



مدل سازی عددی پانل ساندویچی با رویه‌های مختلف و گرادیان هسته تحت ضربه انفجاری

محمد سلوکی*

دانشجو دکتری مهندسی مکانیک گرایش طراحی و کاربردی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
 مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

چکیده

پانل‌های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم جاذب‌های انرژی مناسب برای کاربردهای حفاظت در برابر ضربه نظیر پانل‌های ساختمانی سبک، مواد بسته‌بندی و تجهیزات جاذب انرژی هستند. در این پژوهش، مدهای و اماندگی و تغییر شکل پانل‌های ساندویچی در برابر ضربه‌های انفجاری به صورت عددی بررسی و با نتایج تجربی مقایسه شده است. بارگذاری انفجاری روی پانل ساندویچی با هسته فوم یکنواخت و با مواد طبقه‌بندی تابعی و رویه‌های با جنس آلومینیوم ۵۱۸۲، فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و CFRP صورت گرفته است. مدهای تغییر شکل رویه بالایی، هسته فومی و رویه پایینی با یک روش معین تحلیل شده است. در این پژوهش نشان داده شده است که مدهای تغییر شکل به شدت ضربه، جنس رویه‌ها و گرادیان هسته ساندویچ وابسته است. براساس نتایج پژوهش، تغییر شکل عرضی رویه پایینی به‌طور خطی با شدت ضربه افزایش می‌یابد. در یک شدت ضربه معین (جرم ماده منفجره ۳۰ گرم) و جنس فلزی یکسان رویه پایینی، مقاومت در برابر انفجار نمونه پانل ساندویچی با رویه بالایی CFRP، ۱۹ درصد بالاتر از نمونه ساندویچی با رویه بالایی فلزی است. مقاومت در برابر انفجار نمونه پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی آلومینیوم و جنس رویه پایینی فولادی نسبت به نمونه پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی فولادی و جنس رویه پایینی آلومینیوم ۶ درصد بالاتر است. مقاومت در برابر انفجار نمونه ساندویچی با گرادیان مثبت هسته ساندویچ (چگالی هسته به‌طور خطی در جهت بارگذاری انفجاری کاهش می‌یابد) بالاتر از نمونه پانل ساندویچی با گرادیان منفی هسته ساندویچ است. با مقایسه کردن هسته فوم یکنواخت و هسته با مواد طبقه‌بندی تابعی با اختلاف چگالی بالا، مقاومت انفجاری بالاتری از خود نشان می‌دهد. در حالی که در اختلاف چگالی کم مقاومت انفجاری ضعیف‌تری دارد. در این پژوهش، با استفاده از نرم افزار آباکوس، بارگذاری انفجاری پانل ساندویچی با هسته فوم یکنواخت و مواد طبقه‌بندی تابعی و جنس رویه‌های متفاوت شبیه‌سازی شده است.

کلمات کلیدی: پانل ساندویچی؛ هسته فوم با مواد طبقه بندی تابعی؛ بارگذاری انفجاری؛ پاسخ دینامیکی.

Numerical modeling of sandwich panel with different layers and core gradient under explosive impact

Mohammad Solooki

Ph.D. Student, Mech. Eng., Bu Ali Sina Univ., Hamedan, Iran

Abstract

Aluminum foam core sandwich panels are suitable energy absorbers for impact protection applications such as light building panels, packaging materials and energy absorbing equipment. In this research, the modes of retardation and deformation of sandwich panels against Explosive impacts have been numerically investigated and compared with experimental results. Explosive impacts has been done on a sandwich panel with uniform foam core and FGM, and tops with aluminum 5182, stainless steel 304 and CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Plastic). The deformation modes of the top face sheet, the foam core and the bottom face sheet have been analyzed with a certain method. In this research, it has been shown that the deformation modes are dependent on the intensity of the impact, the material of the face sheets and the gradient of the sandwich core. Based on the results of the research, the transverse deformation of the bottom face sheet increases linearly with the intensity of the impact. At a certain impact intensity (The mass of the Explosive is 30 gr) and the same metal material of the bottom face sheet, the resistance to Explosive of the sandwich panel sample with CFRP top face sheet is 19% higher than the sandwich sample with metal top face sheet. The resistance to Explosive of the sandwich panel sample with the top material of aluminum and the bottom material of steel is 6% higher than the sample of the sandwich panel with the top material of steel and the bottom material of aluminum. The resistance to the Explosive of a sandwich sample with a positive sandwich core gradient (core density decreases linearly in the direction of Explosive impacts) is higher than a sandwich panel sample with a negative sandwich core gradient. By comparing the uniform foam core and the FGM core with a high density difference, it shows a higher Explosive resistance. While in low density difference, it has weaker Explosive resistance. In this research, by using ABAQUS software, the Explosive impacts of sandwich panel with foam core and FGM, and the materials of different face sheets have been simulated.

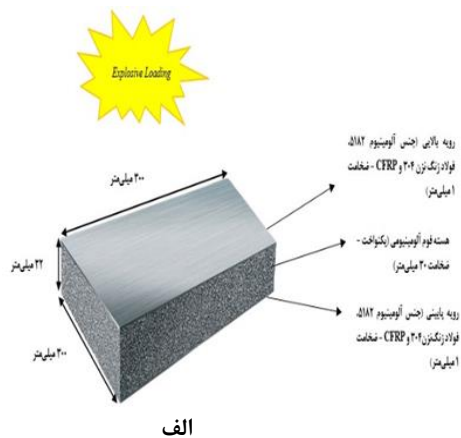
Keywords: Sandwich panel; FGM foam core; Explosive loading; Dynamic response.

۱- مقدمه

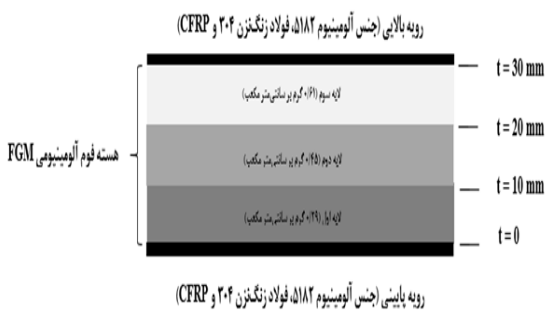
سازه‌های ساندویچی عموماً از دو رویه سفت و محکم و یک هسته نرم تشکیل شده‌اند. یکی از اجزای مهم پانل‌های ساندویچی، هسته است که موادی با جاذب انرژی و سبک وزن است، مثل فوم‌ها [۱،۲]، لانه‌زنبوری [۳،۴]. استحکام و ظرفیت جذب انرژی بالا و دیگر خواص مکانیکی بالا، منجر به استفاده گسترده سازه‌های ساندویچی در کاربردهای مهندسی مانند هوافضا [۶]، اتومبیل [۷] و کاربردهای حفاظتی [۸] شده است. در چند سال اخیر، سازه‌های ساندویچی در برابر بارگذاری‌های انفجاری استفاده شده‌اند. در بعضی از مطالعه‌های اخیر پاسخ‌های انفجاری سازه‌های ساندویچی یا کامپوزیتی با هسته یکنواخت از طریق حل تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی استخراج شده‌است [۹-۲۰]. فلک و دشیپند^۱ [۹] و کیو^۲ [۱۰،۱۱] روند تغییرشکل پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری از طریق حل تحلیلی بررسی کردند. انواع مدهای واماندگی و تغییرشکل پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری، مانند خمش و پارگی رویه‌ها، برش و فشار هسته از طریق آزمایش توصیف می‌شود [۱۲،۱۵]. اثرات بعضی از پارامترهای کلیدی، مانند شرایط بارگذاری، ضخامت رویه‌ها و چگالی هسته روی مقاومت در برابر انفجار پانل‌های ساندویچی با هسته یکنواخت به‌طور گسترده از طریق آزمایش و حل عددی بررسی شده‌است [۱۶-۲۰]. مواد طبقه‌بندی تابعی^۳ یعنی موادی که خواص مکانیکی طبق یک الگو معین، تغییر می‌کند، فضای طراحی بزرگتری نسبت به هسته یکنواخت دارد [۲۱-۲۵]. فوم‌ها دارای خواصی مانند سبک وزن بودن و جاذب انرژی است؛ بنابراین فوم‌های طبقه‌بندی تابعی یک انتخاب خوبی برای مواد هسته سازه‌های ساندویچی است. اخیراً، در بعضی از پژوهش‌ها اثر جذب انرژی در مواد فومی طبقه‌بندی تحت بارگذاری انفجاری بررسی شده‌است. حاتمی و همکاران [۲۶] به بررسی عددی و تجربی اثر تقویت‌های طولی بر جاذب‌های استوانه‌ای و مخروطی تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداختند. نمونه‌ها تحت بارگذاری سقوط آزاد توسط چکش قطره‌ای قرار گرفتند و جذب انرژی، نیروی پیک اولیه، نیروی متوسط و طول خرد شدن آنها محاسبه شد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تعداد تقویت‌ها، طول لهیدگی کاهش و نیروی پیک اولیه افزایش می‌یابد. حاتمی و همکاران [۲۷] به بررسی تجربی اثرات بارگذاری ضربه‌ای بر صفحات مستطیلی مسطح کامپوزیتی خود تراکم فیبری با ورق فولادی منبسط شده پرداختند. مقاومت‌های کششی، فشاری و خمشی بالا این کامپوزیت‌ها را برجسته‌تر کرده است. در یک کار آزمایشی

جامع، با استفاده از چهار طرح اختلاط پایه، ۶۴ پانل کامپوزیت مستطیلی با مساحت ۱۰۰ میلی‌متر مربع و ضخامت‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ میلی‌متر ساخته شد و با بارگذاری ضربه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. لی^۴ [۲۸] پاسخ مقاومت انفجاری استوانه‌های ساندویچی با هسته‌های فومی طبقه‌بندی فلزی نشان داده است. نتایج نشان داد که سازه‌های با هسته طبقه‌بندی عملکرد بهتری نسبت به هسته یکنواخت در برابر مقاومت انفجاری دارد. فرمانی و همکاران [۲۹] به بررسی عددی و تجربی جذب انرژی و تغییرشکل پانل‌های ساندویچی فلزی لوله‌ای شکل با هسته لوله‌های عمودی تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. سازه‌ها با استفاده از لوله‌های آلومینیومی با ارتفاع مساوی و با قطرهای خارجی ۱۲ و ۱۶ (میلی-متر) ساخته شده است که بین صفحات بالا و پایین عمود بر سطوح صفحات تعبیه شده‌اند. از نتایج مشخص شد که حداکثر کار پلاستیک برای سازه‌هایی با ضخامت صفحه ۱/۲ و ۲ میلی‌متر به ترتیب ۸۵۰ و ۳۳۲ ژول به‌دست آمده‌است. لی^۵ [۳۰] به بررسی عددی پاسخ دینامیکی ورق‌های کروی ساندویچی با هسته‌های فوم فلزی تحت بارگذاری انفجاری داخلی پرداخت. ژینگ^۶ [۳۱] آزمایش‌های انفجاری روی دو ورق استوانه‌ای ساندویچی با هسته‌های فوم فلزی انجام داده است. در یک طبقه‌بندی از مواد سبک وزن، کامپوزیت‌های CFRP به‌عنوان رویه‌های سازه‌های ساندویچی استفاده می‌شود [۳۲]. مدهای واماندگی و تغییرشکل رویه‌های CFRP کاملاً با رویه‌های فلزی تحت بارگذاری انفجاری، متفاوت است [۳۳]. حال با توجه به اینکه در پژوهش‌های قبلی اثرات جنس رویه‌ها و اثرات مختلف گرادیان هسته ساندویچ روی پاسخ دینامیکی و مدهای تغییرشکل کمتر بررسی شده‌است، در نتیجه هدف این پژوهش نشان‌دادن اثرات جنس رویه‌های متفاوت و گرادیان هسته ساندویچ روی مدهای تغییرشکل و پاسخ دینامیکی پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری انفجاری به‌صورت عددی و مقایسه با نتایج تجربی است. در این پژوهش، بررسی پارامترهای مختلف مانند پیکربندی‌های مختلف نمونه‌های پانل ساندویچی، مانند هسته یکنواخت با جنس رویه‌های مختلف و هسته ساندویچی با مواد درجه‌بندی تابعی با گرادیان‌های هسته متفاوت و هم‌چنین شدت ضربه انفجار روی مقاومت در برابر انفجار پانل‌های ساندویچی بررسی شده‌است. براساس نتایج پژوهش، تغییر شکل عرضی رویه پایینی به‌طور خطی با شدت ضربه افزایش می‌یابد. در یک شدت ضربه معین (جرم ماده منفجره ۳۰ گرم) و جنس فلزی یکسان رویه پایینی، مقاومت در برابر انفجار نمونه پانل ساندویچی با رویه بالایی

^۴Liu^۵Li^۶Jing^۱ Fleck & Deshpande^۲ Qiu^۳Functionally – Graded Foam



الف



ب

۳- روند مدل‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی ضربه انفجاری بر روی پانل ساندویچی از نسخه سال ۲۰۱۹ نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. انتخاب صحیح مدل ماده و همچنین اعمال صحیح شرایط فیزیکی مساله از قبیل شرایط مرزی و استفاده از سطوح تماس و المان‌های متناسب با نوع مساله، امکان انجام شبیه‌سازی دقیق به کمک این نرم‌افزار را فراهم می‌کند.

۳-۱- مواد و خواص

جنس مواد استفاده شده در پانل‌ها به شرح ذیل می‌باشند:

الف- ورق فولاد ضد زنگ ۳۰۴

برای جنس رویه‌ها از ورق فولاد ضد زنگ ۳۰۴ استفاده شده است. اندازه رویه $1\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ است. در جدول ۱

CFRP، ۱۹ درصد بالاتر از نمونه ساندویچی با رویه بالایی فلزی است. مقاومت در برابر انفجار نمونه پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی آلومینیوم و جنس رویه پایینی فولادی نسبت به نمونه پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی فولادی و جنس رویه پایینی آلومینیوم ۶ درصد بالاتر است. مقاومت در برابر انفجار نمونه ساندویچی با گرادیان مثبت هسته ساندویچ (چگالی هسته به‌طور خطی در جهت بارگذاری انفجاری کاهش می‌یابد) بالاتر از نمونه پانل ساندویچی با گرادیان منفی هسته ساندویچ است. با مقایسه کردن هسته فوم یکنواخت و هسته با مواد طبقه‌بندی تابعی با اختلاف چگالی بالا، مقاومت انفجاری بالاتری از خود نشان می‌دهد.

۲- تعریف مسئله

طی سه دهه اخیر پژوهش‌های فراوانی در زمینه مدهای واماندگی و تغییر شکل پانل‌های ساندویچی در برابر ضربه‌های انفجاری صورت گرفته است. نتایج اغلب این پژوهش‌ها بهبود مقاومت در برابر انفجار پانل‌های ساندویچی در برابر ضربه‌های انفجاری بود؛ هم‌چنین طی این سال‌ها پژوهش‌های فراوانی درباره‌ی اثرات ضخامت و نوع هسته، ضخامت لایه‌ها، نوع ضربه انفجاری بر روی مقاومت انفجاری پانل ساندویچی انجام شده است؛ اما سازه‌هایی که در آن‌ها ترکیبی از لایه‌هایی از جنس آلومینیوم ۵۱۸۲، فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و CFRP به‌عنوان رویه و هسته فوم یکنواخت و FGM به‌عنوان هسته پانل ساندویچی که در این پژوهش پیشنهاد شده، تاکنون بررسی نشده است و پیش‌بینی می‌شود که استفاده از این ترکیب باعث افزایش مقاومت در برابر انفجار پانل‌های ساندویچی شود. از این رو استفاده ترکیبی از لایه‌هایی از جنس آلومینیوم ۵۱۸۲، فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و CFRP به‌عنوان رویه و هسته فوم یکنواخت و FGM و هم‌چنین بررسی تاثیر گرادیان هسته بر روی مقاومت در برابر انفجار پانل‌های ساندویچی را می‌توان به‌عنوان نوآوری این پژوهش مطرح نمود. ساختار پانل‌های ساندویچی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، در شکل ۱ نشان داده شده است.

۹۱۶	دمای ذوب
۳۰۰	دمای تغییر حالت
۰/۰۰۰۶	C
۰/۰۰۱	ϵ_0
ضرایب آسیب جانسون - کوک آلومینیوم ۵۱۸۲	
۰/۰۳۳۶	D_1
۰/۶۹۱	D_2
-۱/۶۱	D_3
۰/۰۲۳	D_4
.	D_5

پ- لمینت CFRP

برای جنس رویه‌ها از لمینت CFRP هم استفاده شده‌است. اندازه رویه $1\text{mm} \times 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ است. در جدول ۳ خواص مکانیکی، ضرایب مدل ماده و آسیب این ورق آورده شده‌است. در شبیه‌سازی‌ها از مدل ماده و آسیب هاشین برای ورق لمینت CFRP استفاده شده‌است.

جدول ۳- خواص مکانیکی لمینت CFRP [۳۵].

خواص مکانیکی لمینت CFRP	
۱۵۴۴	ρ
۱۸۱	E_1
۱۰/۳	E_2
۰/۳	ν_{12}
۷/۱۷	G_{12}
۴/۱۹	G_{13}
۴/۱۹	G_{23}
ضرایب آسیب هاشین برای لمینت CFRP	
۲/۹۵	X_T
۱/۵۷	X_C
۰/۰۷۹	Y_T
۰/۱۹	Y_C
۰/۱۴	S_T
۰/۰۸۸	S_C
ضرایب انرژی شکست هاشین برای لمینت CFRP	
۴۶/۲۳	G_{XT}
۴۳/۹۶	G_{XC}
۲/۸۲	G_{YT}
۲/۳۰	G_{YC}

در شکل ۲ نمودار تنش - کرنش سه جنس آلومینیوم ۵۱۸۲، فولاد ضدزنگ ۳۰۴ و لمینت CFRP رسم شده‌است.

خواص مکانیکی، ضرایب مدل ماده و آسیب این ورق آورده شده است. در شبیه‌سازی‌ها از مدل ماده و آسیب جانسون - کوک برای ورق فولاد ضد زنگ ۳۰۴ استفاده شده‌است.

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد ضد زنگ ۳۰۴ [۳۴].

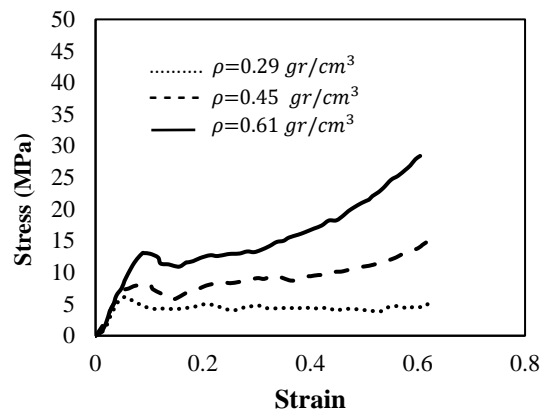
خواص مکانیکی فولاد ضد زنگ ۳۰۴	
۸۰۰۰	ρ
۱۹۳	E
۰/۳	ν
ضرایب جانسون - کوک فولاد ضد زنگ ۳۰۴	
۳۱۰	A
۱۰۰۰	B
۰/۶۵	N
۱	M
۱۶۷۳	دمای ذوب
۲۹۳	دمای تغییر حالت
۰/۰۷	C
۰/۰۱	ϵ_0
ضرایب آسیب جانسون - کوک فولاد ضد زنگ ۳۰۴	
۲	D_1
۱/۹۳۶	D_2
-۲/۹۶۹	D_3
-۰/۰۶	D_4
۱/۱۰۴	D_5

ب- ورق آلومینیوم ۵۱۸۲

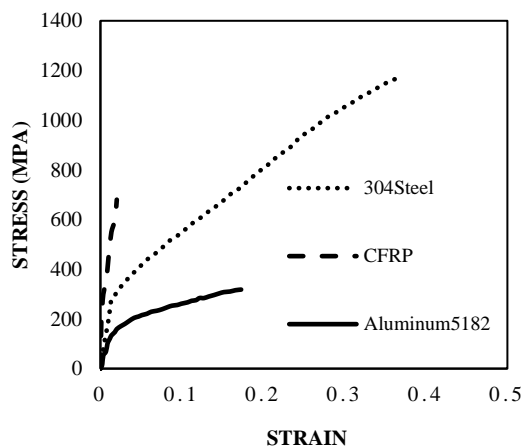
جنس دومی که برای رویه‌ها استفاده شده است، ورق آلومینیوم ۵۱۸۲ است. اندازه رویه $1\text{mm} \times 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ است. در جدول ۲ خواص مکانیکی، ضرایب مدل ماده و آسیب این ورق آورده شده‌است. در شبیه‌سازی‌ها از مدل ماده و آسیب جانسون - کوک برای ورق آلومینیوم ۵۱۸۲ استفاده شده‌است.

جدول ۲- خواص مکانیکی آلومینیوم ۵۱۸۲ [۳۴].

خواص مکانیکی آلومینیوم ۵۱۸۲	
۲۶۵۰	ρ
۶۹/۳	E
۰/۳	ν
ضرایب جانسون - کوک آلومینیوم ۵۱۸۲	
۷۷/۵	A
۵۵۷/۲۲	B
۰/۵۳	n
۲/۶۶	m



شکل ۳- نمودار تنش - کرنش هسته فوم کراشبیبل برای چگالی‌های متفاوت [۳۷].



شکل ۲- نمودار تنش - کرنش سه جنس آلومینیوم ۵۱۸۲، فولاد ضدزنگ ۳۰۴ و لمینت CFRP [۳۴،۳۵].

ث- ماده منفجره

چگالی ماده منفجره 1140 kg/m^3 و سرعت منفجر شدن^۲ 4600 m/s است. ضریب تبدیل ماده منفجره به TNT برابر با 0.7 است. در جدول ۵ ضرایب معادله JWL^۳ برای معادله حالت ماده منفجره مشخص شده است [۳۸].

جدول ۵- ضرایب معادله JWL [۳۸].

۴۶۰۰	سرعت انفجار
۳۷۳/۳	C_1
۳/۷۴	C_2
۴/۱۵	R_1
۰/۹	R_2
۰/۳۵	ω
۱۱۴۰	ρ_0
۶۰۰۰۰۰	انرژی اولیه در واحد حجم

۳-۲- کدگذاری نمونه‌ها

با توجه به تنوع پانل‌های ساندویچی مورد استفاده در این پژوهش (از نظر لایه‌چینی و گرادیان‌های مختلف هسته)، برای اختصار از کدهای ارائه شده در جدول ۶ برای معرفی آن‌ها استفاده شده است. در جدول ۶، UD45، GD-P، GD-N به ترتیب معرف چگالی یکنواخت (450 kg/m^3)، چگالی درجه‌بندی شده با گرادیان مثبت لایه‌ها و چگالی درجه‌بندی شده با گرادیان منفی لایه‌ها است. مدول یانگ هسته FGM می‌توان از طریق تابع توانی به دست آورد.

ت- فوم آلومینیوم

برای جنس هسته از فوم آلومینیوم کراشبیبل^۱ استفاده شده است. اندازه رویه $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ است. هسته شامل هسته یکنواخت به ضخامت 30 میلی‌متر و چگالی 450 kg/m^3 و هسته سه‌لایه با ضخامت‌های یکسان 10 میلی‌متر است. چگالی هسته FGM در شکل ۱-ب مشخص شده است. در جدول ۴ خواص مکانیکی هسته فومی آورده شده است. در شکل ۳ نمودار تنش - کرنش فوم آلومینیوم کراشبیبل رسم شده است.

جدول ۴- خواص مکانیکی هسته فوم آلومینیوم [۳۶].

۲۰۰ - ۷۰۰	ρ
۲/۱۴۳	E
۰/۲۷	ν
۰	نسبت پواسون پلاستیکی
۱	نرخ تنش تسلیم فشاری

^۳ Jones-Wilkins-Lee

^۱ Crushable

^۲ Detonation velocity

که در رابطه ۲، E_1 و E_2 به ترتیب مدول یانگ در پایین‌ترین سطح ورق FGM ($z=-h/2$) و در بالاترین سطح ورق FGM ($z=h/2$) است. تغییرات مدول یانگ در راستای ضخامت صفحه هدفمند برحسب توزیع توانی در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که مدول یانگ برای $1 < p$ در نزدیکی سطح پایین ورق سریعاً تغییر کرده، یا به عبارتی خواص کسر زیادی از ضخامت هسته تمایل به خواص رویه پایین پیدا می‌کند و برای $p < 1$ در نزدیکی سطح ورق بالایی، این روند تمایل به عکس دارد.

در این حالت کسر حجمی صفحه هدفمند به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۸]:

$$g(z) = \left(\frac{z + h/2}{z}\right)^p \quad (1)$$

که در رابطه ۱، p از پارامترهای ماده و h ضخامت هسته است. بنابراین هر یک از خواص لایه‌ها را می‌توان به صورت ترکیبی از کسر حجمی و خواص رویه‌ها نوشت. برای این منظور مدول یانگ به صورت زیر تعریف می‌شود:

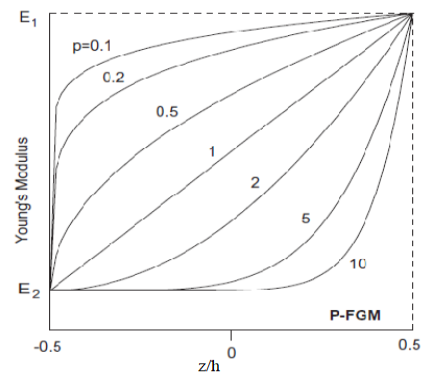
$$E(z) = g(z)E_1 + [1 - g(z)]E_2 \quad (2)$$

جدول ۶- طبقه‌بندی نمونه‌های پانل ساندویچی.

نمونه‌ها	جنس رویه‌ها		چگالی هسته			میانگین چگالی هسته	گرادیان چگالی لایه‌ها	جرم سازه
	بالایی	پایینی	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳			
AL-UD45-AL	AL	AL	-	۰/۴۵	-	۰/۴۵	۰	۱۶۹۲
AL-UD45-ST	AL	Steel	-	۰/۴۵	-	۰/۴۵	۰	۲۱۶۷
AL-UD45-CF	AL	CFRP	-	۰/۴۵	-	۰/۴۵	۰	۱۵۷۶
ST-UD45-AL	Steel	AL	-	۰/۴۵	-	۰/۴۵	۰	۲۱۶۷
ST-UD45-ST	Steel	Steel	-	۰/۴۵	-	۰/۴۵	۰	۲۶۴۲
ST-UD45-CF	Steel	CFRP	-	۰/۴۵	-	۰/۴۵	۰	۲۰۵۲
CF-UD45-AL	CFRP	AL	-	۰/۴۵	-	۰/۴۵	۰	۱۵۷۶
CF-UD45-ST	CFRP	Steel	-	۰/۴۵	-	۰/۴۵	۰	۲۰۵۲
CF-UD45-CF	CFRP	CFRP	-	۰/۴۵	-	۰/۴۵	۰	۱۴۶۱
GD-P	AL	AL	۰/۲۹	۰/۴۵	۰/۶۱	۰/۴۵	۰/۰۱۶	۱۶۹۲
GD-N	AL	AL	۰/۶۱	۰/۴۵	۰/۲۹	۰/۴۵	-۰/۰۱۶	۱۶۹۲

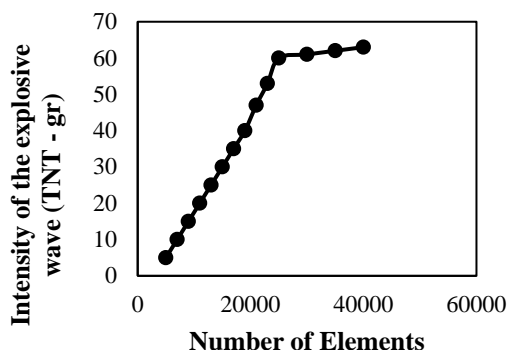
۳-۳- شرایط مرزی و اولیه

در شبیه‌سازی‌ها، درجات آزادی و چرخش‌های تمام لبه‌های بیرونی هدف در تمام جهات مقید شدند. در این مدل از شرط مرزی ENCASTRE استفاده شده است (شکل ۵).

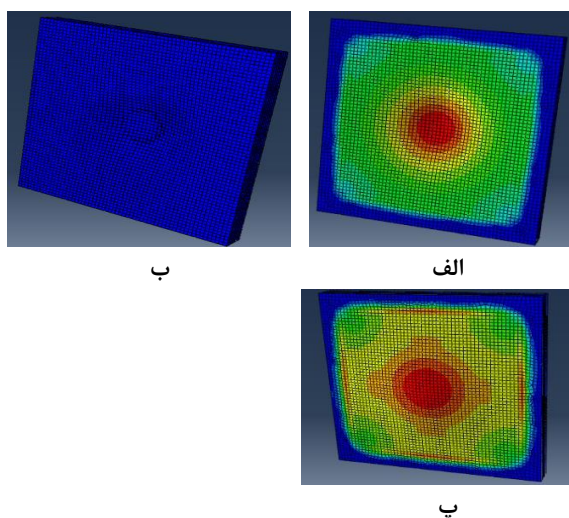


شکل ۴- تغییرات مدول یانگ در یک صفحه FGM [۳۸].

به معیار مورد نظر حذف می‌شوند، لذا نمی‌توان پلاگ‌های ناشی از برخورد را مشاهده نمود.



شکل ۶ - تغییرات شدت موج انفجار برحسب تعداد المان‌های هدف

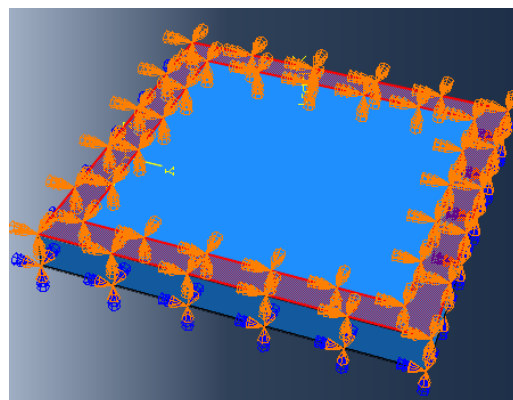


شکل ۷ - مدل اجزا محدود و اعمال موج انفجار بر روی نمونه ST-UD45-Al-40g (الف) رویه بالایی (ب) هسته یکنواخت (پ) رویه پایینی

۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج و مدهای واماندگی و تغییرشکل اجزای پانل ساندویچی از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه و بررسی شده است.

۴-۱- مدهای واماندگی و تغییرشکل پانل ساندویچی



شکل ۵- شرایط مرزی پانل ساندویچی

۳-۴- تعریف تماس

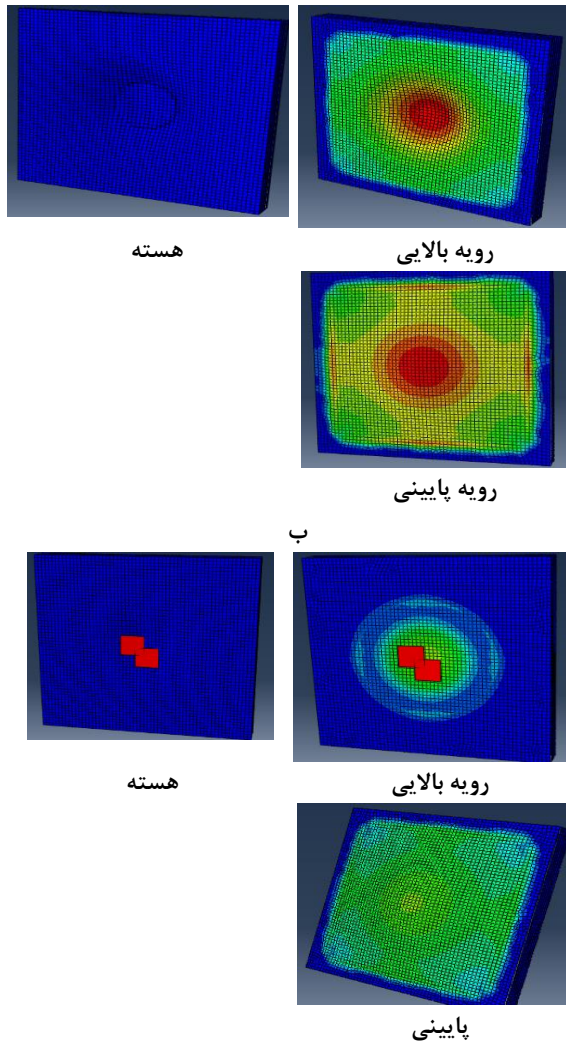
در شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس، در ماژول اینترکشن^۱ نوع تماس و روش انفجار و جرم ماده منفجرشونده را برحسب مقدار معادل TNT مشخص می‌شود. نوع تماس انتخاب شده از نوع Incident wave و روش انفجار کانوپ^۲ است.

۳-۵- المان‌بندی و همگرایی شبکه

برای کم کردن هزینه شبیه‌سازی و داشتن دقت کافی نیاز است که شبکه‌بندی به‌نحو درستی انجام شود. به‌این منظور، شبکه‌های اطراف محل برخورد موج انفجار با ابعاد کوچک‌تر ایجاد می‌شوند و این شبکه هر چه از محل برخورد فاصله می‌گیرد، با نسبتی مشخص بزرگتر می‌شود. حال باید تعداد مناسب المان‌های این شبکه را مشخص نمود. در ابتدا تعداد المان‌ها به‌دلخواه انتخاب و شبیه‌سازی انجام می‌شود. سپس تعداد المان‌ها تا جایی افزایش داده می‌شود که خروجی مساله مقداری تقریباً ثابت و مستقل از شبکه‌بندی شود که به این عمل همگرایی پاسخ شبکه گفته می‌شود. برای مطالعه همگرایی شبکه، از AL-UD45-AL استفاده شده است. نتایج بررسی همگرایی شبکه در شکل ۶ ارائه شده است. تعداد المان‌های هدف ۲۰۵۰۰ المان و نوع المان‌های استفاده شده برای رویه‌ها و هسته از نوع SOLID و C3D8T است. در این شبکه‌بندی برای رویه‌ها از المان‌های با شکل QUAD - STRUCTURED و برای هسته از المان‌های با شکل HEX-DOMINATED (SWEEP) استفاده شده است. در شکل ۷ مدل اجزا محدود و نحوه اعمال موج انفجار در نمونه ST-UD45-Al-40g نشان داده شده است. کل زمان موج انفجار ۰/۰۰۱۳ ثانیه است. از آنجا که برای از بین رفتن المان‌ها در مسیر موج انفجار از تکنیک فرسایش المان استفاده شده است، المان‌ها پس از رسیدن

² Conwep

¹ Interaction



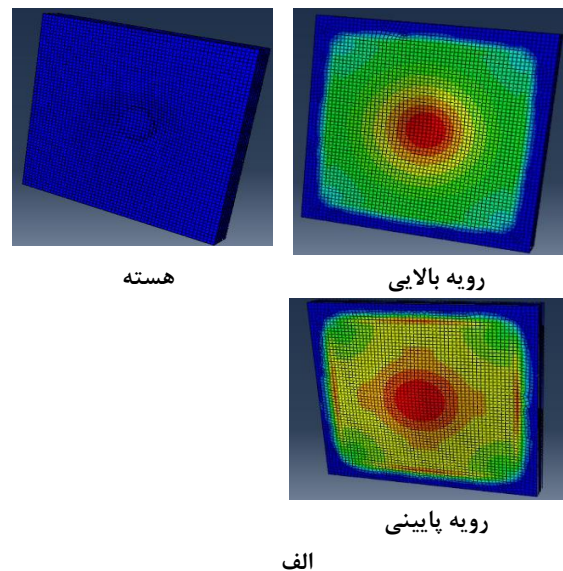
شکل ۸ - مدهای واماندگی و تغییر شکل پانل‌های ساندویچی (الف) مد اول (نمونه ساندویچی ST-UD45-Al-40g) (ب) مد دوم (نمونه ساندویچی Al-UD45-Al-50g) (پ) مد سوم (نمونه ساندویچی GD-L-50g)

جدول ۷ مدهای واماندگی تمام حالات پانل ساندویچی با رویه‌های فلزی را نشان می‌دهد. از نتایج به‌دست آمده نتیجه می‌شود که با افزایش جرم ماده منفجره، از مد ۱ به مد ۳ تغییر مد خواهیم داشت. کدهای موجود در جدول ۷:

^۱ID: تغییر شکل فرورفتگی بدون گسیختگی
^۲TT: پارگی عرضی
^۳PT: پتالینگ

تغییر شکل دائمی رویه‌ها با شدت ضربه وارد بر پانل ساندویچی رابطه خطی دارد. شدت ضربه براساس جرم معادل ماده منفجره TNT مشخص و اعمال می‌شود. مثلاً نمونه ساندویچی ST-UD45-CF-50g معرف این است که رویه بالایی از جنس فولاد ۳۰۴، هسته یکنواخت با چگالی 450 kg/m^3 ، رویه پایینی از جنس لمینت CFRP و جرم معادل ماده منفجره TNT برابر با ۵۰g است. سازه‌های ساندویچی و کامپوزیتی معمولاً در برابر انفجار مخرب مقاومت انفجاری خوبی دارند و انرژی زیاد جذب می‌کنند [۴۰]. مدهای واماندگی و تغییر شکل پانل‌های ساندویچی به ظرفیت جذب انرژی پانل وابسته است؛ بنابراین با بررسی مدهای واماندگی پانل‌های ساندویچی می‌توان سازه‌های کامپوزیتی و ساندویچی با مقاومت انفجاری بالاتری ساخت. مدهای واماندگی و تغییر شکل پانل‌های ساندویچی تحت ضربه‌های انفجاری مختلفی به‌دست می‌آید. مدهای واماندگی و تغییر شکل پانل‌های ساندویچی با رویه‌های فلزی می‌توان به سه مد تقسیم‌بندی کرد:

مد ۱) تغییر شکل‌های بزرگ همراه با اندکی فشردگی موضعی هسته
 مد ۲) تغییر شکل‌های بزرگ همراه با فشردگی بیشتری از هسته
 مد ۳) تغییر شکل‌های بزرگ همراه با پارگی رویه بالا و هسته فوم
 شکل ۸ این سه نوع مد برای پانل‌های ساندویچی با رویه‌های فلزی نشان می‌دهد [۳۹].



الف

³ Petal-like Tearing

¹ Indentation Deformation without rupture

² Transverse Tearing

ST-UD45-ST-70g	مد ۲	ID	CD - SC	PD
GD-P-30g	مد ۱	ID	CD	PD
GD-P-40g	مد ۲	ID	FT	PD
GD-P-50g	مد ۳	ID	CF	PD
GD-N-30g	مد ۲	ID	CD	PD
GD-N-40g	مد ۲	ID	CD	PD
GD-N-50g	مد ۳	TT	CD - SC	PD

CD^۱: تغییر شکل فشاری بدون ترک‌های محیطی

CD-SC^۲: تغییر شکل فشاری همراه با ترک‌های کوچک

FC-LC^۳: له شدن کامل همراه با ترک‌های بزرگ

CF^۴: شکست کامل در وسط ورق

FT^۵: شکست در لایه سوم هسته

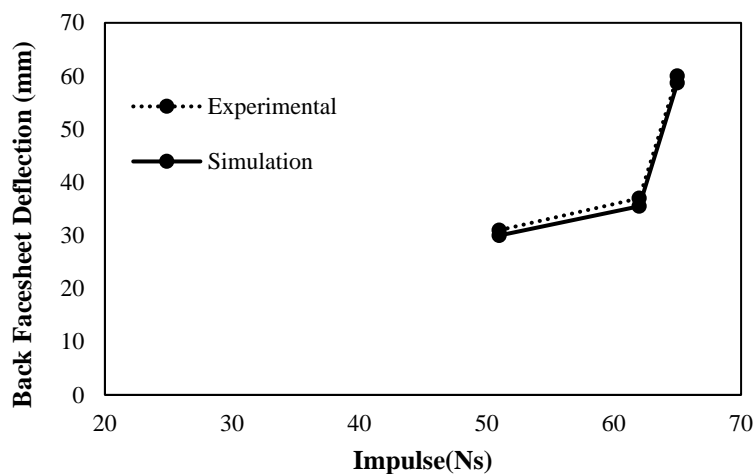
PD^۶: تغییر شکل پلاستیکی بزرگ بدون پارگی

۴-۲- اثر شدت ضربه انفجار بر روی مقاومت در برابر انفجار

شکل ۹ اثر شدت ضربه انفجار برای سه نمونه AI-UD45-AI، ST-UD45-ST، UD45-ST بر روی تغییر شکل عرضی رویه پایینی به صورت عددی نشان و با نتایج تجربی [۴۱] مقایسه شده است. از نتایج شکل ۹ مشخص می‌شود که در یک شدت ضربه معین و جنس فلزی یکسان رویه پایینی، مقاومت در برابر انفجار نمونه پانل ساندویچی با رویه بالایی CFRP، بالاتر از نمونه ساندویچی با رویه بالایی فلزی است؛ همچنین استفاده از رویه‌های فولادی و CFRP نسبت به رویه آلومینیومی موجب کاهش تغییر شکل عرضی رویه پایینی و در نتیجه افزایش مقاومت در برابر انفجار پانل ساندویچی می‌گردد. اختلاف نتایج در قسمت‌های الف، ب و پ شکل ۹ بین نتایج تجربی و عددی به ترتیب ۲، ۸ و ۴ درصد است.

جدول ۷- مدهای واماندگی پنل ساندویچی با رویه‌های فلزی.

نمونه‌ها	کل پانل ساندویچی	رویه بالایی	هسته	رویه پایینی
AI-UD45-AI-50g	مد ۲	ID	CD - SC	PD
AI-UD45-AI-60g	مد ۳	TT	FC - LC	PD
AI-UD45-AI-70g	مد ۳	PT	CF	PD
AI-UD45-ST-40g	مد ۲	ID	CD	PD
AI-UD45-ST-50g	مد ۳	TT	CD - SC	PD
AI-UD45-ST-60g	مد ۳	TT	FC - LC	PD
ST-UD45-AI-40g	مد ۱	ID	CD	PD
ST-UD45-AI-50g	مد ۱	ID	CD	PD
ST-UD45-AI-60g	مد ۲	ID	CD - SC	PD
ST-UD45-ST-50g	مد ۱	ID	CD	PD
ST-UD45-ST-60g	مد ۱	ID	CD - SC	PD



الف

^۴ Complete Fragmentation in the central area

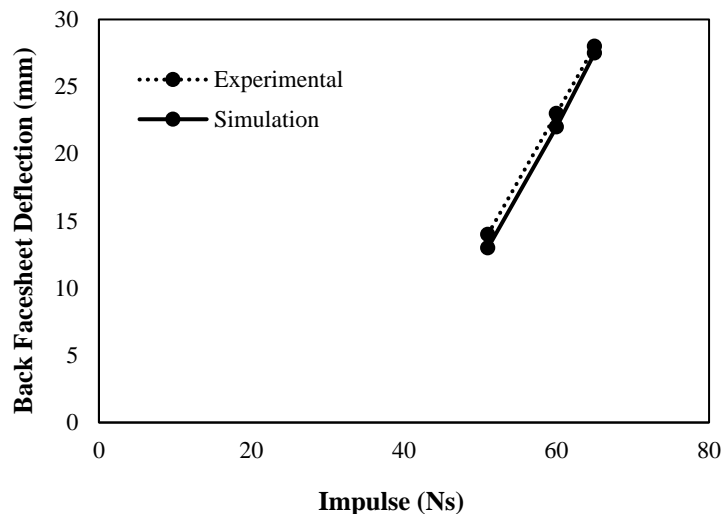
^۵ Fragments in the Third core layer

^۶ Large Plastic Deformation without Tearing

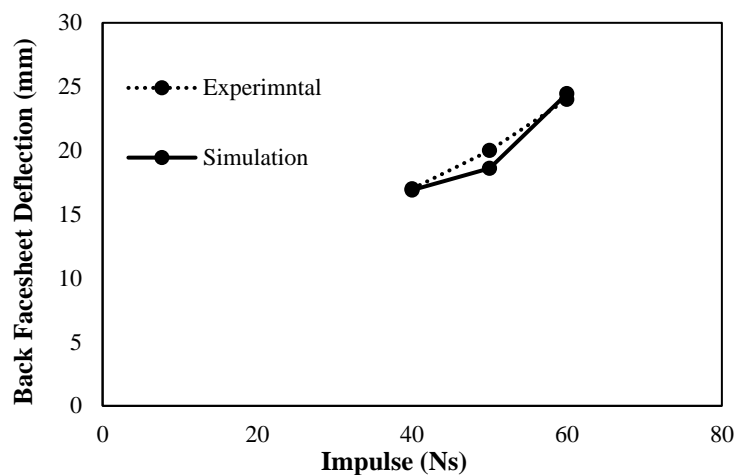
^۱ Compressive Deformation without periphery cracks

^۲ Compressive Deformation with Several Small Cracks

^۳ Fully Crushed with Large Cracks



ب



پ

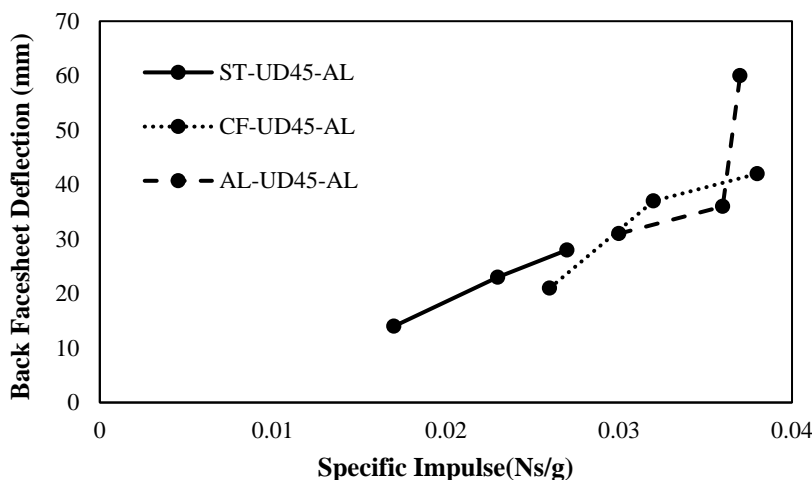
شکل ۹- نمودار تغییرشکل عرضی برحسب شدت ضربه انفجار رویه پایینی فلزی پانل ساندویچی الف (Al-UD45-Al) ب (ST-UD45-ST) پ (CF-UD45-ST)

آلومینیوم و جنس رویه پایینی فولادی و رویه بالایی با جنس CFRP و رویه پایینی با جنس فولادی مقاومت در برابر انفجار بهتری نسبت به نمونه‌های پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی فولادی و جنس رویه پایینی آلومینیوم و رویه بالایی با جنس CFRP و رویه پایینی با جنس آلومینیومی دارد.

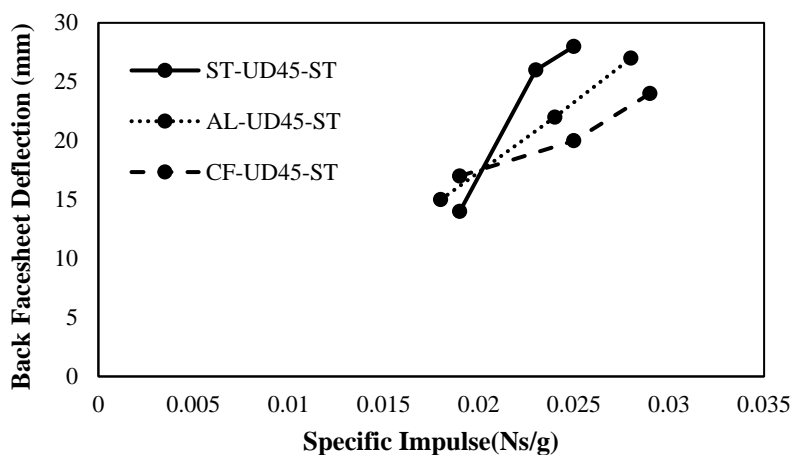
۳-۴ اثر جنس رویه‌ها بر روی مقاومت در برابر انفجار

۱-۳-۴ اثر جنس رویه بالایی

در این قسمت نمونه‌هایی با جنس‌های مختلف رویه بالایی (AL - ST - CF) و جنس رویه پایینی یکسان بر روی مقاومت در برابر انفجار بررسی شده‌است. جنس رویه پایینی در دو حالت AL و ST در نظر گرفته شده است (شکل ۱۰). از نتایج شکل ۱۰ مشخص می‌گردد که نمونه‌های پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی



الف



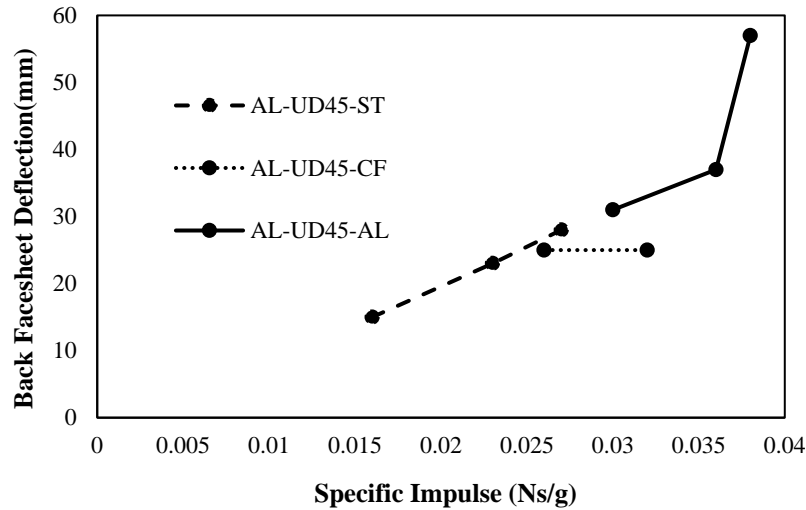
ب

شکل ۱۰ - تغییر شکل عرضی رویه پایینی بر حسب شدت ضربه برای جنس‌های مختلف از رویه بالایی (الف) جنس رویه پایینی AL (ب) جنس رویه پایینی ST

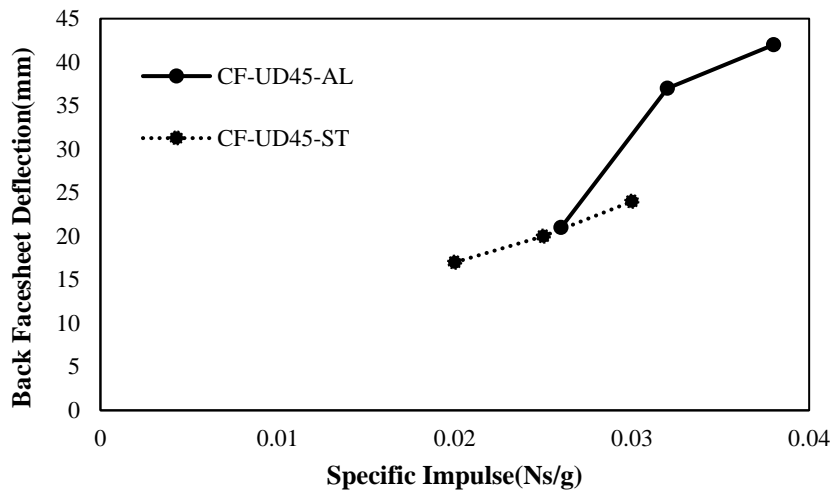
۴-۳-۲- اثر جنس رویه پایینی

هم‌چنین، نمونه پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی CFRP و جنس رویه پایینی فولادی مقاومت در برابر انفجار بهتری نسبت به نمونه‌های پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی CFRP و جنس رویه پایینی آلومینیومی دارد.

در این قسمت نمونه‌هایی با جنس‌های مختلف رویه پایینی (AL - CF - ST) و جنس رویه بالایی یکسان بر روی مقاومت در برابر انفجار بررسی شده است. جنس رویه بالایی در دو حالت AL و CF در نظر گرفته شده است (شکل ۱۱). از نتایج شکل ۱۱ مشخص می‌گردد که نمونه پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی آلومینیوم و جنس رویه پایینی CFRP مقاومت در برابر انفجار بهتری نسبت به نمونه پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی آلومینیوم و جنس رویه پایینی فولادی و آلومینیومی دارد.



الف



ب

شکل ۱۱ - تغییر شکل عرضی رویه پایینی بر حسب شدت ضربه برای جنس‌های مختلف از رویه پایینی

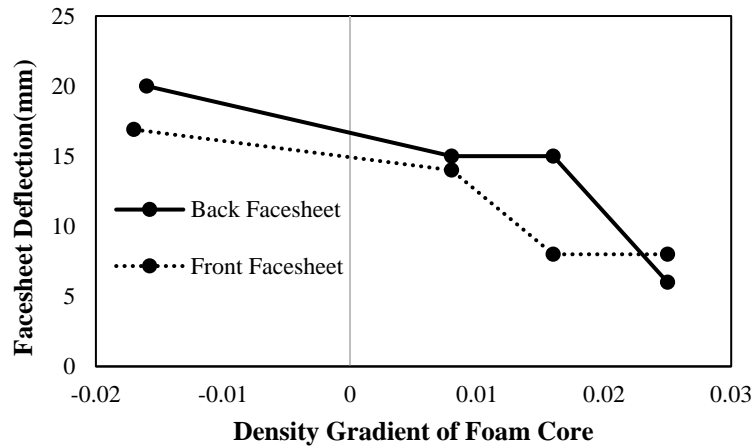
(الف جنس رویه بالایی AL ب) جنس رویه بالایی CFRP

۴-۴- اثر گرادیان چگالی هسته ساندویچ روی مقاومت در

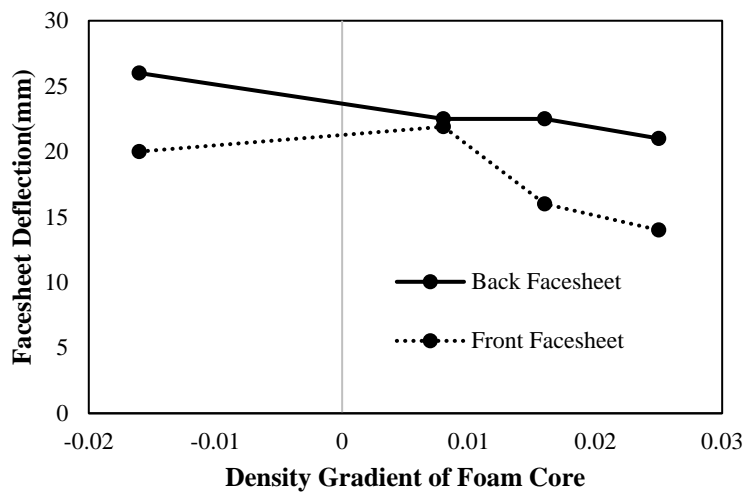
برابر انفجار

هسته کاهش می‌یابد. هنگامی که گرادیان هسته منفی است، تغییر شکل رویه بیشترین مقدار خود را دارد، در حالی که برای گرادیان مثبت هسته این مقدار کمترین است [۴۲]؛ در نتیجه مقاومت در برابر انفجار پانل ساندویچی با گرادیان مثبت هسته بالاتر از پانل ساندویچی با گرادیان منفی هسته است.

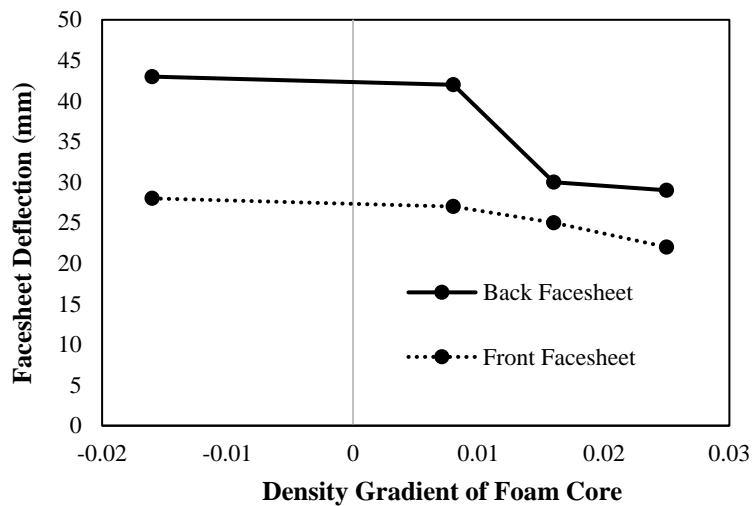
شکل ۱۲ نمودارهای تغییر شکل عرضی رویه‌ها بر حسب گرادیان هسته ساندویچ برای شدت ضربه‌های مختلف را نشان می‌دهد. این نکته به خوبی مشخص است که گرادیان هسته ساندویچ تاثیر بزرگی روی تغییر شکل دائمی رویه‌ها دارد. با در نظر گرفتن یک ترتیبی از شدت ضربه‌ها، تغییر شکل رویه‌های بالا و پایین با افزایش گرادیان



الف



ب



پ

شکل ۱۲- نمودار تغییر شکل عرضی رویه‌ها برحسب گرادیان هسته فوم الف) هنگامی که جرم ماده منفجره ۲۰g (ب) هنگامی که جرم ماده منفجره ۴۰g (پ) هنگامی که جرم ماده منفجره ۵۰g

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پاسخ‌های دینامیکی پانل‌های ساندویچ با جنس‌های مختلف رویه‌ها و هسته فوم یکنواخت و FGM برای تکانه‌های مختلف انفجار به صورت عددی بررسی و با نتایج تجربی مقایسه شد. حالت‌های تغییر شکل / شکست کل ساختار ساندویچی، رویه بالایی، هسته فوم و رویه پایینی به طور کامل بررسی شدند. اثرات جنس رویه‌ها، پیکربندی رویه‌ها و گرادیان چگالی هسته ساندویچ بر مقاومت در برابر انفجار ساختار ساندویچی براساس حالت‌های تغییر شکل / شکست و انحراف دائمی اندازه‌گیری شد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده به صورت زیر است:

۱- برای پانل‌های ساندویچی با رویه‌های فلزی، سه حالت تغییر شکل / شکست شناسایی شد. تغییر شکل پلاستیک بزرگ بدون فشردگی موضعی قابل توجه هسته (مد ۱) در نمونه‌های پانل ساندویچی تحت یک ضربه انفجار کم (جرم ماده منفجره ۳۰ گرم) مشاهده شد. هسته به طور قابل توجهی بیش از نیمی از ضخامت اولیه (مد ۲) تحت یک ضربه متوسط (جرم ماده منفجره ۴۵ گرم) فشردگی شد. پارگی موضعی رویه بالایی و هسته‌های فوم (مد ۳) تحت یک ضربه بالا (جرم ماده منفجره ۶۲ گرم) رخ داد.

۲- در مقایسه با هسته یکنواخت، هسته درجه‌بندی شده (هسته FGM) حالت‌های تغییر شکل متفاوتی را نشان می‌دهد. با افزایش ضربه انفجار (افزایش جرم ماده منفجره از ۳۰ گرم به ۶۵ گرم)، حالت‌های فشردگی موضعی خالص هسته فوم یکنواخت به گسترش فشردگی موضعی و توسعه ترک و سپس بیشتر به شکست شدن قطعه تغییر یافت.

۳- با در نظر گرفتن جنس رویه پایینی آلومینیومی یکسان، مقاومت در برابر انفجار نمونه پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی CFRP نسبت به نمونه پانل ساندویچی با جنس رویه بالایی فلزی ۱۹ درصد بالاتر بود.

۴- در جرم معادل یکسان، مقاومت در برابر انفجار نمونه ساندویچ پانل ST-UD45-AI نسبت به نمونه پانل ساندویچی ST-UD45-AI، ۶ درصد بالاتر بود.

۵- برای پانل ساندویچی با گرادیان‌های متفاوت چگالی هسته، مقاومت در برابر انفجار را می‌توان با افزایش گرادیان چگالی هسته برای محدوده مشخصی از ضربه انفجار افزایش داد. در نتیجه

هنگامی که گرادیان چگالی مثبت هسته باشد، مقاومت در برابر انفجار بالاتری (حدود ۲۰ درصد) نسبت به گرادیان چگالی منفی هسته دارد.

۶- علائم، نشانه‌ها

مدول الاستیسیته، GPa	E
چگالی، kg/m^3	ρ
نسبت پواسون	ν
مدول برشی، GPa	G
نرخ کرنش مرجع، 1/s	$\dot{\epsilon}_0$
تنش تسلیم اولیه، MPa	A
ضریب کرنش سختی، MPa	B
توان کرنش سختی	n
ضریب نرخ کرنش	C
توان نرمی حرارتی	m
ثابت آسیب ماده	D_1
ثابت آسیب ماده	D_2
ثابت آسیب ماده	D_3
ثابت آسیب ماده	D_4
ثابت آسیب ماده	D_5
مدول الاستیسیته طولی، GPa	E_1
مدول الاستیسیته عرضی، GPa	E_2
نسبت پواسون	ν_{12}
مدول برشی در صفحه ۱-۲، GPa	G_{12}
مدول برشی در صفحه ۱-۳، GPa	G_{13}
مدول برشی در صفحه ۲-۳، GPa	G_{23}

[4] Sun G, Huo X, Chen D, Li Q. (2017) Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression. <i>Mater Des</i> ; 133:154–68.	استحکام کششی (محور X)، MPa	X_T
[5] McShane GJ, Radford DD, Deshpande VS, Fleck NA. (2006) The response of clamped sandwich plates with lattice cores subjected to shock loading. <i>Eur J Mech</i> ; 25:215–29.	استحکام فشاری (محور X)، MPa	X_C
[6] Hanssen AG, Girard Y, Olovsson L, Berstad T, Langseth M. (2006) A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels. <i>Int J Impact Eng</i> ; 32:1127–44.	استحکام کششی (محور Y)، MPa	Y_T
[7] Xiao Z, Fang J, Sun G, Li Q. (2015) Crashworthiness design for functionally graded foamfilled bumper beam. <i>Adv Eng Softw</i> ; 85:81–95.	استحکام فشاری (محور Y)، MPa	Y_C
[8] Xia Y, Wu C, Liu Z, Yuan Y. (2016) Protective effect of graded density aluminium foam on RC slab under blast loading – An experimental study. <i>Construct Build Mater</i> 2016; 111:209–22.	استحکام برشی (کششی)، MPa	S_T
[9] Fleck NA, Deshpande VS. (2004) The resistance of clamped sandwich beams to shock loading. <i>J Appl Mech</i> ; 71:386.	استحکام برشی (فشاری)، MPa	S_C
[10] Qiu X, Deshpande VS, Fleck NA. (2004) Dynamic response of a clamped circular sandwich plate subject to shock loading. <i>J Appl Mech</i> ; 71:637.	مدول برشی کششی (محور X)، GPa	G_{XT}
[11] Qiu X, Deshpande VS, Fleck NA. (2003) Finite element analysis of the dynamic response of clamped sandwich beams subject to shock loading. <i>Eur J Mech</i> ; 22:801–14.	مدول برشی فشاری (محور X)، GPa	G_{XC}
[12] Li X, Zhang P, Wang Z, Wu G, Zhao L. (2014) Dynamic behavior of aluminum honeycomb sandwich panels under air blast: experiment and numerical analysis. <i>Compos Struct</i> ; 108:1001	مدول برشی کششی (محور Y)، GPa	G_{YT}
[13] Nurick GN, Langdon GS, Chi Y, Jacob N. (2009) Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast – Part 1: experiments. <i>Compos Struct</i> ; 91:433–41.	مدول برشی فشاری (محور Y)، GPa	G_{YC}
[14] Radford DD, McShane GJ, Deshpande VS, Fleck NA. (2006) The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading. <i>Int J Solids Struct</i> ; 43:2243–59.	سرعت منفجر شدن، m/s	Detonation Speed
[15] Zhu F, Zhao L, Lu G, Wang Z. (2008) Deformation and failure of blast-loaded metallic sandwich panels. Experimental investigations. <i>Int J Impact Eng</i> ; 35:937–51.	ضریب فشار، GPa	C_1
[16] Huang W, Zhang W, Li D, Ye N, Xie W, Ren P. (2016) Dynamic failure of honeycomb-core sandwich structures subjected to underwater impulsive loads. <i>Eur J Mech</i> ; 60:39–51.	ضریب فشار، GPa	C_2
[17] Theobald MD, Langdon GS, Nurick GN, Pillay S, Heyns A, Merrett RP. (2010) large inelastic response of unbonded metallic foam and honeycomb core sandwich panels to blast loading. <i>Compos Struct</i> 2010; 92:2465–75.	مقدار ویژه اولیه	R_1
[18] Jing L, Wang Z, Zhao L. (2016) The dynamic response of sandwich panels with cellular metal cores to localized impulsive loading. <i>Compos Part B-Eng</i> 2016; 94:52–63.	مقدار ویژه ثانویه	R_2
[19] Liu H, Cao Z, Yao G, Luo H, Zu G. (2013) Performance of aluminum foam-steel panel sandwich composites subjected to blast loading. <i>Mater Des</i> ; 47:483–8.	ضریب کسر انرژی فشاری	ω
	چگالی، kg/m^3	ρ_0
	انرژی اولیه بر واحد حجم، KJ/m^3	Initial energy per unit volume

۷- منابع

[1] Xi H, Tang L, Luo S, Liu Y, Jiang Z, Liu Z. (2017) A numerical study of temperature effect on the penetration of aluminum foam sandwich panels under impact. *Compos Part BEng*; 130:217–29.

[2] Zhu L, Guo K, Li Y, Yu T, Zhou Q. (2018) Experimental study on the dynamic behaviour of aluminium foam sandwich plates under single and repeated impacts at low temperature. *Int J Impact Eng*; 114:123–32.

[3] Sun G, Chen D, Huo X, Zheng G, Li Q. (2018) Experimental and numerical studies on indentation and perforation characteristics of honeycomb sandwich panels. *Compos Struct* 2018; 184:110–24.

- [32] Zhang Y, Zong Z, Liu Q, Ma J, Wu Y, Li Q. (2017) Static and dynamic crushing responses of CFRP sandwich panels filled with different reinforced materials. *Mater Des*; 117:396–408.
- [33] Li X, Yahya MY, Nia AB, Wang Z, Yang J, Lu G. (2017) Dynamic failure of basalt/epoxy laminates under blast—Experimental observation. *Int J Impact Eng*; 102:16–26.
- [34] ASTM, E8."8M. (2003) Standard test methods of tension testing of metallic materials [metric]." Annual book of ASTM standards3.
- [35] A. Standard, (2008) "Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials," ASTM D3039/D M, vol. 3039, p. 2008.
- [36] Shen J, Lu G, Ruan D. (2010) Compressive behaviour of closed-cell aluminium foams at high strain rates. *Compos Part B-Eng*; 41:678–85.
- [37] Wang Z, Shen J, Lu G, Zhao L. (2011) Compressive behavior of closed-cell aluminum alloy foams at medium strain rates. *Mater Sci Eng*; 528:2326–30.
- [38] Zhang K, Ni O, Huang J, Dai Y, Zhao H. (2018) A facile and efficient method to investigate the effect of the nature of surfactant and continuous phase on the performance of emulsion explosive. *J Mol Liq*; 249:203–10.
- [39] Li S, Li X, Wang Z, Wu G, Lu G, Zhao L. (2017) Sandwich panels with layered graded aluminum honeycomb cores under blast loading. *Compos Struct*; 173:242–54.
- [40] Liu T, Sun G, Fang J, Zhang J, Li Q. (2018) Topographical design of stiffener layout for plates against blast loading using a modified ant colony optimization algorithm. *Struct Multidiscipl Optim*; 59:335–50.
- [41] Guangyong S, Erdong W, Jingtao Z, Shiqiang L, Yong Z, Qing L. (2020) Experimental study on the dynamic responses of foam sandwich panels with different facesheets and core gradients subjected to blast impulse. *Int J Impact Eng*; 135:103-327.
- [42] Karagiozova D, Nurick GN, Langdon GS, Chung Kim Yuen S, Chi Y, Bartle S. (2009) Response of flexible sandwich-type panels to blast loading. *Compos Sci Technol* 2009; 69:754–63.
- [20] Zhu F, Wang Z, Lu G, Nurick G. (2010) Some theoretical considerations on the dynamic response of sandwich structures under impulsive loading. *Int J Impact Eng*; 37:625–37
- [21] Li G, Xu F, Sun G, Li Q. (2015) A comparative study on thin-walled structures with functionally graded thickness (FGT) and tapered tubes withstanding oblique impact loading. *Int J Impact Eng*; 77:68 83
- [22] Sun G, Li G, Hou S, Zhou S, Li W, Li Q. (2010) Crashworthiness design for functionally graded foam-filled thin-walled structures. *Mater Sci Eng*; 527:1911–9.
- [23] Sun G, Pang T, Xu C, Zheng G, Song J. (2017) Energy absorption mechanics for variable thickness thin-walled structures. *Thin-Walled Struct*; 118:214–28.
- [24] Sun G, Tian J, Liu T, Yan X, Huang X. (2018) Crashworthiness optimization of automotive parts with tailor rolled blank. *Eng Struct*; 169:201–15.
- [25] Zhang H, Sun G, Xiao Z, Li G, Li Q. (2018) Bending characteristics of top-hat structures through tailor rolled blank (TRB) process. *Thin-Walled Struct*; 123:420–40.
- [26] Nouri MD, Hatami H. (2014) Experimental and Numerical Study of the Effect of Longitudinal Reinforcements on Cylindrical and Conical Absorbers under Impact Loading. *Indian J Sci. Tec.*; 7:199–210.
- [27] Hatami H, Chegeni A. (2020) Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials Experimental investigation of impact loading effects on rectangular flat panels of fiber self-compacting cementations composite with expanded steel sheet. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng*; 318:215–25
- [28] Liu X, Tian X, Lu T, Zhou D, Liang B. (2012) Blast resistance of sandwich-walled hollow cylinders with graded metallic foam cores. *Compos Struct*; 94:2485–93.
- [29] Farmani SM, Alitavoli M, Babaei H, Haghgoo M. (2024) Investigation of dynamic response of circular sandwich plates with metal vertical tubes core under blast load. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng*; 150:134–43.
- [30] Li S, Wang Z, Wu G, Zhao L, Li X. (2014) Dynamic response of sandwich spherical shell with graded metallic foam cores subjected to blast loading. *Compos Part A-Appl*; 56:262–71.
- [31] Jing L, Wang Z, Shim VPW, Zhao L. (2014) An experimental study of the dynamic response of cylindrical sandwich shells with metallic foam cores subjected to blast loading. *Int J Impact Eng*; 71:60–72.