

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1401.8.2.11.1](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1401.8.2.11.1)

درصد همانندی: ۱۳٪

بررسی عددی و تجربی اتصال فلنج به جان اسپارهای بال کامپوزیتی یک شناور پرنده

ایرج رجبی^{۱*}، بیژن شهبازی نژاد^۲، محمدرحیم همتیان^۳

irajabi@mut.ac.ir

bijanshabazi74@gmail.com

mhemat@shirazu.ac.ir

^{۱*} نویسنده مسئول، استادیار، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

^۳ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳

چکیده

بال یک شناور پرنده علاوه بر فشارهای آیرودینامیک تحت نیروهای ترکیبی هیدروینامیک از طرف اسکی (ناشی از نشست و برخاست روی دریا) نیز است. در حالت نشست نامتقارن، گشتاور خمشی اعمالی به اسپارهای بال یکی از مهم ترین حالت های بارگذاری در طراحی سازه اسپار بال است. در بال کامپوزیتی، بحرانی ترین بخش آن، اتصال فلنج به جان اسپار است. در مدل سازی المان محدود بال کامپوزیتی واقعی که از تعدادی اسپار، ریب و اعضای دیگر تشکیل شده اند، اتصال فلنج به جان اسپار، به صورت ساده و بدون مدل سازی جزئیات اتصال انجام می شود. در شبیه سازی تیر ساده، از تعداد شبکه و گره خیلی کمتری نسبت به شبیه سازی کامل استفاده می شود و نحوه اتصال فلنج به جان تیر مدل سازی نمی شود، بنابراین می بایست استحکام المان اتصال دهنده و نحوه طراحی و محاسبه رفتار آن مشخص شود. در این تحقیق، تحلیل اجزاء محدود اسپارهای بال یک شناور پرنده با سطح مقطع I با هندسه های متفاوت تحت انواع بارگذاری (مطابق استاندارد) برای حالت های مختلف عملکردی، انجام می شود. پس از آن بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی، قواعد و دستورالعمل های کلی و ساده طراحی در خصوص نحوه اتصال فلنج به جان این اسپارها ارائه می شود. در پایان برای صحت گذاری نتایج المان محدود، ساخت و آزمون یک نمونه تجربی نیز انجام شده که مقایسه نتایج نشان دهنده تطابق بسیار خوبی است.

واژه های کلیدی: روش المان محدود، اسپار کامپوزیتی، عضو اتصال، جان، فلنج

۱. مقدمه

قایق‌های پرنده نوعی از وسایل دوزیست (آبی هوایی) محسوب می‌شوند که ضمن قابلیت نشست و بلند شدن از روی آب، با طراحی خاص خود از پدیده اثر سطحی استفاده کرده و قابلیت‌های عملیاتی خود را افزایش می‌دهند. شناور پرنده، شناوری است که با استفاده از بال‌های خود و یک پدیده فیزیکی ساده توانمندی پرواز پیدا می‌کند. در واقع چون هوای پرفشار زیر بال شناور پرنده به دلیل فاصله کم با زمین نمی‌تواند چرخش خود به سمت نوک بال و روی بال را کامل کند و در عوض در زیر بال، فشرده می‌شود، کاهش برآ ناشی از این حرکت نیز حذف شده و در نتیجه این پدیده باعث می‌شود. دهانه بال مؤثر وسیله افزایش یابد که حاصل آن افزایش نیروی برآ و کاهش نیروی مقاوم القایی و ازدیاد سرعت است. بال یک شناور پرنده علاوه بر فشارهای آیرودینامیک، تحت نیروهای ترکیبی هیدوردینامیک از طرف اسکی (ناشی از نشست و برخاست روی دریا) نیز است. در حالت نشست نامتقارن، گشتاور خمشی اعمالی به اسپارهای بال یکی از مهم‌ترین حالت‌های بارگذاری در طراحی سازه اسپار بال است. در بال کامپوزیتی، بحرانی‌ترین بخش آن، اتصال فلنج به جان اسپار است.

از سوی دیگر استفاده از مواد کامپوزیتی (به‌ویژه کربن) به دلیل سفتی ویژه و نسبت استحکام به وزن بالا در اسپارهای بال شناورهای پرنده کاربرد چشمگیری دارند. به دلیل گشتاورهای خمشی بالا در اسپارهای بال کامپوزیتی شناورهای پرنده از مقاطع T و I استفاده می‌شود، بنابراین نحوه اتصال فلنج به جان اسپارهای کامپوزیتی بال اهمیت بسیار زیادی دارد. ساخت و اتصال فلنج به جان در تیرهای کامپوزیتی با این مقاطع فناوری پیچیده‌ای دارد که در این تحقیق بررسی می‌شود. در این مقاله، فلنج تیر اسپار دارای ساختار چندلایه‌ای از جنس کربن/اپوکسی و جان آن دارای ساختار ساندویچی با رویه‌های کربن و هسته فوم PVC در نظر گرفته شده است.

با توجه به اهمیت موضوع، اتصال فلنج به جان در تیرهای ساندویچی توسط محققان بسیاری بررسی شده است. ماینس^۱

و همکاران [1]، با استفاده از مدل لهیدگی فوم و گسیختگی تدریجی هسته، رفتار تیرهای ساندویچی با رویه کامپوزیتی و هسته PVC زیر خمش سه نقطه‌ای را به روش عددی ارزیابی کردند. در سال ۲۰۰۲ دانیل^۲ و همکاران [۲] رفتار تیرهای ساندویچی با هسته‌های مختلف گسترده و لانه‌زنبوری دارای رویه‌های چندلایه کربنی، تحت خمش سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای بررسی کردند. ایشان تأثیر هندسه تیر، نوع بارگذاری، جنس و نحوه لایه گذاری در مود زوال را بررسی کردند.

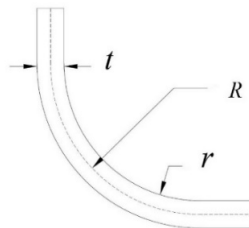
در سال ۲۰۰۵، تافتگارد^۳ و لیستراپ^۴ [۳]، برای ساخت و تولید تیرهای T شکل، استفاده از دو فوم مثلثی شکل پیشنهاد کردند که باعث کاهش وزن می‌شود. دهرامان و همکاران [۴] با بررسی عددی و تجربی یک اتصال T شکل کامپوزیتی نشان دادند که زاویه بارگذاری در زوال اتصال تأثیر بسزایی دارد. والنزا^۵ و همکاران [۵] در آزمون خمش سه نقطه تیر با هسته فوم PVC و رویه چندلایه کامپوزیتی به دو نتیجه متفاوت دست یافتند. در نوع اول، فرورفتگی و زوال هسته تحت بار محلی بدون آسیب در رویه اتفاق افتاد ولی در نوع دوم، نیروی اعمالی باعث تغییر شکل موضعی رویه بالایی تیر و شکست ناگهانی آن شده است. در سال ۲۰۱۵ محققان [۶] با استفاده از مواد مدرج تابعی در اتصال فلنج به جان تیر T شکل، مقاومت آن بین ۱۰ تا ۵۰ درصد در شرایط مختلف افزایش دادند.

سورسن^۶ و همکاران [۷] رفتار خمشی و مود گسیختگی تیرهای ساندویچی را با آزمون خمش سه نقطه‌ای تحت بار استاتیکی و ضربه بررسی کردند. برای پیش‌بینی رشد ترک در هسته و جدایش بین هسته و رویه از مدل عددی استفاده نمودند. در صحنه گذاری نیز تطابق خوبی بین نتایج تحلیل عددی و نمونه تجربی و آزمایشگاهی ارائه شده است.

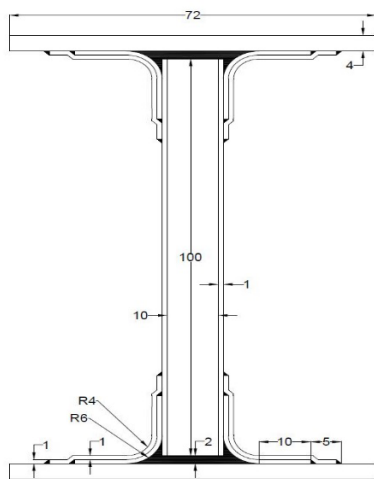
در سال ۲۰۱۷، طاهری و همکاران [۸] رفتار خمش چهار نقطه‌ای تیرهای ساندویچی با طول‌های مختلف را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که مکانیزم زوال تیرها در اثر لهیدگی هسته و گسیختگی رویه در نقطه اعمال بار بوده است. آن‌ها نمودار نیرو-جابجایی و مود شکست تیرها با دو

داخلی (r)، شعاع میانی (R) و ضخامت با (t) نمایش داده شده است.

ترتیب لایه گذاری، جنس و تعداد لایه های فلنج و جان تیر ثابت در نظر گرفته می شوند و لایه های تشکیل دهنده فلنج و رویه جان به صورت درون صفحه ای شبه ایزوتروپیک فرض می شوند. همچنین هر لایه در جهت های اصلی درون صفحه ای خواص یکسانی دارد.



شکل ۱. هندسه عضو اتصال دهنده (کمان)



شکل ۲. هندسه و سطح مقطع تیر I شکل

۳. روش کلی مدل سازی المان محدود تیر

در مدل سازی المان محدود سازه های صنعتی که از تعداد زیادی تیر و اعضای دیگر تشکیل شده است، اتصال فلنج به جان، به صورت ساده و بدون مدل سازی عضو اتصال دهنده در نظر گرفته می شود. شکل ۳ این نوع مدل سازی را که در نرم افزار انسیس^۷ انجام شده است نشان می دهد. در این روش، فلنج چندلایه ای و جان ساندویچی توسط المان پوسته^۸ مدل می شود. در روش دیگر (تحقیقاتی) که در شکل ۴ نشان داده شده است، برای مدل سازی تیر، عضو اتصال دهنده جان و فلنج با جزئیات آن مدل می شود. در این مدل، برای اتصال

روش آزمایشگاهی و تئوری را با یکدیگر مقایسه نمودند که نتایج دو روش، تطابق مناسبی نشان می دهند.

بررسی موارد بالا نشان می دهد که اگرچه به دلیل اهمیت موضوع تحقیقات زیادی در زمینه نحوه اتصال فلنج به جان در تیرهای کامپوزیتی انجام شده است، اما هیچ کدام به موضوع پارامترهای مؤثر در طراحی لایه ای اتصال دهنده فلنج به جان اسپارهای کامپوزیتی یک شناور پرنده اشاره ای نکرده است. در این تحقیق بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی و تجربی، قواعد و دستورالعمل های کلی و ساده طراحی در خصوص نحوه اتصال فلنج به جان این اسپارها ارائه می شود.

۲. صورت مسئله و فرضیات

اسپارهای کامپوزیتی با رویه چندلایه و جان ساندویچی در ساختار بال هواپیماها و شناورهای پرنده کاربرد بسیار وسیعی دارند [۹]. پیچیده ترین بخش برای طراحی و ساخت یک اسپار ساندویچی با سطح مقطع I، نحوه اتصال فلنج به جان آن است، چون منابع و مراجع طراحی و ساخت جداگانه فلنج و جان به وفور در دسترس بوده و کار دشواری نیست [۱۰]. هدف از این مقاله این است که با کمک تحلیل های عددی اثر پارامترهای مهم در طراحی عضو اتصال دهنده فلنج به جان در تیرهای ساندویچی I شکل اسپار بال یک شناور پرنده بررسی و استخراج شود. بر اساس نتایج این تحقیق می توان دستورالعمل کلی برای طراحی اتصال سایر تیرهای ساندویچی با مقاطع T، X و H به صورت مشابه طراحی کرد. یکی از پرکاربردترین نحوه اتصال فلنج به جان تیرهای کامپوزیتی استفاده از روش کمانی از دایره است که در این مقاله به اختصار روش کمانی نامیده می شود. در این مقاله سعی می شود به سؤال های زیر پاسخ داده شود.

در روش اتصال کمانی فلنج به جان، تعداد لایه کامپوزیت مورد نیاز برای اتصال فلنج به جان به چه عواملی وابسته است؟ شعاع کمان برای اتصال فلنج به جان تیر به سایر هندسه تیر چه ارتباطی دارد؟

شکل ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات هندسه عضو اتصال (کمان) و هندسه مقطع تیر مورد نظر را نشان می دهد که در آن شعاع

در شبیه‌سازی سه‌بعدی و کامل‌سازه، ویرایش و بهینه‌سازی مدل بسیار سخت می‌شود؛ بنابراین، در تحلیل و شبیه‌سازی المان محدود سازه‌های بزرگ صنعتی که دارای تعداد زیادی تیر و اتصالات است، برای مدل‌سازی از المان‌های دوبعدی، یک‌بعدی پوسته و تیر استفاده می‌شود و امکان مدل‌سازی عضو اتصال‌دهنده فلنج به جان تیر وجود ندارد، بنابراین می‌بایست به‌صورت جداگانه استحکام المان اتصال‌دهنده و نحوه طراحی و محاسبه رفتار آن مشخص و پارامترهای مهم طراحی آن ارائه شود.

در این تحقیق، تحلیل اجزاء محدود تیر ساندویچی (اسپار بال) با هندسه‌های متفاوت تحت انواع بارگذاری (مطابق استاندارد) برای حالت‌های مختلف عملکردی، انجام می‌شود. پس‌از آن بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی، قواعد و دستورالعمل‌های کلی و ساده طراحی در خصوص نحوه اتصال فلنج به جان این اسپارها ارائه می‌شود.

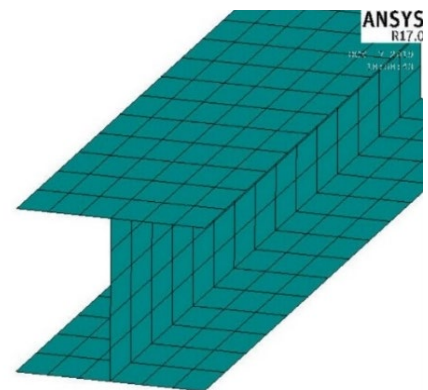
۴. نتایج عددی مدل‌سازی المان محدود

در این قسمت تیرهای مختلف تحت بارگذاری‌های مختلف با روش المان محدود تحلیل می‌شود تا با جمع‌بندی نتایج به‌دست‌آمده دستورالعمل طراحی هندسی عضو اتصال‌دهنده فلنج به جان استخراج شود.

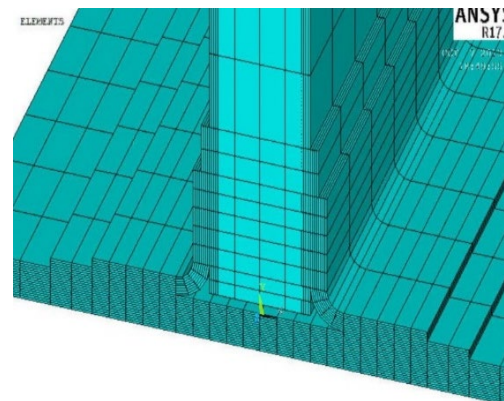
۴-۱. جنس و نحوه لایه‌چینی

در این تحقیق جنس الیاف و پارچه‌های فلنج و رویه‌های جان از کربن، رزین اپوکسی و فوم هسته نیز PVC با دانسیته 80 kg/m^3 در نظر گرفته شده است. ضخامت هر لایه کامپوزیت با جرم مخصوص 200 گرم بر مترمربع، 0.25 میلی‌متر فرض شده است. درصد وزنی الیاف 60 و جرم مخصوص هر لایه کامپوزیتی 374 گرم بر مترمربع است و خواص لایه‌ها در جهت‌های اصلی درون صفحه‌ای یکسان است. لایه چینی تیرهای ساندویچی در این تحقیق به‌صورت $((\pm 45)/0.90)_n$ است که در آن n تعداد لایه‌های زوج می‌باشد. با تحلیل عددی تیرهای کامپوزیتی با شرایط مرزی مختلف و بارگذاری و هندسه متفاوت، مشخصات کمان اتصال (شامل تعداد لایه و شعاع مناسب

فلنج به جان، از روش چندلایه متصل‌کننده (اتصال کمانی) استفاده شده است. روش اتصال کمانی، فلنج کامپوزیتی تیر را به جان ساندویچی آن از طریق تعدادی از لایه‌های کامپوزیت استفاده‌شده در رویه جان ساندویچی تیر، به‌صورت کمانی دایروی متصل می‌کند. همچنین از چسب اپوکسی برای پرکردن قسمت زیرین اتصال (فاصله بین کمان اتصال دایروی و بدنه تیر) استفاده می‌شود. در این روش، برای مدل‌سازی هسته جان که یک ساختار ساندویچی دارد از المان حجم‌دار^۹ و برای مدل‌سازی رویه‌های کامپوزیتی آن از المان پوسته استفاده می‌شود. فلنج و عضو اتصال‌دهنده توسط المان پوسته مدل می‌شوند [۱۱].

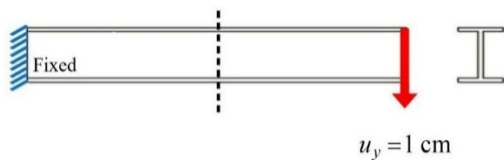


شکل ۳. مدل‌سازی تیر به‌صورت ساده

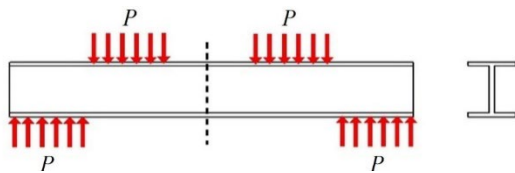


شکل ۴. مدل‌سازی تیر به‌صورت کامل

مدل‌سازی تیر به‌صورت ساده و با استفاده از المان پوسته (شکل ۳)، دارای شبکه‌بندی نزدیک به 920 المان است. درحالی‌که که مدل‌سازی با استفاده از المان سه‌بعدی (شکل ۴) دارای تعداد المان 75413 (بیش از 75 برابر) است.



شکل ۸. بارگذاری چهارم



شکل ۹. بارگذاری پنجم

گفتنی است؛ استناد به نتایج تحلیل المان محدود منوط به استقلال نتایج از شبکه‌بندی است؛ بنابراین برای بارگذاری نوع اول (با شعاع عضو اتصال ۸ میلی‌متر) تحلیل با شبکه‌بندی‌های مختلف انجام شده تا مرحله‌ای که اندازه شبکه‌بندی‌ها در دو مرحله متوالی در نتایج تأثیری نداشته باشد. همان‌طور که در جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود، نتایج تحلیل شبکه‌بندی با اندازه المان ۳ میلی‌متر مناسب است.

جدول ۱. نتایج استقلال نتایج تحلیل از شبکه‌بندی در بارگذاری اول

اندازه المان (میلی‌متر)	ضریب اطمینان رویه جان	ضریب اطمینان عضو اتصال	جابه‌جایی بیشینه تیر (میلی‌متر)
۱۰	۶/۵۱	۱/۰۱	۱۴
۶	۸/۲۷	۲/۹۰	۱۷/۵۰
۳	۸/۲۷	۴/۲۹	۱۹
۲	۸/۲۷	۴/۳۱	۱۹

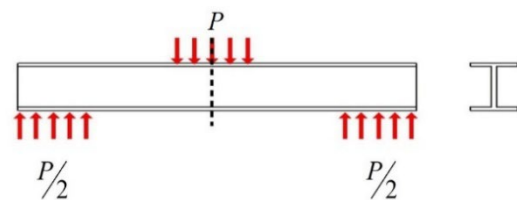
در تیرهای I شکل تحت خمش، فلنج‌ها بارهای محوری و خمشی (قسمت اصلی) را انتقال می‌دهد و سهم بار وارد شونده به جان تیر به مراتب از فلنج کمتر است، بنابراین در ساختار کامپوزیتی تعداد لایه در جان تیر از فلنج آن بسیار کمتر است. معمولاً فرض می‌شود فلنج طوری انتخاب می‌شود که استحکام لازم برای تحمل بار وارد شونده به تیر وجود داشته باشد. تعداد لایه‌های جان تیر به صورتی انتخاب می‌شود که برش را تحمل نماید و ضریب اطمینانی بیش از فلنج داشته باشد. با فرض حداقل لایه در رویه جان تیر (۴ لایه ۲۰۰ گرم بر مترمربع کربن) و نسبت $R/t = 2.5$ ، نتایج بر

اتصال فلنج به جان تیر) استخراج می‌شود. بر اساس الزامات استاندارد مورداستفاده برای طراحی سازه بال شناور پرنده بارهای خمشی و برشی در تیر مهم هستند و بارهای محوری و پیچشی اهمیت کمتری دارند. با شرط اینکه مقاومت عضو اتصال و رویه جان نزدیک به هم باشد یا اینکه مقاومت عضو اتصال کمی بیشتر از رویه جان باشد، مشخصات کمان اتصال (عداد مناسب لایه و شعاع مناسب آن) به دست می‌آید.

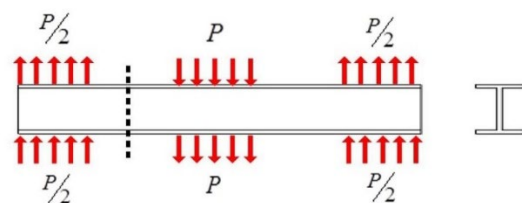
۲-۴. بارگذاری‌های مختلف در نظر گرفته شده و نتایج استخراج شده

استخراج شده

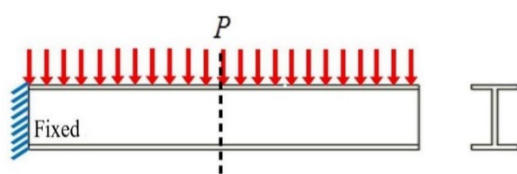
بر اساس الزامات استاندارد مورداستفاده برای طراحی سازه بال شناور پرنده، پنج نوع بارگذاری مطابق شکل ۵ تا ۹ در نظر گرفته شده است. بار اعمالی در هر حالت با پارامتر P نمایش داده است. چون مسئله خطی و استاتیکی است، می‌توان برای P مقدار واحد را در نظر گرفت و برای هر مقدار دلخواه آن، نتایج را با متناسب به آن بسط داد. در تحلیل‌های انجام شده، مقدار بار P به نحوی استخراج شده است که ضریب اطمینان تنش تسای‌وو در قسمت‌های مختلف تیر الزامات مربوطه را برآورده سازد، معیار تسای‌وو نسبت به بقیه معیارهای شکست در کامپوزیت‌ها کاربرد بیشتری دارد [۱۲].



شکل ۵. بارگذاری اول



شکل ۶. بارگذاری دوم



شکل ۷. بارگذاری سوم

بهتری است و کمان اتصال‌دهنده با ۸ لایه استحکام بیشتری نسبت به رویه جان تیر دارد.

برای حالت‌هایی که عضو اتصال ۱۲ لایه دارد ($O_I/W_I = 3$)، ضرایب اطمینان کمان اتصال و رویه ساندویچی جان تفاوت زیادی دارد و سازه توزیع تنش یکنواختی ندارد، اگرچه کمان اتصال‌دهنده با ۱۲ لایه استحکام بیشتری نسبت به رویه جان تیر دارد.

این تحلیل برای نسبت $R/t = 2.5$ انجام شده است و اگر تعداد لایه رویه ساندویچی را با W_I و تعداد لایه کمان اتصال را با O_I نشان دهیم برای تحلیل‌های انجام شده در جدول ۲ نسبت $O_I/W_I = 2$ مناسب‌ترین حالت است.

گزارش بررسی اثر نسبت R/t در نتایج تحلیل‌ها تحت بارگذاری نوع اول، برای حالت‌هایی که تعداد لایه‌های عضو اتصال دو برابر تعداد لایه‌های رویه جان است در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای نسبت $O_I/W_I = 2$ به ازای نسبت‌های مختلف R/t (برای شعاع‌های درونی ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر) ضرایب اطمینان عضو اتصال و رویه جان به هم نزدیک هستند و توزیع تنش یکنواخت بوده و هرچه R/t افزایش یابد ضرایب اطمینان عضو اتصال کاهش و ضرایب رویه جان افزایش می‌یابد. به‌طور کلی نسبت R/t بر نتایج تأثیر چشمگیری ندارد.

نتایج به‌دست آمده از بارگذاری نوع اول، در جدول‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که نسبت O_I/W_I برابر با ۲ باعث توزیع یکنواخت تنش در عضو اتصال و رویه جان می‌شود که از نظر طراحی مناسب‌ترین حالت است.

جدول ۳. نتایج بارگذاری اول، برای شعاع‌های مختلف کمان

اتصال، $O_I/W_I = 2$

$(fs)_o$	$(fs)_w$	R/t
۱۴/۰۱	۱۱/۴۳	۲/۵
۱۳/۶۲	۱۲/۲۵	۲/۵
۱۳/۰۳	۱۳/۳۳	۴/۵
۱۲/۵۵	۱۴/۴۸	۵/۵

اساس نسبت تعداد لایه‌های کمان اتصال‌دهنده به تعداد لایه‌های رویه جان در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج بارگذاری اول

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_I/W_I
۲/۴۴	۸/۲۷	۱
۶/۰۹	۹/۱۶	۱/۵
۱۴/۰۱	۱۱/۴۳	۲
۲۶/۸۶	۱۱/۰۹	۳

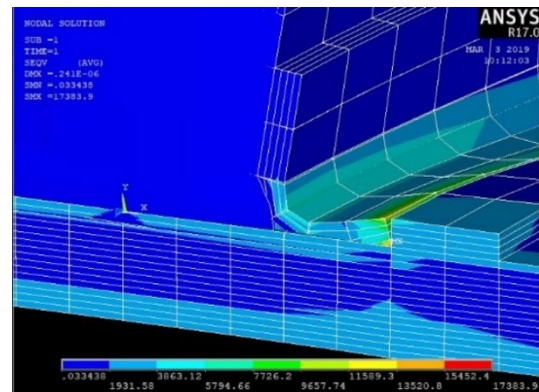
تعریف علائم استفاده شده در جدول ۲ به شرح زیر است:

ضریب اطمینان اتصال $(fs)_o$

ضریب اطمینان رویه جان $(fs)_w$

نسبت تعداد لایه در عضو اتصال به رویه جان O_I/W_I

با توجه به جدول ۲ ملاحظه می‌شود که در این حالت برای عضو اتصال با ۴ یا ۶ لایه کامپوزیت (نسبت ۱ و ۱/۵)، ضرایب اطمینان کمان اتصال نسبت به رویه جان فاصله زیادی دارد، توزیع تنش در تیر یکنواخت نیست و بحرانی‌ترین قسمت در تیر، عضو اتصال است (کانتور تنش و جزئیات آن در شکل ۱۰ نمایش داده شده است).



شکل ۱۰. توزیع تنش در جان و عضو اتصال تیر

با توجه به تمرکز تنش ایجاد شده در عضو اتصال شکل ۱۰ این نتیجه مناسب نیست، زیرا هدف، طراحی اتصالی است که توزیع تنش و ضریب اطمینان در آن نزدیک به رویه جان باشد. برای حالت‌هایی که عضو اتصال ۸ لایه دارد (نسبت ۲)، ضرایب اطمینان کمان اتصال (۱۴) و رویه ساندویچی جان (۱۱/۴۳) به هم نزدیک می‌شوند و سازه دارای توزیع تنش

جدول ۷. نتایج بارگذاری سوم (رویه جان از ۴ لایه)

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_I/W_I
۲/۷۲	۷/۸۱	۱
۸/۱۰	۷/۹۸	۱/۵
۱۶/۳۷	۷/۸۰	۲
۲۹/۵۶	۷/۸۴	۳

جدول ۸. نتایج بارگذاری سوم (رویه جان از ۸ لایه)

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_I/W_I
۲/۶۳	۷/۷۳	۱
۷/۹۸	۸/۰۱	۱/۵
۱۶/۳۸	۷/۸۹	۲
۳۰/۳۶	۷/۹۳	۳

جدول ۹. نتایج بارگذاری سوم (رویه جان از ۱۲ لایه)

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_I/W_I
۲/۲۷	۷/۷۵	۱
۷/۲۸	۷/۹۸	۱/۵
۱۵/۷۴	۷/۸۲	۲
۳۱/۲۸	۷/۹۴	۳

با توجه به جدول‌های ۷ تا ۹ ملاحظه می‌شود که در این حالت نیز افزایش تعداد لایه در رویه جان تیر تأثیر چندانی در مقدار ضرایب اطمینان در جان تیر ندارد.

در این نوع بارگذاری، به‌ازای نسبت $O_I/W_I = 1.5$ ضریب اطمینان در عضو اتصال‌دهنده و رویه جان نزدیک به یکدیگر بوده و توزیع تنش در این نسبت مناسب است. در بارگذاری سوم، در مقایسه با دو بارگذاری اول نیروی برشی سهم بیشتری دارد. البته باید توجه داشت که با در نظر گرفتن نسبت $O_I/W_I = 2$ باز هم وضعیت طراحی نسبت به مقادیر بالاتر مناسب است.

همان‌طور که در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود به‌ترتیب در بارگذاری‌های چهارم و پنجم، استفاده از نسبت $O_I/W_I = 2$ باعث توزیع تنش یکنواخت و ضرایب اطمینان نزدیک به هم در رویه جان و عضو اتصال می‌شود. همچنان نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌ها در رویه جان تیر

در بارگذاری دوم؛ بار در دو طرف تیر وارد می‌شود؛ بنابراین توزیع گسترده‌تری دارد و مقطع موردبررسی دور از محل اعمال بار است.

نتایج برای سه حالت لایه‌گذاری رویه جان تیر (۴ لایه، ۸ لایه و ۱۲ لایه) و نسبت‌های مختلف تعداد لایه‌های کمان اتصال به رویه جان تیر در جدول‌های ۴ تا ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۴. نتایج بارگذاری دوم (رویه جان از ۴ لایه تشکیل شده است)

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_I/W_I
۴/۲۰	۷/۹۰	۱
۶/۲۶	۸/۱۴	۱/۵
۷/۹۴	۸/۲۶	۲
۱۱/۳۴	۸/۳۲	۳

جدول ۵. نتایج بارگذاری دوم (رویه جان از ۸ لایه تشکیل شده است)

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_I/W_I
۲/۳۶	۷/۸۴	۱
۴/۸۳	۸/۱۴	۱/۵
۷/۸۸	۸/۲۸	۲
۱۱/۱۵	۸/۳۴	۳

جدول ۶. نتایج بارگذاری دوم (رویه جان از ۱۲ لایه تشکیل شده است)

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_I/W_I
۳/۰۵	۷/۸۹	۱
۵/۳۳	۸/۱۶	۱/۵
۷/۲۹	۸/۲۹	۲
۱۱/۲۵	۸/۳۴	۳

نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه در رویه جان تیر تأثیر چندانی در ضرایب اطمینان در جان تیر ندارد. همچنین نزدیک‌ترین نتایج تنش در رویه جان و عضو اتصال مشابه بارگذاری اول در نسبت O_I/W_I برابر با ۲ است و هرچه تعداد لایه جان کمتر باشد شرایط بهتر می‌شود.

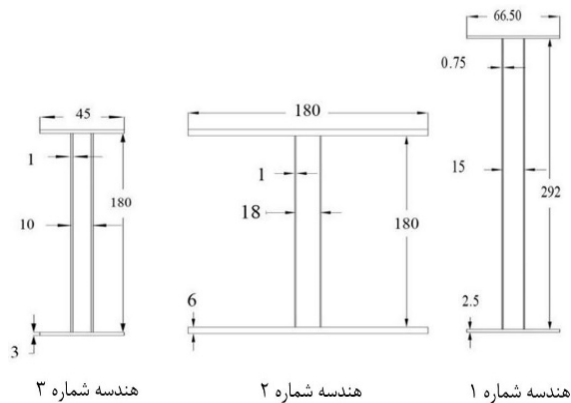
در بارگذاری نوع سوم؛ بار به‌صورت گسترده به تیر اعمال می‌شود و ضخامت کل رویه جان تیر یک میلی‌متر است. سایر موارد مشابه بارگذاری نوع دوم بوده، نتایج در جدول‌های ۷ تا ۹ نشان شده است.

برای همه تیرها مقادیر ثابت $R/t = 2.5$ و $O_i/W_i = 2$ و ضخامت رویه 0.75 میلی‌متر و طول تیرها در این سه حالت به ترتیب برابر با 5 ، $1/90$ و 3 متر در نظر گرفته شده است.

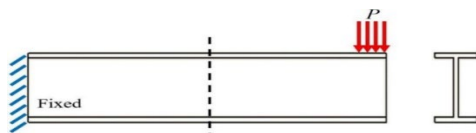
بار به صورت گسترده در محدوده انتهایی تیر به طول 30 سانتی‌متر اعمال شده است. به ترتیب نتایج برای هندسه یک، دو و سه در جدول‌های ۱۳ تا ۱۵ ارائه شده است.

نتایج تحلیل‌های انجام‌شده در هندسه‌های مختلف تأیید می‌کند که در نظر گرفتن نسبت $O_i/W_i = 2$ باعث توزیع تنش یکنواخت در سطح مقطع تیرهای ساندویچی و مشابه شدن ضرایب اطمینان در رویه جان تیر و کمان اتصال می‌شود.

همچنین نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌ها (افزایش ضخامت) جان تیر یا کمان اتصال نقش مؤثری در ضرایب اطمینان ندارد و رعایت نسبت ضخامت اجزاء اتصال مهم‌تر است.



شکل ۱۱. مقاطع هندسه‌های مختلف برای تیر



شکل ۱۲. نحوه بارگذاری و شرایط مرزی

جدول ۱۳. نتایج برای هندسه شماره ۱

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_L	W_L
۱/۴۰	۱/۵۱	۶	۳
۱/۰۸	۱/۲۳	۱۲	۶
۱/۰۳	۱/۱۶	۱۸	۹

و کمان اتصال تأثیر چشمگیری در ضرایب اطمینان این اجزاء ندارد و فقط باعث افزایش وزن می‌شود.

جدول ۱۰. نتایج بارگذاری چهارم برای نسبت $O_i/W_i = 2$

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_L	W_L
۳/۱۷	۲/۵۶	۸	۴
۳/۱۲	۲/۸۲	۱۶	۸
۳/۱۱	۲/۹۱	۲۴	۱۲

جدول ۱۱. نتایج بارگذاری پنجم برای نسبت $O_i/W_i = 2$

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_L	W_L
۲/۰۸	۲/۱۱	۸	۴
۲/۲۳	۲/۳۰	۱۶	۸
۲/۲۰	۲/۲۴	۲۴	۱۲

تأثیر مقدار شعاع کمان اتصال و نسبت R/t بر مقدار ضریب اطمینان جان تیر و عضو اتصال‌دهنده تحت بارگذاری نوع دوم، برای نسبت $O_i/W_i = 2$ در جدول ۱۲ ارائه شده است. نتایج تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که شعاع کمان اتصال، تأثیر چندانی در ضرایب اطمینان ندارد. به نظر می‌رسد محدوده $2.5 < R/t < 5.5$ مناسب است.

جدول ۱۲. مقادیر ضرایب اطمینان در تیر ساندویچی برای شعاع‌های

مختلف با $O_i/W_i = 2$

R/t	$(fs)_o$	$(fs)_w$
۲	۳/۲۰	۳/۶۰
۲/۵	۳/۹۵	۳/۶۱
۳	۴/۳۱	۴/۶۱
۳/۵	۴/۵۷	۴/۶۰
۴	۴/۷۵	۴/۶۰
۴/۵	۴/۸۸	۴/۵۹
۵	۴/۹۷	۴/۵۷
۵/۵	۴/۰۲	۴/۵۶
۶	۴/۰۶	۴/۵۴
۶/۵	۴/۰۹	۴/۵۲

برای ارزیابی تأثیر هندسه سطح مقطع تیر بر نتایج اتصال، اثر تغییر ارتفاع جان و پهنای فلنج سطح مقطع تیر نسبت به شکل ۲، در ۳ سطح مقطع با هندسه متفاوت مطابق شکل ۱۱ تحت یک نوع بارگذاری یکسان (شکل ۱۲) تحلیل شده است.

استاندارد تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای قرار داده خواهد شد. انتظار می‌رود عضو اتصال بعد از فلنج و جان تیر دچار شکست شود.

۲-۵. نحوه ساخت

طبق آیین‌نامه ASTM C 393 [۱۴] برای استناد به نتایج آزمایشگاهی باید ۳ نمونه ساخته و مورد آزمون قرار گیرد که نتایج نهایی از میانگین این ۳ نمونه به دست می‌آید.

سه تیر با ابعاد و جنس و لایه‌چینی برابر در شرایط یکسان کارگاه به روش و کیوم بگ (کیسه خلا) ساخته شده است. ابتدا فلنج تیرها، به صورت ورق از چند لایه با جنس کربن و رزین از نوع اپوکسی ساخته و در حین ساخت آن فرایند و کیوم و پخت انجام شده است. جان تیرها نیز به صورت ساندویچی ساخته و و کیوم و پخت شده است، سپس فلنج و جان از طریق کمان اتصال به یکدیگر اتصال داده شده و پس از اتمام ساخت، عملیات پخت تیر انجام شد.

۳-۵. شرایط آزمون خمشی سه نقطه‌ای

- شعاع غلتک استوانه‌ای برابر با ۲۰ میلی‌متر؛
 - سرعت حرکت اعمال نیرو، برابر ۳ میلی‌متر بر دقیقه؛
 - استفاده از پدهای لاستیکی با ضخامت ۲ میلی‌متر در تکیه‌گاه‌های اعمال نیرو.
- دستگاه آزمایش در شکل ۱۳ و غلتک اعمال نیرو و پد لاستیکی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۳. مجموعه دستگاه آزمایش

جدول ۱۴. نتایج برای هندسه شماره ۲

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_L	W_L
۲/۵۴	۲/۷۲	۸	۴
۲/۷۸	۲/۹۴	۱۶	۸
۲/۸۹	۳/۰۵	۲۴	۱۲

جدول ۱۵. نتایج برای هندسه شماره ۳

$(fs)_o$	$(fs)_w$	O_L	W_L
۱/۸۳	۱/۸۷	۸	۴
۱/۴۶	۱/۵۲	۱۶	۸
۱/۵۱	۱/۵۵	۲۴	۱۲

در پایان بر اساس نتایج به دست آمده از بارگذاری‌ها و نمونه‌های متعدد با مطالعه پارامتری هندسه‌های مختلف موارد زیر جمع‌بندی می‌شود:

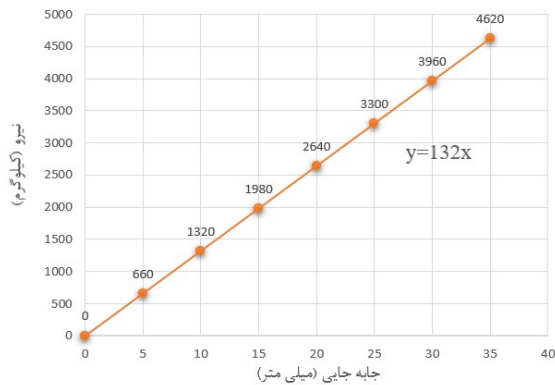
- تعداد لایه‌های کمان اتصال‌دهنده فلنج به جان اگر دو برابر تعداد لایه رویه جان باشد، باعث توزیع تنش نسبتاً یکنواخت در سطح مقطع تیر می‌شود و مقاومت کمان اتصال نزدیک به رویه جان خواهد بود؛
- نسبت شعاع کمان به ضخامت اتصال، تأثیر چندانی در استحکام آن ندارد و نسبت شعاع میانی به ضخامت اتصال در محدوده $2.5 < R/t < 5.5$ مناسب است؛
- افزایش تعداد لایه‌ها (افزایش ضخامت) جان تیر یا کمان اتصال نقش مؤثری در ضرایب اطمینان ندارد و رعایت نسبت ضخامت این اجزاء اتصال مهم‌تر است.

۵. آزمایش تجربی و مقایسه با نتایج المان محدود

۱-۵. مقدمه

برای صحت‌گذاری نتایج حاصل مدل‌سازی‌های عددی و بررسی دقت تحلیل المان محدود، معمولاً از آزمایش‌های تجربی استفاده می‌شود. در این قسمت، نتایج روش المان محدود در خصوص سفتی، بار نهایی و محل شکست یک نمونه تیر با نتایج آزمایش مورد قیاس قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج تحلیل عددی انجام شده در بخش‌های قبل، در ساخت تیر، تعداد لایه‌های عضو اتصال دو برابر تعداد لایه‌های رویه جان در نظر گرفته می‌شود. سپس تیر مطابق

پس از حذف اثر تکیه‌گاه (قسمت اول نمودارها) و میانگین‌گیری مطابق استاندارد، نمودار نهایی حاصل از میانگین نتایج سه آزمایش در شکل ۱۶ ارائه شده است.



شکل ۱۶. نمودار نیرو-جاب‌جایی میانگین ۳ آزمون

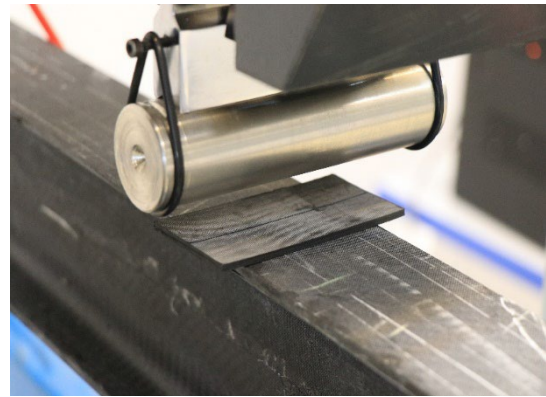
مقادیر شیب نمودار، نیرو و جاب‌جایی آزمون هر سه تیر به صورت خلاصه در جدول ۱۶ آورده شده است. که در آن:

نیروی شکست (کیلوگرم)	P
مقدار جاب‌جایی (میلی متر)	δ
شیب نمودار (نیوتن بر میلی متر)	m

بررسی چشمی نمونه‌ها نشان می‌دهد که اولین شکست موضعی در تمامی آزمون‌ها در فلنج تیر و در منطقه اعمال نیرو است که با ادامه اعمال بار، شکست به اجزاء دیگر یعنی جان و کمان اتصال نیز گسترش می‌یابد. مکانیزم شکست نهایی تیرها در آزمون‌های خمش سه‌نقطه در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



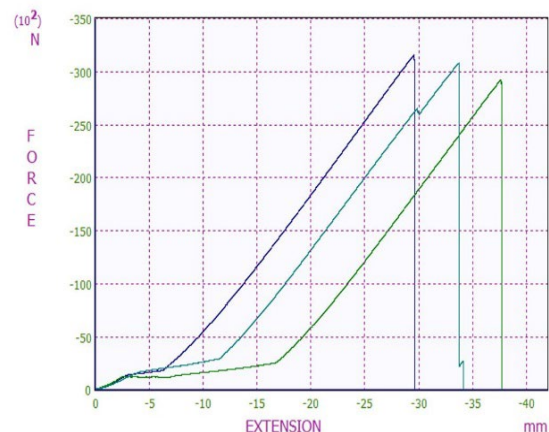
شکل ۱۷. مکانیزم شکست نهایی تیرها در آزمون‌های خمش سه‌نقطه



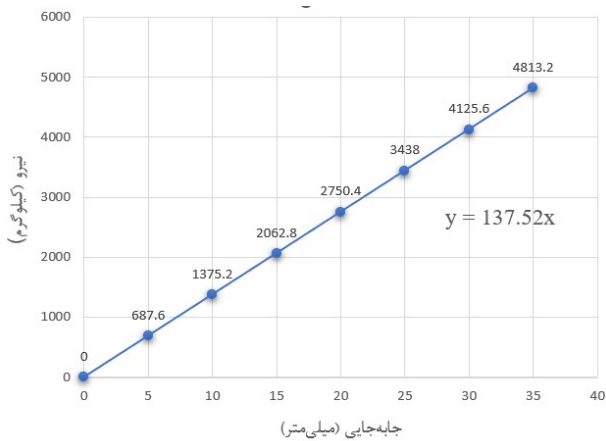
شکل ۱۴. غلتک اعمال نیرو روی تیر

۴-۵. تحلیل نتایج آزمون‌ها

تیرهای موردنظر برابر استاندارد، توسط دستگاه ۲۵ تنی یونیورسال، مورد آزمون مخرب خمش سه‌نقطه‌ای [۱۴] قرار گرفته است. در شکل ۱۵ نمودار نیرو-جاب‌جایی تیرها ترسیم شده است. در ابتدای این نمودار تغییر شکل‌های مقاطع لاستیکی در تکیه‌گاه‌ها و محل اعمال نیرو در قسمت اول نمودارها مشاهده می‌شود (دارای شیب کمتر)، سپس با ادامه بارگذاری تیرها رفتار مشابه با شیب‌خطی تقریباً یکسان مشاهده می‌شود. افزایش بار تا به وجود آمدن اولین شکست (شنیدن صدا) در تیرها ادامه یافته و نیروی نهایی شکست و محل آن مشخص شده است. به دلیل متغیرهای متعدد در ساخت و آزمون چندلایه‌های کامپوزیتی و ساندویچی معمولاً تطابق صد درصدی در نتایج تجربی به دست نمی‌آید، ولی رفتار مشابه با دقت تا تیرانس ۱۵٪ جهت میانگین‌گیری منطقی است. به همین دلیل استاندارد الزام به انجام حداقل ۳ (تا ۵) نمونه آزمون و سپس میانگین‌گیری نموده است.



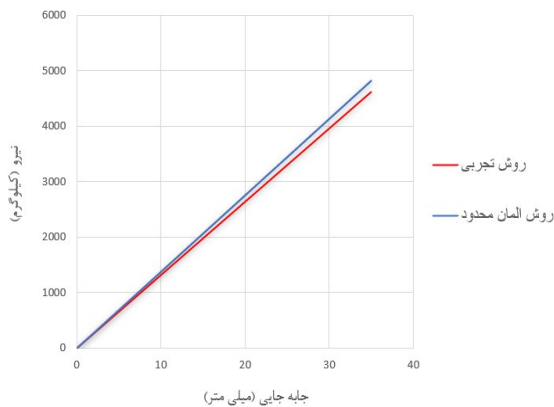
شکل ۱۵. نمودار نیرو-جاب‌جایی آزمون خمش سه‌نقطه‌ای تیرها



شکل ۱۶. نمودار نیرو-جابجایی با استفاده از روش المان محدود

جدول ۱۷. ضرایب اطمینان در بخش‌های مختلف تیر

$(fs)_w$	$(fs)_o$	$(fs)_f$
۱/۵۲	۱/۴۰	۱



شکل ۱۷. مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی در دو حالت عددی و تجربی

همان‌طور که ملاحظه شد سفتی تیر (تغییر شکل تیر) که از روش المان محدود محاسبه شد با مقدار آن که از آزمایش تجربی به دست آمد انطباق بسیار خوبی دارد. این موضوع تا حدودی اطمینان به مدل‌سازی و تحلیل المان محدود انجام شده را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر بار شکست که از آزمایش‌ها به دست آمده (مطابق میانگین بار جدول ۱۶) به مقدار محاسبه شده از روش المان محدود (نیروی ۳۲۸۰ کیلوگرم به ازای جابه‌جایی ۲۳/۸۵ میلی‌متر در شکل ۱۸) بسیار نزدیک است و محل شکست در هر دو حالت یکسان است. این موضوع اعتماد به مدل‌سازی المان محدود را دوچندان می‌کند. با توجه به طراحی انجام شده و مطابق با تحلیل المان محدود انتظار می‌رود که شکست در فلنج تیر قبل از عضو اتصال رخ دهد که نتایج آزمایش‌ها نیز در تطابق با این پیش‌بینی است.

جدول ۱۶. مقادیر شیب، نیرو و جابه‌جایی در سه تیر

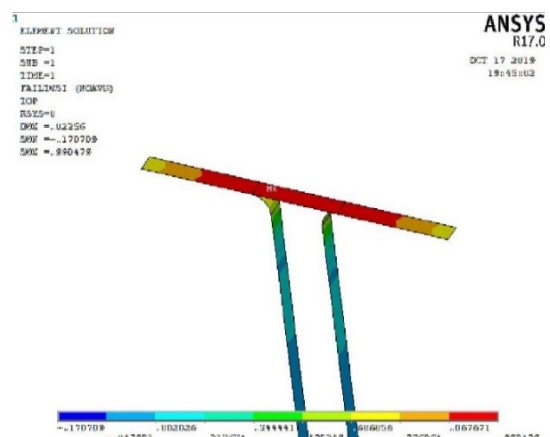
m	δ	P	
۱۳۵	۲۰/۳۷	۲۷۷۲	نمونه اول
۱۳۱	۲۲/۷۸	۲۹۶۱	نمونه دوم
۱۳۰	۲۴/۶۱	۳۱۸۹	نمونه سوم
۱۳۲	۲۲/۵۸	۲۹۷۴	میانگین

برای اعتبارسنجی تحلیل المان محدود، شبیه‌سازی تیرهای ساخته شده آزمون تجربی در نرم‌افزار انسیس انجام شده است، مطابق آزمون‌ها تیر مورد بارگذاری و خمش قرار گرفته است. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد، به ازای جابه‌جایی ۲۳/۸۵ میلی‌متر و نیروی ۳۲۸۰ کیلوگرم (شکل ۱۸)، تیر در فلنج دچار شکست می‌شود و شیب نمودار نیرو-جابجایی ۱۳۷/۵۲ است (شکل ۱۹).

در شکل ۱۶ شیب نمودار در آزمون‌های تیرها برابر ۱۳۲ گزارش شده است که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و تحلیل عددی نشان می‌دهد.

ضریب اطمینان در فلنج، رویه جان و کمان اتصال تیر به ازای بارگذاری مورد اشاره در جدول ۱۷ ارائه شده است. نمادهای w و o و f به ترتیب مربوط به فلنج، کمان اتصال و رویه جان است.

در شکل ۲۰ نمودار نیرو-جابجایی برای دو حالت تجربی و عددی مقایسه شده است.



شکل ۱۸. مکان شکست در نرم‌افزار انسیس

با توجه به مطالعات انجام شده در این پژوهش پیشنهاد می شود که برای اتصال فلنج به جان در اسپارهای کامپوزیتی (تمام کربن با هسته فوم در جان تیر) بال یک شناور پرنده، تعداد لایه عضو اتصال دهنده دو برابر تعداد لایه رویه جان ساندویچی باشد. با این انتخاب، ضرایب اطمینان عضو اتصال دهنده و رویه جان از یک مرتبه خواهند بود و در این صورت شاهد اتصالی امن هستیم. همچنین ملاحظه شد که شعاع کمان عضو اتصال تأثیر زیادی در مقاومت آن ندارد ولی دیده شد که اگر نسبت شعاع میانی به ضخامت عضو اتصال در محدوده ۲/۵ تا ۵/۵ در نظر گرفته شود، ضریب اطمینان بهتر خواهد بود. این نتیجه گیری های ساده و کاربردی برای سازه اسپار I شکل (فلنج ها چند لایه تمام کربن و جان تیر ساندویچی با هسته فوم و رویه کربن) بال یک شناور پرنده با انجام تعداد زیادی تحلیل عددی روی پارامترهای مختلف لایه اتصال کمانی فلنج به جان، در شرایط بارگذاری مختلف استاندارد استخراج شد. اگرچه تضمین دستورالعمل های پیشنهادی به طور کلی برای هر تیر دلخواه در هر شرایط بارگذاری دلخواه امکان پذیر نیست اما حداقل به عنوان نقطه شروع و پیشنهاد طراحی مناسب است، به ویژه که هیچ دستورالعملی در این خصوص برای شناورهای پرنده تاکنون در آیین نامه ها، استانداردها و مقاله ها ارائه نشده است.

فهرست علائم

بار اعمالی (kg)	P
شعاع میانی (mm)	R
ضخامت (mm)	t
شیب نمودار نیرو-جابه جایی (Nm^{-1})	m
علائم یونانی	
مقدار جابه جایی (mm)	δ
زیر نویس ها	
عضو اتصال	o
جان تیر	w
تعداد لایه	l
فلنج تیر	f

۶. نتیجه گیری

به دلیل کاربرد گسترده تیرهای کامپوزیتی با مقاطع T و I شکل در اسپارهای بال شناور پرنده، بررسی مقاومت عضو اتصال دهنده فلنج به جان در اسپارهای مذکور و بررسی مودهای شکست آن تحت بارگذاری های مختلف ضروری است. از این رو در این مقاله، روش اتصال کمانی فلنج به جان مورد مطالعه قرار گرفت و رفتار اتصال با دقت بالایی در نرم افزار انسیس مدل شد تا بتوان به تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل هندسه اتصال بر مقاومت آن تحت بارگذاری های مختلف پی برد. در مدل سازی المان محدود سازه های بال کامپوزیتی شناور پرنده که از تعداد زیادی تیر و اعضای دیگر تشکیل شده اند، اتصالات به صورت ساده و بدون عضو اتصال دهنده در نظر گرفته می شوند تا با کاهش تعداد المان ها نسبت به مدل سازی کامل تحلیل امکان پذیر شود (مدل سازی کامل و با تمامی جزئیات مجموعه بال یک شناور پرنده به دلیل حجم بالا، نیاز به سیستم های محاسباتی بسیار قوی و زمان زیاد و ... در دفاتر طراحی انجام نمی شود) و بتوان در مدت زمان بسیار کمتری حل مسئله و طراحی انجام شود. در روش مدل سازی ساده به دلیل کم بودن تعداد المان ها و عدم پیچیدگی هندسی، ایجاد تغییرات و بهینه سازی در سازه راحت انجام می شود؛ بنابراین، مدل سازی المان محدود سازه های کاربردی به صورت ساده و بدون در نظر گرفتن عضو اتصال انجام می شود و بعد از آن، تعداد لایه های تشکیل دهنده عضو اتصال تعیین می شود. در این مطالعه با بررسی عددی و تجربی، نکته های کلیدی ساده در خصوص طراحی عضو اتصال دهنده جان به فلنج در تیرهای کامپوزیتی بال یک شناور پرنده استخراج شد. ابتدا با بررسی عددی و مدل سازی المان محدود تیرهای مختلف کامپوزیتی به صورت کامل و با در نظر گرفتن عضو اتصال، در شرایط بارگذاری مختلف، نکته های کاربردی در خصوص اتصال فلنج به جان بیان شد، سپس قواعدی کلی و ساده برای طراحی اتصال فلنج به جان ارائه شد. با انجام آزمایش های عملی دقت مدل سازی المان محدود و دستورالعمل های پیشنهادی در یک مورد کاربردی ارزیابی شد.

- [9] Kreja I. A literature review on computational models for laminated composite and sandwich panels. *Open Engineering*. 2011 Mar 1;1(1):59-80.
- [10] Cao J, Grenestedt JL. Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. 2004 Sep 1;35(9):1091-105.
- [11] Hughes TJ, Cottrell JA, Bazilevs Y. Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2005 Oct 1;194(39-41):4135-95.
- [12] Kaw AK. *Mechanics of composite materials*. CRC press; 2005 Nov 2.
- [13] Ćurković L, Bakić A, Kodvanj J, Haramina T. Flexural strength of alumina ceramics: Weibull analysis. *Transactions of FAMENA*. 2010;34(1):13-8.
- [14] Standard, A.S.T.M., 2000. C393 Standard test method for flexural properties of sandwich constructions. ASTM C393-00. ASTM International; Philadelphia. 2000;19103.

پی‌نوشت‌ها

1. Mines
2. Daniel
3. Toftegaard
4. Lystrup
5. Valenza
6. Thorsson
7. ANSYS
8. Shell
9. Solid

سپاسگزاری

این مقاله از یک پروژه تحقیقاتی مشترک بین گروه صنایع دریایی شهید صفایی وزارت دفاع و دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز استخراج شده است. حمایت مالی و خدمات آزمایشگاهی طرح توسط گروه شهید صفایی انجام شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از مدیران و کارکنان گروه، به ویژه مسئولان پژوهشی و هیئت داوران پروژه که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

مراجع

- [1] Mines RA, Alias A. Numerical simulation of the progressive collapse of polymer composite sandwich beams under static loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2002 Jan 1;33(1):11-26.
- [2] Daniel IM, Gdoutos EE, Wang KA, Abot JL. Failure modes of composite sandwich beams. *International journal of damage mechanics*. 2002 Oct;11(4):309-34.
- [3] Toftegaard H, Lystrup A. Design and test of lightweight sandwich T-joint for naval ships. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2005 Aug 1;36(8):1055-65.
- [4] Li HC, Dharmawan F, Herszberg I, John S. Fracture behaviour of composite maritime T-joints. *Composite Structures*. 2006 Sep 1;75(1-4):339-50.
- [5] Valenza A, Fiore V, Calabrese L. Three-point flexural behaviour of GFRP sandwich composites: A failure map. *Advanced Composite Materials*. 2010 Jan 1;19(1):79-90.
- [6] Nimje SV, Panigrahi SK. Design and analysis of functionally graded adhesively bonded double supported tee joint of laminated FRP composite plates under varied loading. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2015 Sep 17;29(18):1951-70.
- [7] Thorsson SI, Xie J, Marek J, Waas AM. Matrix crack interacting with a delamination in an impacted sandwich composite beam. *Engineering Fracture Mechanics*. 2016 Sep 1;163:476-86.
- [8] Taheri-Behrooz F, Mansouri Nik M. Experimental and numerical analysis of sandwich composite beams under four-point bending. *Modares Mechanical Engineering*. 2017 Mar 10;17(1):241-52.