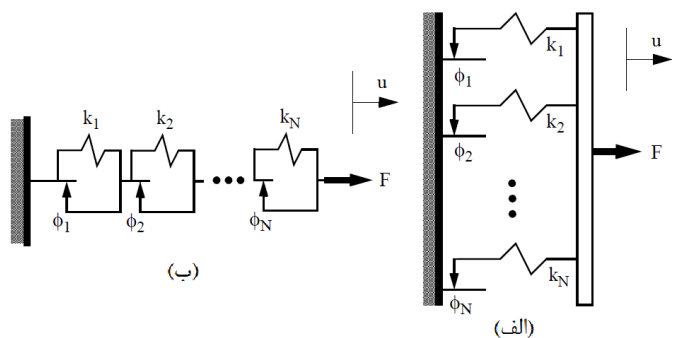
این روش احتمالاً قدیمی‌ترین روش برای مدل‌سازی اتصالات پیچی است [۳۲، ۳۳]. در این مقالات تلاش شده است تا یک فرمول تئوری برای محاسبه سفتی برشی در سازه‌ای با یک اتصال پیدا شود [۳۲]. همچنین روشی برای محاسبه توزیع بار در پیچ‌های یک اتصال متقارن ارائه گردیده است [۳۳]. پیچ‌ها و زیرسازه‌های مرتبط، با فنر مدل شده و رابطه‌ای عمومی برای رفتار در محدوده الاستیک ارائه شده است. این رابطه برای اتصالاتی با فواصل، سفتی‌ها و مواد مختلف قابل اعمال است، اما اعمال آن در سازه‌های حاوی اتصالات زیاد بسیار زمان‌بر می‌باشد. برای غلبه بر این مشکل با معرفی یک رابطه بازگشتی، روابط موجود در [۳۳] توسعه داده شده است [۳۴]. این رویکرد برای سازه‌های کامپوزیتی نیز تعمیم داده شده است [۳۵].

نتایج حاصل از بررسی در حیطه تحلیل دینامیکی سازه‌های هوافضایی بیانگر آن است که بکارگیری فنر پیچشی در شبیه‌سازی سطوح اتصالات در موشک‌های چندمرحله‌ای [۴۶] و موشک‌های تاکتیکی [۳۷، ۳۹] رویه‌ای معمول بوده است. در تمامی این موارد سفتی فنرها با فرایند سعی و خطا در قیاس با اندازه‌گیری‌های تجربی تعیین می‌شده است. هدف از این مدل‌سازی‌ها



به کارهای قبل از آن برمی‌گردد که در [۵۷] گردآوری شده‌اند. مدل ایوان<sup>۱</sup> یک سیستم توزیع شده از بی‌شمار المان‌های الاستوپلاستیک می‌باشد که قادر به نمایش کاهش سفتی، از حالت تدریجی تا اتفاقی (الاستیک-کاملاً پلاستیک) می‌باشد. این نوع از مدل‌ها در زیر دسته سیستم‌های الاستوپلاستیک قرار می‌گیرند که شامل رفتار ماکروسکوپی از قبیل لغزش اصطکاکی سطوح اتصال تا ریزلغزش منجر به کاهش سفتی و تسلیم غیرمخرب مواد می‌باشد.

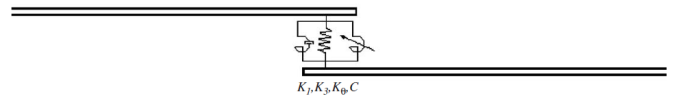
ایوان [۵۵] یک تابع چگالی یکنواخت<sup>۲</sup>،  $\phi$ ، به عنوان تابع توزیع<sup>۳</sup> معرفی کرد. این مدل شامل واحدهایی متشکل از فنر خطی موازی با یک لغزنده در لغزنده‌های اصطکاکی منجر به رفتار غیرخطی در المان‌های جنکینز می‌گردد [۵۸]. مدل ایوان به دو حالت موازی-سری و سری-سری چیدمان می‌شوند. (شکل ۱۴) این دو مدل را نشان می‌دهد.



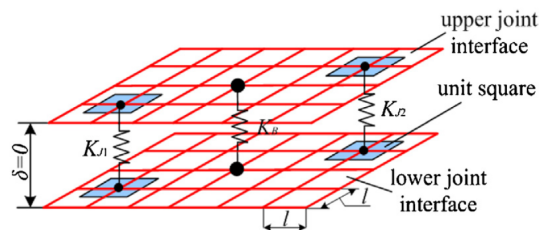
شکل ۱۴: شماتیکی از دو چیدمان مختلف برای مدل‌های ایوان، (الف) موازی-سری؛ (ب) سری-سری [۵۹]

مدل ایوان جهت توصیف رفتار اتصالات پیچی لب‌به‌لب تحت نیروی هارمونیک محوری، مورد توجه قرار گرفته است [۵۹]. منحنی نیرو-جابجایی با توزیع تسلیم شدن لغزنده‌ها یا نیروهای لغزش توصیف می‌شود. فرض بر این است که سفتی اتصال پس از شروع لغزش بزرگ برابر صفر است. در مرجع [۶۰] نیز از این مدل ایده گرفته شده است (شکل ۱۵) همچنین در یک رساله دکتری در زمینه شناسایی سیستم‌های دینامیکی غیرخطی از این مدل استفاده شده است [۶۱]. یک مدل چهار پارامتری از چیدمان موازی-سری ایوان توسعه داده شده است که پارامترهای آن بر اساس نتایج تجربی انرژی اتلافی بر حسب دامنه نیروی اعمالی استخراج می‌شوند [۶۲، ۶۳]. این مدل برای هر دو حالت ریزلغزش و لغزش بزرگ مناسب است. مدل ساختاری دارای چهار پارامتر است که مرتبط با پارامترهای کلیدی در پاسخ سازه بوده و عبارتند از: نیروی لغزش اتصال سفتی اتصال ( $F_s$ )، سفتی اتصال ( $K_t$ )، قانون توان اتلاف انرژی ( $\chi, \beta$ ). این مدل چهار پارامتری برای پیش‌بینی ارتعاش سازه‌ها با اتصالات گسسته مورد استفاده قرار گرفته است [۶۴، ۶۶]. در برخی سازه‌ها که اتصالات منبع اصلی کاهش سفتی سازه هستند، پارامترهای مدل ایوان با بررسی انحراف در نمودارهای پاسخ فرکانسی نرمال ضمن افزایش فرکانس تحریک استخراج شده است [۳]. این کار نمایشی از استنتاج خواص اتصال از طریق مشاهده رفتار و پاسخ دینامیکی سازه کامل می‌باشد.

اتصالات با در نظر گرفتن سفتی حاصل از تغییر فرم زبری‌های موجود در سطوح اتصالات توسعه داده‌اند [۴۷] (شکل ۱۰).

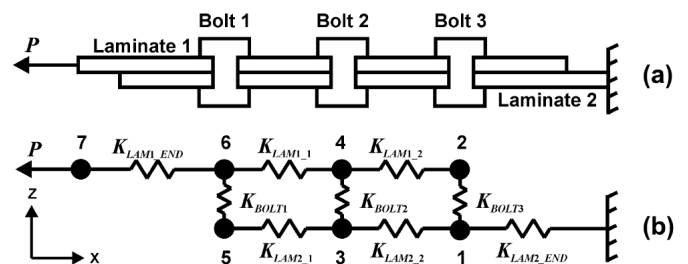


شکل ۱۱: مدل‌سازی سطوح اتصال پیچی با فنر و میراگر [۴۴]



شکل ۱۲: مدل دینامیکی سطوح اتصال پیچی با در نظر گرفتن سفتی حاصل از تغییر فرم زبری‌ها [۴۷]

مدل‌سازی اتصالات پیچی توسط فنر در سازه‌های کامپوزیتی نیز توسعه داده شده است [۴۸، ۵۰]. پیچ‌ها و چندلایه‌ها با مجموعه‌ای از جرم‌ها و فنرها شبیه‌سازی شده (شکل ۱۳) و توزیع بار و سفتی اتصالات پیچی پیش‌بینی می‌شود. به نظر می‌رسد که استفاده از این روش در مدل‌سازی سطوح اتصالات مکانیکی در سازه‌های کامپوزیتی رو به افزایش است [۵۱، ۵۳].



شکل ۱۳: مدل‌سازی اتصال پیچی در سازه کامپوزیتی با جرم و فنر [۴۴]

اعمال روش المان‌های فنر-میراگر بین گره‌های متناظر در سطوح مشترک اتصال، راه حلی ساده برای نمایش اتصالات در سازه‌های غیرپیچیده است [۵۴]. اما این رویکرد حداقل دارای ۳ عیب عمده می‌باشد:

۱. تعداد درجات آزادی سیستم را افزایش می‌دهد که منجر به زمان‌برتر شدن فرایند تحلیل می‌گردد.
۲. این روش مدل محدود شده‌ای از اتصالات است. یعنی اثر توزیعی اتصال تنها در نقاط خاصی از سطوح تماس - گاهی فقط در یک نقطه - متمرکز می‌شود.
۳. با اعمال المان فنر بین گره‌های منطبق بر هم، در یک جهت سفتی بزرگی نسبت به المان‌های اطراف در محل اتصال ایجاد می‌شود [۱۵]. این حالت نمایش صحیحی از سطوح اتصال نیست و ممکن است از نظر سینماتیکی هم ناسازگار بوده و باعث بروز مشکلات عددی شود.

## ۷.۲ مدل ایوان (المان‌های جنکینز)

این مدل غیرخطی نخستین بار در سال ۱۹۶۶ برای توصیف رفتار الاستو-پلاستیک فلزات توسعه یافت [۵۵، ۵۶]. سرمنشاء و ریشه‌های این روش

<sup>1</sup>Iwam model (Jenkins elements) <sup>2</sup>Uniform density function <sup>3</sup>Distribution function

چگالی، مستلزم اندازه‌گیری نیروی بازگرداننده در سطوح اتصال است که عملی نیست. چگالی‌های جمعیت مختلفی به همراه محدودیت‌های آنها در مراجع [۵۷، ۷۰] ذکر شده است. بسیاری از فرایندهای شناسایی در این زمینه بر پایه بازتولید حلقه‌های پس‌ماند<sup>۳</sup> است. یعنی پارامترهای مدل طوری تنظیم می‌شوند که حلقه‌های پس‌ماند ثبت شده از تست بازتولید شوند [۷۱، ۷۲]. این حلقه‌ها با اندازه‌گیری مستقیم نیروی سطوح تماس و جابجایی حاصل می‌شوند. این اندازه‌گیری‌ها نیازمند تجهیزات و ملاحظات ویژه به خصوص در اندازه‌گیری نیرو هستند. راهکار دوم برای حصول حلقه‌های پس‌ماند به کارگیری روش‌های غیرمستقیم نظیر نگاشت حالت نیرو<sup>۴</sup> می‌باشد [۷۳] که نیازمند مدل‌سازی دقیق سازه می‌باشد. احمدیان و رجایی [۷۴] روشی برای شناسایی تابع توزیع بر اساس انرژی اتلافی در سطوح اتصال ارائه کرده‌اند. آنها نشان دادند که انرژی اتلافی تابع منحصربفردی از تابع چگالی توزیع ایوان و اندازه ارتعاشات در سطوح تماس است.

نیروی اتصال را می‌توان به صورت زیر نمایش داد

$$F(t) = \int_0^{\infty} \rho(\phi)[u(t) - x(t, \phi)] d\phi \quad (3)$$

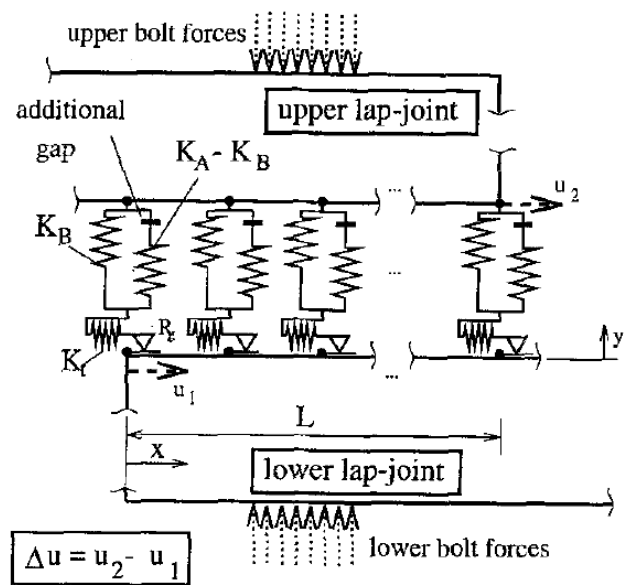
که در آن

$$\dot{x}(t, \phi) = \begin{cases} \dot{u} & \text{if } \|u - x(t, \phi)\| = \phi \text{ and } \dot{u}[u - x(t, \phi)] > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$u(t)$  افزایش طول اتصال،  $x(t, \phi)$  جابجایی لغزنده اصطکاکی با قدرت  $\phi$  و  $\rho(\phi)$  چگالی جمعیت<sup>۵</sup> فنرها و لغزنده‌ها می‌باشد. ویژگی‌های پاسخ اتصال با مدل ایوان با چگالی جمعیت  $\rho(\phi)$  مشخص می‌شود.

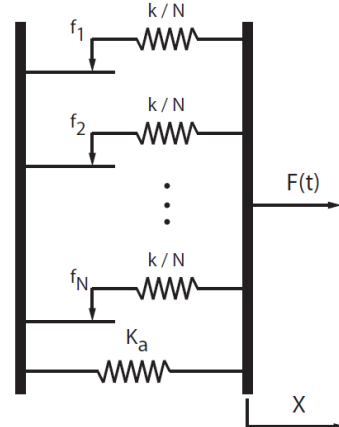
نتایج تجربی در سطوح نیرویی اندک، نشان داده است که اتلاف انرژی اتصال در یک سیکل ارتعاشی وابسته به توانی از نیروی اعمالی است. به صورت تحلیلی، اتلاف انرژی متناظر با میرایی خالص ماده، توان ۲ و اتلاف انرژی متناظر با اصطکاک بین سطوح تماسی دو ماده با فشار یکنواخت، توان ۳ را به دست می‌دهد [۵۹، ۶۲، ۷۵، ۷۶] اما بر اساس مشاهدات تجربی، مقدار توان در محدوده ۲ تا ۳ می‌باشد [۷۵]. یک توضیح برای این پدیده، این است که توزیع فشار در اتصال، غیریکنواخت فرض می‌شود [۷۶]. در هر حال، در سطوح نیرویی اندک، فرمی از چگالی جمعیت مطلوب است که باعث اتلاف انرژی به فرم توانی شود. در سطوح نیرویی بزرگ، به دلیل شروع لغزش بزرگ، اتصالات رفتار غیرخطی گسسته دارند. این ویژگی نیز باید در تعیین چگالی جمعیت مدنظر باشد.

مدل ایوان با چیدمان سری-سری نیز برای شبیه‌سازی سطوح تماس بین یک میله و فونداسیون اصطکاکی توسعه یافته است (شکل ۱۴ ب) [۷۷]. با الهام از این مدل، مدلی با سطوح دوطرفه برای توصیف میرایی ناشی از اتصال در سازه ارائه شده است [۷۸]. همچنین مدل ایوان جدیدی توسعه داده شده و یک مدل تاخیر-برش<sup>۶</sup> برای شبیه‌سازی رفتار لغزشی سطوح پیشنهاد گردیده است [۷۹]. در این مدل که در (شکل ۱۷) نشان داده شده است، هر المان شامل دو فنر موازی می‌باشد.



شکل ۱۵: مدل‌سازی سطوح یک اتصال پیچی لبه‌ای [۶۰]

بر اساس مشاهدات تجربی، یک اتصال پس از شروع لغزش بزرگ نیز مقداری سفتی دارد [۶۰]. با افزودن یک فنر خطی الاستیک به صورت موازی با المان‌های جنکینز (شکل ۱۶) مدل ایوان تطبیق‌یافته<sup>۱</sup> معرفی شده است [۶۷]. این راهکار برای انطباق بهتر مدل ایوان با مشاهدات تجربی اتخاذ شده است. المان دوطرفه تیر ایوان تطبیق‌یافته با استفاده از دو مدل ایوان تطبیق‌یافته تشکیل شده است که به یکدیگر مونتاژ می‌شوند تا جابجایی عرضی و دوران بین گره‌ها در نظر گرفته شود. از این المان جهت شبیه‌سازی رفتار غیرخطی اتصالات پیچی در سازه‌های تیری شکل استفاده شده است. فرمولاسیون المان تطبیق‌یافته به همراه کویپل آن با مدل‌های المان محدود تیر استاندارد نیز ارائه شده است [۶۸، ۶۹]. در این مقالات راهکاری با استفاده از شبکه‌های عصبی برای تخمین پارامترهای مدل ایوان تطبیق‌یافته به کمک پاسخ حوزه زمان به یک نیروی تحریک هارمونیک ارائه کردند.

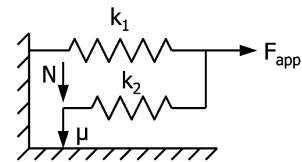


شکل ۱۶: مدل ایوان تطبیق‌یافته [۶۹]

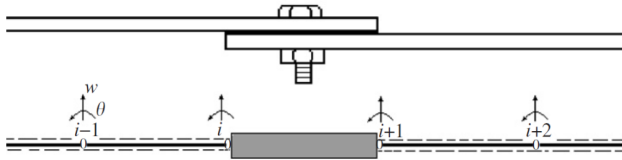
شناسایی چگالی جمعیت یا تابع توزیع، فرایند پیچیده‌ای است. نشان داده شده است که تابع چگالی را می‌توان با دوبار مشتق‌گیری از نیروی بازگرداننده<sup>۲</sup> سطوح اتصال به دست آورد [۵۵]. ولی شناسایی دقیق تابع

<sup>1</sup>Adjusted Iwan model <sup>2</sup>Adjusted Iwan model <sup>3</sup>Adjusted Iwan model <sup>4</sup>Adjusted Iwan model <sup>5</sup>Population density <sup>6</sup>Shear-lag model

تفاوت دارد [۸۷]. با المان‌های ژنریک می‌توان ماتریس‌های جرم، سفتی و میرایی اتصال را برای اتصالات با هندسه مختلف به صورت پارامتری استخراج کرد. در مدل المان ژنریک، تعامل بین تمام درجات آزادی اتصال در نظر گرفته شده و اثر توزیعی اتصال در سازه لحاظ شده است. (شکل ۱۸).



شکل ۱۷: مدل جدید ایوان [۷۹]



شکل ۱۸: مدل‌سازی یک اتصال پیچی با المان ژنریک [۸۸]

در این روش که رویکرد عمومی‌تری برای انتخاب پارامتر در مدل اتصالات سازه‌ای می‌باشد، مجموعه‌ای از ماتریس‌های جرم و سفتی سازه‌ای در نظر گرفته می‌شوند که دارای معنای فیزیکی بوده و می‌توانند مشخصه‌های دینامیکی کلی سازه را تغییر دهند. بنابراین المان ژنریک هر المانی از یک مجموعه است که خواص ویژه‌ای در اشتراک با یک ماتریس المانی اولیه داشته باشد. این رویکرد اجازه می‌دهد که بتوان تغییرات بسیار زیادی در یک المان ایجاد نمود بدون اینکه معنای فیزیکی خود را از دست بدهد. بنابراین روش بسیار جذابی است. در راهکار المان ژنریک، ماتریس سفتی یک المان یا گروهی از المان‌ها به موده‌های موضعی<sup>۴</sup> تجزیه شده و مجموعه‌ای از ماتریس‌های سفتی قابل قبول ایجاد می‌شود [۱۶]. این روش به عنوان یک رویکرد عمومی‌تر مطرح بوده و نمونه‌ای از کاربردهای آن شامل توسعه المان‌های خاص برای مدل‌سازی یک آب‌بند لاستیکی (نشت‌گیر) توسط احمدیان و همکارانش در [۸۹] توصیف شده است. با استفاده از المان‌های ژنریک به همراه یک رویه بهینه‌سازی، پارامترهای یک اتصال طوری شناسایی شده است که اتصالات صحیح بین گره‌ها دست‌نخورده باقی بماند [۹۰]. احمدیان و جلالی [۸۸] فرمولاسیون المان ژنریک را برای مدل‌سازی اتصالات پیچ و مهره‌ای به کار برده‌اند. آنها با مقایسه فرکانس‌های طبیعی حاصل از آزمون و مقادیر حاصل از مدل، به تعیین پارامترهای اتصال پرداختند و نشان دادند که چون المان‌های ژنریک تعامل بین درجات آزادی اتصال را در نظر گرفته و اثر توزیعی اتصال در سازه را لحاظ می‌کنند، نتایج بهتری نسبت به مدل‌های فنری ارائه می‌دهند. اساساً موفقیت این روش، وابسته به درک صحیح از رفتار اتصال و کاهش ماهرانه تعداد پارامترهای مستقل در المان‌های ژنریک است. این روش برای شناسایی آسیب در سازه‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۹۱، ۹۲]. به نظر می‌رسد این روش مقبولیت یافته [۹۳، ۹۵] و نتایج بهتری در قیاس با روش ابعاد جبرانی ارائه می‌کند [۱۶]، ولی بکارگیری آن در نرم‌افزارهای المان محدود به راحتی امکان‌پذیر نیست [۹۶].

## ۹.۲ لایه واسط با ضخامت صفر

مفهوم لایه واسط با ضخامت صفر<sup>۵</sup> نخستین بار در سال ۱۹۶۸ در مسائلی مرتبط با زمین‌شناسی (نظیر لغزش صخره‌ها) و حفاری (ارتباط مته با خاک اطراف) و مدل‌سازی ترک در صخره‌ها یا شبیه‌سازی سطوح تماس آنها مطرح

در تحقیقات اخیر، اکثراً مدل موازی-سری مدنظر قرار گرفته است. نشان داده شده است که هر مدلی از مواد یا سازه‌ها که فرض ماسینگ<sup>۱</sup> را ارضا کند، می‌تواند به صورت یک مدل منحصر به فرد موازی-سری ایوان بیان شود [۷۰، ۸۰]. کاربرد مدل موازی-سری ایوان برای اتصالات پیچی لب به لب نیز بیان شده است [۸۱]. رجایی و احمدیان یک مدل ایوان تعمیم یافته<sup>۲</sup> معرفی کردند که اثر تغییرات نیروی نرمال در سفتی برشی سطوح اتصال را مدنظر قرار می‌دهد [۸۲]. در جدیدترین پژوهش [۸۳]، با تلفیق مدل‌های موجود در [۶۷] با مدل چهار پارامتری ایوان [۶۳]، یک مدل موازی-سری با ۶ پارامتر ارائه کرده‌اند. این مدل قابلیت‌های هر دو مدل فوق‌الذکر را دارا بوده و پیش‌بینی‌های آن انطباق بهتری با مشاهدات تجربی در مرجع [۶] دارد. مدل ایوان برای نمایش ریاضی پس‌ماند در اتصالات پیچی و مدل‌سازی ریزلغزش‌ها در سطوح تماس قطعات مناسب است. این رویکرد برای مدل‌سازی غیرخطی میرایی در اتصالات مجزا بسیار موفق است و می‌توان آن را برای محاسبه سفتی غیرخطی و اتلاف انرژی در سطوح اتصال مورد استفاده قرار داد. در صورت استفاده از مدل ایوان چهار پارامتری، هر اتصال به تنهایی نیازمند چهار پارامتر  $((F_s), (K_t), (\chi), (\beta))$  می‌باشد و مدل‌سازی سازه‌های بزرگ با این روش نیازمند صدها و یا هزاران پارامتر است. در نتیجه برای سازه‌های بزرگ مناسب به نظر نمی‌رسد.

## ۸.۲ المان ژنریک

در زمانی که مدل ابعاد جبرانی [۱۴] در اروپا برای شبیه‌سازی سطوح اتصالات معرفی گردید، در آن سوی اقیانوس اطلس، احمدیان و همکارانش [۸۴] در حال پایه‌گذاری ایده جدیدی تحت عنوان "المان ژنریک"<sup>۳</sup> برای این منظور بودند. در این رویکرد، روشی را برای فرمولاسیون مجموعه‌ای از المان‌های قابل قبول با در نظر گرفتن مقادیر و بردارهای ویژه هر المان منفرد معرفی شده است [۸۵]. موده‌های این المان‌های منفرد را می‌توان تصحیح کرد و این امر منجر به تغییرات در ساختار ماتریس‌های جرم و سفتی به نوعی می‌گردد که اتصال بین گره‌ها در مدل از بین نرود. از این ایده در به‌روزرسانی مدل‌های المان محدود استفاده شده است [۸۶].

یکی از دلایل ارائه این ایده این بود که ماتریس‌های به‌روزرشده در روش‌های مستقیم، اگرچه نتایج تجربی را به خوبی بازسازی می‌کنند، ولی توجیه فیزیکی ندارند، زیرا فاقد خصوصیات اصلی ماتریس‌های سازه‌ای هستند. با استفاده از المان‌های ژنریک این مشکل به وجود نمی‌آید. مساله دیگر این بود که در مدل‌سازی برخی قسمت‌های سازه‌ها نظیر اتصالات مشکل وجود داشت. زیرا در برخی موارد شکل اتصال با شکل المان‌های موجود در نرم‌افزارها متفاوت است یا دینامیک حاکم بر اتصال با فرمول‌بندی المان

<sup>1</sup>Masing's hypothesis    <sup>2</sup>Generalized iwan model    <sup>3</sup>Generic element

<sup>4</sup>Local    <sup>5</sup>Zero-Thickness Interface Element

تبعیت می‌کنند. در رابطه (۶)،  $[C]_{۶*۶}$  ماتریس ساختاری المان‌های لایه واسط بوده و ارتباط بین تنش‌ها و کرنش‌ها را برقرار می‌سازد. چون ۶ مولفه مستقل تنش و ۶ مولفه مستقل کرنش وجود دارند، ۳۶ ضریب لازم است تا بتوان آنها را به صورت خطی به یکدیگر مرتبط نمود. هر چند با توجه به ملاحظات انرژی ذخیره شده در یک ماده با رفتار الاستیک خطی، می‌توان نشان داد که این ۳۶ ضریب باید از یک چیدمان متقارن پیروی نمایند. وجود تقارن در روابط تنش-کرنش، تعداد ضرایب مستقل در ماتریس  $[C]_{۶*۶}$  را از ۳۶ عدد به ۲۱ عدد کاهش می‌دهد.  $[C_{nn}]_{۳*۳}$  زیرماتریس نرمال،  $[C_{ss}]_{۳*۳}$  زیرماتریس برشی و  $[C_{ns}]_{۳*۳}$  و  $[C_{sn}]_{۳*۳}$  بیانگر اثرات کوپلینگ بین رفتار نرمال و برشی در سطوح اتصال می‌باشند. در مدل پیشنهادی از اثرات کوپلینگ صرف‌نظر شده است. در نتیجه رابطه (۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$[C] = \begin{bmatrix} [C_{nn}] & [0] \\ [0] & [C_{ss}] \end{bmatrix} \quad (۷)$$

ضرایب موجود در ماتریس فوق را می‌توان بر حسب پارامترهای مختلفی از خواص ماده بیان نمود که عبارتند از:

۱. مدول یانگ ( $E$ )
۲. ضریب پواسون ( $\nu$ )
۳. مدول برشی  $[G = \frac{E}{2(1+\nu)}]$
۴. مدول حجمی  $[K = \frac{E}{3(1-2\nu)}]$
۵. مدول مقید  $[M = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}]$
۶. ثابت لامه  $[\mu = G, \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}]$

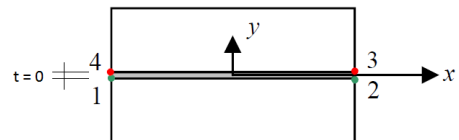
با توجه به رابطه (۷)، ماتریس ساختاری لایه واسط برای رفتار الاستیک خطی را می‌توان تنها با دو پارامتر مستقل  $E$  و  $\nu$  (مدول یانگ و ضریب پواسون) به صورت رابطه (۸) تعریف نمود:

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2}-\nu & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{2}-\nu & 0 \\ sym & & & & & \frac{1}{2}-\nu \end{bmatrix} \quad (۸)$$

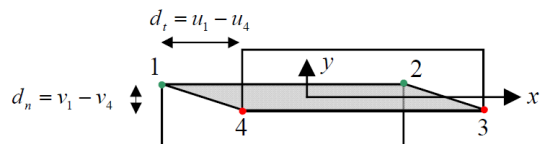
رابطه (۸) در واقع ماتریس سفتی برای یک ماده ایزوتروپیک (جنس المان‌های لایه واسط) بوده و مقادیر مناسب پارامترهای  $E$  و  $\nu$  که مرتبط با سفتی‌های نرمال و برشی این المان‌ها هستند، ناشناخته بوده و با فرایند به‌روزرسانی مدل شناسایی می‌شوند. مدول یانگ،  $E$ ، یا مدول الاستیک، میزان سفتی یک ماده را کمی‌سازی می‌کند. هر چه مدول یانگ بزرگتر باشد، تغییر فرم الاستیک آن در برابر بار وارده، کوچک‌تر است. انقباض جانبی مواد در برابر یک بار وارده کششی، با ضریب پواسون اندازه‌گیری می‌شود. با تنظیم این پارامترها می‌توان مقادیر مناسب برای سفتی نرمال و سفتی برشی المان‌های لایه واسط را استخراج نمود.

یکی از مباحث مهم در بکارگیری روش لایه واسط تعیین ضخامت آن است. در حال حاضر رابطه تئوری دقیقی برای یافتن ضخامت این لایه وجود ندارد و مقدار بهینه آن وابسته به پارامترهایی نظیر صافی سطوح اتصال،

گردیده است [۹۷، ۹۹] این روش در مدل‌سازی سطوح اتصالات مکانیکی نیز استفاده شده است [۱۰۰، ۱۰۱]. در این رویکرد، فرض می‌شود که لایه واسط دارای ضخامت صفر بوده (شکل ۱۹) و یک رابطه سازگاری، معمولاً بین مقادیر سفتی برشی و سفتی نرمال، تعریف می‌شود [۱۰۲].



(a) original



(b) displaced

شکل ۱۹: مدل لایه واسط با ضخامت صفر [۹۷، ۱۰۳]

این روش امروزه کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. دلایل آن عبارتند از عدم مدل‌سازی دقیق رفتار اتصال در راستای عمود بر لایه [۱۰۴]، احتمال ناپایداری‌های عددی [۱۰۵] و ایجاد مشکلاتی در شبکه‌بندی (مش) [۱۰۶].

## ۱۰.۲ لایه واسط با ضخامت اندک

این روش نخستین بار در سال ۱۹۸۴ در حیطه مهندسی عمران برای مدل‌سازی سطوح تماس ساختمان با خاک اطراف معرفی گردید [۱۰۷، ۱۰۸]. در این رویکرد [۱۰۷] فرض می‌شود که سطوح مشترک اتصال دارای ضخامت اندک  $t$  بوده و روابط آن را برای حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی می‌توان استخراج کرد (شکل ۲۰). این روش در مسائل مرتبط با مهندسی عمران نظیر لغزش در فونداسیون ساختمان‌ها نیز مورد استفاده بوده است [۱۰۹].

نخستین بار احمدیان و همکارانش [۱۱۰] از این روش برای شناسایی اتصالات در دینامیک سازه‌ها استفاده کرده‌اند و در حال حاضر به عنوان روش موثری برای مدل‌سازی اتصالات مطرح می‌باشد. فرض اساسی این است که سطوح اتصال را می‌توان با لایه نازکی از المان‌هایی با خواص الاستیک نامعلوم مدل‌سازی نمود. نتایج رضایت‌بخشی از اعمال این روش در سازه‌های مختلف حاوی اتصالات رزوه‌ای با سطوح بزرگ [۱۱۱]، اتصالات پیچی [۱۱۰] و اتصالات جوشی [۱۱۲] گزارش شده است. در تمامی این مقالات از نرم‌افزار نَسترن<sup>۱</sup> برای بهینه‌سازی و کمینه‌کردن تابع هدف استفاده شده است. این روش برای محاسبه میرایی در اتصالات نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۱۳، ۱۱۴]. شکل کلی روابط ساختاری برای لایه واسط را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

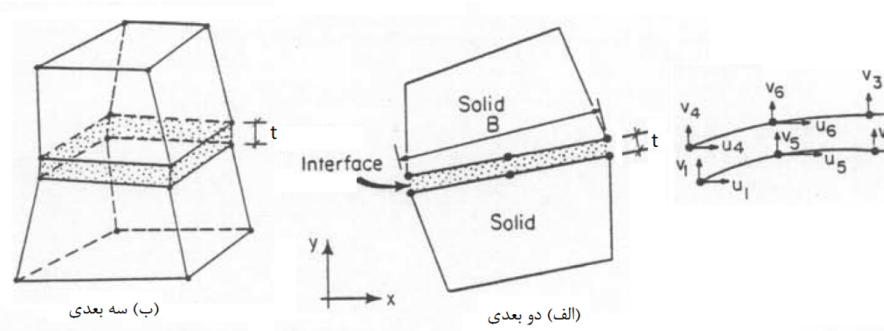
$$\sigma = [C] \varepsilon \quad (۵)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} [C_{nn}] & [C_{ns}] \\ [C_{sn}] & [C_{ss}] \end{bmatrix} \quad (۶)$$

رابطه (۵) بیانگر قانون هوک بوده و تنها برای کرنش‌های کوچک معتبر است. فلزات و سرامیک‌ها در محدوده تغییر فرم الاستیک خود کاملاً از این قانون

<sup>1</sup>MSC/NASTRAN <sup>2</sup>Bulk modulus <sup>3</sup>Constrained modulus <sup>4</sup>Lame's constants





شکل ۲۰: مدل لایه واسط با ضخامت اندک [۱۰۷]

### ۳ نتیجه‌گیری

امروزه روش المان محدود به خوبی توسعه یافته و دقت مدل‌سازی قطعات سازه‌ای با این روش در حد قابل قبولی است. ولی هنوز بخش‌هایی از سازه‌ها نظیر سطوح اتصالات را نمی‌توان با دقت خوبی مدل کرد. در بسیاری از تحلیل‌های سازه‌ای، انعطاف‌پذیری اتصال نادیده گرفته شده و فرض می‌شود که اتصال کاملاً صلب است. اما در عمل سطوح اتصالات اثرات قابل توجهی در پاسخ دینامیکی سازه‌ها داشته و چشم‌پوشی از این اثرات پیش‌بینی خواص سازه‌ها را غیردقیق می‌سازد. بنابراین ایجاد مدل‌های دقیقی از اتصالات اهمیت اساسی در پیش‌بینی رفتار دینامیکی سازه‌ها دارد.

روش‌های مدل‌سازی بسیاری برای بررسی رفتار دینامیکی سازه‌های ساده ارائه شده است. اما تمامی آنها در مواجهه با سازه‌های پیچیده دارای محدودیت هستند. زیرا این روش‌ها برای کاربردهای خاصی توسعه داده شده‌اند و نمی‌توان به راحتی کاربرد آنها را به سازه‌های بزرگ تعمیم داد. در این راستا با ارزیابی روش‌های مرسوم برای مدل‌سازی اتصالات، این نتیجه حاصل گردید که روش‌های مدل‌سازی سطوح نقطه-به-نقطه نظیر المان‌های فنر پتانسیل استفاده در سازه‌های بزرگ را ندارند و باید به سمت روش‌های مدل‌سازی پیوسته سطح-به-سطح با دیدگاه ماکرو نظیر لایه واسط و لایه رابط رفت.

### مراجع

- [1] R.A. Ibrahim, C.L. Pettit. *Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners*. Journal of Sound and Vibration 2005. 279 p. 857-936.
- [2] J.V. Ferreira. *Dynamic Response Analysis of Structures with Nonlinear Components*, in Department of Mechanical Engineering. 1998 Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- [3] M.B. Levine, C. White *Microdynamic Analysis for Establishing Nanometric Stability Requirements of Jointed Precision Space Structures*, in 19th International Modal Analysis Conference. 2001: Kissimmee, FL.
- [4] Jalali, H. *Updating of Structural Joint Model Using*

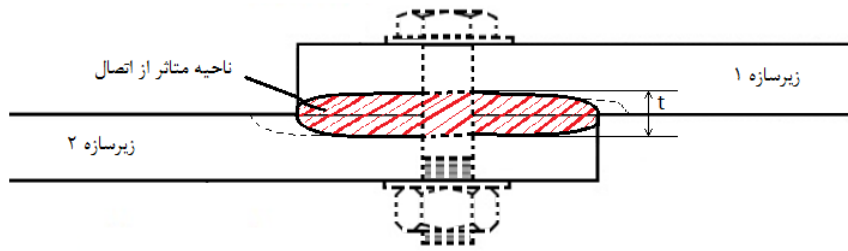
<sup>1</sup>Connective layer    <sup>2</sup>Joint affected region (JAR)

چگونگی توزیع زبری‌ها، ابعاد اتصال، مقدار پیش‌بار و تاثیر المان‌های مجاور بر این لایه می‌باشد [۱۰۴]. جلالی و همکارانش [۱۱۵] و ایرانزاد و احمدیان [۱۱۶] در شناسایی پارامترهای یک اتصال پیچی لب‌به‌لب با مدل‌سازی دوبعدی، ضخامت لایه واسط را برابر با فاصله تارهای خنثی دو تیر گرفته‌اند. اما مقدار مناسب برای ضخامت این لایه در مدل‌های سه بعدی، مبهم است. نسبت ضخامت المان واسط به میانگین ابعاد اتصال می‌تواند تا ۰/۰۰۱ برسد، بدون اینکه مشکلی در محاسبات به وجود آید [۱۱۷]. اما محققان دیگری با انجام مطالعات پارامتری پیشنهاد کرده‌اند که این نسبت در محدوده ۰/۰۱ تا ۰/۱ باشد [۱۰۷]. بنابراین لازم است تا یک فرایند سعی و خطا برای یافتن ضخامت بهینه لایه واسط در مدل‌های سه بعدی، صورت پذیرد.

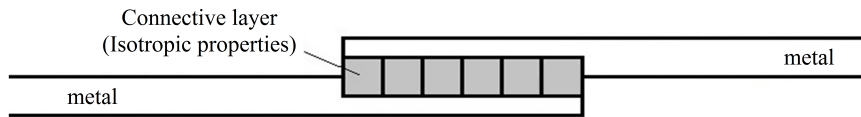
این امر منجر به افزایش میزان محاسبات می‌گردد. حتی اگر ضخامت بهینه‌ای نیز یافت شود، ابعاد اصلی سازه در واقع تغییر کرده است. همچنین اختصاص چگالی به المان‌های واسط، باعث افزایش جرم مدل در قیاس با سازه واقعی به خصوص در سازه‌های بزرگ می‌گردد. این مشکل به خصوص در مدل‌سازی اتصالات در سازه‌های بزرگ پیش می‌آید. در نتیجه استفاده از المان واسط در مدل‌های سه بعدی مناسب به نظر نمی‌رسد.

### ۱۱.۲ لایه رابط

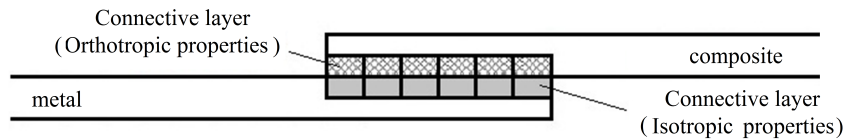
روش جدیدی که اخیراً برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سطوح اتصالات پیچی پیشنهاد شده است، لایه رابط<sup>۱</sup> می‌باشد [۱۱۸]. این روش بر اساس مفهوم ناحیه متأثر از اتصال (نما)<sup>۲</sup> بنیان نهاده شده است (شکل ۲۱). در این روش فرض می‌شود که اثرات کاهش سفتی اتصال در ناحیه معینی از زیرسازه‌ها در مجاورت سطوح اتصال تحت عنوان نما گسترش می‌یابد. ضخامت نما به عواملی نظیر پیش‌بار اتصال، صافی سطوح، جنس زیرسازه‌ها و ... بستگی دارد. این روش با موفقیت در مدل‌سازی سطوح اتصالات پیچی در سازه‌های فلزی [۱۲۰]، سازه‌های هیبریدی فلز/کامپوزیت [۱۲۱] و سازه‌های بزرگ [۱۲۲] به کار رفته است. شماتیکی از این مدل برای سازه‌های فلزی و سازه‌های هیبریدی به ترتیب در (شکل ۲۲ و ۲۳) روابط ساختاری روش لایه رابط همانند روش لایه واسط است. با این تفاوت که به جای اعمال لایه‌ای جداگانه در سطوح اتصال، بخشی از ضخامت زیرسازه‌ها این نقش را ایفا می‌کند. حسن روش لایه رابط در این است که برخلاف روش لایه واسط، ابعاد و جرم سازه هیچ تغییری نمی‌کند.



شکل ۲۱: مفهوم ناحیه متاثر از اتصال [۷۹]



شکل ۲۲: مدل لایه رابط [۱۲۰]



شکل ۲۳: مدل لایه رابط دوگانه [۱۲۱]

- [12] P.J. Gray, C.T. McCarthy. *A global bolted joint model for finite element analysis of load distributions in multi-bolt composite joints*. Composites: Part B 2010. 41 p. 317-325.
- [13] M.A. McCarthy. *Bolted joints in composite aircraft structures, in COMPOSIT Workshop on Joining and Assembling Technologies*. 2003: Turin, Italy.
- [14] J.E. Mottershead, et al. *Experience in Mechanical Joint Model Updating, in 19th International Seminar on Modal Analysis*. 1994: Leuven, Belgium.
- [15] J.E. Mottershead, et al. *Geometric Parameters for Finite Element Model Updating of Joints and Constraints*. . Mechanical Systems and Signal Processing 1996. 10(2): p. 171-182.
- [16] H. Ahmadian., J.E. Mottershead, and M.I. Friswell *Joint Modelling for Finite Element Model Updating, in Proceedings of 14th IMAC*.. 1996: Dearborn, Michigan. p. 591-596.
- [17] C.B. Horton, et al *Finite-element model updating of the welded joints in a tubular hframe. in Proceedings of the 17th international modal analysis conference*. 1999. Orlando, USA.
- [18] J.E. Mottershead, et al. *Selection and updating of parameters for an aluminium space-frame model, Mechanical Systems and Signal Processing 2000*. . 114(6): p. 923-944.
- [19] Mottershead, J.E. and S. James *Updating Parameters for the Model of a Three Storey Aluminium Modal Test Results (In Persian)n Mechanical Engineering Department*. Microdynamic Analysis for Establishing Nanometric Stability Requirements of Jointed Precision Space Structures, in 19th International Modal Analysis Conference 2003, Iran University of Science and Technology: Tehran.
- [5] D.J. Segalman, et al. *Modelling joint friction in structural dynamics. Structural Control and Health Monitoring*. 2006. 13: p. 430-453.
- [6] D.J. Segalman, et al. *Handbook on Dynamics of Jointed Structures (Tech. Rep. SAND2009- 4164), Sandia National Laboratories*.. 2009, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- [7] U. Parlitz, et al. *Identification of pre-sliding friction dynamics. Chaos 2004*. 14(2): p. 420- 430.
- [8] M. Hanss, S. Oexl, and L. Gaul. *Identification of a bolted-joint model with fuzzy parameters loaded normal to the contact interface, Mechanics Research Communications 2002*.. 29(2/3): p. 177-187.
- [9] J. Montgomery. *Methods for Modeling Bolts in the Bolted Joint in 38th ANSYS Conference*. 2002
- [10] E. Baumann. *Finite element analysis of advanced composite structures containing mechanically fastened joints, Nuclear Engineering and Design*. 1982. 70 p. 67-83.
- [11] Ekh, J. and J. Schon. *Finite element modeling and optimization of load transfer in multifastener joints using structural elements Composite Structures 2008*. 82: p. 245-256.

- [32] Vogt, F. *The load distribution in bolted or riveted joints in light-alloy structures*. Report No. SME-3300 (or NACA TM 1135). 1944, Royal Aircraft Establishment.
- [33] Tate, M.R. and S.J. Rosenfeld *Preliminary investigation of the loads carries by individual bolts in bolted joints, NACA TN-1051. 1946*. National Advisory Committee for Aeronautics.
- [34] Rosenfeld, S.J. *Analytical and experimental investigation of bolted joints, NACA TN- 1458. 1947*, National Advisory Committee for Aeronautics.
- [35] Nelson, W.D., B.L. Bunin, and L.J. HartSmith *Critical Joints in Large Composite Aircraft Structure, NASA CR-3710. 1983*. Nelson, W.D., B.L. Bunin, and L.J. HartSmith
- [36] Alley, V.L. and S.A. Leadbetter, *Prediction and Measurement of Natural Vibrations of Multistage Launch Vehicles*. AIAA Journal, 1963. 1(2): p. 374-379.
- [37] Maloney, J.G., M.T. Shelton, and D.a. Underhill *Structural dynamic properties of tactical missile joints - phase 1, General Dynamics Report No. CR-6-384-945-001. 1970*
- [38] Maloney, J.G. and M.T. Shelton *Structural dynamic properties of tactical missile joints phase 2. General Dynamics Report No. CR-6- 384-945-002. 1971*.
- [39] Lasker, G., et al. *Structural dynamic properties of tactical missile joints - phase 3. General Dynamics Report No. CR-6-384-945- 003. 1974*.
- [40] Yoshimura, M. *Measurement of Dynamic Rigidity and Damping Property for Simplified Joint Models and Simulation by Computer*. Annals of the CIRP, 1977. 25(1): p. 193-198.
- [41] Wang, J.H. and C.M. Liou *Experimental Identification of Mechanical Joint Parameters*. Journal of Vibration and Acoustics, 1991. 113.
- [42] Witek, A. *Stiffness and Damping Identification of Vibroisolation Pads in Machine Elements Joints*. in Contact mechanics III : third International Conference on Contact Mechanics, A.S. editors: M.H. Aliabadi, Editor. 1997.
- [43] Wang, J. and P. Sas *A Method for Identifying Parameters of Mechanical Joints. Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics. 1990. 57: p. 337-342*
- [44] Ahmadian, H. and H. Jalali *dentification of bolted lap joints parameters in assembled structures*. Mechanical Systems and Signal Processing 2007. 21 p. 1041-1050.
- [45] Gant, F., et al. *Definition and updating of simplified models of joint stiffness*. International Journal of Solids and Structures 2011. 48 p. 775-784.
- Frame, in Proceedings of the 16th International Modal Analysis Conference. 1998. p. 8-11.*
- [20] O.A.-S Duque, et al. *A methodology for the choice of the initial conditions in the model updating of welded joints using the fuzzy finite element method, Computers and Structures. 2007. 85 p. 1534-1546.*
- [21] C. Stocchi, P. Robinson, and S.T. Pinho *A detailed finite element investigation of composite bolted joints with countersunk fasteners. . Composites: Part A 2013. 52 p. 143- 150.*
- [22] J. Kim, J.-C. Yoon, and B.-S. Kang *Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints*. Applied Mathematical Modelling 2007. 31: p. 895-911.
- [23] D.J. Segalman, et al. *Handbook on Dynamics of Jointed Structures, SAND2009-4164. 2009*. ASandia National Laboratories.
- [24] Y.-D. Kwon, et al. *Finite Element Modeling for Static and Dynamic Analysis of Structures with Bolted Joint. Key Engineering Materials 2006. 306-308: p. 547-552.*
- [25] Ireman, T. *Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints.. 3Composite Structures, 1998. 43(3): p. 195-216.*
- [26] McCarthy, M.A., et al. *Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, singlelap composite bolted joints: part I – model development and validation. Composite Structures 2005. Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, singlelap composite bolted joints: part I – model development and validation. Composite Structures 2005*
- [27] McCarthy, C.T. and M.A. McCarthy *Threedimensional finite element analysis of singlebolt, single-lap composite bolted joints: part II - effects of bolt-hole clearance. Composite Structures, 2005. 71(2): p. 159-175.*
- [28] McCarthy, C.T., et al. *Experiences with modelling friction in composite bolted joints*. Experiences with modelling friction in composite bolted joints
- [29] Padhi, G.S., M.A. McCarthy, and C.T. McCarthy, *BOLJAT: a tool for designing composite bolted joints using threedimensional finite element analysis. Composite Part A 2002. 33(11): p. 1573-1584.*
- [30] McCarthy, C.T., M.A. McCarthy, and V.P.Lawlor *Progressive damage analysis of multibolt composite joints with variable bolthole clearances. Composite Part B, 2005. 36(4): p. 290-305.*
- [31] Camanho, P.P. and F.L. Matthews *A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates. Journal of Composite Materials 1999. 33(24): p. 2248- 2280.*

- [59] Segalman, D.J., *An Initial Overview of Iwan Modeling for Mechanical Joints (Tech. Rep. SAND2001-0811)*. Sandia National Laboratories 2001: Albuquerque
- [60] Gaul, L. and J. Lenz *Nonlinear dynamics of structures assembled by bolted joints*. Acta Mechanica, 1997. 125: p. 169-181
- [61] Peng, C.-Y *Generalized Model Identification of Linear and Nonlinear Dynamic Systems*. 1988, California Institute of Technology: Pasadena, CA
- [62] Segalman, D.J., *A Four-Parameter Iwan Model for Lap-Type Joints (Tech. Rep. SAND2002-3828)*. Sandia National Laboratories 2002: Albuquerque.
- [63] Segalman, D.J *A Four-Parameter Iwan Model for Lap-Type Joints*. Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, 2005. 72: p. 752-760.
- [64] Allen, M.S. and R.L. Mayes *Estimating the degree of nonlinearity in transient responses with zeroed early-time fast Fourier transforms*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010. 24: p. 2049-2064.
- [65] Segalman, D.J. and W. Holzmann *Nonlinear Response of a Lap-Type Joint using a WholeInterface Model*. n 23rd International Modal Analysis Conference. 2005: Orlando, Florida.
- [66] Deaner, B.J., et al *Investigation of Modal Iwan Models for Structures with Bolted Joints*. in 31th International Modal Analysis Conference. 2013
- [67] Songa, Y., et al. *Simulation of dynamics of beam structures with bolted joints using adjusted Iwan beam elements*. Journal of Sound and Vibration, 2004. 273 p. 249-276.
- [68] Shirayeva, O.V., et al. *Parameter estimation and investigation of a bolted joint model*. Journal of Sound and Vibration, 2007. 307 p. 680-697.
- [69] Pettit, C.L., et al. *Parameter Identification and Investigation of a Bolted Joint Model, (AIAA 2005-2378)*. in 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2005: Austin, Texas.
- [70] Segalman, D.J. and M.J. Starr *Relation ships Among Certain Joints Constitutive Models (Tech.Rep.SAND2004-4321)*. Sandia National Laboratories, 2004, Sandia National Laboratories: Albuquerque, NM.
- [71] Sanliturk, K.Y. and D.J. Ewins *Modelling two-dimensional friction contact and its application using harmonic balance method*. Journal of Sound and Vibration, 1996. 193: p. 511-523
- [72] Ouyang, H., M.J. Oldfield, and J.E. Mottershead *Experimental and theoretical studies of a bolted joint excited by a torsional dynamic load*. International Journal of Mechanical Sciences, 2006. 48(12): p. 1447- 1455.
- [46] Guo, T., et al. *Alternative method for identification of the dynamic properties of bolted joints*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012. 26(10): p. 3017-3027.
- [47] Wang, L., et al. *Analysis and modeling for flexible joint interfaces under micro and macro scale*. Precision Engineering. 2013. 37(7): p. 817-824.
- [48] McCarthy, M.A., C.T. McCarthy, and G.S. Padhi *A simple method for determining the effects of bolt-hole clearance on load distribution in single-column multi-bolt composite joints*. Composite Structures 2006. 73 p. 78-87.
- [49] McCarthy, C.T. and P.J. Gray *An analytical model for the prediction of load distribution in highly torqued multi-bolt composite joints*. Composite Structures, 2011. 93 p. 287-298.
- [50] Gray, P.J. and C.T. McCarthy *An analytical model for the prediction of through-thickness stiffness in tension-loaded composite bolted joints*. . Composite Structures, 2012. 94 p. 2450- 2459.
- [51] Bois, C., et al. *An analytical model for the strength prediction of hybrid (bolted/bonded) composite joints*. Composite Structures, 2013. 97 p. 252-260.
- [52] Lecomte, J., et al. *An analytical model for the prediction of load distribution in multi-bolt composite joints including hole-location errors*. Composite Structures, 2014. 117 p. 354-361
- [53] Liu, F., et al. *An analytical joint stiffness model for load transfer analysis in highly torqued multi-bolt composite joints with clearances*. Composite Structures, 2015. 131 p. 625-636
- [54] Visser, W.J. *Updating Structural Dynamics Models Using Frequency Response Data in Department of Mechanical Engineering*. 1992 Imperial College of Science, Technology and Medicine: London
- [55] Iwan, W.D. *A Distributed-Element Model for Hysteresis and Its Steady-State Dynamic Response*. ASME Journal of Applied Mechanics, 1966. 33(4): p. 893-900.
- [56] Iwan, W.D. *On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems*. Journal of Applied Mechanics, 1967. 34(3): p. 612-617
- [57] Segalman, D.J. and M.J. Starr, *Iwan models and their provenance in ASME International Design Engineering Technical Conference..* 2012: Chicago, IL, USA.
- [58] Kashani, H. *Parametric Study of Nonlinear Behavior of Jenkins Element Using Harmonic Balance Method*. in 11th International Conference on Vibration Problems. 2013: Lisbon, Portugal



- [86] Ahmadian, H. *Dynamic model identification using modal testing data*. in Department of mechanical Engineering. 1994, University of Waterloo: Canada.
- [87] Jalali, H. *Modeling and Identification of Nonlinear Parameters in Bolted Joints (In Persian)*, in *Department of Mechanical Engineering*. in Department of Mechanical Engineering. 2007, Iran University of Science and Technology: Tehran.
- [88] Ahmadian, H. and H. Jalali *Generic element formulation for modelling bolted lap joints*. in *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007. 21: p. 2318-2334.
- [89] Ahmadian, H., J.E. Mottershead, and M.I. Friswell *Parameterisation and Identification of a Rubber Seal*. in *Proceedings of the 16th International Modal Analysis Conference*. in 1998.
- [90] Ratcliffe, M.J. and N.A.J. Lieven *A Generic Element-based Method for Joint Identification*. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2000. in 14(1): p. 3-28.
- [91] Titurus, B., M.I. Friswell, and L. Starek *Damage Detection Using Generic Elements - Part I. Model updating Computers and Structures*. in 2003. 81 p. 2273-2286
- [92] Titurus, B., M.I. Friswell, and L. Starek *Damage detection using generic elements - Part II. Damage detection Computers and Structures*. in 2003. 81 p. 2287-2299.
- [93] H. Ahmadian, G.M.L. Gladwell, and F. Ismail *Parameter Selection Strategies in Finite Element Model Updating Transactions of the ASME*. in *Journal of Vibration and Acoustics*, 1997. 119: p. 37-45.
- [94] Ahmadian, H., J.E. Mottershead, and M.I. Friswell *Physical Realization of Generic Element Parameters in Model Updating*. *Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics*. 2002. 124: p. 628- 633.
- [95] Jalali, H., H. Ahmadian, and J.E. Mottershead *Identification of nonlinear bolted lap-joint parameters by force-state mapping*. *International Journal of Solids and Structures* 2007. 44 p. 8087-8105.
- [96] Palmonella, M., et al. *Finite element models of spot welds in structural dynamics - review and updating Computers and Structures* 2005. 83: p. 648-661.
- [97] Goodman, R.E., R.L. Taylor, and T.L. Brekke *A model for the mechanics of jointed rock*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*. 1968. 59 p. 99-137.
- [98] Heuze, F.E. and T.G. Barbour, *New models for rock joints and interfaces ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1982. 108: p. 757-766.
- [73] Ahmadian, H., H. Jalali, and F. Pourahmadian, *Nonlinear model identification of a frictional contact support*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010. 24 (8): p. 2844-2854.
- [74] Ahmadian, H. and M. Rajaei *Identification of Iwan distribution density function in frictional contacts*. *Journal of Sound and Vibration* 2014. 333 p. 3382-3393
- [75] Smallwood, D.O., D.L. Gregory, and R.G. Coleman *Damping Investigations of a Simplified Frictional Shear Joint (Tech. Rep. SAND2001-0811)*. Sandia National Laboratories 2000.
- [76] Song, Y., et al. *Effect of Pressure Distribution on Energy Dissipation in a Mechanical Lap Joint*. *AIAA Journal*. 2005. 43: p. 420-425.
- [77] Quinn, D.D. and D.J. Segalman *Using Series Series Iwan-Type Models for Understanding Joint Dynamics*. *Transactions of the ASME. Journal of Applied Mechanics*, 2005. 72.
- [78] Miller, J.D. and D.D. Quinn *A two-sided interface model for dissipation in structural systems with frictional joints* *Journal of Sound and Vibration*. 2009. 321: p. 201-219.
- [79] Deshmukh, D.V., et al. *Correlation of a discrete friction (Iwan) element and continuum approaches to predict interface sliding behavior*. *European journal of Mechanics A - Solids* 2007. 26: p. 212-224.
- [80] Segalman, D.J. and M.J. Starr *Inversion of Masing models via continuous Iwan systems*. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2008. 43: p. 74-80.
- [81] Argatov, I.I. and E.A. Butcher, *On the Iwan models for lap-type bolted joints* *International Journal of Non-Linear Mechanics* 2011. 46 p. 347-356.
- [82] Rajaei, M. and H. Ahmadian *models for lap-type bolted joints Development of generalized Iwan model to simulate frictional contacts with variable normal loads*. *Applied Mathematical Modelling*, 2014. 38(15-16): p. 4006-4018.
- [83] Li, Y. and Z. Hao *A six-parameter Iwan model and its application*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016. 68-69: p. 354-365.
- [84] Ahmadian, H., G.M.L. Gladwell, and F. Ismail *Families of Finite Element Models for Updating Procedures*. in 12th International Modal Analysis Conference. 1994.
- [85] Gladwell, G.M.L. and H. Ahmadian *Generic Elements Suitable for Finite Element Model Updating*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1995. 9(6): p. 601-614.

- [112] H. Ahmadian, et al. *Dynamic modelling of spot welds using thin-layer interface theory*, in *10th International Congress on Sound and Vibration (ICSV10)*. 2003: Stockholm, Sweden.
- [113] Bograd, S., A. Schmidt, and L. Gaul *Joint damping prediction by thin-layer elements*. in *26th International Modal Analysis Conference 2008*: Orlando, FL.
- [114] Bograd, S., A. Schmidt, and L. Gaul *Integration of Damping Properties of Assembled Structures into the Finite Element Method Using Thin-Layer Elements and the Model of Constant Hysteresis in IMAC*. 2009.
- [115] Jalali, H., A. Hedayati, and H. Ahmadian, *Modelling mechanical interfaces experiencing micro-slip/slap*. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2011. 19(6): p. 751-764.
- [116] M. Iranzad, H. Ahmadian *Identification of nonlinear bolted lap joint models*. *Computers and Structures*. 2012. 96-97: p. 1-8.
- [117] G. N. Pande, K. G. Sharma *On joint/interface elements and associated problems of illconditionin*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1979. 3(3): p. 293-300
- [۱۱۸] س. شکراللهی، ح. احمدیان، ف. عادل. توسعه یک الگوی جدید برای به‌روزرسانی مدل المان محدود اتصالات پیچی و مقایسه کارایی آن با رویکرد لایه واسط، مجله مهندسی مکانیک مدرس. دوره ۱۶، شماره ۳، صص ۳۵-۴۲، خرداد ۱۳۹۵.
- [۱۱۹] ف. عادل، به‌روزرسانی مدل المان محدود یک سازه هوافضایی با استفاده از نتایج تست مودال. رساله دکتری مهندسی هوافضا، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، آبان ۱۳۹۵.
- [120] S. Shokrollahi, F. Adel *Finite element model updating of bolted lap joints implementing identification of joint affected region parameters*. *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics* 2(1), 64-77, 2016.
- [121] 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, 172-185, 2017.
- [۱۲۲] ف. عادل، س. شکراللهی، س. خدایاری آبکنار. به‌روزرسانی مدل المان محدود سازه‌های بزرگ هوایی با استفاده از یک رویکرد ساده، شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی انجمن هوافضای ایران، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. ۳-۵ اسفند ۱۳۹۵.
- [99] Wang, J.G., Y. Ichikawa, and C.F. Leung *A constitutive model for rock interfaces and joints*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2003. 40: p. 41- 53.
- [100] Gaul, L. and M. Mayer *Modeling of Contact Interfaces in Built-up Structures by Zero-thickness Elements*. 2004.
- [101] Mayera, M.H. and L. Gaul *Segment-to-Segment Contact Elements for Modelling Joint Interfaces in Finite Element Analysis Mechanical Systems and Signal Processing 2007*. 21 p. 724-734.
- [102] Beer, G. *An isoparametric joint interface element for finite element analysis*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1985. 21 p. 585-600.
- [103] Riahi, A., E.R. Hammah, and J.H. Curran *Limits of Applicability of the Finite Element Explicit Joint Model in the Analysis of Jointed Rock Problems*. in *ARMA* 10- 336. 2008
- [104] Sharma, K.G. and C.S. Desai *Analysis and implementation of thin-layer element for interfaces and joints*. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992. 118 p. 2442-2462.
- [105] Day, R.A. and D.M. Potts *Zero thickness interface elements - numerical stability and application* *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1994. 18: p. 689-708.
- [106] Potts, D.M. and L. Zdravkovic *ZFinite element analysis in geotechnical engineering: Theory*. 1999, Thomas Telford Limited: Great Britain.
- [107] C.S.,Desai, et al., Thin-layer elements for interfaces and joints *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1984. 8(1): p. 19-43.
- [108] Zaman, M.M.-u., C.S. Desai, and E.C. Drumm *Interface model for dynamic soilstructure interaction* *Journal of Geotechnical Engineering*. 1984. 110(9): p. 1257-1273.
- [109] Samadhiy, N.K., M.N. Viladkar, and M.A. Al-Obaydi *Three-Dimensional Joint-Interface Element for Rough Undulating Major Discontinuities in Rock Masses* *INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMECHANICS*. 2008. 8: p. 327-335.
- [110] Ahmadian, H., et al., Identification of bolted-joint in-terface models *in International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA)*. 2002: Katholieke University, Leuven, Belgium.
- [111] H. Ahmadian, et al *Modeling and updating of large surface-to-surface joints in the AWE-MACE structure*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006. 20 p. 868-880.