

تعیین خواص خستگی لایه چینی ساندویچی نامتقارن از نوع شیشه/کربن/فوم PVC از طریق ارایه طرحی جدید برای انجام آزمایش‌ها

محمود ذبیح‌پور	دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف
سعید ادیب نظری	دانشیار دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف
رامین مسلمیان	دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان
علی عابدیان	استادیار دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

تحقیق حاضر به تعیین خواص خستگی یک لایه چینی ساندویچی نامتقارن تحت بارگذاری کششی می‌پردازد. به منظور تعیین خواص خستگی این جزء سازه‌ای، ابتدا لازم است آزمایشات استحکام استاتیکی آن انجام شود. برای هر دو وضعیت استاتیکی و خستگی، ارایه طرحی مناسب برای قطعات آزمایش ضروری است. با استفاده از روش اجزاء محدود و نرم‌افزار تحلیل سازه (ANSYS) نشان داده شد که طرح اتصال فوم به لایه چینی صلب بخش گیره (Solid Laminate) در نواحی انتهایی سنجه با زاویه ۴۵ درجه در مقایسه با طرح ۹۰ درجه، وضعیت بسیار مناسبی را در شکست نهایی لایه چینی ایجاد می‌کند. این نتیجه با استفاده از آزمایش‌های استاتیکی نیز تایید گردید. با کمک چنین طرح کارآمدی، آزمایشات خستگی بر روی لایه چینی مورد نظر اجرا گردید. خواص خستگی و همچنین مکانیزم‌ها و وضعیت‌های آسیب ایجاد شده مورد بحث قرار گرفت. نتایج آزمایشات در حالت بارگذاری خستگی نیز وقوع وضعیت‌های آسیب در داخل ناحیه سنجه و مورد قبول بودن نتایج آزمایشات را نشان می‌دهند. در نهایت ایجاد خوردشدگی شدید (pulverization) در ترک راستای ضخامت فوم نشان دهنده تعداد سیکل‌های زیاد طی شده در مدت رشد این نوع ترک در داخل فوم می‌باشد. بنابراین بخش مهمی از عمر خستگی لایه چینی در رشد ترک داخل فوم اتفاق می‌افتد.
کلمات کلیدی: لایه چینی ساندویچی نامتقارن، خواص خستگی، اجزاء محدود، آزمایش‌های مشخصه‌سازی.

Determination of Fatigue Properties of Unsymmetrical Sandwich Composites with Glass/Carbon Faces and PVC Foam Core Using A New Design of Sample Test Geometry

M. Zabihpoor, S. Adibnazari and A. Abedian

Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology

R. Moslemian

Faculty of Engineering, Kashan University

Abstract

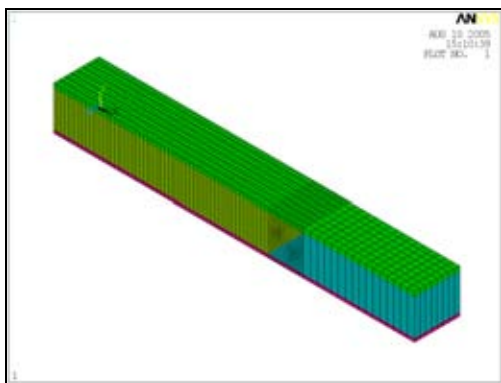
Fatigue properties of a unsymmetrical sandwich composites with glass/carbon faces and PVC foam core has been investigated. To determine fatigue properties of the sandwich laminate, first of all, the static strength tests must be conducted. On the other hand the sample test geometry must be designed such that the failure occurs in gauge zone for both case of static and fatigue tests. Two different type of foam/solid laminate interface geometry are considered. Based on static analysis of the two FEM models, critical points in the specimens causing static failure were explained. FEA and experiments results both give improvement of failure zone and strength values for oblique type design of gauge interface. The angle of the oblique design is 45 in degree. With such an efficient design, fatigue tests were conducted. Fatigue properties of the laminate were determined and discussed. The pulverization observed within normal crack in the foam indicates that the main part of the laminate fatigue is spent in this type of damage.

Key words: Unsymmetrical sandwich composites, Fatigue properties, Characterization tests.

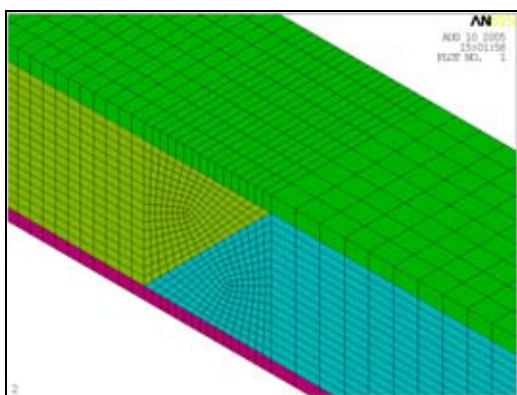
۱- مقدمه

مواد مرکب تقویت شده با الیاف پیوسته علاوه بر خواص استاتیکی مناسب و امکان تولید سازه‌های بهینه، خواص و رفتار خستگی بسیار خوبی نیز از خود نشان می‌دهند. با وجود مزیت مواد مرکب در بارگذاری خستگی، بررسی کامل این رفتار با پیچیدگی‌هایی همراه بوده و استفاده از وضعیت‌های واماندگی برای شرح آسیب خستگی مواد مرکب کاری دشوار می‌باشد. دشواری این بررسی در مورد لایه چینی‌های با الیاف متفاوت و ساندویچی دو چندان می‌شود و این مساله به دلیل وقوع مکانیزم‌های متنوع آسیب داخل لایه چینی می‌باشد که می‌تواند کلید طراحی مواد و سازه‌ها با عمر خستگی بالاتر باشد. موضوع خستگی مواد مرکب با الیاف از یک جنس و یا لایه چینی‌های مختلف توسط محققان متعددی بررسی شده است. اما ساختارهای ساندویچی با صفحات از نوع لایه چینی مواد مرکب کمتر تحقیق شده و نتایج عددی خواص خستگی آنها بسیار معدود می‌باشد. ساختارهای ساندویچی شامل دو صفحه نازک متصل در دو طرف یک هسته ضخیمتر و سبکتر می‌باشند. صفحات بیرونی عموماً از نوع لایه چینی‌های مواد مرکب و از جنس الیاف کربن، شیشه و یا کولار بوده و هسته آن می‌تواند از نوع لانه زنبوری، فوم‌های متخلخل و یا چوب بالسا تهیه گردد. صفحات بیرونی بیشترین بار صفحه‌ای و خمشی را تحمل می‌کنند در حالی که هسته، سفتی خمشی، استحکام برشی خارج از صفحه و استحکام فشاری بالا را ایجاد می‌کند [۱]. در ساختارهای ساندویچی با هسته فلزی و یا فوم پلیمری، ضعیفترین بخش سازه، هسته می‌باشد که تحت بارگذاری استاتیکی و نوسانی سریعتر از سایر بخش‌ها دچار واماندگی می‌شود. خواص مکانیکی فوم‌های پلیمری با در نظر گرفتن توصیف ساختار تخلخلی آنها توسط محققان زیادی مشخصه‌سازی شده است. بخشی از این تحقیقات به وسیله گیبسون و اشبی جمع‌آوری گردیده است [۲]. زنگرت و بکلاند آزمایشات استاتیکی را برای بررسی صلبیت فوم‌های PVC برنامهریزی و اجرا کردند [۳]. نتایج کار آنها نشان داد که مکانیک شکست الاستیک خطی برای تعیین خواص شکست این فوم‌ها قابل اعمال است. گرنشت رشد ترک را در فوم‌های PVC تحقیق نمود [۴]. شپشا و همکاران مود 1 انتشار ترک خستگی در فوم‌های PVC را مورد مطالعه قرار دادند [۵]. با کمک روش اجزاء محدود ضریب شدت تنش K در نوک ترک محاسبه گردیده و در

آن فرض اعتبار مکانیک شکست الاستیک خطی لحاظ شد. در زمینه رفتار خستگی هسته‌های فومی پژوهش‌های متعددی توسط محققین مختلف انجام شده است. از جمله کاملترین این تحقیقات بررسی مشخصات خستگی هسته فومی متخلخل و لانه زنبوری توسط بورمن و زنگرت می‌باشد [۶]. تعدادی از مکانیزم‌های واماندگی مواد مرکب ساندویچی تحت بار دینامیکی توسط ترانتیفیلو ارائه شده است [۷]. گیبسون و اشبی مکانیک سه بعدی مواد متخلخل را تشریح کردند [۸]. گیبسون در ادامه، رفتار مکانیکی این مواد را مدل‌سازی نمود [۹]. در نتیجه این پژوهش‌ها مشخص گردید واماندگی زمانی رخ می‌دهد که آسیب به یک سطح بحرانی برسد. این سطح بحرانی خود به بیشینه تنش اعمالی در بارگذاری نوسانی وابسته است. ساختارهای مرکب ساندویچی تحت بار خمشی توسط شنهار و همکاران بررسی گردید [۱۰]. کنی و محفوظ اثرات فرکانس بر روی رفتار خستگی ساختارهای مرکب ساندویچی با الیاف شیشه (S2) و ماتریس وینیل استر را تحقیق نمودند که در آنها دو نمونه مختلف (با هسته‌های متفاوت فوم PVC مقایسه شده‌اند [۱]). نتیجه این تحقیق نشان داد نرخ رشد ترک با افزایش فرکانس بارگذاری کاهش می‌یابد. لستاری و کیانو نیز تکنیک‌هایی را برای آشکارسازی آسیب در لایه چینی‌های ساندویچی ارائه کرده‌اند که در آنها هسته‌هایی از نوع لانه زنبوری به کار رفته است [۱۱]. در نهایت آنچه در بررسی مسایل واماندگی مواد سازه‌ها اهمیت فراوانی دارد اطلاع از مکانیزم‌های واماندگی است [۱۲]. همانطور که مرور تاریخچه نشان می‌دهد رفتار خستگی لایه چینی‌های ساندویچی با هسته فوم پلیمری کمتر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. عدم وجود اطلاعات و نتایج تجربی کافی از رفتار خستگی سازه‌های واقعی که به صورت لایه چینی‌های ساندویچی ساخته می‌شوند اهمیت مساله را بیش از پیش روشن می‌سازد. ساختارهایی نامتقارن با هسته فومی (مانند PVC) و صفحات از نوع لایه چینی‌های 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 مربوط به حضور عدم تقارن در صفحات به پیچیدگی ناشی از کاربرد و اثر الیاف مختلف اضافه می‌شود. در این مقاله بررسی خواص خستگی یک لایه چینی ساندویچی بحرانی در سازه واقعی که از مواد مرکب ساخته شده مورد نظر



(الف)



(ب)

شکل ۲- مدل اجزاء محدود المان بحرانی طرح زاویه دار. الف) نمای کامل. ب) نمای متمرکز از طرح زاویه دار

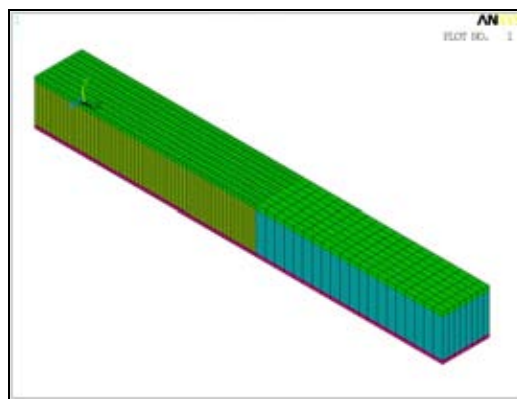
۳- مدلسازی اجزاء محدود

برای مقایسه اثر طرح‌های مختلف اتصال ناحیه درگیر با هسته فومی و همچنین اثر مؤلفه‌های تنش ایجاد شده بر وضعیت شکست المان بحرانی مدلسازی اجزاء محدود صورت گرفته است. شبیه‌سازی به کمک کد تجاری اجزاء محدود (ANSYS) و با استفاده از المان لایه‌ای (Solid191) انجام گرفته است. شکل‌های ۱ و ۲ این مدل‌ها را برای هر دو طرح نشان می‌دهند. با اعمال شرایط مرزی مناسب از اجرای آزمایش و وارد نمودن بار (با در نظر گرفتن تقارن قطعه و بارگذاری) توزیع تنش داخل اجزای مدل‌ها معین می‌شود. جهت اعمال شرط مرزی ناشی از فک‌های دستگاه تست، جابجایی گره‌های صفحاتی که فک‌های دستگاه آنها را نگه می‌دارد در جهت ضخامت صفر در نظر گرفته شده است. بارگذاری مدل به این صورت می‌باشد که بار کششی در سه مرحله در سه نسبت مساوی از بار کل ۶۱/۵۴ کیلو نیوتن به مدل اعمال می‌شود. این مقدار بار معادل بار نهایی

قرار گرفته است. این لایه چینی از نوع ساختار نامتقارن با هسته فومی می‌باشد.

۲- روش انجام پژوهش

ابتدا المان بحرانی در سازه واقعی بر اساس انواع بارگذاری‌های مهم از طریق تحلیل اجزاء محدود تعیین می‌شود. ترتیب لایه چینی این المان از سازه واقعی در جدول ۲ تشریح شده است. المان مذکور دارای هسته فومی از نوع (PVC) و صفحات نامتقارن بوده، همچنین کل لایه چینی نیز دارای عدم تقارن است. از آن جایی که دستورالعمل استاندارد در مورد طرح ناحیه درگیر در گیره برای نمونه‌های آزمایش تحت بار کشش استاتیک و نوسانی ارائه نشده است دو طرح نمونه که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور ابتدا از هر دو طرح مدل‌های اجزاء محدود تهیه شده و بر روی مؤلفه‌های تنش در نقاط مختلف بحث می‌گردد و طرح مناسب‌تر برای تهیه و اجرای آزمایشات استحکام استاتیک و خستگی به دست می‌آید. از نتایج آزمایش استاتیک برای مقایسه نتایج استفاده می‌شود. در انتها نتایج آزمایشات خستگی تشریح می‌گردند. وجود چنین ترتیبی برای لایه چینی (نامتقارن) در اثر اعمال بار ساده کششی نوسانی انواع مؤلفه‌های تنش را در لایه‌های قطعه ایجاد خواهد کرد که در رفتار خستگی لایه چینی نقش تعیین کننده‌ای ایفا می‌کنند. تحلیل مدل‌های (FEM) که در بخش بعدی ارائه شده‌اند وجود چنین مؤلفه‌هایی را نشان می‌دهند.



شکل ۱- مدل اجزاء محدود المان بحرانی طرح ساده

بدست آمده از آزمایش استاتیک لایه چینی طرح زاویه‌دار می‌باشد. شکل‌های ۳ و ۴ هندسه دو طرح را نشان می‌دهند.

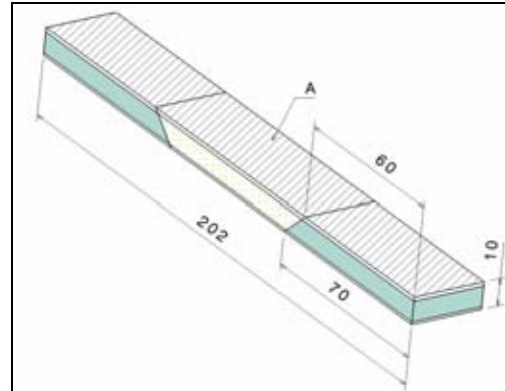
برای تعیین رفتار واقعی لایه چینی تحت بارگذاری استاتیک و خستگی آزمایشات مربوطه برنامه‌ریزی و انجام گردید و از آن جا بررسی وضعیت ایجاد و رشد آسیب در قطعات امکان‌پذیر شده است.

۴- روش تجربی

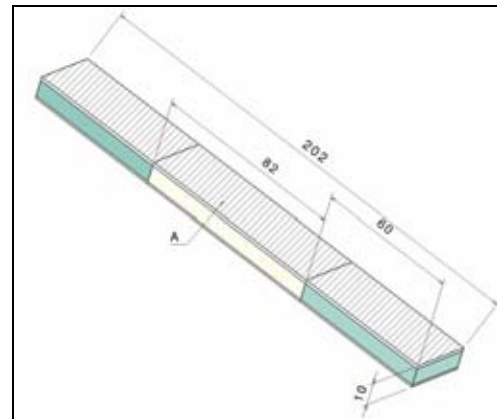
بر مبنای هندسه شرح داده شده در بخش‌های قبلی، نمونه‌های آزمایش مورد نظر با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شده‌اند. کلیه مراحل ساخت، پخت و ترتیب لایه‌گذاری دقیقاً مطابق نمونه سازه واقعی می‌باشد. اجرای آزمایش کشش استاتیک و خستگی بر اساس استانداردهای ASTM D3039-3039M، ASTM D3479-3479M برنامه‌ریزی شده‌اند. ابعاد قطعات عبارت است از: $202 \times 25/4 \times 20$ cm.

۴-۱- ساخت قطعات آزمایش

حداقل پنج قطعه آزمایش برای حالت استاتیک لازم است. در آزمایش خستگی، وابسته به سطح و نوع استفاده از نتایج، تعداد قطعات تحت آزمایش متغیر است که شرح آنها در استاندارد خستگی ارائه گردیده است. در شکل‌های ۵ و ۶ قطعات پس از ساخت، اجرای مراحل برش و اندازه کردن (Trim) نمایش داده شده‌اند. در این شکل هر دو نوع روش اتصال فوم نشان داده شده است.



شکل ۳- مدل طرح زاویه‌دار (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۴- مدل طرح ساده (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۵- قطعه آزمایش با اتصال ساده



شکل ۶- قطعه آزمایش با اتصال زاویه‌دار

خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌های به کار رفته به شرح جدول ۱ می‌باشد. لازم به ذکر است که خواص ارائه شده از طریق آزمایشات مشخصه‌سازی حاصل شده و از شرح آنها در این مبحث اجتناب می‌شود. ترتیب لایه چینی 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 نماید. به این منظور از لایه‌های با الیاف بافته شده شیشه و به تعدادی که با ضخامت هسته فومی برابر باشد استفاده شده است. با توجه به جدول ۱ این تعداد ۳۲ لایه می‌باشد. لایه‌ها در ناحیه رویه‌های بالا و پایین

جدول ۱- خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌های

جنس لایه	نمایه	ضخامت (mm)	کسر حجمی الیاف	نوع رزین	Exx (MPa)	Eyy (MPa)	Gxy (MPa)	Nuxy
Woven Glass	Type-1	۰/۱۴۹	۰/۴۵	Epoxy	۱۶۲۸۰	۱۶۲۸۰	۳۷۲۸	۰/۰۴۷
Woven Glass	Type-2	۰/۳۱۲۵	۰/۴۵	Epoxy	۱۶۲۸۰	۱۶۲۸۰	۳۷۲۸	۰/۰۴۷
U.D Carbon	C	۰/۲۴۷	۰/۵	Epoxy	۱۱۵۰۰۰	۶۸۱۹	۲۹۵۲	۰/۲۹۶
PVC Foam	HT110	۱۰	-----	-----	۱۰۵	۱۰۵	۵۰	۰/۰۵۴

جدول ۲- ترتیب لایه چینی

شماره لایه	جنس لایه	صفحه	زاویه نسبت به امتداد طولی (X)
۱	Glass-Type 1	A	۰/۹۰
۲	C	A	۰
۳	C	A	۰
۴	Glass-Type 2	A	۴۵
۵	Foam	-	-----
۶	Glass-Type 2	B	۴۵
۷	C	B	۰
۸	C	B	۰
۹	C	B	۰
۱۰	Glass-Type 1	B	۰/۹۰

۴-۲- آزمایش‌های استاتیک

آزمایش‌های استاتیک جهت تعیین استحکام نهایی ساختارهای ساندویچی برنامه‌ریزی گردیدند. کلیه 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 کامپیوتر از دستگاه مطابق روش استاندارد لحاظ گردیده است. نتایج عددی و مقادیر پارامترهای آماری آزمایش در جدول ۳ نمایش داده شده است.

۴-۳- آزمایش‌های خستگی

برای توسعه نمودار S-N، به کمک نتایج مربوط به بار نهایی حاصل از آزمایش‌های استاتیک، نسبت‌های مناسب اعمال بار در نظر گرفته شدند. با انتخاب شکل موج بارگذاری از نوع سینوسی

با دامنه ثابت و نسبت بار موجی $R=0/1$ پارامترهای خستگی تعیین گردید. در جدول (۴) نسبت بارهای انتخاب شده ارایه شده‌اند. نمودار S-N به دست آمده در شکل (۵) ترسیم گردیده است.

جدول ۳- نتایج 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

فرکانس‌های بالا (به ویژه در مقادیر بالای بار)، ثابت نگه داشتن نرخ بارگذاری، کاهش زمان و هزینه انجام آزمایش‌های جلوگیری از افزایش دما در قطعه و نتایج سایر محققین فرکانس اعمال بار بر روی مقدار ۵/۸ هرتز تنظیم گردید. این فرکانس نسبت به مقدار متعارف حداکثری ۱۰ هرتز مدت طولانی‌تر و هزینه بیشتری برای آزمایش‌های به‌مراه داشته اما در مقابل دمای قطعه در اثر بار نوسانی افزایش قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت [۱۳].

۵- نتایج و بحث

بررسی وضعیت آسیب در قطعات تحت آزمایش استاتیک نشان می‌دهد در قطعات با طرح ساده (الف) جدایش فوم از ناحیه درگیر در بخش گیره اتفاق افتاده است. در حالی که در طرح زاویه‌دار (ب) قطعه از ناحیه داخلی‌تر در سنج (Gauge) صفحه (B) دچار واماندگی شده است که به آزمایش ایده‌آل نزدیک‌تر است (شکل‌های ۸ و ۹).



شکل ۸- شکست استاتیک (طرح ساده)

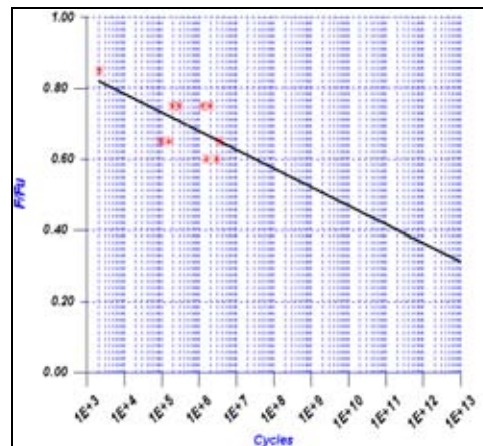


شکل ۹- شکست استاتیک (طرح زاویه‌دار)

چنین نتیجه‌ای از نتایج تحلیل اجزاء محدود نیز به دست می‌آید (شکل‌های ۱۰ الی ۱۱). مقایسه کانتورهای Tsai-Wu در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نیز جابجایی نقاط بحرانی به طرف داخل سنج را نمایش می‌دهد که بهبود قابل ملاحظه‌ای در انتقال نیرو برای حالت (ب) به ناحیه سنج مشاهده می‌شود. بنابراین آزمایش به طور مطلوب‌تری طراحی شده و استحکام بدست آمده بالاتر و واقعی‌تر خواهد بود. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ اولین لایه‌ای از لایه چینی را که به حالت واماندگی می‌رسند (FPF) نشان می‌دهند. این لایه، اولین لایه کربنی مجاور لایه شیشه متصل به فوم در رویه (B) برای هر دو طرح می‌باشد و بار

جدول ۴- نسبت بارها در آزمایش خستگی

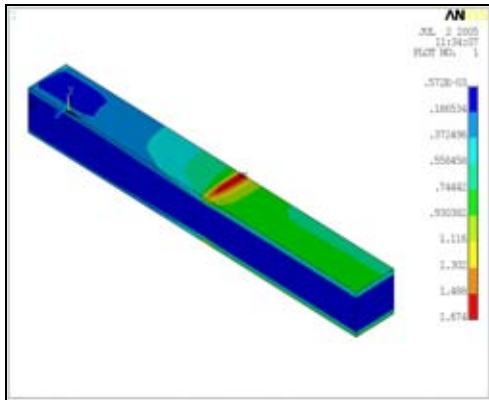
ردیف	نسبت بار
۱	۰/۶
۲	۰/۶۵
۳	۰/۷۵
۴	۰/۸۵



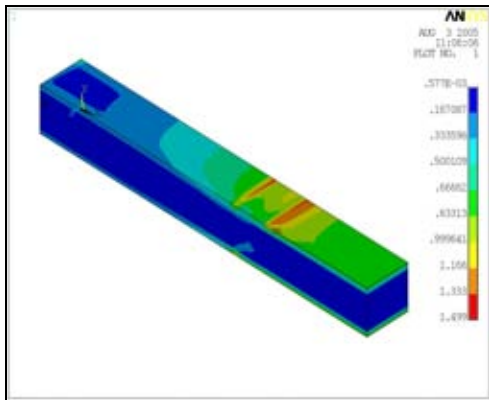
شکل ۷- نمودار S-N

۴-۴- شرایط و تجهیزات آزمایش

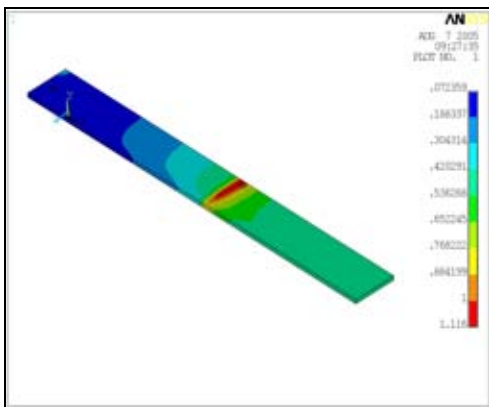
در انجام آزمایش‌های مکانیکی از دستگاه کشش- فشار اینسترون (Instron 8502) استفاده شده است. حداکثر قدرت این دستگاه در اعمال بار دینامیکی (200KN) و در حالت استاتیک (250KN) می‌باشد. گیره‌های دستگاه با سیستم هیدرولیک فعال می‌شوند و در نتیجه فشار اعمالی قابل تنظیم است. به دلیل محدودیت در سیستم تغذیه نیرو (Power Pack) و پاسخ سفتی (Stiffness) قطعه تحت آزمایش حداکثر فرکانس قابل اعمال با افزایش مقدار بار کاهش می‌یابد. قابلیت توقف خودکار آزمایش متناظر با تعریف معیاری مناسب، ثبت تعداد سیکل‌های طی شده و همچنین حداکثر بار واقعی در موج بارگذاری لحظه شکست در دستگاه وجود دارد. با این سیستم می‌توان انواع شکل موج‌های متعارف در آزمایش خستگی را انتخاب نمود. کنترل مراحل و پارامترهای آزمایش از دو طریق پنل و کامپیوتر (توسط نرم افزار ویژه) امکان‌پذیر است. در دستیابی به یک موازنه بین محدودیت قدرت دستگاه و پاسخ سفتی قطعه در اعمال



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 زاویه‌دار



شکل ۱۲- مقدار Tsai-Wu برای اولین لایه شکسته شده از طرح ساده در مرحله بارگذاری دوم

متناظر با واماندگی اولین لایه در طرح (ب) بزرگتر از بار مربوطه در طرح (الف) می‌باشد. نتایج مقادیر تنش در جهت ضخامت در سطوح بیرونی صفحه‌های لایه چینی در ناحیه درگیر در بخش گیره شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهند. مقادیر و کانتور این تنش‌ها بسیار نزدیک به مقدار (2MPa)، معادل فشار فک‌ها می‌باشد که در نتیجه اعمال شرایط مرزی جابجایی صفر در جهت ضخامت بدست آمده است، از این رو شرایط فیزیکی مساله به طور کامل در مدل‌سازی (FEM) شبیه‌سازی شده است. در آزمایش‌های خستگی، قطعه‌ها تحت اثر چهار نسبت بار متفاوت قرار داده شده‌اند. نسبت بارهای نزدیک به یک، وضعیت آسیبی بسیار شبیه به آزمایش استاتیکی را نشان می‌دهند. شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ را با شکل‌های ۹ و ۱۱ مقایسه کنید. با کاهش نسبت بار وضعیت‌های آسیب اتفاق افتاده از وضعیت آسیب استاتیکی دور می‌شوند.

به طور کلی وضعیت‌های آسیب مشاهده شده را به چهار ناحیه می‌توان تقسیم نمود. ناحیه (الف): که در آن لایه‌ها در ناحیه انتهای اتصال فوم به ناحیه درگیر در گیره دچار آسیب می‌شوند. (ب): پارگی و نواری شدن طول قطعه در ناحیه سنج و لایه‌ها. (ج): شکست عمودی فوم زیر ناحیه قسمت (الف). (د): رشد ترک طولی در فوم پس از رسیدن شکست عمودی فوم به صفحه A. اصولاً رشد ترک خستگی در داخل ناحیه فوم که فضای همگن و ایزوتروپ فرض می‌شود باعث کاهش پراکندگی نتایج آزمایش‌ها می‌گردد که این خود یک مزیت برای سازه‌های ساندویچی با هسته فومی محسوب می‌شود. نکته دیگر آنکه با افزایش نسبت بار طول ترک طولی در فوم و همچنین طول و تعداد ترک‌های ناحیه (ب) شدت کاهش می‌یابد. بنابراین در نسبت بارهای بالا آسیب‌های ناحیه (الف) و (ج) آسیب‌های غالب می‌باشند.

با بررسی قطعات آزمایش شده تحت بار خستگی مشاهده می‌گردد که در ناحیه ترک راستای ضخامت، فوم به صورت خورد شده و به شکل دندانه‌های بسیار ریز در آمده است (pulverized)، که دلالت بر تعداد سیکل‌های بسیار زیاد در هنگام رشد این نوع ترک در داخل فوم دارد. در نتیجه بخش عمده عمر خستگی قطعه طی رشد ترک عمودی داخل فوم واقع می‌شود. چنین نتیجه‌ای از جهت مدل‌سازی عمر خستگی این نوع قطعه حایز اهمیت می‌باشد.



شکل ۱۶- وضعیت آسیب های خستگی (۱)



شکل ۱۷- وضعیت آسیب های خستگی (۲)



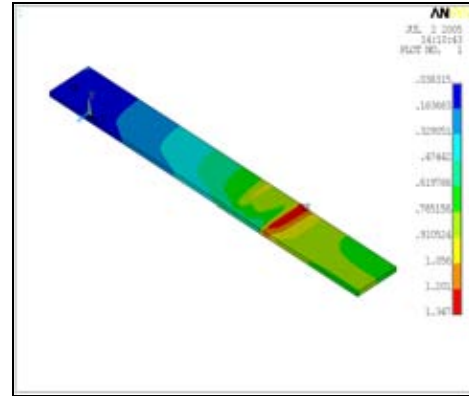
شکل ۱۸- وضعیت آسیب های خستگی (۳)

۶- نتیجه گیری

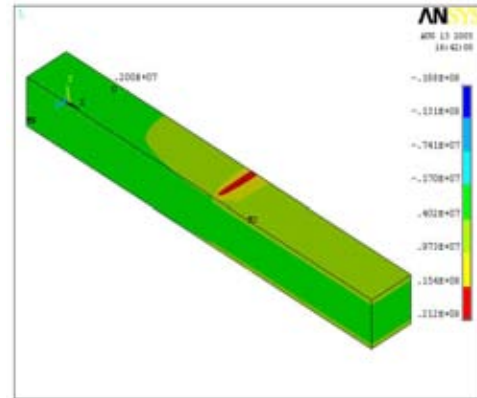
نتایج حاصل بر اساس آزمایش‌های و تحلیل‌های اجزاء محدود نشان می‌دهد استفاده از طرح زاویه‌دار باعث انتقال ناحیه شکست از محدوده اتصال سنجه به گیره در قطعه به محدوده درونی‌تر سنجه می‌گردد و از این رو استحکام حاصله به مقادیر واقعی نزدیکتر می‌باشد. بررسی آزمایش‌های خستگی در نسبت بارهای بالا نیز نتایج مشابهی را ارائه می‌دهد. از نتایج آزمایش‌های خستگی چهار وضعیت آسیب مشاهده گردید: (الف): آسیب‌دیدگی لایه‌ها در ناحیه انتهای اتصال فوم به ناحیه درگیر در گیره (ب): پارگی و نواری شدن طول قطعه در ناحیه سنجه و لایه‌ها (ج): شکست عمودی فوم زیر ناحیه قسمت (الف) و (د): رشد ترک طولی در فوم پس از رسیدن شکست عمودی فوم به صفحه A. 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. همچنین وقوع پدیده خورد شدگی شدید در ترک عمودی فوم نشان از اختصاص سهم بزرگی از عمر خستگی و تعداد سیکل طی شده قطعه به رشد ترک در فوم دارد.

سپاس‌گزاری‌ها

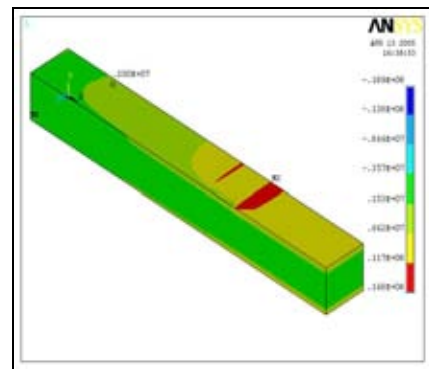
نویسندگان از جناب آقای دکتر محمود مهرداد شکر به دلیل راهنمایی‌های ایشان در انجام آزمایشات تشکر می‌نمایند.



شکل ۱۳- مقدار Tsai-Wu برای اولین لایه شکسته شده از طرح زاویه‌دار در مرحله بارگذاری سوم



شکل ۱۴- مقدار تنش در جهت ضخامت از طرح ساده در مرحله بارگذاری سوم



شکل ۱۵- مقدار تنش در جهت ضخامت از طرح زاویه‌دار در مرحله بارگذاری سوم

- مراجع
- [8] Gibson, L. J and Ashby, M. F., "The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Solids", Proceeding of the Royal Society of London, 382:43, 1982.
- [9] Gibson, L. G., "Modeling Mechanical Behavior of Cellular Materials", Materials science and Engineering, All0: 1-36, 1989.
- [10] Shenhar, Y, Frostig, Y. and Altus, E., "Stresses and Failure Patterns in Bending of Sandwich beams with Transversly Flexible Cores and Laminated Composite Skins", Composite Structures, 35:145-152, 1996.
- [11] Lestari, W. and Qiao, P., "Damage detection of Fiber-reinforced Polymer honeycomb Sandwich beams", Composite Structures, 67:365-373, 2005.
- [12] Chen, P., Shen, Z., Xiong, J., Yang, S., Fu, S., and Ye, L., "Failure mechanisms of laminated composites subjected to static indentation", Composite Structures, 75:489-495, 2006.
- [13] D'Amore, A., Stupak, P. R., Rigale, F., and Nicolais, L., "Uniaxial and Biaxial Flexural Fatigue of Thermoset-Based Continuous Glass Mat-Reinforced Composites for Automotive Applications", in: Impact and Dynamic Fracture of Polymers and Composites, Editors: William, J.G., and Pavan, A.,ESIS Publication 19, Chippenham, Wiltshire, pp. 413 -421, 1995.
- [1] Kanny, K and Mahfuz, H., "Flexural fatigue characteristics of sandwich structures at different loading frequencies", Composite Structures, 67:403-410, 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, 34:225-242, 1989.
- [4] Grenestedt, J. L., Hallstrom, S. and Kutteneuler, J., "On Cracks Emanating from Wedges in Expanded PVC Foam", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 54, No 4, pp. 445-456, 1996.
- [5] Shipsha, A, Burman, M and Zenkert, D., "On Mode-I Fatigue crack growth in foam cores for sandwich structures and Materials", Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Aeronautics, Rep. 2001-13, 103-116, 1997.
- [6] Burman, M and Zenkert, D., "Fatigue crack Initiation and propagation in sandwich Structures", Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Aeronautics, 1988.
- [7] Triantafillou, T. C and Gibson, L. J., "Failure Mode Maps for Foam Core Sandwich Beams", Material Science and Engineering, 95:37-53, 1987.