

# بررسی رفتار خستگی سازه‌های ساندویچی با پوسته‌های هیبریدی نامتقارن و هسته فومی تحت بارگذاری کشش-کشش

محمود ذیح‌پور (دانشجوی دکتری)

سعید ادیب‌نظری (دانشیار)

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

زهمین مسلمان (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

در این نوشتار پاسخ خستگی یک لایه‌چینی ساندویچی با هسته‌ی فومی و صفحات هیبریدی نامتقارن مورد تحقیق قرار گرفته است. لایه‌چینی ساندویچی مورد نظر بخشی از المان بحرانی یک سازه مرکب واقعی است. روش تهیه و ساخت مواد لایه‌چینی‌ها مشابه المان بحرانی است. دو نوع الیاف شیشه‌ی بافته شده مشابه (G1, G2) و یک نوع الیاف کربن تک‌جهته (C) با سیستم رزین اپوکسی در صفحات بالا و پایین هسته‌ی فومی به کار گرفته شده است. ترتیب لایه چینی و زوایای هر کدام از لایه‌ها عبارت است از:

[G1/C/C/C/G2/Foam/G2/C/C/G1] و

[0/0/0/0/±45/Core/±45/0/0/0]. به منظور تعیین طرحی عملی در انجام

آزمایشات ایجاد شکست نهایی در ناحیه‌ی سنج و رسیدن به استحکام واقعی، دو طرح متفاوت با کمک شیوه‌ی FEM مورد بررسی قرار گرفت و طرح مناسب‌تر برای انجام آزمایش‌های خستگی و استاتیکی نهایی انتخاب شد. نتایج تجزیه و تحلیل‌های اجزاء محدود با استفاده از آزمایشات استاتیکی تأیید گردید. در ادامه، آزمایشات متعدد خستگی بر روی نمونه‌های لایه‌چینی انجام شد و در نهایت وضعیت‌های آسیب ایجاد شده در لایه‌چینی ساندویچی تحت بار استاتیکی و خستگی تشریح گردید. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از طرح زاویه‌دار باعث انتقال ناحیه‌ی شکست از محدوده‌ی اتصال سنج به گیره در قطعه به محدوده‌ی درونی‌تر سنج می‌شود و از این رو استحکام حاصله به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است. بررسی آزمایشات خستگی در نسبت بارهای بالا نیز به نتایج مشابهی می‌انجامد. از چهار وضعیت آسیب تشخیص داده شده، رشد دو نوع ترک قائم و موازی با امتداد بارگذاری در داخل فوم اتفاق می‌افتد. با افزایش نسبت بار، طول ترک موازی با امتداد بارگذاری که به دنبال ترک قائم ایجاد می‌شود کاهش می‌یابد.

zabihpoor@ae.sharif.edu  
adib@sharif.edu  
moslemian@iust.ac.ir

واژگان کلیدی: لایه‌چینی ساندویچی، رفتار خستگی، پوسته‌های هیبریدی، مدل‌سازی اجزاء محدود.

## مقدمه

و نتایج عددی خواص خستگی آنها بسیار معدود است. ساختارهای ساندویچی دو صفحه‌ی نازک متصل در دو طرف یک هسته‌ی ضخیم‌تر و سبک‌تر را شامل می‌شوند. صفحات بیرونی عموماً از نوع لایه‌چینی‌های مواد مرکب و از جنس الیاف کربن، شیشه یا کولار است و هسته‌ی آن ممکن است از نوع لانه‌زنبوری، فوم‌های متخلخل یا چوب بالسا تهیه شود. صفحات بیرونی بیشترین بار صفحه‌یی و خمشی را تحمل می‌کنند در حالی که هسته تولیدکننده‌ی سفتی خمشی، استحکام برشی خارج از صفحه و استحکام فشاری بالا است.<sup>[1]</sup> در ساختارهای ساندویچی با هسته‌ی فلزی یا فوم پلی‌مری، هسته ضعیف‌ترین بخش سازه است که تحت

مواد مرکب تقویت شده با الیاف پیوسته‌ی شیشه و کربن خواص و رفتار خستگی بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند. با وجود مزیت مواد مرکب در بارگذاری خستگی، بررسی کامل این رفتار با پیچیدگی‌هایی همراه است و نیز استفاده از وضعیت‌های و اماندگی برای شرح آسیب خستگی مواد مرکب کاری دشوار است. دشواری این مسئله در مورد لایه‌چینی با الیاف متفاوت (هیبرید) و ساندویچی (مثلاً با هسته‌ی فومی) دوچندان می‌شود. موضوع خستگی مواد مرکب با الیاف از یک جنس و یا لایه‌چینی‌های مختلف توسط محققان متعددی بررسی شده است، اما در خصوص ساختارهای ساندویچی با صفحات از نوع لایه چینی مواد مرکب کم‌تر تحقیق شده

لایه‌چینی ساندویچی بحرانی در سازه‌ی واقعی ساخته شده از مواد مرکب بررسی شده است. این لایه چینی از نوع ساختار نامتقارن با هسته‌ی فومی و صفحات هیبریدی است.

### روش انجام تحقیق

ابتدا المان بحرانی در سازه‌ی واقعی براساس انواع بارگذاری‌های آلودینامیکی از طریق تحلیل اجزاء محدود تعیین می‌شود. المان مذکور دارای هسته‌ی فومی از نوع (PVC) و صفحات نامتقارن و هیبریدی بوده، همچنین کل لایه‌چینی نیز نامتقارن است. از آنجا که دستورالعمل استاندارد در مورد طرح ناحیه‌ی درگیر درگیره برای نمونه‌های آزمایش تحت بارکشش استاتیکی و نوسانی ارائه نشده است دو طرح نمونه که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این

بارگذاری استاتیکی و نوسانی سریع‌تر از سایر بخش‌ها دچار واماندگی می‌شود. خواص مکانیکی فوم‌های پلی‌مری با در نظر گرفتن توصیفات ساختار تخلخلی آنها توسط محققان زیادی مشخصه‌سازی شده است. بخشی از این تحقیقات به‌وسیله‌ی گیبسون و اشبی جمع‌آوری شده است.<sup>[۱]</sup> زنگرت و بکلاند برای بررسی صلیب فوم‌های PVC آزمایشات استاتیکی را برنامه‌ریزی و اجرا کردند.<sup>[۲-۳]</sup> نتایج کار آنها نشان داد که مکانیک شکست کشسانی خطی برای تعیین خواص شکست این فوم‌ها قابل اعمال است. گیبسون و اشبی مکانیک سه‌بعدی مواد متخلخل را نیز تشریح کردند.<sup>[۴]</sup> و در ادامه، گیبسون رفتار مکانیکی این مواد را مدل‌سازی کرد.<sup>[۵]</sup> در نتیجه‌ی این پژوهش‌ها مشخص شد واماندگی زمانی رخ می‌دهد که آسیب به یک سطح بحرانی برسد. این سطح بحرانی خود به بیشینه‌ی تنش اعمالی در بارگذاری نوسانی وابسته است.

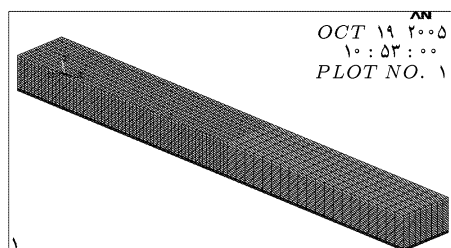
گرنشتت رشد ترک را در فوم‌های PVC بررسی کرد.<sup>[۶]</sup> محققین در زمینه‌ی رفتار خستگی هسته‌های فومی پژوهش‌های متعددی انجام داده‌اند. از جمله کامل‌ترین این تحقیقات می‌توان به «بررسی مشخصات خستگی هسته‌ی فومی متخلخل و لانه زنبوری» توسط بورمن و زنگرت اشاره کرد.<sup>[۷]</sup> یوتن و همکاران نیز رفتار و خواص خستگی فوم‌های PVC را بررسی کردند.<sup>[۸]</sup> شپشا و همکاران مود I انتشار ترک خستگی در فوم‌های PVC را مورد مطالعه قرار دادند.<sup>[۹]</sup>

با کمک روش اجزاء محدود ضریب شدت تنش K در نوک ترک محاسبه، و در آن فرض اعتبار مکانیک شکست کشسانی خطی لحاظ شد. رشد ترک‌های خستگی در فوم‌های پلی‌اورتان نیز توسط لیلی و نوبل تعیین شده است.<sup>[۱۰]</sup> به‌طور مشابه، یاتو و مایر در خصوص انتشار ترک در فوم‌های پلی‌کربنات تحت بارگذاری خستگی تحقیق کردند.<sup>[۱۱]</sup>

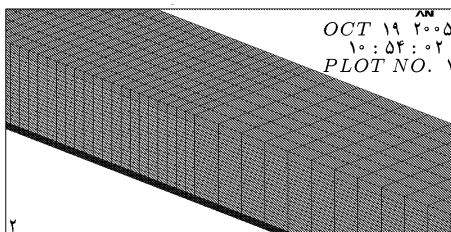
زنگرت بررسی جامعی بر روی استحکام تیرهای ساندویچی که در صفحه‌ی مرکزی آنها جدایش لایه‌ی اتفاق افتاده است انجام داد.<sup>[۱۲]</sup> تنش‌ها و الگوهای واماندگی در خمش تیرهای ساندویچی با هسته‌های متداول، توسط شنه‌ار و همکاران تعیین شد.<sup>[۱۳]</sup> تعدادی از سازوکارهای واماندگی مواد مرکب ساندویچی تحت بار دینامیکی توسط تریانتیفیلو ارائه شده است.<sup>[۱۴]</sup>

هدلاند و همکاران درخصوص رفتار خستگی ساختارهای ساندویچی تحقیق کرده‌اند.<sup>[۱۵]</sup> آلن و شوی نیز آزمایشات خستگی و خستگی خمشی محدودی را بر روی تیرهای ساندویچی با صفحات مرکب پلیمری انجام داده‌اند.<sup>[۱۶-۱۸]</sup> کنی و محفوظ اثرات فرکانس بر روی رفتار خستگی ساختارهای مرکب ساندویچی با الیاف شیشه (S2) و ماتریس وینیل‌استر را مورد بررسی قرار دادند که در آنها دو نمونه‌ی مختلف با هسته‌های متفاوت فوم PVC مقایسه شده‌اند.<sup>[۱]</sup> نتیجه‌ی این تحقیق نشان داد نرخ رشد ترک با افزایش فرکانس بارگذاری کاهش می‌یابد. لاستاری و کباتو نیز شیوه‌هایی را برای آشکارسازی آسیب در لایه‌چینی‌های ساندویچی ارائه کرده‌اند که در آنها هسته‌هایی از نوع لانه زنبوری به کار رفته است.<sup>[۳]</sup>

چنان که مرور تاریخچه نشان می‌دهد رفتار خستگی لایه چینی‌های ساندویچی با هسته‌ی فوم پلی‌مری کم‌تر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. عدم وجود اطلاعات و نتایج تجربی کافی از رفتار خستگی سازه‌های واقعی که به‌صورت لایه‌چینی‌های ساندویچی ساخته می‌شوند اهمیت مسئله را بیش از پیش روشن می‌سازد. ساختارهایی نامتقارن با هسته‌ی فومی (مانند PVC) و صفحات از نوع لایه‌چینی‌های هیبریدی از جمله ترکیباتی هستند که معمولاً در سازه‌های اصلی هواپیماهای سبک تهیه شده از مواد مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرند. در چنین حالتی پیچیدگی رفتار مکانیکی ناشی از عدم تقارن صفحات به پیچیدگی ناشی از کاربرد الیاف مختلف (هیبرید) اضافه می‌شود. در این نوشتار خواص خستگی یک

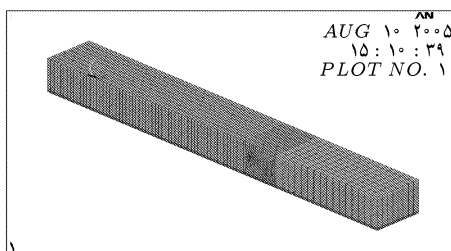


الف) نمای کامل؛

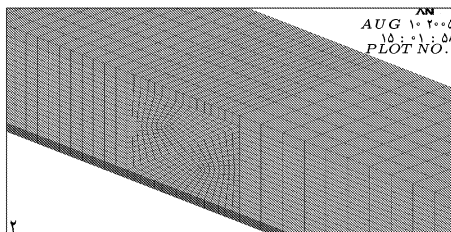


ب) نمای متمرکز از طرح ساده.

شکل ۱. مدل اجزاء محدود المان بحرانی طرح ساده.



الف) نمای کامل؛



ب) نمای متمرکز از طرح زاویه‌دار.

شکل ۲. مدل اجزاء محدود المان بحرانی طرح زاویه‌دار.

دو طرح را نشان می‌دهند. خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌های به کار رفته مطابق جدول ۱ است.

لازم به ذکر است که خواص ارائه شده از طریق انجام آزمایشات مشخصه‌سازی توسط نگارنده به دست آمده، و از شرح آنها در این مبحث اجتناب می‌شود. ترتیب لایه‌چینی در مدل (و یا المان بحرانی) در جدول ۲ ارائه شده است.

طرح‌های ناحیه درگیر در گیره طوری در نظر گرفته شده است که بتواند فشار گیره را تحمل و منتقل کند. به این منظور از لایه‌های با الیاف بافته شده‌ی شیشه (G2) و به تعدادی که با ضخامت هسته‌ی فومی برابر باشد استفاده شده است. با توجه به جدول ۱ این تعداد ۳۲ لایه است. لایه‌ها در ناحیه‌ی «رویه‌های بالا و پایین» سرتاسری قرار داده شده و در قسمت «سنجه» به‌وسیله‌ی محدوده‌ی هسته فومی تعیین می‌شود. بنابراین، مطابق آنچه در جدول ۲ ارائه شد ترتیب لایه‌چینی در ناحیه‌ی سنجه عبارت است از: رویه‌ی A، فوم ۱۰ میلی‌متری، و در نهایت رویه‌ی B. لایه‌های داخل رویه‌های A و B به‌طور کامل در جدول ۲ تشریح شده است. همچنین در ناحیه‌ی درگیر درگیر ترتیب لایه‌چینی به این صورت است: رویه‌ی A، ۳۲ لایه از نوع الیاف G2، و در پایان رویه‌ی B. از آنجا ترتیب لایه‌چینی در کل قطعه از جمله ناحیه‌ی اتصال مشخص شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌ها.

جنس لایه	Woven Glass	Woven Glass	U.D Carbon	PVC Foam
نمایه	G1	G2	C	HT110
ضخامت (mm)	0.149	0.3125	0.247	10
دانسیته ( $Kg/m^3$ )	1604	1604	1470	110
کسر حجمی الیاف	0.45	0.45	0.5	-
نوع رزین	Epoxy	Epoxy	Epoxy	-
Exx (MPa)	16280	16280	115000	105
Eyy (MPa)	16280	16280	6819	105
Gxy (MPa)	3728	3728	2952	50
Nuxy	0.47	0.47	0.296	0.054

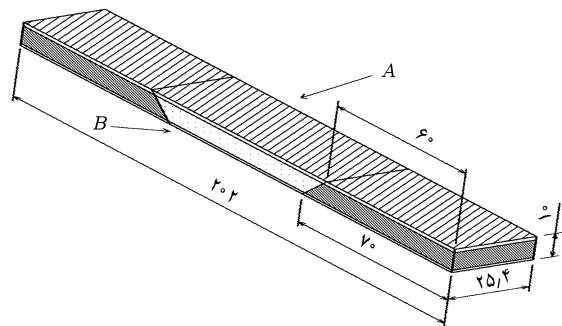
جدول ۲. ترتیب لایه‌چینی.

شماره‌ی لایه	زویه نسبت به امتداد طولی (x)	صفحه	جنس لایه
۱	0/90	A	G1
۲	0	A	C
۳	0	A	C
۴	±45	A	G2
۵	-	-	Foam
۶	±45	B	G2
۷	0	B	C
۸	0	B	C
۹	0	B	C
۱۰	0/90	B	G1

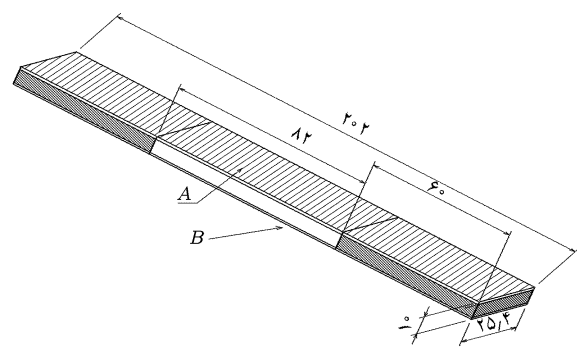
منظور ابتدا از هر دو طرح مدل‌های اجزاء محدود تهیه شده و درخصوص مؤلفه‌های تنش در نقاط مختلف بحث می‌شود و طرح مناسب‌تر برای تهیه و اجرای آزمایشات استحکام استاتیکی و خستگی به دست می‌آید. از نتایج آزمایش استاتیکی برای مقایسه‌ی نتایج استفاده می‌شود. در انتها نتایج آزمایشات خستگی تشریح می‌شوند. وجود چنین ترتیبی برای لایه‌چینی (نامتقارن و هیبریدی) در اثر اعمال بار ساده کشش-کشش نوسانی انواع مؤلفه‌های تنش را در لایه‌های قطعه ایجاد خواهد کرد که در رفتار خستگی لایه‌چینی نقش تعیین‌کننده‌ی ایفا می‌کند. تحلیل مدل‌های (FEM) که در بخش بعدی ارائه شده‌اند نشان‌گر وجود چنین مؤلفه‌هایی است.

## مدل‌سازی اجزاء محدود

برای مقایسه‌ی اثر طرح‌های مختلف اتصال ناحیه‌ی درگیر با هسته‌ی فومی و نیز اثر مؤلفه‌های تنش ایجاد شده بر وضعیت شکست المان بحرانی، مدل‌سازی اجزاء محدود صورت گرفته است. شبیه‌سازی به‌کمک کد تجاری اجزاء محدود (ANSYS) و با استفاده از المان لایه‌ی (Solid199) انجام گرفته است. شکل‌های ۱ و ۲ این مدل‌ها را به‌صورت نیمه متقارن طولی برای هر دو طرح نشان می‌دهند. با اعمال شرایط مرزی مناسب از اجرای آزمایش و وارد کردن بار (با در نظر گرفتن تقارن قطعه و بارگذاری) توزیع تنش داخل اجزای مدل‌ها معین می‌شود. برای اعمال شرط مرزی ناشی از فک‌های دستگاه آزمایش، جابه‌جایی گره‌های صفحاتی که فک‌های دستگاه آنها را نگه می‌دارد در جهت ضخامت صفر در نظر گرفته شده است. بارگذاری مدل به این صورت است که بار کششی در سه مرحله و در سه نسبت مساوی از بار کل ۶۱/۵۴ کیلونیوتن به مدل اعمال می‌شود. این مقدار بار، معادل بار نهایی به دست آمده از آزمایش استاتیک لایه‌چینی طرح زویه‌دار است. شکل‌های ۳ و ۴ هندسه‌ی



شکل ۳. مدل طرح زویه‌دار (ابعاد به میلی‌متر).



شکل ۴. مدل طرح ساده (ابعاد به میلی‌متر).

## روش تجربی

برای تعیین رفتار واقعی لایه‌چینی تحت بارگذاری استاتیک و خستگی، آزمایشات مربوطه برنامه‌ریزی و انجام شده که بررسی وضعیت ایجاد و رشد آسیب در قطعات را ممکن می‌سازد.

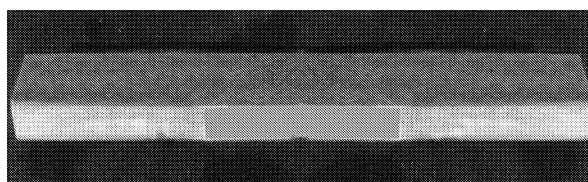
## آماده‌سازی قطعات آزمایش

بر مبنای هندسه‌ی شرح داده شده در بخش‌های قبلی، نمونه‌های آزمایش مورد نظر با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شده‌اند. کلیه‌ی مراحل ساخت، پخت و ترتیب لایه‌گذاری دقیقاً مطابق نمونه‌ی سازه واقعی است. اجرای آزمایش کشش استاتیک و خستگی براساس استانداردهای ASTM D3039-3039M و ASTM D3479-3479M برنامه‌ریزی شده‌اند. ابعاد قطعات عبارت است از:  $202\text{mm} \times 257\text{mm}$  حداقل پنج قطعه آزمایش برای حالت استاتیک لازم است. در آزمایش خستگی، بسته به سطح و نوع استفاده از نتایج، تعداد قطعات تحت آزمایش متغیر است که شرح آنها در استاندارد خستگی ارائه شده است. شکل‌های ۵ و ۶ قطعات را پس از ساخت، اجرای مراحل برش و اندازه‌گیری نمایش می‌دهند. در این شکل‌ها هر دو طرح اتصال فوم نشان داده شده است.

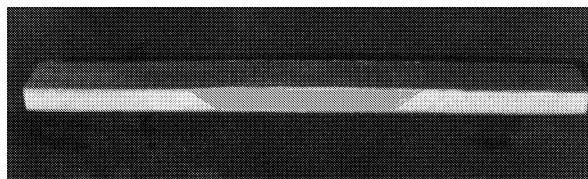
## آزمایشات استاتیک و خستگی

آزمایشات استاتیک برای تعیین استحکام نهایی ساختارهای ساندویچی برنامه‌ریزی شدند. کلیه‌ی شرایط آزمایش اعم از ابعاد قطعه، پارامترهای بارگذاری (نرخ بارگذاری، سرعت حرکت نقاط اعمال نیرو و...)، رعایت تراز راستای محورهای اعمال نیرو، کالیبراسیون دستگاه و دریافت و ثبت آنی اطلاعات حاصل در رایانه از دستگاه مطابق روش‌های استاندارد ذکر شده در بخش قبلی لحاظ شده است. نتایج عددی و مقادیر پارامترهای آماری آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

برای توسعه‌ی نمودار S-N، به کمک نتایج مربوط به بار نهایی حاصل از آزمایشات استاتیک، نسبت‌های مناسب اعمال بار در نظر گرفته شدند. با انتخاب شکل موج بارگذاری از نوع سینوسی با دامنه‌ی ثابت و نسبت بار موجی  $R=0.1$  پارامترهای خستگی تعیین شد. در جدول ۴ نسبت بارهای انتخاب شده ارائه شده‌اند، و نیز نمودار S-N به دست آمده در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۵. قطعه‌ی آزمایش با اتصال ساده.



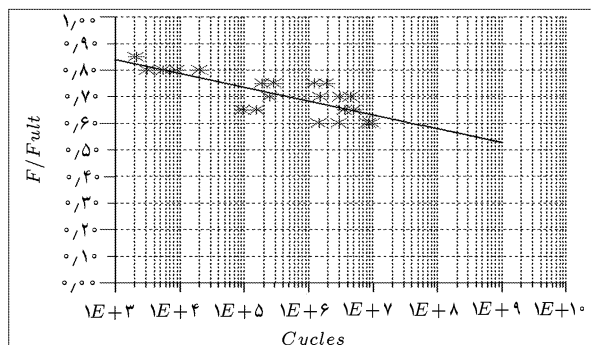
شکل ۶. قطعه‌ی آزمایش با اتصال زویه‌دار.

جدول ۳. نتایج عددی و مقادیر پارامترهای آماری آزمایش استاتیک.

ردیف	استحکام (MPa)
۱	۵۵,۰۲
۲	۶۲,۳۱
۳	۶۴,۸۳
۴	۶۴
۵	۶۱,۵
متوسط	۶۱,۵۴
انحراف معیار	۴,۴۷

جدول ۴. نسبت بارهای انتخاب شده در آزمایش خستگی.

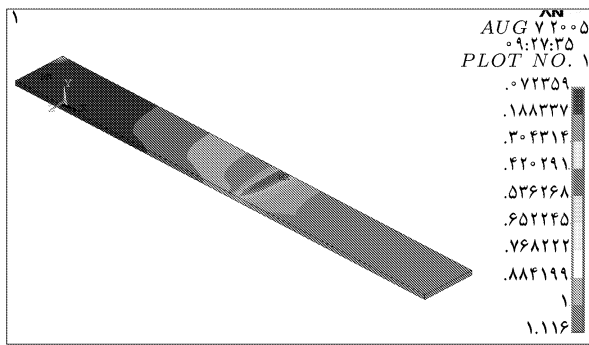
ردیف	نسبت بار
۱	۰٫۶
۲	۰٫۶۵
۳	۰٫۷
۴	۰٫۷۵
۵	۰٫۸
۶	۰٫۸۵



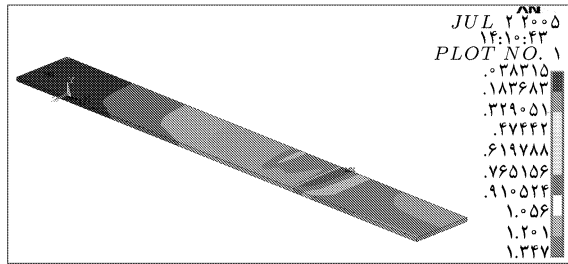
شکل ۷. نمودار S-N.

## تجهیزات آزمایش

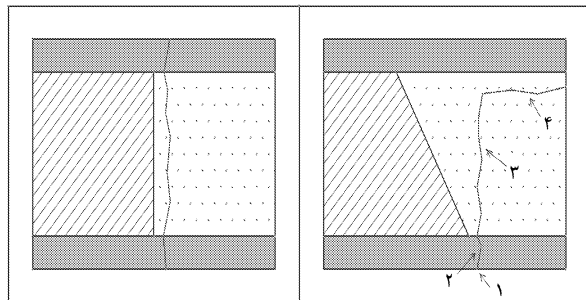
در انجام آزمایشات مکانیکی از دستگاه کشش-فشار اینسترون ۸۵۰۲ استفاده شده است. حداکثر قدرت این دستگاه در اعمال بار دینامیکی معادل  $200\text{KN}$  و در حالت استاتیک  $250\text{KN}$  است. گیره‌های دستگاه با سیستم هیدرولیک فعال می‌شوند و در نتیجه فشار اعمالی قابل تنظیم است. به دلیل محدودیت در سیستم تغذیه‌ی نیرو و پاسخ سفتی قطعه‌ی تحت آزمایش، حداکثر فرکانس قابل اعمال با افزایش مقدار بار کاهش می‌یابد. قابلیت توقف خودکار آزمایش متناظر با تعریف معیاری مناسب، ثبت تعداد چرخه‌های طی شده و همچنین حداکثر بار واقعی در موج بارگذاری لحظه‌ی شکست در دستگاه وجود دارد. با این سیستم می‌توان انواع شکل موج‌های متعارف در آزمایش خستگی را انتخاب کرد. کنترل مراحل و پارامترهای آزمایش از دو طریق پل و رایانه (توسط نرم‌افزار ویژه) امکان‌پذیر است. برای دستیابی به موازنه‌ی محدودیت قدرت دستگاه و پاسخ سفتی قطعه در اعمال فرکانس‌های بالا (به‌ویژه در مقادیر بالای بار)، کاهش زمان، هزینه‌ی انجام آزمایشات، جلوگیری از افزایش دما در قطعه و نتایج سایر تحقیقات فرکانس اعمال بار بر روی مقدار  $5.8$  هرتز تنظیم شد. این فرکانس نسبت به مقدار متعارف  $10$  هرتز، مدت زمان طولانی‌تر و هزینه‌ی



شکل ۱۲. مقدار Tsai-Wu برای اولین لایه‌ی شکسته شده از طرح ساده در مرحله‌ی بارگذاری دوم.



شکل ۱۳. مقدار Tsai-Wu برای اولین لایه‌ی شکسته شده از طرح زویه‌دار در مرحله‌ی بارگذاری سوم.



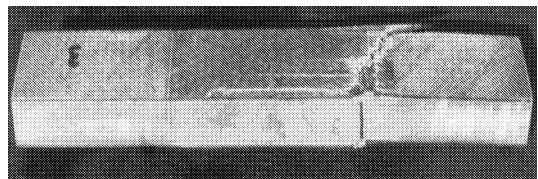
شکل ۱۴. شماتیک وضعیت آسیب‌های خستگی.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نیز منجر به جابه‌جایی نقاط بحرانی به طرف داخل سنجه می‌شود که باعث بهبود قابل ملاحظه‌ی در انتقال نیرو برای حالت (ب) به ناحیه‌ی سنجه می‌شود. به عبارت دیگر، در این شکل‌ها موقعیت کانتورهای مقادیر بیشینه‌ی معیار Tsai-Wu به طرف داخل سنجه جابه‌جا شده است و لذا نشان می‌دهد که این نقاط داخل سنجه زودتر به حد واماندگی می‌رسند. این همان نتیجه‌ی است که برای تعیین استحکام واقعی یک قطعه یا ماده لازم است: یعنی وقوع واماندگی در ناحیه‌ی سنجه قطعه آزمایش. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که شکل کانتور بحرانی طرح ساده (شکل ۱۰) حفظ شده اما ناحیه‌ی بحرانی واقعی با شکلی مشابه در ناحیه‌ی سنجه ایجاد شده است که وضعیت مطلوب یک طراحی آزمایش است. بنابراین آزمایش به‌طور مطلوب‌تری طراحی شده و استحکام به دست آمده بالاتر و واقعی‌تر خواهد بود. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ اولین لایه از لایه‌چینی را که به حالت واماندگی می‌رسند (FPF) نشان می‌دهند. این لایه، اولین لایه‌ی کرنی مجاور لایه‌ی شیشه متصل به فوم در رویه (B) برای هر دو طرح است، و بار متناظر با واماندگی اولین لایه در طرح «ب» بزرگ‌تر از بار مربوطه در طرح «الف» است. در آزمایشات خستگی،

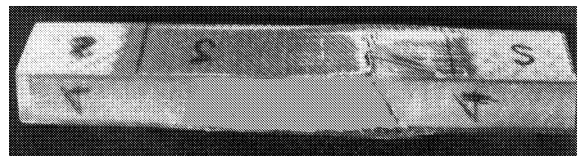
بیشتری برای آزمایشات در بر داره، در مقابل دمای قطعه در اثر بار نوسانی افزایش قابل ملاحظه‌ی نخواهد داشت.

## نتایج و بحث

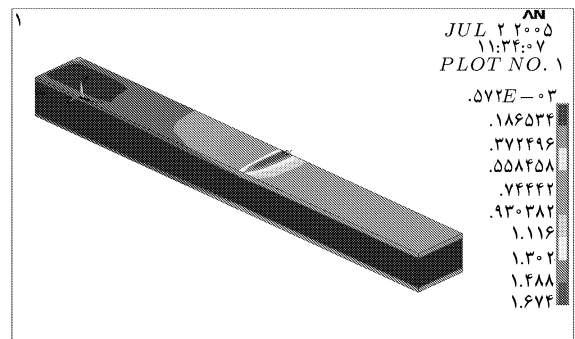
بررسی وضعیت آسیب در قطعات تحت آزمایش استاتیک نشان می‌دهد که در قطعات با طرح ساده «الف» جدایش فوم از ناحیه‌ی درگیر در بخش گیره اتفاق افتاده است. در حالی که در طرح زویه‌دار «ب» قطعه از ناحیه‌ی داخلی‌تر در سنجه در صفحه با تعداد لایه بیشتر دچار واماندگی شده است که به آزمایش ایده‌آل نزدیک‌تر است (شکل‌های ۸ و ۹). چنین نتیجه‌ی از نتایج تحلیل اجزاء محدود نیز به دست می‌آید (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). مقایسه‌ی کانتورهای Tsai-Wu در



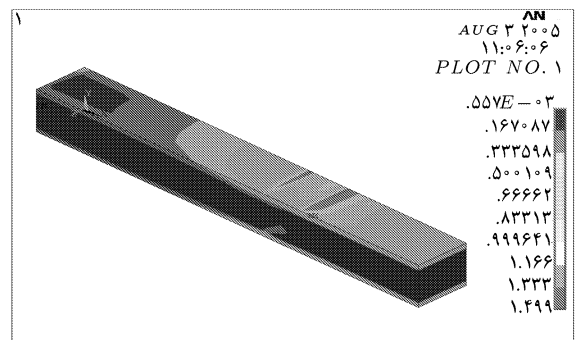
شکل ۸. شکست استاتیک (طرح ساده).



شکل ۹. شکست استاتیک (طرح زویه).



شکل ۱۰. مقادیر معیار شکست Tsai-Wu برای قطعه با طرح اتصال ساده.



شکل ۱۱. مقادیر معیار شکست Tsai-Wu برای قطعه با طرح اتصال زویه‌دار.

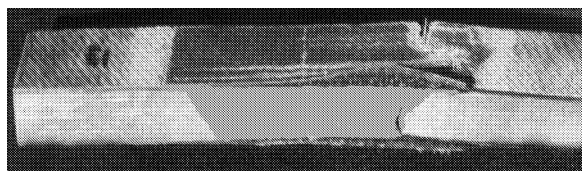
کرد: ناحیه‌ی ۱، مربوط به پارگی و نواری شدن طول قطعه در ناحیه‌ی سنجه و لایه‌ها؛ ناحیه‌ی ۲، آسیب لایه‌ها در ناحیه‌ی انتهایی اتصال فوم به ناحیه‌ی درگیر در گیره؛ ناحیه‌ی ۳ شکست عمودی فوم زیر ناحیه‌ی ۲؛ ناحیه‌ی ۴ رشد ترک طولی در فوم پس از رسیدن شکست عمودی فوم به صفحه A. اصولاً رشد ترک خستگی در داخل ناحیه‌ی فوم که فضای هموزن و ایزوتروپ فرض می‌شود باعث کاهش پراکندگی نتایج آزمایش‌ها می‌شود که این خود یک مزیت برای سازه‌های ساندویچی با هسته‌ی فومی محسوب می‌شود. نکته‌ی دیگر آن‌که با افزایش نسبت بار، طول ترک طولی در فوم و همچنین طول و تعداد ترک‌های ناحیه‌ی ۱ به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین در نسبت بارهای بالا آسیب‌های ناحیه‌ی ۲ و ۳ آسیب‌های غالب‌اند.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل، براساس آزمایشات و نیز تحلیل‌های اجزاء محدود، نشان می‌دهد که استفاده از طرح زاویه‌دار باعث انتقال ناحیه‌ی شکست از محدوده‌ی اتصال سنجه به گیره در قطعه به محدوده‌ی درونی‌تر سنجه می‌شود و از این رو استحکام حاصله در مقایسه با طرح ساده به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است. از طرف دیگر، تطابق کامل روش اجزاء محدود و آزمایشات تأیید می‌شود. بررسی آزمایشات خستگی در نسبت بارهای بالا نیز نتایج مشابهی را ارائه می‌دهد. از نتایج آزمایشات خستگی چهار وضعیت آسیب مشاهده شده ۱، پارگی و نواری شدن طول قطعه در ناحیه‌ی سنجه و لایه‌ها؛ ۲، آسیب دیدگی لایه‌ها در ناحیه‌ی انتهایی اتصال فوم به ناحیه‌ی درگیر در گیره؛ ۳، شکست عمودی فوم زیر ناحیه‌ی قسمت ۱، ۲، ۴، رشد ترک طولی در فوم پس از رسیدن شکست عمودی فوم به صفحه‌ی متشکل از لایه‌های کم‌تر، از چهار وضعیت آسیب تشخیص داده شده، رشد دو نوع ترک قائم و موازی امتداد بارگذاری در فوم اتفاق می‌افتد که با افزایش نسبت بار طول ترک موازی امتداد بارگذاری که به دنبال ترک قائم ایجاد می‌شود، کاهش می‌یابد.

### منابع

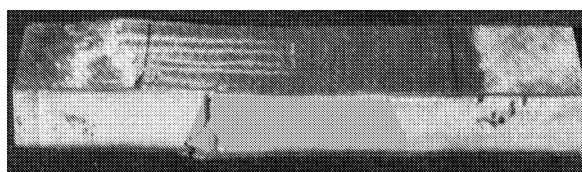
1. Kanny, K and Mahfuz, H. "Flexural fatigue characteristics of sandwich structures at different loading frequencies", *Composite Structures*, **67**(4), pp. 403-410 (2005).
2. Gibson, L.H. and Ashby, M.F. "Cellular solid-structure and properties", 2nd edn, Cambridge University press, Cambridge (1997).
3. Zenkert, D. and Backland, J. "PVC sandwich core Materials-Mode I fracture Toughness", *Composite Science and Technology*, **34**, pp. 255-242 (1989).
4. Zenkert, D. "PVC Sandwich Core Materials: Fracture under Mode II Loading and Mixed Mode Conditions", *Materials Science and Engineering*, **A108**, pp. 233-240 (1989).
5. Zenkert, D, Schubert and Burman, M. "Fracture Initiation in Foam Core Sandwich Structures due to Singular Stresses at Corners", *Mechanics of Composite Materials and Structures*, **4**(1), pp. 1-22 (1997).
6. Gibson, L. J and Ashby, M.F. "The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Solids", *Proc.R.Soc.Lond*, **382**(43), (1982).



شکل ۱۵. وضعیت آسیب‌های خستگی (۱).



شکل ۱۶. وضعیت آسیب‌های خستگی (۲).



شکل ۱۷. وضعیت آسیب‌های خستگی (۳).

قطعات تحت تأثیر چهار نسبت بار متفاوت قرار داده شده‌اند. انواع وضعیت‌های آسیب حاصل در شکل ۱۴ به نمایش درآمده است. نسبت بارهای نزدیک به یک، وضعیت آسیبی بسیار شبیه به آزمایش استاتیکی را نشان می‌دهند. شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ را با شکل‌های ۸ تا ۱۱ مقایسه کنید. با کاهش نسبت بار وضعیت‌های آسیب اتفاق افتاده از وضعیت آسیب استاتیکی دور می‌شوند. به‌طور کلی وضعیت‌های آسیب مشاهده شده را به چهار ناحیه می‌توان تقسیم

7. Gibson, L.G. "Modeling Mechanical Behavior of Cellular Materials", *Materials science and Engineering*, Allo, pp. 1-36 (1989).
8. Grenestedt, J. L, Hallstrm, S and Kutteneuler, J. "On Cracks Emanating from Wedges in Expanded PVC Foam", *Engineering Fracture Mechanics*, **54**(4), pp. 445-456 (1996).
9. Burman, M and Zenkert, D. "Fatigue crack Initiation and propagation in sandwich Structures", Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Aeronautics (1988).
10. Buene, L. Echtermeyer, A.T. and Sund, O. E. "Fatigue Properties of PVC Foam Core Materials", Det Norske Veritas Report 91-2049, (1991).
11. Shipsha, A, Burman, M and Zenkert, D. "On Mode-I Fatigue crack growth in foam cores for sandwich structures and Matereials", Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Aeronautics, Rep 2001-13, pp. 103-116 (1997).
12. Lilley, J and Noble, F. W. "Fatigue Crack Growth in Polyurethane Foam", *Journal of Material Science*, **16**, pp. 1801-1808 (1981).

13. Yau, S. S and Mayer, G. "Fatigue Crack Propagation in Polycarbonate Foam", *Materials Science and Engineering*, **78**, pp. 111-114 (1986).
14. Zenkert, D. "Strength of Sandwich Beams with Mid-Plane Debondings in the Core", *Composite Structures*, **15**, pp. 279-299 (1990).
15. Shenhar, Y., Frostig, Y. and Altus, E. "Stresses and Failure Patterns in Bending of Sandwich beams with Transversely Flexible Cores and Laminated Composite Skins", *composite Structures*, **35**, pp. 145-152 (1996).
16. Triantfillou, T. C. and Gibson, L. J. "Failure Mode Maps for Foam Core Sandwich Beams", *Material Science and Engineering*, **95**, pp. 37-53 (1987).
17. Hedlund, A ,Olsson K-A, Sorensson ,L. "Fatigue Testing of Sandwich Core Material Divinycell H250", ILK Report A-61, Department of Aeronautics, Kungliga Tekniska Hogskolan (1993).
18. Allen, H.G and Sheno, R.A. "Flexural Fatigue Tests on Sandwich Structures", Second International Conference on Sandwich Constructions, Eds. D. Weissmann-Berman and K-A Olsson, EMAS Ltd, Solihull, UK, pp. 499-517 (1992).
19. Sheno, R.A, Clark S.D and Allen, H.G. "Fatigue Behaviour of Polymer Composite Sandwich Beams", *Journal of Composite Materials*, **29** (18), (1995).
20. Lestari, W and Qiao, P. "Damage detection of Fiber-reinforced Polymer honeycomb Sandwich beams", *Composite Structures*, **67**(33), pp. 365-373 (2005).