

مقایسه دو مدل برای پیش‌بینی حالت تخریب تیر ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم در دماهای بالا

وحید فدائی نائینی^۱، مجتبی یزدی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳۹۹۵۵۹۶، mohaghghi@ut.ac.ir

چکیده

در این مقاله، از دو مدل گیبسون تعمیم‌یافته و مونتانیی جهت پیش‌بینی رفتار تخریب تیر ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم در دمای بالا، استفاده شده است. به این منظور، ابتدا دو مدل مذکور شامل خصوصیات هندسی و فیزیکی جهت بیان حالت تخریب تیر، در نظر گرفته شد. سپس نمودار نیروی تخریب تیر بر حسب مشخصات هندسی تیر و دما، با استفاده از دو مدل موجود استخراج شده و با داده‌های تجربی در دسترس مقایسه شدند. داده‌های نظری و تجربی، توافق خوبی با یکدیگر داشتند. در هر دو مدل، مشاهده می‌شود که نیروهای تخریب نظری، با افزایش ضخامت هسته و رویه افزایش یافته و با افزایش فاصله تکیه‌گاه‌ها کاهش می‌یابند. همچنین بر اساس نتایج هر دو مدل، بار حدی با افزایش دما کاهش می‌یابد. در مدل مونتانیی تغییر شکل نامتقارن تیر (با وجود تقارن هندسی و بارگذاری) در نظر قرار می‌گیرد و این در حالی است که در مدل گیبسون این موضوع دارای توجیه خاصی نیست. از طرفی در مدل مونتانیی در دماهای بالا، نیروی تجربی حد تخریب به نیروی تخریب پیش‌بینی شده در یکی از حالات تخریب (حالت IIB) نزدیکی بیشتری دارد و این در حالی است که در مدل گیبسون در دماهای بالا، نیروی تجربی در فاصله میانی دو حالت تخریب قرار گرفته و در برخی از محدوده‌های دمایی، صراحتاً نمی‌توان در زمینه حالت تخریب اظهار نظر نمود. در عین حال یکی از نقاط ضعف مدل مونتانیی نسبت به مدل گیبسون، عدم پیش‌بینی حالت تخریب تسلیم رویه است.

کلیدواژگان

تخریب، تیر ساندویچی، هسته، فوم

Comparison of two models for predicting the failure mode of aluminum foam core sandwich beams at high temperatures

Vahid Fadaei Naeini¹, Mojtaba Haghghi Yazdi^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* P.O.B. 143995596 Tehran, Iran, mohaghghi@ut.ac.ir

Abstract

In this paper, the two models of Modified Gibson and "Montanini" are used to predict failure behavior of sandwich beams with aluminum foam core at high temperatures. First, the geometrical and physical properties of the two models were considered to describe failure mode of the sandwich beam. Next, the failure load diagram of the beam in terms of beam geometrical properties as well as temperature was obtained using these two models and the results were compared with available experimental data. A good agreement was observed between theoretical results and experimental data. In both models, it can be seen that the theoretical failure loads are enhanced by increasing face and core thicknesses and are reduced by increasing span length. Moreover, according to the results of the two models, the failure loads decrease with temperature rise. In the "Montanini" model, the asymmetric deformation of the beam is considered (despite the geometrical and loading symmetry), while the Gibson's model has no justification about it. Besides, in "Montanini" model at high temperatures, the amount of experimental failure load is closer to the load of one of the modes (mode IIB). However in Gibson's model at high temperatures, the amount of experimental load is between failure load in two modes and the failure mode cannot be clearly specified in some temperature ranges. However, one of the drawbacks of the "Montanini" model as compared with Gibson's model, is the lack of prediction of face yield failure mode.

Keywords

Failure, Sandwich Beam, Core, Foam

۱- مقدمه

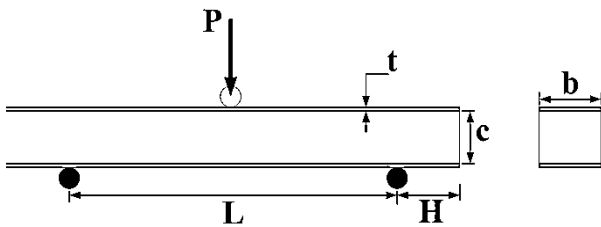
گروه پژوهشی گیبسون یک مدل تخریب تیر ساندویچی را ایجاد نمودند و بار تخریب اولیه را به‌صورت بیشینه بار، در هر حالت تخریب تخمین زدند [۵،۸]. یو و همکاران [۹] به جای سمبه تخت برای اعمال نیرو در آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای، از یک سر استوانه‌ای استفاده نموده و مدل گیبسون تعمیم یافته را، پیشنهاد دادند. هدف این پژوهش، به‌دست آوردن اطلاعاتی راجع به تغییر شکل و تخریب تیرهای ساندویچی در دماهای بالا در آزمایش خمشی سه‌نقطه‌ای می‌باشد.

در اغلب پژوهش‌های پیشین، حالات تخریب تیرهای ساندویچی در دماهای معمولی، مورد بررسی قرار گرفته است. این در حالی است که شرایط کارکرد سازه‌های ساندویچی در دمای بالا، ارائه مدل‌های نظری برای پیش‌بینی حالت تخریب تیر در دماهای بالا و یا تعمیم مدل‌های موجود برای کارایی در این شرایط را می‌طلبد.

به همین منظور در این پژوهش، مدل مونتانی برای پیش‌بینی حالت تخریب تیر در دمای بالا، تعمیم داده شده است و حالات تخریب نظری تیر در دماهای مختلف بر اساس این مدل ارائه شده و با نتایج تجربی و همچنین نتایج حاصل از مدل گیبسون تعمیم‌یافته، مقایسه شده‌اند.

۲- مدل سازی تحلیلی

یک تیر ساندویچی با طول کل L و عرض b ، شامل دو صفحه رویه با ضخامت t و یک هسته از جنس فوم آلومینیوم با ضخامت c که تحت بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای قرار گرفته است، در نظر گرفته شد. طول ناحیه تحت اثر بار برابر L فرض شد. کمیت H نیز برابر فاصله سر آزاد تیر از تکیه‌گاه‌ها می‌باشد. این تیر در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمای تیر ساندویچی تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای

جهت بارگذاری از سمبه‌ای با سر استوانه‌ای و تکیه‌گاه‌های استوانه‌ای استفاده شد. در روابط، از زیروندهای f و c به‌ترتیب جهت اشاره به صفحات رویه و هسته استفاده شد. بنابراین $E_f(T)$ و $\sigma_{yf}(T)$ به‌ترتیب بیانگر مدول یانگ و استحکام تسلیم صفحات رویه هستند. $E_c(T)$ ، $G_c(T)$ و $\sigma_{yc}(T)$ نیز به‌ترتیب به مدول یانگ، مدول برشی، استحکام فشاری و استحکام برشی هسته فوم آلومینیومی اشاره دارند. در این پژوهش این کمیت‌ها همگی وابسته به دما در نظر گرفته شدند.

انحراف تیر ساندویچی تحت بار P برابر مجموع انحراف خمشی و برشی تحت بار P است، که طبق رابطه (۱) قابل بیان است [۱۰]:

$$\delta = \frac{PL^3}{48(EI)_{eq}} + \frac{PL}{4(AG)_{eq}} \quad (1)$$

که سفتی خمشی معادل $(EI)_{eq}$ و سفتی برشی معادل $(AG)_{eq}$ براساس روابط (۲) و (۳) تعریف می‌شوند [۱۰]:

$$(EI)_{eq} = \frac{E_f b t^3}{6} + \frac{E_f b c^3}{12} + \frac{E_f b t(t+c)^2}{2} \approx \frac{E_f b t c^2}{2} \quad (2)$$

تیرهای ساندویچی به‌دلیل مزایایی از قبیل سفتی خمشی زیاد، مقاومت حرارتی، عایق‌بندی صوتی و مونتاژ آسان، در صنایع هوافضا و زیردریایی کاربرد گسترده‌ای پیدا نموده‌اند. اخیراً سازه‌های ساندویچی با ترکیبات مختلف مواد تشکیل دهنده صفحات رویه و هسته برای بهبود عملکردشان در حال توسعه هستند. علاقه بارزی که به کاربرد سازه‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی در عرصه‌های صنعتی وجود دارد، موضوع قابل توجهی به نظر می‌رسد. فوم آلومینیوم می‌تواند به عنوان یک تجهیز سازه‌ای، یک دستگاه برودتی و یا یک مستهلک کننده صوتی ایفای نقش کند [۱]. به‌دلیل ظرفیت بالای سازه‌های ساندویچی از جمله کار در شرایط محیطی سخت، که ممکن است شامل کار در دمای بالا باشد، مطالعه پاسخ سازه‌ای آن‌ها در دمای بالا ضروری به‌نظر می‌رسد. خواص مکانیکی و مکانیزم‌های تخریب تیرهای ساندویچی فوم آلومینیوم با خواص فیزیکی و هندسی اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها (اعم از چگالی نسبی فوم، ضخامت هسته، ضخامت رویه و ...) و همچنین فرآیند تولید متناسب است.

رفتار مشخصه تیرهای ساندویچی در دمای بالا، در مطالعات پیشین مورد بررسی واقع شده است [۲،۳]. ترینانفیلو و همکاران [۴]، معادلاتی را استخراج نمودند که میزان بار را به هنگام وقوع حالات مختلف واماندگی برای تیری ساندویچی که رویه و هسته آن به‌صورت پلاستیک تسلیم می‌شوند، نشان می‌دهد. ایشان سپس نمودار حالت واماندگی را با محورهای چگالی نسبی هسته و نسبت ضخامت رویه به طول تیر، ارائه دادند. این نمودارها در یک حالت معلوم، بارگذاری و همچنین برای دسته‌ای از مواد رویه و هسته بدون فوم، حالت غالب واماندگی را برای هر نوع طراحی ممکن تیر، نشان می‌دهد. آزمایشات صورت گرفته بر روی تیرهای ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته‌هایی از جنس فوم پلی‌یورتان صلب، نشان دادند که معادلات و شکل‌ها، واماندگی را به خوبی توصیف می‌کنند. شکل‌ها می‌توانند جهت طراحی تیرهای ساندویچی با کمترین وزن برای یک استحکام مشخص، به‌کار روند. شکل‌های مشابه حالت واماندگی برای تیرهای ساندویچی ساخته شده از جنس رویه و هسته شکننده و همچنین برای ورق‌های ساندویچی می‌توانند رسم شوند.

مک کورمک و همکاران [۵]، میزان بار اولیه واماندگی مرتبط با اولین انحراف از حالت خطی در منحنی بار - جابجایی و همچنین بار بیشینه برای هر حالت واماندگی را تخمین زدند. نگاشت‌های حالت واماندگی به‌گونه‌ای ایجاد شدند که حالت واماندگی غالب برای طراحی‌های عملی تیر را نشان می‌دادند. نتایج تحلیل با انجام آزمایشاتی بر روی تیرهای ساندویچی با هسته‌های فوم آلومینیومی در خمشی سه نقطه‌ای مقایسه شدند؛ نتایج تحلیلی به‌صورت خوبی، بارهای بیشینه و حالت واماندگی را توصیف می‌کردند.

در پژوهش انجام شده توسط گروه پژوهشی مونتانی و همکاران، پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی تیر ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم، تحت آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای بررسی شدند و مدلی جهت بیان حالت تخریب این تیرها ارائه شد [۶]. نتایج پژوهش مطرح شده توسط لی و همکاران [۷] پاسخ فوم آلومینیومی را در برابر بارهای حد تخریب در دماهای مختلف بیان می‌نمود. در این پژوهش، دریافته شد که استحکام تخریب فوم آلومینیومی بر اساس دما متغیر بوده و به‌صورت تقریباً خطی با افزایش دما، کاهش می‌یابد. این موضوع در حالی است که اکثر پژوهشگران تمرکز خود را بر روی رفتار فوم آلومینیوم در دمای محیط قرار داده‌اند.

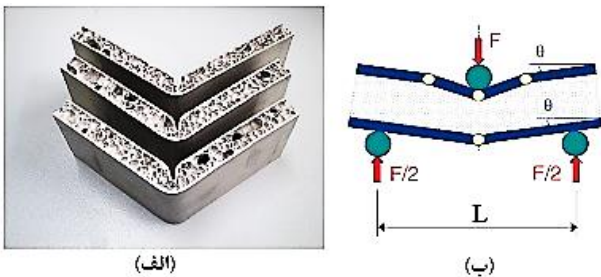
۲-۲- روابط مدل تخریب مونتانینی

در مورد پنل‌های ساندویچی فوم آلومینیوم، حالات تخریب مشاهده شده (حالات تخریب I، IIA و IIB) تا حدی با حالاتی که تا کنون در مقالات گزارش شده‌اند (برش هسته، تسلیم رویه، فرورفتگی و چروکیدگی هسته) متفاوت است و در نتیجه نیاز به معرفی مدل‌های جدید تخریب می‌باشد. برای اولین بار در مرجع [۶] با استفاده از روابط تخریب ارائه شده در پژوهش‌های پیشین، حالات تخریب جدیدی معرفی شدند که جزئیات حالت تخریب پنل ساندویچی را به شیوه بهتری بیان می‌کردند.

اولین حالت تخریب (حالت I) با فرورفتگی قسمتی از هسته، زیر جسم فرورونده و همچنین با چرخش قسمتی از پنل حول ناحیه لولایی، به صورتی شبیه حالت برش هسته A [۶] اتفاق می‌افتد (شکل ۲). بار تخریب حالت I با استفاده از جمع آثار حالت فرورفتگی و برش هسته در مود A بر اساس رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۶]:

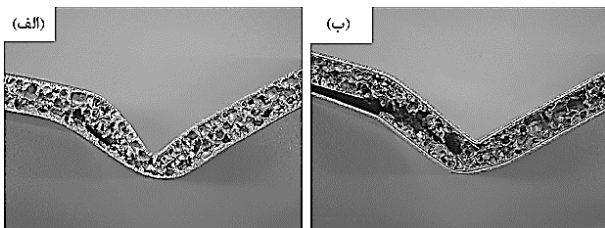
$$F_I = F_{IND} + F_{CSA} = (bt\sqrt{3\sigma_{yf}(T)\sigma_{yc}(T)}) + [\sigma_{yf}(T)\frac{bt^2}{L} + 2bc\tau_{yc}(T)(1 + \frac{2H}{L})] \quad (10)$$

می‌توان مشاهده نمود که جمله اول رابطه، به فاصله تکیه‌گاه‌ها بستگی نداشته در حالی که بخش دوم رابطه با افزایش فاصله تکیه‌گاه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۲ حالت تخریب I. (الف) مدل تجربی و (ب) تئوری [۶]

هر دو حالت IIA و IIB مشابه حالت برش هسته AB بوده و در حقیقت حد واسط حالات A و B می‌باشند [۱۱]. در حالت برش هسته AB، نیمی از تیر با حالت A تغییر شکل یافته در حالی که نیمی دیگر با حالت B تغییر شکل می‌یابد. در این صورت یک تغییر شکل لولایی بر روی یکی از تکیه‌گاه‌ها به وجود آمده و قسمتی از تیر که بر روی تکیه‌گاه دیگر است؛ بدون تغییر شکل باقی می‌ماند. اگرچه مکانیزم تخریب IIB با حالت برش هسته AB سازگار است، ولی معادل حالت IIA که در آن تسلیم فشاری هسته در ناحیه-ای میان دو ناحیه تغییرشکل یافته اتفاق می‌افتد، نمی‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳ مکانیزم‌های تخریب. (الف) حالت IIA و (ب) حالت IIB [۶]

در هر دو حالت ذکر شده، تخریب با برش هسته آغاز می‌شود؛ ولی در حالت IIA، تنش‌ها به وسیله جدایش رویه و هسته آزاد نشده (این فرآیند در

$$(AG)_{eq} = \frac{G_c b(t+c)^2}{c} \approx G_c b c \quad (3)$$

این روابط بر اساس این فرضیات، که صفحات رویه بسیار نازک‌تر از هسته بوده و ضریب سفتی صفحات رویه، بسیار بزرگ‌تر از ضریب سفتی هسته است، به دست آمده‌اند. همچنین فرض اتصال کامل^۱ رویه و هسته نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته شد.

۱-۲- روابط مدل گیبسون تعمیم‌یافته

در صورتی که تنش در صفحات رویه، به حد تنش تسلیم مواد صفحات رویه برسد، تخریب اولیه در صفحات رویه ایجاد خواهد شد. تحلیل حالت تسلیم صفحات رویه در مدل گیبسون تعمیم‌یافته، تاثیر شکل قسمت اعمال‌کننده بار و تکیه‌گاه‌ها را در نظر نمی‌گیرد، بنابراین فرض حالت بار بحرانی تسلیم صفحات رویه، همچنان در این قسمت قابل استفاده است که توسط رابطه (۴) بیان می‌شود [۱۰]:

$$(P)_{cri\ yf} = \frac{4bt(t+c)}{L} \sigma_{yf}(T) \quad (4)$$

در این رابطه از استحکام هسته فومی صرف‌نظر شده است. هنگامی که تیر ساندویچی در معرض بارگذاری عرضی قرار گیرد، قسمت عمده نیروی برشی توسط هسته فومی تحمل می‌شود؛ در صورتی که تنش برشی در هسته فومی به استحکام برشی ماده تشکیل‌دهنده آن برسد، تخریب اولیه در هسته فومی رخ خواهد داد. بار بحرانی برای حالت برش هسته به صورت رابطه (۵) است [۱۰]:

$$(P)_{cri\ cs} = \frac{3bt^2}{L} \sigma_{yf}(T) + 2bc(1 + \frac{H}{L}) \tau_{yc}(T) \quad (5)$$

به هنگام ایجاد فرورفتگی در تیر، امکان تخریب لایه فوقانی نزدیک به جسم فرورونده به همراه هسته فومی وجود دارد. نیروی بحرانی برای ایجاد فرورفتگی بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$(P)_{cri\ in} = 2bt\sqrt{\sigma_{yf}(T)\sigma_{yc}(T)} \quad (6)$$

نگاشت حالت تخریب با استفاده از کمیت‌های بی‌بعد t/L و c/L به عنوان محورهای مختصاتی و بر اساس معادلات (۴) تا (۶) ایجاد می‌شود. این نگاشت به سه ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود که در هر ناحیه یک مکانیزم تخریب حاکم است. این نواحی به وسیله سه خط گذار از یکدیگر مجزا شده که در حقیقت طراحی تیر را برای حالتی بیان می‌دارند که دو مکانیزم دیگر دارای بار تخریب یکسان باشند. سه خط گذار به ترتیب به وسیله معادلات (۷) تا (۹) قابل بیان هستند [۱۰]:

$$\frac{c}{L} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma_{yc}(T)}{\sigma_{yf}(T)}} - \left(\frac{t}{L}\right) \quad (7)$$

$$\frac{c}{L} = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{H}{L}\right) \left(\frac{\tau_{yc}(T)}{\sigma_{yf}(T)}\right) - \left(\frac{2t}{L}\right) \right] \left(\frac{t}{L}\right) \quad (8)$$

$$\frac{c}{L} = \left[\frac{L}{L+H} \right] \left[\frac{\sigma_{yf}(T)}{\tau_{yc}(T)} \right] \left[\left(\frac{\sigma_{yc}(T)}{\sigma_{yf}(T)}\right)^{1/2} \left(\frac{t}{L}\right) - 3\left(\frac{t}{L}\right)^2 \right] \quad (9)$$

واضح است که این سه خط گذار به صورت اساسی به استحکام مواد تشکیل‌دهنده هسته و رویه‌ها، وابسته می‌باشند.

1. Perfect Bonding

همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، استحکام تسلیم ماده به صورت یکنواخت تا دمای 300°C کاهش یافته و پس از آن نرخ کاهش کمی را دنبال می‌کند. این اختلاف بزرگ در نرخ کاهش خواص با دما، معرف حساسیت بین دو محدوده دمایی کمتر از 300°C و بیشتر از آن است که احتمالاً به دلیل ایجاد تغییرات در ریزساختار ماده اتفاق می‌افتد.

استحکام فشاری فوم آلومینیومی نیز با افزایش دما کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دما، استحکام کششی و برشی فوم آلومینیومی را کاهش می‌دهد. بر اساس نتایج تجربی، مدول یانگ و مدول برشی، ماده تشکیل‌دهنده صفحه رویه، مستقل از دمای آزمایش بوده و تغییر قابل توجهی در اثر افزایش دما در مقادیر این کمیت‌ها رخ نخواهد داد [۱۰].

همچنین جهت شناسایی حالات تخریب ممکن، از صفحات رویه و همچنین هسته با ضخامت‌های متفاوت استفاده شد؛ این موضوع در حالی است که طول کل تیر ثابت و برابر $L = 300$ (mm) و عرض آن نیز برابر $b = 30$ (mm) است [۱۰].

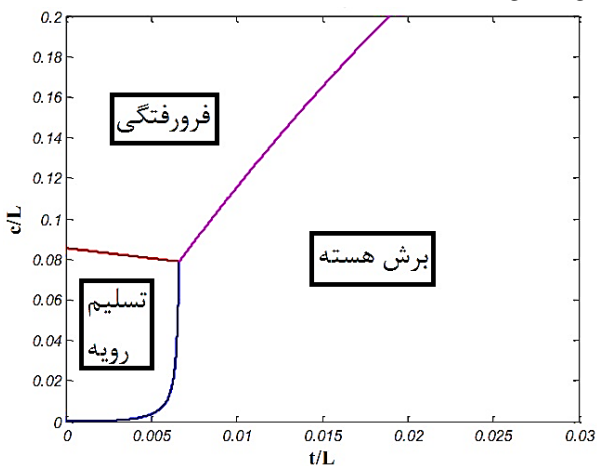
صفحات رویه و هسته در دمای بالا با چسب مصنوعی AK۰۴۰۴ به یکدیگر متصل شدند. تمامی نمونه‌های تیر ساندویچی ابتدا به مدت ۲ ساعت تحت دمای 80°C و سپس به مدت ۲ ساعت دیگر تحت دمای 150°C عملیات حرارتی شده و در انتها در دمای اتاق خنک شدند [۱۰].

باید به این نکته توجه نمود که استحکام کششی چسب AK۰۴۰۴ در حدود 35 MPa می‌باشد که این مقدار بسیار بیشتر از استحکام کششی هسته فومی می‌باشد. همچنین دمای کاری این چسب تا حدود 150°C می‌باشد که بسیار بیشتر از دمای انجام آزمایشات تجربی است [۱۰].

در آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای، سرعت قسمت وارد کننده نیرو برابر 0.5 mm/s تنظیم شد و آزمایش به شیوه شبه‌استاتیک در پنج دمای ذکر شده انجام گرفت [۱۰].

۳-۱- نمودارهای تخریب بر اساس مدل گیبسون تعمیم یافته

نگاشت حالت تخریب بر اساس هندسه و خواص ارائه شده در دمای محیط، در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ پیش‌بینی حالت تخریب اولیه در دمای محیط

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴، هنگامی حالت برش هسته اتفاق می‌افتد که صفحات رویه ضخیم‌تر و مستحکم‌تر از آن باشند که در برابر بار تسلیم در آن‌ها اتفاق بیفتد. در حقیقت، نمونه‌هایی با هسته فومی به ضخامت 20 mm در حالت فرورفتگی یا تسلیم رویه و به صورت تصادفی بر اساس رقابت میان این دو حالت، تخریب می‌شوند.

حالت IIB اتفاق می‌افتد و بنابراین در حالت IIA در هسته تنش فشاری وجود دارد. بار تخریب حالت IIB از طریق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۶]:

$$F_{IIB} = F_{CSAB} = 2\sigma_{yf}(T) \frac{bt^2}{L} + 2bc\tau_{yc}(T) \left(1 + \frac{H}{L}\right) \quad (11)$$

همچنین بار تخریب حالت IIA با استفاده معادله ۱۲ قابل محاسبه می‌باشد [۶]:

$$F_{IIA} = 2\sigma_{yf}(T) \frac{bt^2}{L} + 2bc\tau_{yc}(T) \left(1 + \frac{H}{L}\right) + \sigma_{yc}(T) \frac{bL}{4} \quad (12)$$

بار حدی حالت IIB همواره کمتر از حالت I بوده و وابستگی بسیار کمی به فاصله بین تکیه‌گاه‌ها دارد. روابط نظری به دست آمده برای محاسبه نیروی تخریب (روابط ۱۰ تا ۱۲) به فاصله بین تکیه‌گاه‌ها (L)، هندسه تیر ساندویچی (b, t, c) و خصوصیات ماده (σ_{yc} , σ_{yf}) بستگی دارد. در حالت کلی خصوصیات ماده، تابع دما بوده و بنابراین بار تخریب برای هر حالت می‌تواند متفاوت باشد.

۳- نتایج و بحث

جهت ارائه نتایج عددی و مقایسه داده‌های تجربی با نتایج حاصل از مدل‌های پیش‌بینی حالت تخریب ذکر شده، یک تیر ساندویچی با ابعاد هندسی و خصوصیات فیزیکی مشخص، در نظر گرفته شد.

در اندازه‌گیری‌های تجربی به عمل آمده، از فوم آلومینیومی سلولی با چگالی نسبی ۰/۱۱ به عنوان ماده هسته استفاده شد. اندازه میانگین هر سلول در این فوم تقریباً ۲ میلی‌متر بود. صفحات آلومینیومی ۱۰۶۰ با خلوص ۹۹/۲٪ با ضخامت‌های متفاوت به عنوان صفحات رویه انتخاب شدند [۱۰].

یک سری از آزمایشات اعم از کشش تک‌محوری، تست فشاری و برشی مثل کشش تک‌محوره صفحات رویه جهت به دست آوردن خواص مکانیکی مواد استفاده شد.

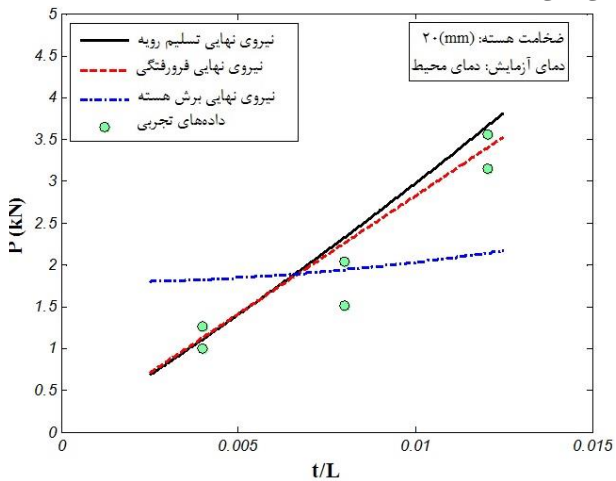
خواص مکانیکی صفحات رویه و هسته فوم آلومینیوم در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی صفحه رویه و هسته فومی [۱۰].

۱- صفحات رویه: آلومینیوم ۱۰۶۰ خالص					
دما ($^{\circ}\text{C}$)	۲۵	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
مدول یانگ	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
رویه (GPa)					
تنش تسلیم	۱۱۰	۹۰	۷۰	۲۰	۱۰
رویه (MPa)					
۲- هسته فومی: فوم آلومینیوم					
دما ($^{\circ}\text{C}$)	۲۵	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
مدول یانگ	۰,۱۸	۰,۱۸	۰,۱۸	۰,۱۸	۰,۱۸
هسته (GPa)					
مدول برشی	۰,۱۲	۰,۱۲	۰,۱۲	۰,۱۲	۰,۱۲
هسته (GPa)					
تنش تسلیم	۳,۲۲	۲,۳۴	۱,۸۳	۱,۳۵	۰,۸۶
هسته (MPa)					
تنش تسلیم	۱,۱۷	۰,۸۸	۰,۷۱	۰,۵۴	۰,۳۷
هسته (MPa)					
استحکام برشی	۱,۳۵	۱,۱۵	۰,۸۷	۰,۵۶	۰,۳۹
هسته (MPa)					

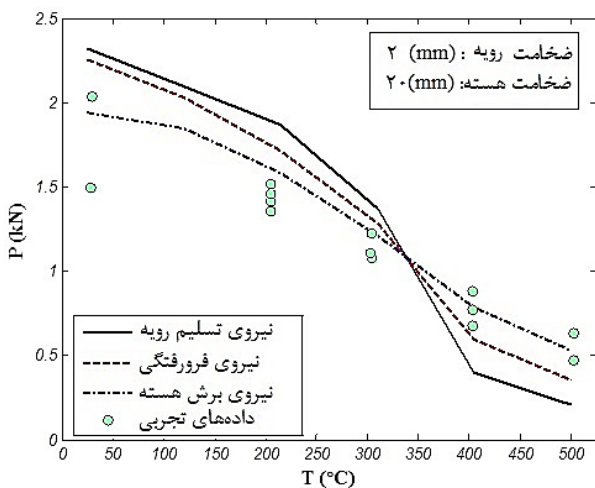
نیروهای نهایی نظری و تجربی دارای توافق قابل قبولی به ازای انواع ضخامت‌های هسته و رویه در دمای محیط می‌باشند (شکل‌های ۶ و ۷). این موضوع به دلیل آن است که مدل تعمیم‌یافته گیبسون در حالت کلی برای تیرهای ساندویچی با صفحات رویه نازک، مناسب است.

بر اساس شکل‌های ۶ و ۷، نیروهای تخریب تجربی، با افزایش ضخامت هسته و رویه افزایش یافته و با افزایش طول تیر کاهش می‌یابند. این موضوع در حالی است که به‌ازای پیش‌بینی مدل گیبسون تعمیم‌یافته، نیروی تخریب نظری در حالت تخریب بر اثر فرورفتگی، مستقل از ضخامت هسته می‌باشد. همچنین در حالت تخریب بر اثر برش هسته، نیروی مورد نیاز تخریب، میزان وابستگی کمی به ضخامت صفحات رویه دارد.



شکل ۷ مقایسه نیروی تخریب حالات مختلف بر اساس مدل گیبسون تعمیم یافته با داده‌های تجربی بر حسب ضخامت رویه [۱۰]

نیروی حدى حالات مختلف تخریب بر اساس مدل گیبسون تعمیم‌یافته، برای نمونه‌های تحت خمش سه نقطه‌ای در دماهای مختلف، در شکل ۸ نمایش داده شده است.

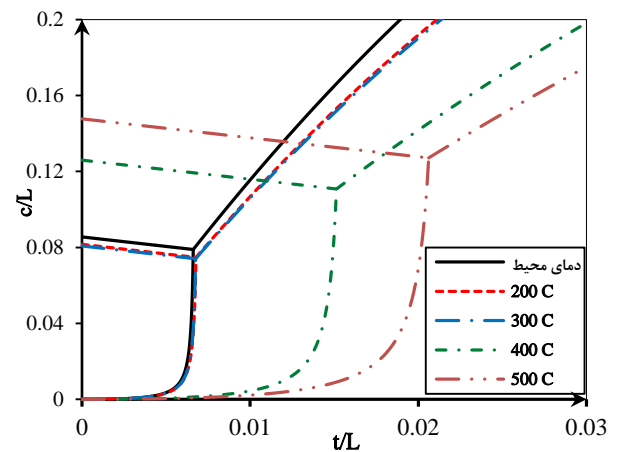


شکل ۸ مقایسه نیروی تخریب حالات مختلف بر اساس مدل گیبسون تعمیم یافته با داده‌های تجربی بر حسب دما [۱۰]

همان‌گونه که انتظار می‌رفت، بار حدى با افزایش دما کاهش یافته و برای دماهای کمتر از 300°C ، پیش‌بینی‌های نظری، مقدار بیشتری را برای نیروهای نهایی تخمین می‌زند و برای دماهای بیشتر از 300°C مقادیر کمتری را برای نیروی نهایی تخمین می‌زند. این موضوع به این دلیل است که پیش-بینی نیروی نهایی حالت تسلیم رویه و فرورفتگی به‌وسیله مدل گیبسون

شکل ۵ تاثیر دمای آزمایش را بر خطوط گذار میان حالات مختلف تخریب بر اساس مدل گیبسون تعمیم‌یافته، نشان می‌دهد. با استفاده از این شکل می‌توان دریافت که بر اثر افزایش دما، ناحیه تخریب از طریق تسلیم رویه وسیع‌تر شده و ناحیه برش هسته سهم کمتری را به‌خود اختصاص خواهد داد.

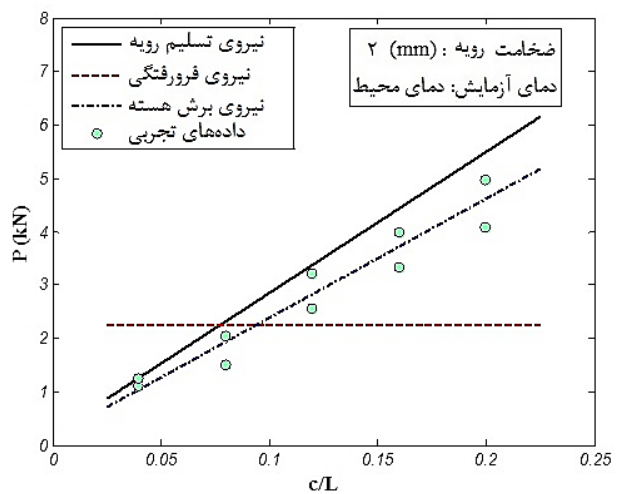
در حقیقت، این شکل بیان می‌دارد که به‌ازای ضخامت هسته مشخص، با افزایش ضخامت رویه در دماهای بالاتر، همچنان مکانیزم تخریب از طریق تسلیم رویه، برقرار است. از طرفی با افزایش دما به ازای یک ضخامت رویه مشخص، برای ایجاد تخریب از طریق فرورفتگی باید ضخامت هسته افزایش پیدا کند. بنابراین نمونه‌هایی با ضخامت رویه 2mm و ضخامت هسته 20mm در دماهای بالا، دچار خمش شده و از طریق تسلیم رویه تخریب می‌شوند.



شکل ۵ پیش‌بینی حالت تخریب اولیه در دمای محیط

با افزایش دما، استحکام رویه و هسته فومی کاهش یافته و بنابراین صفحات رویه به هنگام قرارگیری تحت بار خمشی در دماهای بالا، تمایل به خمش دارند. در صورتی که فوم آلومینیومی به حد کافی ضعیف باشد، در دمای بالا رویه فوقانی به‌سادگی دچار فرورفتگی درون هسته فومی شده و حالت تخریب در اثر فرورفتگی رخ می‌دهد.

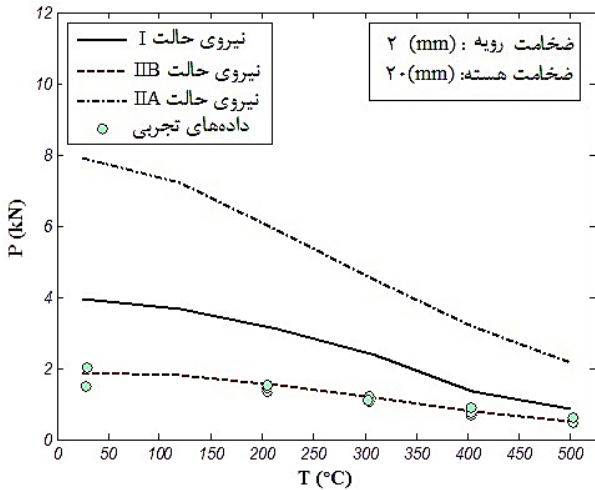
نیروهای نهایی نظری و تجربی بر اساس مدل گیبسون تعمیم یافته در شکل ۶ ارائه شده‌اند؛ این نیروها برابر بیشترین نیرو برای حالت تخریب پیش-بینی شده توسط مدل تعمیم‌یافته گیبسون است.



شکل ۶ مقایسه نیروی تخریب حالات مختلف بر اساس مدل گیبسون تعمیم یافته با داده‌های تجربی [۱۰] بر حسب ضخامت هسته

با توجه به نمودار شکل ۱۰ می‌توان دریافت که نیروی تخریب نظری در حالت تخریب I وابستگی بیشتری به ضخامت رویه نسبت به دو حالت تخریب دیگر دارد. یکی از دلایل این موضوع، نوع حالت تخریب است که در حالت تخریب I، رویه و هسته دچار خمش شده و در رویه نقاطی با تغییر شکل پلاستیک زیاد ایجاد می‌شود. این در حالی است که حالات IIA و IIB با برش هسته آغاز می‌شوند.

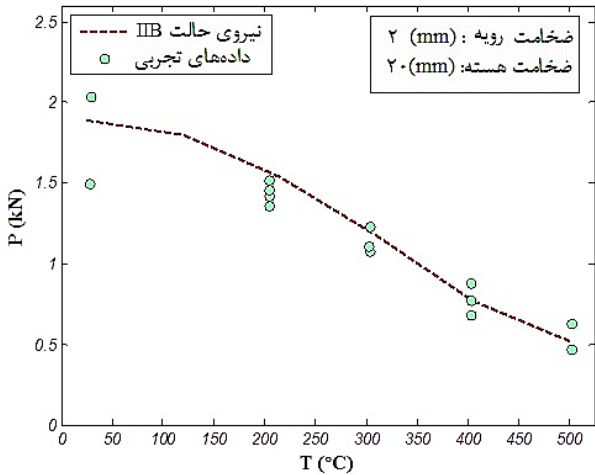
نیروی حدی حالات مختلف تخریب بر اساس مدل مونتانیینی، برای نمونه‌های تحت خمش سه نقطه‌ای در دماهای مختلف، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱ مقایسه نیروی تخریب حالات مختلف بر اساس مدل مونتانیینی با داده‌های تجربی [۱۰] بر حسب دما

همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش دما اختلاف میان نیروهای تخریب دو حالت I و IIA با داده‌های تجربی کاهش می‌یابد. در این میان همچنان حالت تخریب IIB دارای کمترین میزان اختلاف با داده‌های تجربی می‌باشد. از طرفی، همانند مدل گیبسون تعمیم‌یافته، در مدل مونتانیینی نیز بار حدی با افزایش دما کاهش یافته و برای دماهای کمتر از ۳۰۰°C، پیش‌بینی‌های نظری، مقدار بیشتری را برای نیروهای نهایی تخمین می‌زند و برای دماهای بیشتر از ۳۰۰°C مقادیر کمتری را برای نیروی نهایی تخمین می‌زند.

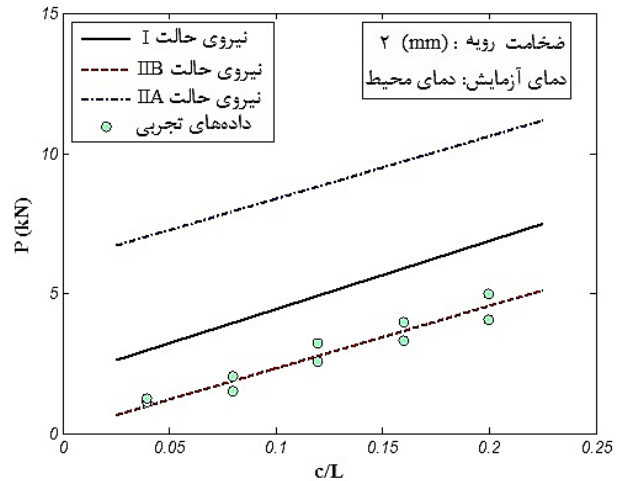
اختلاف نیروی تخریب تجربی با نیروی تخریب پیش‌بینی شده در حالت IIB توسط مدل مونتانیینی، به‌صورت واضح‌تر در شکل ۱۲ ارائه شده است.



بسیار به خصوصیات ماده تشکیل دهنده آن‌ها بستگی داشته و از طرفی، استحکام تسلیم صفحه رویه تا دمای ۳۰۰°C به آرامی افت کرده و پس از آن روند کاهشی سریع را طی می‌کند.

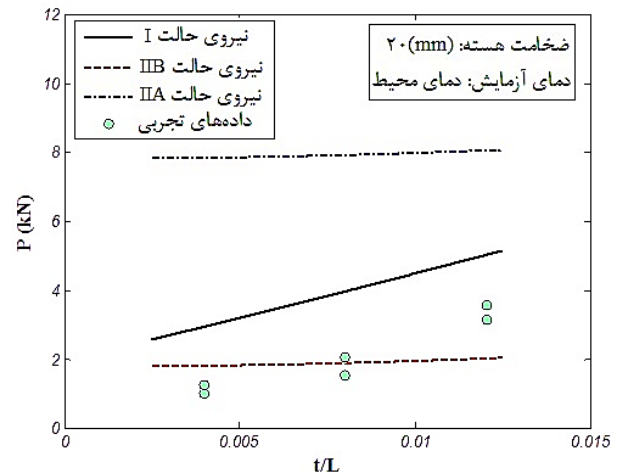
۳-۲- نمودارهای تخریب بر اساس مدل مونتانیینی

نیروهای نهایی نظری و تجربی بر اساس مدل مونتانیینی در شکل ۹ ارائه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، داده‌های تجربی مقادیری بسیار نزدیک به حالت تخریب IIB را نشان داده و اختلاف قابل توجهی با دو حالت تخریب دیگر دارند. همچنین بر اساس انتظار، نیروی تخریب با افزایش ضخامت هسته افزایش می‌یابد ولی نرخ افزایش آن به ازای حالات مختلف تخریب، متفاوت است.



شکل ۹ مقایسه نیروی تخریب حالات مختلف بر اساس مدل مونتانیینی با داده‌های تجربی [۱۰] بر حسب ضخامت هسته

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که برای دو حالت تخریب (حالات IIA و IIB) که در هر دو حالت برش هسته نقش دارد، نیروی تخریب، وابستگی بسیار کمی به ضخامت رویه دارد. از طرفی، مشاهده می‌شود که داده‌های تجربی با حالت تخریب IIA اختلاف زیادی دارند. این موضوع در حالی است که با افزایش دما، نیروی تخریب حالت I و IIA کاهش پیدا نموده و محدوده اختلاف کمتری را با حالت IIB به‌وجود می‌آورند.



شکل ۱۰ مقایسه نیروی تخریب حالات مختلف بر اساس مدل مونتانیینی با داده‌های تجربی بر حسب ضخامت رویه [۱۰]

f رویه
c هسته
y تسلیم

شکل ۱۲ مقایسه نیروی تخریب حالت IIB بر اساس مدل مونتانیی با داده‌های تجربی [۱۰] بر حسب دما

باید در نظر داشت که حالات تخریب IIA و IIB در مدل مونتانیی، علیرغم شکل ظاهری مشابه تیر پس از تخریب در دو حالت، کاملاً از یکدیگر مجزا می‌باشند. در هر دو حالت تخریب با برش هسته آغاز می‌شود؛ ولی در حالت IIB به هنگام تخریب نهایی، به علت جدایش هسته و رویه تنش‌ها آزاد می‌شوند.

در مدل مونتانیی، تغییر شکل نامتقارن تیر (علیرغم تقارن هندسی و بازگذاری) مدنظر قرار می‌گیرد و این در حالی است که در مدل گیبسون این موضوع، دارای توجیه خاصی نیست. در مدل مونتانیی در دمای بالا، نیروی تجربی حد تخریب به نیروی تخریب پیش‌بینی شده در یکی از حالات (حالت IIB) نزدیک‌تر است و این در حالی است که در مدل گیبسون در دمای بالا، نیروی تجربی در فاصله میانی دو حالت تخریب قرار گرفته است و به صراحت نمی‌توان در زمینه حالت تخریب اظهارنظر نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تخمین نیروی حد تخریب تیر ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم بر اساس خواص هندسی و فیزیکی تیر و همچنین بر اساس دما با استفاده از دو مدل متفاوت، پرداخته شد. برای انجام این کار، از دو مدل گیبسون تعمیم‌یافته و مونتانیی، جهت پیش‌بینی بار حد تخریب تیر تحت حالات مختلف استفاده شد. با توجه به نمودارهای به‌دست آمده با استفاده از هر دو مدل، مشاهده می‌شود که نیروهای تخریب نظری، با افزایش ضخامت هسته و رویه افزایش یافته و با افزایش طول تیر کاهش می‌یابند، که این موضوع بر اساس عوامل موجود در تعریف سختی خمشی و برشی قابل انتظار است. باید به خاطر داشت که در هر دو مدل اثرات جدایش پیوند میان هسته و رویه در نظر گرفته نشد. همچنین اثرات استحکام بالای چسب در افزایش مقاومت الاستیک خمشی تیر نیز نادیده گرفته شد. همچنین باید خاطر نشان نمود که ممکن است در دماهای بالا اثرات دیگری از جمله جدایش لایه‌های هسته و رویه نیز می‌تواند در انحراف داده‌های تجربی از داده‌های نظری موثر واقع شود.

۵- فهرست علائم

L طول کل تیر (m)
b عرض تیر (m)
t ضخامت صفحات رویه (m)
c ضخامت هسته (m)
L طول ناحیه تحت اثر بار (m)
H فاصله سر آزاد تیر از تکیه‌گاه‌ها (m)
E مدول یانگ ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
G مدول برشی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
P بار اعمالی (kgms^{-2})

علائم یونانی

σ استحکام نرمال ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
 τ استحکام برشی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)

زیرنویس‌ها

۶- مراجع

- [1] Harte, A.-M., N.A. Fleck, and M.F. Ashby, Sandwich panel design using aluminum alloy foam. *Advanced Engineering Materials*(Germany), 2000. 2(4): pp. 219-222.
- [2] Hakamada, M., et al., Compressive deformation behavior at elevated temperatures in a closed-cell aluminum foam. *Materials transactions*, 2005. 46(7): pp. 1677.
- [3] Aly, M.S., Behavior of closed cell aluminium foams upon compressive testing at elevated temperatures: Experimental results. *Materials Letters*, 2007. 61(14): pp. 3138-3141.
- [4] Triantafillou, T.C. and L.J. Gibson, Failure mode maps for foam core sandwich beams. *Materials Science and Engineering*, 1987. 95(0): pp. 37-53.
- [5] McCormack, T.M., et al., Failure of sandwich beams with metallic foam cores. *International Journal of Solids and Structures*, 2001. 38(28-29): pp. 4901-4920.
- [6] Crupi, V. and R. Montanini, Aluminium foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending. *International Journal of Impact Engineering*, 2007. 34(3): pp. 509-521.
- [7] Li, Z., et al., Effect of temperature on the indentation behavior of closed-cell aluminum foam. *Materials Science and Engineering: A*, 2012. 550: pp. 222-226.
- [8] Ashby MF, Evans AG, Fleck NA, Gibson LJ, Hutchinson JW, Wadley HNG. *Metal foams: a design guide*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2000.
- [9] Yu, J., et al., Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams with closed-cell aluminum-foam core in three-point bending. *International Journal of Impact Engineering*, 2008. 35(8): pp. 885-894.
- [10] Li, Z., et al., Deformation and failure mechanisms of sandwich beams under three-point bending at elevated temperatures. *Composite Structures*, 2014. 111: pp. 285-290.
- [11] Kesler O, Gibson LJ. Size effects in metallic foam core sandwich beams. *Mater Sci. Eng.* 2002; A326:228-34.