

# بررسی پاسخ به ضربه سرعت پایین در پانل های ساندویچی با هسته موجدار پر شده با فوم آلومینیومی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵

پویا پیرعلی<sup>۱</sup>، محسن حیدری بنی<sup>۲</sup>، حمید صفرزاده<sup>۳</sup>، جعفر اسکندری جم<sup>۴</sup>

۱- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ppirali@mut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

۴- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

## چکیده

پانل‌های ساندویچی متشکل از صفحات رویه و هسته فوم فلزی، به‌طور گسترده‌ای برای مقاومت در برابر ضربه با سرعت پایین استفاده می‌شوند. در این تحقیق سعی شده است تا با مطالعه رفتار فوم آلومینیومی و استفاده از آن در سه نوع ساختار ساندویچی با هسته‌های موجدار مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی خواص جذب انرژی آن‌ها را تحت ضربه با سرعت پایین به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گیرد. با استفاده از نرم‌افزار آباکوس فرآیند مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها صورت پذیرفت. همچنین در آزمون تجربی، از یک دستگاه سقوط وزنه با ضربه‌زننده‌ی سرعت پایین و دارای سر تخت بر روی پانل‌های ساندویچی با هسته موجدار با و بدون فوم آلومینیومی، صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی انجام شده است. حالت‌های تغییر شکل، نمودارهای جذب انرژی و سهم جذب انرژی هر جزء مورد بحث قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده آن است که استفاده از فوم آلومینیومی به صورت قابل توجهی سبب افزایش ظرفیت و بهبود روند جذب انرژی سازه شده است و از نفوذ ضربه‌زننده در پانل جلوگیری کرده است. همچنین نتایج نشان داد که هسته‌های موجدار مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی رفتار متفاوتی در جذب انرژی و جلوگیری از نفوذ ضربه‌زننده داشتند؛ بطوریکه هسته موجدار مستطیلی روند جذب بهتر و سریع‌تری داشت و از نفوذ ضربه‌زننده به داخل پانل بیشتر از دو هسته موجدار دیگر جلوگیری به عمل آورد.

واژه‌های کلیدی: پانل ساندویچی، فوم آلومینیومی، ضربه کم سرعت، شبیه‌سازی عددی، روش اجزای محدود.

## Investigation of low-velocity impact response in foam-filled corrugated-core sandwich panels

Pouya Pirali<sup>1</sup>, Mohsen Hydari Bani<sup>2</sup>, Hamid Safarzadeh<sup>3</sup>, Jafar Eskandari Jam<sup>4</sup>

1- Assistant Professor, Materials and Manufacturing Technologies Academic Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, ppirali@mut.ac.ir.

2- Ph.D Student, Materials and Manufacturing Technologies Academic Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

3- Master's Student, Materials and Manufacturing Technologies Academic Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

4- Professor, Materials and Manufacturing Technologies Academic Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

Sandwich panels, consisting of face sheets and a metallic foam core, are extensively employed for low-velocity impact resistance. This study aimed to investigate the energy absorption characteristics of aluminum foam integrated within three types of sandwich structures featuring rectangular, trapezoidal, and triangular corrugated cores under low-velocity impact through both experimental and numerical approaches. Modeling and analysis of the specimens were conducted using Abaqus software. Additionally, experimental validation of the numerical results was performed using a low-velocity impact drop-weight tester with a flat-headed impactor on sandwich panels with corrugated cores, both with and without aluminum foam. Deformation modes, energy absorption curves, and the contribution of each component to energy absorption were thoroughly analyzed. The results indicate that the incorporation of aluminum foam significantly enhances the energy absorption capacity and improves the structural energy absorption process, effectively preventing the impactor penetration into the panel. Furthermore, it was found that the rectangular, trapezoidal, and triangular corrugated cores exhibited distinct behaviors in terms of energy absorption and impact penetration resistance, with the rectangular core demonstrating a superior and more rapid energy absorption response and greater prevention of impactor penetration compared to the other two core geometries.

**Keywords:** Sandwich panel, aluminum foam, low-velocity impact, numerical simulation, finite element method

۷

سال ۱۴- شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۴

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



## ۱. مقدمه

یک ساختار ساندویچی اصولاً از دو ورق نازک با استحکام کششی و فشاری مناسب و یک لایه میانی نسبتاً ضخیم و مقاوم در برابر تنش‌های برشی تشکیل می‌شود. در این نوع ساختارها، ورق‌ها معمولاً با استفاده از چسب یا فرآیند جوشکاری به لایه میانی متصل می‌شوند. این ساختار به ظاهر ساده، که به علت شباهت ظاهری‌اش با ساندویچ به همین نام خوانده می‌شود. استفاده گسترده از سازه‌های ساندویچی، مستلزم شناخت کافی از همه ابعاد اختلاف این سازه‌ها با مواد رایج است. لذا به منظور رفع این نیاز، انجام مطالعات جدید در حوزه شناخت رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی الزامی است. فلزات صلب و غیر متخلخل، معمولاً جاذب‌های خوبی برای انرژی نیستند. این مواد هنگامی که تحت تنش یا نیرو قرار می‌گیرند، به سختی دچار تغییر شکل شده و مقداری زیادی از این نیرو یا تنش را منتقل می‌کنند؛ بنابراین اگر به اجسام و قطعات ضربه وارد شود، باعث آسیب رساندن به آن‌ها می‌شود. در مقابل، فوم‌های فلزی و به ویژه فوم‌های آلومینیوم علاوه بر داشتن وزن سبک و نسبت استحکام به وزن بالا، ظرفیت بی نظیری در جذب انرژی موقع بارگذاری تحت فشار و ضربه را دارند. بسیاری از فلزات و آلیاژها مانند آلومینیوم، فولاد، مس، نیکل، سرب، روی، منیزیم و تیتانیوم قابلیت فومی شدن را با استفاده از فرآیندهای تولید مختلف دارند. در این میان استفاده از فلز آلومینیوم به عنوان ماده زمینه فوم، به دلیل داشتن وزن سبک و نقطه ذوب پایین و دارا بودن سفتی ویژه بالا، مقاومت خوب در برابر خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا، ظرفیت جذب انرژی عالی، قابلیت بازیافت و همچنین قابلیت تولید

ساختارهای سلولی نسبتاً همگن و همسانگرد، توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است.

گفتنی است یک ساختار ساندویچی، مقاومت بسیار بالاتری نسبت به تک‌تک اجزای خود دارد و از سبکی فوق‌العاده‌ای نیز برخوردار است ولی هر یک از این اجزاء به تنهایی نسبتاً ضعیف و منعطف‌اند. اما هنگامی که به شکل ساختار ساندویچی درآیند، سازه‌هایی محکم، سفت، سخت و سبک به وجود خواهند آورد [۱]. تغییر شکل هسته و شکست آن از عوامل مؤثر در قابلیت جذب انرژی سازه‌های ساندویچی است؛ به طوریکه پرتابه پس از شکست پوسته، امکان نفوذ و تخریب هسته سازه را دارد [۲]. از پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

مطالعه تجربی و عددی برای بررسی اثر شکل ضربه زننده بر رفتار ضربه با سرعت پایین [۳]، بررسی عددی و تحلیلی تیرهای ساندویچی موج‌دار کاملاً گیردار با هسته خم‌شده و پر شده با فوم فلزی برای دستیابی به پاسخ آن را تحت ضربه با سرعت پایین [۴]، بررسی یک پانل ساندویچی با هسته موج‌دار مثلثی از جنس فولاد ضد زنگ ۳۰۴ را با فوم آلومینیومی سلول بسته جهت ایجاد یک ساختار کامپوزیتی [۵]، بررسی تجربی پاسخ دینامیکی پانل‌های ساندویچی فلزی با هسته موج‌دار پر شده با فوم آلومینیومی و فوم پی‌وی سی را تحت آزمایش انفجار هوایی [۶]، بررسی تجربی و عددی اثرات پیکربندی هندسی هسته‌های موج‌دار (قوسی شکل، سینوسی، مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی) با اندازه، وزن و مواد یکسان در پاسخ به ضربه موضعی و عملکرد فشرده‌سازی سطحی پانل‌های ساندویچی [۷]،



بررسی تجربی و تئوری حالت‌های گسیختگی تیرهای ساندویچی کاملاً گیردار با هسته‌های فوم آلومینیوم تحت ضربه با سرعت پایین بر روی دهانه میانی توسط یک دستگاه سقوط وزنه [۸]، مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی تأثیر مواد هسته بر رفتار ضربه با سرعت پایین پانل‌های ساندویچی با هسته دوزنقه‌ای برای بررسی پاسخ‌های دینامیک سه نوع پانل ساندویچی موجود با پیکربندی هندسی یکسان، متشکل از ورق‌های یکسان پلاستیک تقویت‌شده با الیاف کربن و هسته‌های مختلف موجود از جنس آلیاژ آلومینیوم، فولاد ضد زنگ [۹]، بررسی تجربی و عددی یک ساندویچ پانل کاملاً فلزی با هسته Y شکل پر شده با فوم آلومینیومی [۱۰]، مطالعه تجربی رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌های ساندویچی صورت شیشه‌ای/اپوکسی ادغام شده با یک هسته دوخته‌شده چندلایه سه‌بعدی [۱۱]، بررسی تجربی مقاومت ضربه‌ای هسته درجه‌بندی‌شده پانل ساندویچی مربعی [۱۲]، مطالعه مقاومت به ضربه لایه چینی متعامد [۱۳]، مقایسه ساندویچ پانل‌ها با هسته موجی دوطرفه تحت بارگذاری خمشی با ساندویچ پانل‌ها با هسته یک طرفه و تقویت آن با الیاف پنبه در مقایسه با الیاف شیشه [۱۴]، بررسی اثر افزودن سیم آلیاژ حافظه‌دار به جهت تقویت پوسته‌ها و تأثیر پیش‌کرنش بر رفتار بالستیکی سازه ساندویچی [۱۵]، تأثیر نانو ذرات گرافن بر استحکام ساختار پانل ساندویچ تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه با سرعت پایین [۱۶]، بررسی تأثیر سیم حافظه‌دار بر رفتار بالستیکی ساندویچ پانل هسته دوزنقه‌ای آلومینیومی با پوسته‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار [۱۷]، بررسی جذب انرژی و شناسایی

آسیب کامپوزیت‌های ساندویچی چند لایه تقویت‌شده با الیاف شیشه و فوم پلی وینیل کلراید تحت ضربه‌های مکرر با کاهش انرژی و فرورفتگی شبه استاتیک [۱۸]، بررسی عملکرد ضربه‌ای سرعت پایین ساندویچ پانل‌های کامپوزیت فیبر کربن پیوسته با چاپ سه بعدی یکپارچه [۱۹].

در پژوهش حاضر، برای نخستین بار، تأثیر نوع هندسه هسته موجودار (مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی) در ترکیب با فوم آلومینیومی، بر رفتار جذب انرژی پانل‌های ساندویچی تحت ضربه موضعی با سرعت پایین، به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری این تحقیق در بررسی هم‌زمان سه نوع هندسه موجودار، تحلیل مقایسه‌ای رفتار جذب انرژی با و بدون فوم آلومینیومی، و صحت‌سنجی دقیق داده‌ها بین نتایج تجربی و عددی نهفته است. یافته‌ها نشان می‌دهند که الحاق فوم آلومینیومی به ساختار هسته به طور مؤثری از نفوذ ضربه‌زننده جلوگیری کرده و ظرفیت جذب انرژی را بهبود می‌بخشد، به‌ویژه در هسته موجودار مستطیلی که عملکرد بهینه‌تری از خود نشان داده است. این نوع پانل‌ها به دلیل توانایی بالای جذب انرژی، پتانسیل بالایی برای استفاده در ساخت بدنه پهپادها، ماهواره‌های کوچک مانند ماهواره‌های مکعبی و سازه‌های محافظ تجهیزات حساس در هواپیماهای بدون سرنشین دارند. همچنین، در صنایع نظامی می‌توان از آن‌ها به‌عنوان جاذب ضربه در مازول‌های حمل تسلیحات یا محافظت از تجهیزات لجستیکی استفاده کرد. کاربرد دیگر این سازه‌ها، در زیر بدنه ربات‌های امداد و نجات جهت جلوگیری از آسیب ناشی از برخورد با موانع محیطی در مأموریت‌های دشوار است.



## ۲. پیشینه تئوریک

پانل‌های ساندویچی با هسته موجدار پر شده با فوم فلزی به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن و ظرفیت جذب انرژی بالا، کاربرد وسیعی در محافظت در برابر ضربه‌های سرعت پایین یافته‌اند. تحلیل تئوریک این سازه‌ها مستلزم بررسی پارامترهایی مانند انرژی جذب شده، نیروی بیشینه، جابه‌جایی، شتاب ضربه‌زننده و سختی مؤثر است. نیروی حداکثر ( $F_{Peak}$ )، نیروی میانگین ( $F_{mean}$ )، ظرفیت جذب انرژی ( $E_a$ ) و ضریب شکل یا راندمان نیروی لهیدگی ( $\eta$ )، پارامترهایی هستند که برای سنجیدن خواص جذب استفاده می‌شوند. به علاوه پارامتر دیگری به نام انرژی جذب شده بر واحد وزن<sup>۱</sup> وجود دارد که از اهمیت بالایی در بررسی جاذب‌ها برخوردار است [۲۰]. این پارامترها محدودکننده می‌باشد. مقدار انرژی جذب شده همان سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی است. ضریب شکل، از نسبت نیروی میانگین بر نیروی حداکثر به دست می‌آید و نتایج محاسبه‌شده از آزمایش تجربی و میزان درصد خطای نتایج با تحلیل عددی قابل‌اندازه‌گیری است.

$$E_a = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad (1)$$

$$E_a = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad (2)$$

$$\eta = \frac{F_{mean}}{F_{Peak}} \quad (3)$$

$$SEA = \frac{E_a}{W_m} \quad (4)$$

$W_m$  جرم نمونه‌ها بر حسب گرم است.

انرژی جنبشی اولیه ضربه‌زننده با جرم  $m$  و سرعت اولیه  $v$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} mV^2 \quad (5)$$

بخشی از این انرژی توسط پانل جذب می‌شود که مقدار آن از انتگرال نیرو نسبت به جابه‌جایی به دست می‌آید:

$$E_{abs} = \int p(\delta) d\delta \quad (6)$$

که در آن  $P(\delta)$  نیروی اعمالی و  $\delta$  جابه‌جایی نقطه ضربه است. سختی مؤثر سازه نیز به شکل نسبت بیشینه نیرو به بیشینه جابه‌جایی تعریف می‌شود:

$$k_{eff} = \frac{P_{max}}{\delta_{max}} \quad (7)$$

برای ارزیابی راندمان جذب انرژی، شاخص CFE<sup>۲</sup> به کار می‌رود که از نسبت نیروی میانگین به نیروی بیشینه به دست می‌آید:

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \quad (8)$$

نیروی میانگین نیز از تقسیم انرژی جذب شده بر بیشینه جابه‌جایی محاسبه می‌گردد:

$$P_{mean} = \frac{E_{abs}}{\delta_{max}} \quad (9)$$

از دیدگاه دینامیکی، شتاب لحظه‌ای ضربه‌زننده  $a(t)$  برابر است با نیروی اعمال شده تقسیم بر جرم ضربه‌زننده:

$$a(t) = \frac{P(t)}{m} \quad (10)$$

مقدار جابجایی ضربه‌زننده به کمک روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$V = a\Delta t + V_0 \quad (11)$$

$$X = V\Delta t + X_0 \quad (12)$$

$$F = ma \quad (13)$$

در روابط بالا  $V$  و  $V_0$  به ترتیب سرعت ثانویه و سرعت اولیه،  $a$  شتاب،  $\Delta t$  تغییرات زمان،  $X$  و  $X_0$  به ترتیب جابجایی ثانویه و جابجایی اولیه و در نهایت  $F$  و  $m$  به ترتیب معرف نیرو و جرم ضربه‌زننده می‌باشد.



این پارامتر نقش کلیدی در مدل‌سازی رفتار ضربه‌ای سازه دارد و تأثیر مستقیمی بر سرعت و میزان انرژی منتقل شده به پانل دارد.

با ترکیب تحلیل‌های تجربی و عددی، می‌توان رفتار سازه‌های ساندویچی با هسته‌های موجدار مختلف و پرشده با فوم آلومینیومی را بررسی کرده و پارامترهای مؤثر بر بهبود جذب انرژی را شناسایی نمود.

### ۳. روش انجام تحقیق

#### ۱.۳ خواص و مواد

تمامی قطعات پانل ساندویچی از ورق آلومینیوم 3105-H14 به همراه هسته پرشده با فوم آلومینیومی است؛ لذا می‌بایست تمام خواص مکانیکی آن‌ها در این ماژول تعریف و به قطعات متناظر نسبت داده شوند. برای به دست آوردن خواص مکانیکی ورق آلومینیوم و فوم آلومینیوم می‌بایست آزمون کشش و فشار متناظر آن‌ها مطابق الزامات استاندارد مربوطه انجام شود؛ آزمایش کشش بر روی نمونه‌های آماده‌شده از ورق آلومینیوم 3105-H14 مطابق استاندارد ASTM E8/E8M [35] انجام گرفته است. آزمایش فشار تک محوری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۴۰ و طول ۶۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ISO 13314 که مختص قطعات متخلخل فلزی یا همان فوم‌های فلزی است؛ توسط دستگاه آزمون فشار با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. شکل ۱ مراحل لهیدگی فوم آلومینیوم تحت آزمون فشار تک محوری را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مراحل لهیدگی فوم آلومینیوم تحت آزمون فشار تک محوری.

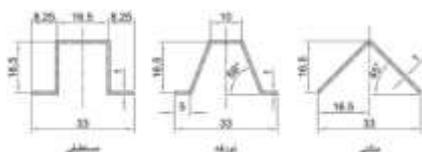
#### ۲.۳ شبیه‌سازی المان محدود

فرآیند مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شد. از آنجاکه مدل‌ها و شرایط آزمون هر نمونه با دیگری متفاوت است؛ لذا با توجه به نوع و ابعاد متفاوت هر نمونه و جلوگیری از تکرار نام کامل هر نمونه، کدهایی برای شناسایی نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ نام کامل نمونه‌ها، قطر ضربه‌زننده، انرژی ضربه، ضخامت ورق‌ها، کد نمونه‌ها و نحوه کدگذاری ارائه شده است. از این پس جهت سادگی، کد مربوط به هر نمونه به جای مشخصات کلی آن بیان شده است. برای مش زدن صفحات رویه و هسته از المان شل<sup>۳</sup> ۴ گره‌ای و برای قطعات صلب و قطعات فوم از المان ۸ گره‌ای آجری با انتگرال کاهش یافته در ماژول مش استفاده شد. در شکل ۲ می‌توان طرح کلی هسته این پانل‌ها را مشاهده نمود.



شکل ۲. طرح کلی هسته پانل‌ها (الف) مستطیلی، (ب) دوزنقه‌ای و (ج) مثلثی.

تمام پانل‌های ساندویچی با الهام از مقاله مرجع [۷] به ابعاد کلی ۹۹×۹۹ میلی‌متر و هسته‌هایی مطابق با ابعاد تار خنثی نشان داده شده در شکل ۳ در ماژول Part نرم‌افزار به طور دقیق مدل شدند. در شکل ۳ مشخصات ابعادی تار خنثی هر تک سلول هسته برای ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر ترسیم شد.

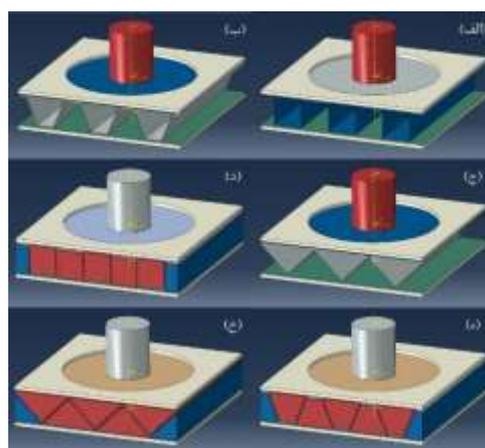


شکل ۳. مشخصات ابعادی تار خنثی تک سلول هسته پانل‌ها.





با توجه به اینکه ضخامت‌های ورق‌های رویه، زیرین و هسته کم است می‌توان در ماژول Part آن‌ها را به صورت Shell مدل نموده تا در هنگام اجرا و حل Run Time کمتری تحمیل شود. برای مقید کردن پانل در راستای عمودی، پانل مابین دو عدد گیره به ابعاد کلی  $99 \times 99 \times 2$  میلی‌متر با یک سوراخ دایره‌ای شکل به قطر ۷۵ میلی‌متر قرار داده شده است. گیره‌ها به صورت Solid مدل شده‌اند تا در مراحل آتی در ماژول Interaction قید Rigid به آن‌ها نسب داده شود. همانند گیره‌ها، ضربه‌زننده‌های سر تخت نیز با قطر ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر و به طول کلی ۳۰ میلی‌متر به صورت Solid مدل شده است تا در مراحل آتی در ماژول Interaction قید Rigid به آن نسب داده شود. تمام قطعات مدل شده در محیط Part نرم‌افزار با در نظر گرفتن نوع پانل اعم از خالی یا پر شده با فوم در این مرحله در محیط Assembly با در نظر گرفتن ابعاد و شرایط مسئله و همچنین نفوذ اولیه قطعات مونتاژ می‌گردند. در شکل ۴ نمونه‌ای از پانل‌های ساندویچی مونتاژ شده در محیط نرم‌افزار نشان داده شده است.



شکل ۴. مونتاژ پانل‌های الف) مستطیلی، ب) دوزنقه، ج) مثلثی بدون فوم و د) مستطیلی، ه) دوزنقه و خ) مثلثی پر شده با فوم با ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و ضخامت ورق ۱ میلی‌متر.

در ماژول Step یک فرآیند دینامیک صریح با دوره زمانی ۰,۰۱۵ ثانیه برای پانل‌های خالی و ۰,۰۱ ثانیه برای پانل‌های پر شده با فوم به همراه خروجی‌های مورد نیاز از جمله نمودارهای شتاب-زمان، سرعت-زمان، جابجایی-زمان و ... ایجاد می‌گردد و در ادامه در ماژول Interaction، خواص اندرکنش بین قطعات شامل ضربه اصطکاک ۰,۳۵ و رفتار تماسی Hard به عنوان خواص مربوطه تعریف می‌شوند. گیره‌ها و ضربه‌زننده نیز با توجه به اینکه در مرحله نخست به شکل Solid ایجاد شدند؛ می‌بایست در این محیط توسط قید صلب (Rigid Body)، به قطعات صلب تبدیل شوند. با توجه به اینکه چگالی گیره‌ها و ضربه‌زننده نسبت به سایر قطعات بسیار بالاست و در اثر ضربه دچار تغییر شکل قابل توجهی نخواهند شد و مضاف بر این به جهت اینکه هدف از شبیه‌سازی بررسی شرایط پانل ساندویچی است؛ لذا استفاده از قطعات صلب سبب کاهش زمان حل مسئله و دقت بیشتری خواهد شد. برای اتصال تمام اجزای پانل به یکدیگر از جمله رویه‌ها به هسته موجدار و فوم‌ها به هسته از قید Tie استفاده شده است.

### ۳.۳ آزمون تجربی

آزمون تجربی بر روی پانل‌های ساندویچی با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر و ضربه‌زننده‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر، تحت انرژی ۱۵۰ ژول و مطابق شرایط تعیین شده در مرحله شبیه‌سازی انجام شد. این دسته از پانل‌ها با توجه به سهولت ساخت، زمان‌بندی مناسب، کنترل هزینه‌ها و در دسترس بودن مواد اولیه انتخاب گردیدند. روند انجام آزمون‌های تجربی شامل دو مرحله کلی بود؛ نخست، ساخت نمونه‌های پانل ساندویچی مطابق

با مشخصات مرحله شبیه‌سازی و دوم، انتخاب دستگاه سقوط وزنه مناسب و بررسی شرایط ابعادی و عملکردی آن که در صورت نیاز، ساخت تجهیزات جانبی لازم جهت انجام آزمایش انجام شد. در مرحله اول، به فرآیند ساخت نمونه‌ها و تجهیزات مرتبط پرداخته شد و در مرحله دوم، دستگاه سقوط وزنه معرفی و نحوه عملکرد آن به تفصیل شرح داده شد. در فرآیند ساخت نمونه‌ها، ابتدا ورق‌های آلومینیوم به همراه نقشه‌های برش و خم‌کاری به کارگاه مربوطه ارسال گردید. عملیات برش ورق‌های رویه، زیرین و گسترده هسته موجدار توسط برش لیزری انجام گرفت. سپس در مرحله خم‌کاری، با استفاده از پرس برک، ورق هسته مطابق نقشه‌ها فرم داده شد. در نهایت، تمامی قطعات مورد نیاز جهت مونتاژ پانل‌ها آماده گردیدند که باید طبق روش مناسب در مراحل بعدی مونتاژ شوند (شکل ۵). تمامی نقشه‌های دوبعدی، سه‌بعدی و گسترده قطعات خم‌کاری شده با کمک نرم‌افزارهای مهندسی سالی‌دورکس و اتوکد طراحی و به کارگاه تحویل داده شدند. پس از آماده شدن قطعات، مونتاژ پانل‌ها با استفاده از چسب مخصوص آلومینیوم صورت گرفت. قطعات به یکدیگر چسبانده و با گیره تا ۲۴ ساعت تحت فشار قرار گرفتند تا چسب به طور کامل خشک و اتصال مستحکم ایجاد شود. پس از طی زمان لازم و اطمینان از استحکام چسب، گیره‌ها برداشته شده و نمونه‌ها جهت انجام آزمون‌ها آماده شدند (شکل ۶). برای آزمون‌های سقوط وزنه در این پژوهش، ارتفاع رهاسازی ۳ متر و دو وزنه به جرم‌های ۴۵ و ۷٫۵ کیلوگرم انتخاب گردید. ارتفاع و جرم وزنه‌ها متناسب با انرژی و سرعت برخورد قابل تنظیم است. پس از برخورد

ضربه‌زننده به پانل، داده‌های شتاب-زمان و نیرو-زمان توسط سنسورهای متصل به قسمت بالایی ضربه‌زننده ثبت شده و از طریق کامپیوتر قابل مشاهده و تحلیل هستند. نحوه عملکرد دستگاه به این صورت است که ابتدا مجموعه وزنه‌ها، سنسورها و ضربه‌زننده مطابق شرایط نصب، به دستگاه متصل می‌شوند. سپس کابل‌های سنسورها به دستگاه جمع‌آوری داده متصل و خروجی آن به وسیله کابل USB به کامپیوتر منتقل می‌شود. در مرحله بعد، برای تنظیم ارتفاع رهاسازی متناسب با انرژی ضربه، آهنرباهای بالای مجموعه رهاسازنده فعال می‌شوند تا ضربه‌زننده به همراه وزنه‌های متصل در ارتفاع مورد نظر به صورت ثابت نگه داشته شوند. با قطع جریان برق، آهنرباها غیرفعال شده و مجموعه از ارتفاع رها شده و با قطعه قرار گرفته زیر دستگاه و بین دو گیره برخورد می‌کند. در پایان، داده‌های شتاب-زمان و نیرو-زمان به کمک شتاب‌سنج و نیروسنج ثبت و توسط دستگاه جمع‌آوری داده به صورت رشته‌ای از اعداد در کامپیوتر ذخیره می‌شوند.



شکل ۵. پانل‌های ساندویچی بدون فوم (الف) مستطیلی، (ب) دوزنقه‌ای و (ج) مثلثی.



شکل ۶. پانل‌های ساندویچی پر شده با فوم (الف) مستطیلی، (ب) دوزنقه‌ای و (ج) مثلثی.



#### ۴. نتایج

نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری و آزمون تجربی، بحث بر روی نتایج به دست آمده د به تفصیل در این بخش انجام گرفته است.

#### ۱۰۴ بررسی همگرایی

برای دستیابی به یک مدل ایده‌آل با پاسخ‌های درست و دقیق نیاز به یک مدل همگرا در مش‌بندی است؛ که لازمه این مهم بررسی حساسیت به تعداد مش مدل هاست. حال با توجه

به مطالبی که بیان شد؛ برای بررسی حساسیت به مش، اندازه مش‌بندی المان‌ها را از ۵ الی ۰/۵ میلی‌متر تغییر داده و تغییرات نیروی ماکزیمم برخورد بررسی شد. به‌عنوان نمونه نتایج نمودار همگرایی پانل REC1I5E1 در شکل ۷ ارائه شده است.

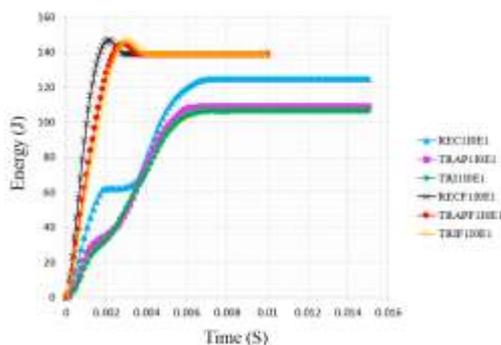
جدول ۱. کدگذاری نمونه‌ها.

کد نمونه	ضخامت ورق‌ها	انرژی ضربه	قطر ضربه‌زننده	مشخصات کامل
REC1I5E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۵ میلی‌متر	پانل با هسته مستطیلی توخالی
TRAP1I5E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲ میلی‌متر	پانل با هسته دوزنقه‌ای توخالی
TRI1I5E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۵ میلی‌متر	پانل با هسته مثلثی توخالی
RECF1I5E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۵ میلی‌متر	پانل با هسته مستطیلی پر شده با فوم
TRAPF1I5E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۵ میلی‌متر	پانل با هسته دوزنقه‌ای پر شده با فوم
TRIF1I5E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۵ میلی‌متر	پانل با هسته مثلثی پر شده با فوم
REC1I0E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته مستطیلی توخالی
TRAP1I0E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته دوزنقه‌ای توخالی
TRI1I0E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته مثلثی توخالی
RECF1I0E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته مستطیلی پر شده با فوم
TRAPF1I0E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته دوزنقه‌ای پر شده با فوم
TRIF1I0E1	۱ میلی‌متر	۱۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته مثلثی پر شده با فوم
REC2I5E2	۲ میلی‌متر	۲۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته مستطیلی توخالی
TRAP2I5E2	۲ میلی‌متر	۲۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته دوزنقه‌ای توخالی
TRI2I5E2	۲ میلی‌متر	۲۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته مثلثی توخالی
RECF2I5E2	۲ میلی‌متر	۲۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته مستطیلی پر شده با فوم
TRAPF2I5E2	۲ میلی‌متر	۲۵۰ ژول	۲۰ میلی‌متر	پانل با هسته دوزنقه‌ای پر شده با فوم
TRIF2I5E2	۲ میلی‌متر	۲۵۰ ژول	۲۵ میلی‌متر	پانل با هسته مثلثی پر شده با فوم

حروف ابتدایی مخفف نام انگلیسی ساختار هسته است؛ به این‌گونه که REC معرف هسته مستطیلی، TRAP معرف هسته دوزنقه و TRI معرف هسته مثلثی است. در صورت وجود حرف F پس از مخفف نام هسته، نشان‌دهنده پانل پر شده با فوم است. اولین عدد از سمت چپ معرف ضخامت ورق‌های پانل است. I0 و I5 به ترتیب معرف ضربه‌زننده با قطر ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر است. E1 و E2 به ترتیب معرف انرژی ۱۵۰ و ۲۵۰ ژول است.

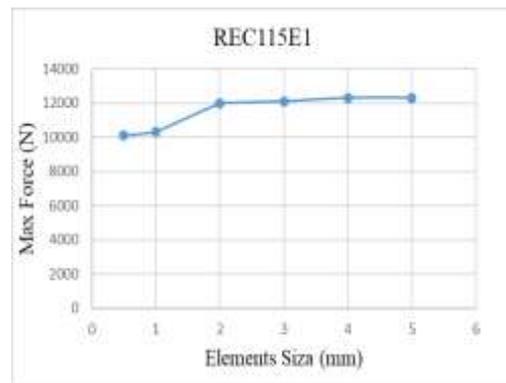


شده است. در مورد پانل‌های TR110E1 و TRIF110E1، وضعیت تغییر شکل حاکی از سوراخ شدن کامل نمونه بدون فوم و خروج ضربه‌زننده از سمت مقابل است، اما نمونه دارای فوم تنها سوراخ شدن ورق بالایی و ایجاد تغییر شکل موضعی را تجربه کرده است. هسته موجدار این نمونه‌ها تحت ضربه دچار خمش قابل توجهی شده است. همچنین همانند حالت قبل، ورق‌ها در ناحیه برخورد به صورت دندریتی از اطراف جدا شده‌اند. با توجه به وضعیت تغییر شکل پانل‌های مثلثی، یال‌های هسته به دلیل عدم قرارگیری مستقیم زیر ضربه‌زننده، دچار کمانش نشده و انرژی ضربه را از طریق خمش جذب کرده‌اند. همچنین، تحلیل ورق‌ها نشان داد که ورق‌ها در ناحیه برخورد به شکل دندریتی و به واسطه نفوذ ضربه‌زننده، از اطراف جدا شده‌اند. در نهایت، نمودار جذب انرژی به صورت تابعی از زمان برای نمونه‌های تحت ضربه با قطر ضربه‌زننده ۲۰ میلی‌متر و انرژی ۱۵۰ ژول در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸. نمودار انرژی-زمان پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۰ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول.

همان‌طور که در نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود، پانل‌های دارای فوم نسبت به نمونه‌های بدون فوم، روند جذب انرژی سریع‌تر و مقدار جذب انرژی بیشتری را نشان داده‌اند. انرژی ناشی

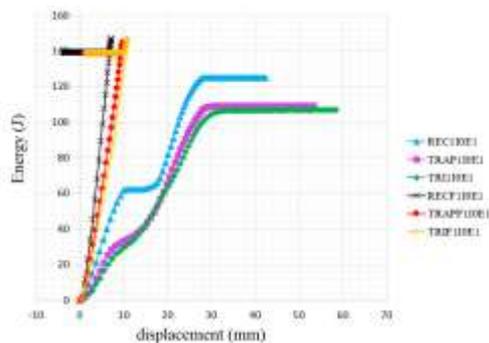


شکل ۷. نمودار استقلال از مش پانل REC115E1.

با توجه به شکل ۷ اندازه المان ۱ میلی‌متر برای تحلیل نمونه‌ها استفاده شده است.

## ۲.۴ نتایج شبیه‌سازی پانل‌های با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۰ میلی‌متری با انرژی ۱۵۰ ژول

در این شبیه‌سازی، ضخامت همه ورق‌های پانل‌های ساندویچی با و بدون فوم برابر با ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده و قطر ضربه‌زننده سر تخت معادل ۲۰ میلی‌متر تعیین شده است. انرژی برخورد نیز مقدار ۱۵۰ ژول انتخاب شده است. تحلیل تغییر شکل پانل‌های REC110E1 و RECF110E1 نشان می‌دهد که ضربه‌زننده در نمونه بدون فوم، پانل را به طور کامل سوراخ کرده و از سمت دیگر خارج شده است؛ در حالی که نمونه دارای فوم تنها دچار تغییر شکل موضعی در محل برخورد شده و سوراخ شدن کامل اتفاق نیفتاده است. علت این تفاوت، قرارگیری دقیق یال‌های هسته مستطیلی زیر ضربه‌زننده است که منجر به کمانش یال‌های عمودی و در نتیجه افزایش جذب انرژی در هنگام برخورد می‌شود. علاوه بر این، بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد که ورق در ناحیه برخورد، به دلیل نفوذ ضربه‌زننده به صورت دندریتی و از اطراف ناحیه برخورد جدا

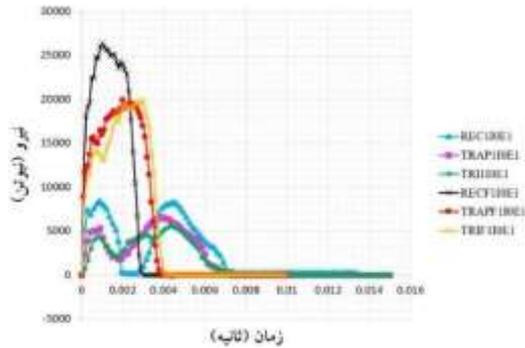


شکل ۹. نمودار انرژی-جابجایی پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۰ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول.

وجود فوم در هسته ساختار ساندویچی سبب شده است تا مقدار نفوذ ضربه‌زننده در پانل‌های دارای فوم در مقایسه با پانل‌های بدون فوم کمتر شود. در میان پانل‌های بدون فوم، پانل با هسته موجدار مستطیلی روند جذب انرژی بیشتر و بهتری را در مقایسه با پانل‌های با هسته موجدار دوزنقه‌ای و مثلثی از خود نشان داده است؛ در حالیکه پانل‌های دوزنقه‌ای و مثلثی روند جذب انرژی تقریباً یکسانی از خود نشان داده‌اند. نمودار نیرو برحسب زمان برای پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۰ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول در شکل ۱۰ ارائه شده است. با بررسی شکل ۱۰ مشاهده شد که پانل‌های بدون فوم دارای نمودارهای دو قله‌ای هستند؛ که این امر به دلیل سوراخ شدن پانل در اثر برخورد ضربه‌زننده با ورق بالایی و سپس با ساختار هسته و ورق پایینی پانل است؛ در صورتیکه پانل‌های دارای فوم همگی دارای نمودارهای تک قله‌ای هستند. همچنین نمودارهای شکل ۱۰ حاکی از آن است که پانل‌های دارای فوم قله‌های بزرگ‌تری از نیرو را ایجاد کرده‌اند؛ به‌طوری‌که پانل با هسته موجدار مستطیلی نسبت به دو پانل دیگر با هسته موجدار دوزنقه‌ای و مثلثی دارای فوم حداکثر نیروی بزرگ‌تری دارد. به‌طور مثال در پانل با هسته

از ضربه در این پانل‌ها به‌طور قابل‌توجهی سریع‌تر و موثرتر جذب شده است. به‌عنوان مثال، در زمان ۰,۰۱۵، پانل با هسته موجدار مستطیلی بدون فوم حدود ۶۲ ژول انرژی جذب کرده، در حالی که نمونه مشابه با فوم توانسته است ۱۴۶ ژول انرژی جذب کند که این افزایش معادل تقریباً ۱۳۵,۴ درصد بوده و نشان‌دهنده تاثیر مثبت حضور فوم است. در پانل‌های با هسته موجدار دوزنقه‌ای و مثلثی نیز حضور فوم موجب تسریع روند جذب انرژی نسبت به نمونه‌های بدون فوم شده است. همچنین، در میان پانل‌های بدون فوم، نمونه با هسته موجدار مستطیلی بیشترین میزان جذب انرژی را داشته است، در حالی که پانل‌های دوزنقه‌ای و مثلثی روند جذب انرژی تقریباً مشابهی را نشان داده‌اند. نمودار انرژی به ازای جابه‌جایی در شکل ۹ برای پانل‌های تحت ضربه با قطر ضربه‌زننده ۲۰ میلی‌متر و انرژی ۱۵۰ ژول ارائه شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، پانل‌های دارای فوم در مقایسه با نمونه‌های مشابه بدون فوم، با جابه‌جایی کمتر، انرژی بیشتری را جذب کرده‌اند. برای نمونه، در جابه‌جایی ۵ میلی‌متر، پانل با هسته موجدار مستطیلی بدون فوم حدود ۳۴ ژول و نمونه دارای فوم حدود ۹۹ ژول انرژی جذب کرده‌اند که نشان‌دهنده افزایش جذب انرژی تقریباً ۱۹۱,۱ درصدی ناشی از حضور فوم است. همچنین بیشینه جابه‌جایی در پانل‌های دارای فوم با هسته‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب برابر با ۹,۸، ۷,۱ و ۱۰,۷ میلی‌متر بوده که در این مقادیر نیز انرژی جذب‌شده در نمونه‌های دارای فوم به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از نمونه‌های بدون فوم است.

مستطیلی بدون فوم حداکثر نیرو ۸۴۴۴,۵۵ نیوتن و در پانل با هسته مستطیلی با فوم حداکثر نیرو ۲۶۳۳۷,۳ نیوتن است که این مقدار ۲۱۱,۸٪ افزایش مقدار نیرو را به دلیل حضور فوم نشان می‌دهد.

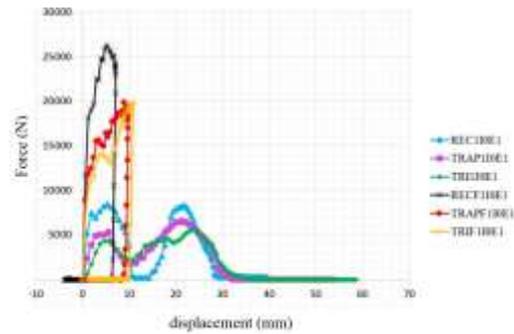


شکل ۱۰. نمودار نیرو-زمان پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۰ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول.

در مورد پانل‌های با هسته موجدار دوزنقه‌ای و مثلی دارای فوم نیز نسبت به پانل با هسته مشابه بدون فوم حداکثر مقادیر نیرو بیشتر است. اگر پرتابه را خودرو فرض کنیم، هدف اصلی کاهش شتاب ناگهانی و محافظت از سرنشینان است؛ بنابراین، ویژگی مطلوب داشتن جذب انرژی بالا در جابه‌جایی بیشتر و نیروی عکس‌العمل ملایم‌تر و گسترده‌تر در زمان است. در این شرایط، نیروی عکس‌العمل زیاد که ناگهانی وارد بیشتری وارد کند. پس در کاربردهای غیرنظامی مثل تصادف خودرو یا ایمنی سازه، نیروی عکس‌العمل زیاد ویژگی منفی محسوب می‌شود، زیرا منجر به آسیب بیشتر به پرتابه می‌شود. اما در صنایع نظامی، بالا بودن نیروی عکس‌العمل وارد بر پرتابه یک ویژگی مثبت محسوب می‌شود، زیرا باعث می‌شود پرتابه سریع‌تر متوقف شود، تخریب شود یا حتی به عقب بازتاب کند. در این شرایط، جذب سریع انرژی در جابه‌جایی کم،

یعنی مقاومت شدید در برابر نفوذ، هدف دفاعی مهمی است. دو قله‌ای بودن منحنی نیرو-زمان شکل ۱۰ می‌تواند یک ویژگی مثبت برای سازه جاذب انرژی محسوب شود، زیرا نشان‌دهنده جذب انرژی در دو مرحله مجزا توسط اجزای مختلف سازه مانند فوم و هسته موجدار است. قله اول معمولاً به پاسخ سریع لایه‌ی بالایی و شروع تغییر شکل فوم مربوط می‌شود، در حالی که قله دوم اغلب به درگیری کامل تر فوم و آغاز تغییر شکل یا کمانش ساختار هسته موجدار اختصاص دارد. وجود این دو مرحله جذب انرژی باعث توزیع تدریجی تر نیروی ضربه، کاهش تمرکز تنش و جلوگیری از شکست ناگهانی می‌شود. همچنین این رفتار چندمرحله‌ای نشان‌دهنده مشارکت مؤثر تمام اجزای داخلی سازه در فرایند جذب انرژی و افزایش پایداری سازه تحت ضربه است. نمودار نیرو برحسب جابجایی برای پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۰ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول در شکل ۱۱ ارائه شده است. با بررسی نمودار شکل ۱۱ مشخص شد که پانل‌های دارای فوم در عمق نفوذ کمتری نسبت به نمونه‌های بدون فوم، بیشینه نیروی بیشتری تولید کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که پانل با هسته مستطیلی کمترین عمق نفوذ اما بیشترین مقدار نیرو را دارا می‌باشد. همچنین، با توجه به اینکه مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی معرف میزان انرژی جذب شده است و مساحت زیر نمودار پانل‌های دارای فوم نسبت به نمونه‌های بدون فوم بیشتر است، بنابراین انرژی جذب شده توسط این پانل‌ها نیز بیشتر است.





شکل ۱۱. نمودار نیرو-جابجایی پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۰ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول.

انرژی جنبشی اولیه ضربه‌زننده است که طی فرآیند برخورد مستهلک می‌شود. این انرژی هم در آزمون تجربی از طریق محاسبه انتگرال نیرو نسبت به جابجایی و هم در شبیه‌سازی عددی توسط پارامترهایی مانند انرژی داخلی کل سازه (شامل انرژی کرنش، پلاستیک و اتلاف ویسکوز) در نرم‌افزار آباکوس استخراج شده است. بنابراین، انرژی خروجی ارائه‌شده در نمودارهای انرژی-زمان، نمایانگر انرژی تجمعی جذب شده توسط کل ساختار تا هر لحظه از زمان برخورد است.

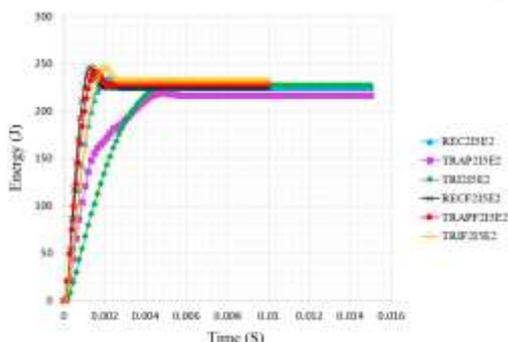
#### ۳.۴ نتایج شبیه‌سازی پانل‌های با ضخامت ورق ۲ میلی‌متر تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری با انرژی ۲۵۰ ژول

در این شبیه‌سازی، ضخامت تمامی ورق‌های پانل‌های ساندویچی با و بدون فوم برابر ۲ میلی‌متر و قطر ضربه‌زننده سر تخت ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شرایط برخورد نیز با انرژی ۲۵۰ ژول اعمال شده است. نتایج حاصل از این تحلیل در قالب حالت‌های تغییر شکل، نمودارهای نیرو و انرژی، و سهم جذب انرژی هر بخش از پانل ارائه گردیده است. حالت‌های تغییر شکل پانل‌های REC215E2 و REC210E2 نشان داد که ضربه‌زننده در هیچ‌یک از دو حالت با و بدون فوم، قادر به سوراخ کردن کامل پانل نبوده و تنها موجب تغییر شکل موضعی در محل برخورد شده است. همچنین، از آن‌جا که یال‌های هسته مستطیلی به‌صورت مستقیم در زیر ضربه‌زننده قرار داشته‌اند، در اثر برخورد، یال‌های عمودی به‌ویژه در پانل بدون فوم دچار کمناش شدید شده‌اند، که این موضوع موجب افزایش میزان جذب انرژی گردیده است. به همین ترتیب، تحلیل تغییر شکل پانل‌های

روند کاهش مقدار جابجایی و افزایش مقدار نیروی حداکثر در پانل‌های دارای فوم نسبت به نمونه‌های بدون فوم به‌وضوح قابل مشاهده است. علاوه بر این، نوع ساختار موجدار هسته نیز تأثیر قابل توجهی در کاهش جابجایی و افزایش نیروی حداکثر داشته است؛ به‌طوری‌که پانل‌های با هسته موجدار مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب باعث افزایش جابجایی و کاهش نیرو می‌شوند. نکته مهم این است که الحاق فوم آلومینیومی به ساختار هسته موجدار پانل ساندویچی منجر به کاهش تقریباً ۸۰ درصدی جابجایی ضربه‌زننده شده است. در مقابل، بررسی روند نیروی حداکثر در پانل‌های ساندویچی با و بدون فوم نشان می‌دهد که مقدار نیروی حداکثر در نمونه‌های دارای فوم با هسته‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب ۲۱۱، ۲۰۱ و ۲۵۱ درصد افزایش یافته است. این افزایش ناشی از افزایش مقاومت پانل و تقویت نیروی عکس‌العمل سازه ساندویچی در برابر ضربه به دلیل وجود فوم می‌باشد. در این پژوهش، انرژی بررسی‌شده انرژی جذب‌شده توسط سازه ساندویچی در برابر ضربه است که به‌صورت منطقی، ترکیبی از انرژی‌های داخلی مانند انرژی کرنش الاستیک و پلاستیک، انرژی جذب‌شده در اثر فشرده‌سازی فوم، و بخشی از

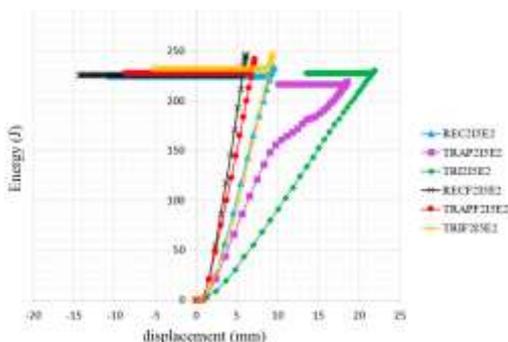
TRAP2I5E2 و TRAPF2I5E2 نیز نشان داد که ضربه‌زننده موفق به نفوذ کامل به هیچ‌یک از دو ساختار نشده است. در پانل بدون فوم، ضربه‌زننده با سوراخ نمودن ورق بالایی و ایجاد تغییر شکل شدید در هسته موجدار، موجب تغییر شکل موضعی پانل شده است؛ در حالی که در پانل دارای فوم، تغییر شکل تنها در ورق بالایی، فوم و هسته موجدار در محل برخورد متمرکز شده است، بدون آن که ورق بالایی سوراخ شود. بررسی چگونگی جدایش ورق‌ها نشان داد که ورق در ناحیه برخورد، در اثر نفوذ ضربه‌زننده، به‌صورت دنیروی شکل از اطراف محل برخورد جدا شده است. در مورد پانل‌های TRI2I5E2 و TRIF2I5E2، مشاهده شد که در پانل بدون فوم، ورق بالایی به‌طور کامل سوراخ شده و ضربه‌زننده با ایجاد گسیختگی شدید در هسته موجدار، در مجاورت ورق پایینی متوقف شده است؛ در حالی که در پانل دارای فوم، ضربه‌زننده تنها با ایجاد تغییر شکل شدید در ورق بالایی و نفوذ در بخش فومی هسته متوقف شده است. همچنین، یال‌های هسته مثلثی در هر دو ساختار در اثر ضربه دچار خمش قابل توجهی شده‌اند. مطابق بررسی صورت گرفته، ورق‌ها در ناحیه برخورد در اثر نفوذ ضربه‌زننده، از اطراف محل برخورد به‌صورت دنیروی شکل جدا شده‌اند. نمودار انرژی بر حسب زمان برای این پانل‌ها تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری با انرژی ۲۵۰ ژول، در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. با بررسی شکل ۱۲ مشاهده شد که پانل‌های دارای فوم نسبت به پانل‌های بدون فوم روند جذب انرژی بیشتر و سریع‌تری دارند و انرژی حاصل از ضربه را بسیار سریع‌تر و بهتر جذب می‌نمایند، به‌طوری‌که در لحظه ۰,۰۰۱۵ ثانیه، پانل با هسته موجدار مثلثی

بدون فوم تنها ۱۰۲ ژول انرژی جذب کرده، در حالی که پانل مشابه دارای فوم ۲۲۳ ژول انرژی جذب نموده است که این موضوع بیانگر افزایش ۱۱۸ درصدی جذب انرژی به دلیل وجود فوم می‌باشد؛



شکل ۱۲. نمودار انرژی-زمان پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۲۵۰ ژول.

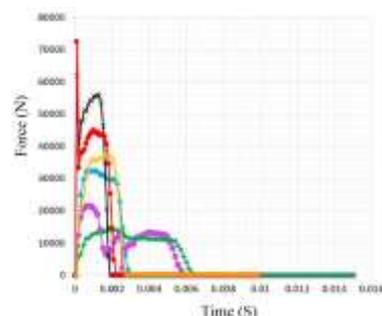
همچنین در میان پانل‌های بدون فوم، پانل با هسته موجدار مستطیلی عملکرد جذب انرژی مشابهی با سایر پانل‌های بدون فوم دارد، در حالی که در حالت‌های دارای فوم، پانل‌های با هسته موجدار دوزنقه‌ای و مثلثی نیز روند جذب انرژی بسیار سریع‌تری از حالت‌های مشابه بدون فوم از خود نشان داده‌اند؛ نمودار انرژی بر حسب جابجایی برای پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۲۵۰ ژول در شکل ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۳. نمودار انرژی-جابجایی پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۲۵۰ ژول.

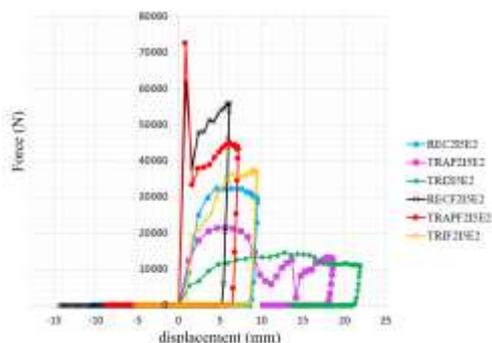


با توجه به شکل ۱۳ مشاهده شد که پانل های با هسته موجدار دارای فوم و پانل با هسته موجدار مستطیلی بدون فوم، نسبت به پانل های دیگر، با مقدار جابجایی کمتر، انرژی بیشتری را جذب نموده اند. به طور مثال، در جابجایی ۵ میلی متر، پانل با هسته موجدار مستطیلی ۱۱۷ ژول انرژی و پانل با هسته موجدار مستطیلی با فوم ۱۹۳ ژول انرژی جذب نموده است؛ که این مقدار ۶۴،۹٪ افزایش جذب انرژی را به سبب حضور فوم نشان می دهد. همچنین مقدار جابجایی حداکثر در پانل دارای فوم با هسته مستطیلی، دوزنقه ای و مثلثی به ترتیب ذکر شده در حدود ۶،۱، ۷،۲ و ۹،۴ میلی متر است، که به غیر از ساختار ساندویچی با هسته موجدار مستطیلی بدون فوم، نسبت به دو ساختار ساندویچی دیگر با هسته موجدار دوزنقه ای و مثلثی کمتر است. ضمناً مقادیر جابجایی ضربه زننده در پانل ها نشان می دهد که وجود فوم در هسته ساختار ساندویچی سبب شده است تا مقدار نفوذ ضربه زننده در پانل های دارای فوم کمتر شود؛ به طوریکه کمترین مقدار نفوذ مربوط به پانل با هسته موجدار مستطیلی با فوم و بیشترین مقدار نفوذ مربوط به پانل با هسته موجدار مثلثی بدون فوم است. نمودار نیرو ضربه زننده ۲۵ میلی متری و انرژی ۲۵۰ ژول در شکل ۱۴ ارائه شده است.



شکل ۱۴. نمودار نیرو-زمان پانل های تحت برخورد ضربه زننده ۲۵ میلی متری و انرژی ۲۵۰ ژول.

با توجه به شکل ۱۴ مشاهده شد که پانل های دارای فوم قله های بزرگ تری از نیرو را ایجاد کرده اند؛ به طوریکه در پانل های دارای فوم پانل با هسته موجدار مستطیلی نسبت به پانل با هسته موجدار مثلثی بیشترین مقدار حداکثر نیرو را داراست؛ که این مورد در خصوص پانل های بدون فوم نیز صادق است و پانل با هسته موجدار مستطیلی قله بزرگ تری از نیرو دارد. به طور مثال در پانل با هسته مستطیلی بدون فوم حداکثر نیرو ۳۲۵۴۱،۳ نیوتن و در پانل با هسته مستطیلی با فوم حداکثر نیرو ۶۱۹۲۳،۱ نیوتن است که این مقدار ۹۰،۲٪ افزایش مقدار نیرو را به دلیل حضور فوم نشان می دهد. در مورد پانل های با هسته موجدار دوزنقه ای و مثلثی دارای فوم نیز نسبت به پانل با هسته مشابه بدون فوم حداکثر مقادیر نیرو بیشتر است. نمودار نیرو برحسب جابجایی برای پانل های تحت برخورد ضربه زننده ۲۵ میلی متری و انرژی ۲۵۰ ژول در شکل ۱۵ ارائه شده است.



شکل ۱۵. نمودار نیرو-جابجایی پانل های تحت برخورد ضربه زننده ۲۵ میلی متری و انرژی ۲۵۰ ژول.

پانل های دارای فوم و پانل با هسته موجدار مستطیلی بدون فوم در عمق نفوذ کمتر، حداکثر نیروی بزرگ تری ایجاد نموده اند؛ علت این امر، استحکام بالای فوم آلومینیومی و مقاومت هسته موجدار مستطیلی در برابر کماتش است که سبب افزایش مقدار حداکثر نیروها شده است. افزایش

ضخامت ورق پانل‌های ساندویچی خود سبب کاهش مقدار نفوذ ضربه‌زننده و افزایش مقدار نیروهای عکس‌العمل سازه، علی‌الخصوص در نمونه‌های بدون فوم شده است. روند کاهش مقدار جابجایی و افزایش مقدار نیروی حداکثر در پانل‌های دارای فوم نسبت به پانل‌های بدون فوم مشهود است. همچنین تأثیر نوع ساختار موجدار هسته نیز در کاهش جابجایی و افزایش نیرو مؤثر است؛ به‌طوریکه پانل با هسته موجدار مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی به‌ترتیب ذکرشده، افزایش مقدار جابجایی و کاهش مقدار نیرو را ایجاد می‌کنند. نکته حائز اهمیت آن است که الحاق فوم آلومینیومی در ساختار هسته موجدار پانل ساندویچی در حدود ۳۵ الی ۶۱ درصد از مقدار جابجایی ضربه‌زننده در پانل کاسته است و در مقابل، با بررسی روند نیروی حداکثر در پانل‌های ساندویچی با و بدون فوم، ملاحظه می‌گردد که مقدار نیروی حداکثر در پانل‌های دارای فوم با هسته موجدار مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی به‌ترتیب در حدود ۹۰، ۲۳۶ و ۱۵۵ درصد افزایش داشته است؛ علت این امر، افزایش مقاومت پانل و در واقع افزایش مقدار نیروی عکس‌العمل سازه ساندویچی تحت ضربه به‌سبب وجود فوم است.

#### ۴.۴ نتایج شبیه‌سازی پانل‌های با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری با انرژی ۱۵۰ ژول

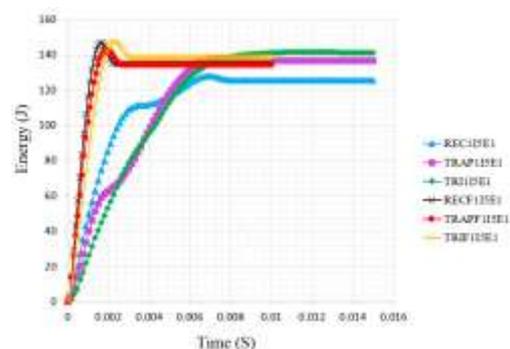
در این قسمت از شبیه‌سازی نیز ضخامت تمامی ورق‌های پانل‌های ساندویچی با و بدون فوم ۱ میلی‌متر و قطر ضربه‌زننده سر تخت ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده و این پانل‌ها تحت انرژی برخورد ۱۵۰ ژول قرار گرفته‌اند؛ مانند بخش‌های قبلی، ابتدا نتایج شبیه‌سازی حاصل از این بررسی در قالب حالت‌های تغییر شکل، نتایج نموداری و

سهم جذب انرژی هر قطعه ارائه شده و در نهایت نتایج تجربی آورده شده است. در اینجا حالت‌ها و نحوه تغییر شکل پانل‌ها شبیه‌سازی شد. حالت‌های تغییر شکل پانل‌های RECF1I5E1 و RECF1I5E1 نشان داد که ضربه‌زننده ورق بالایی پانل ساندویچی بدون فوم را به‌طور کامل سوراخ نموده و با ایجاد کمانش و تغییر شکل زیاد در هسته موجدار، در بالای ورق پایینی متوقف شده است؛ اما در پانل دارای فوم، ضربه‌زننده نتوانسته است پانل را سوراخ کند و تنها باعث تغییر شکل موضعی در محل برخورد شده است. پانل‌های هسته مستطیلی دقیقاً در زیر ضربه‌زننده قرار گرفته و در اثر برخورد، پانل‌های عمودی هسته دچار کمانش زیادی شده‌اند که این موضوع سبب جذب انرژی بیشتری شده است. همچنین بررسی نحوه سوراخ شدن ورق‌های پانل نشان داد که ورق در ناحیه برخورد، در اثر نفوذ ضربه‌زننده، به صورت دنیروی شکل از اطراف ناحیه برخورد جدا شده است. حالت‌های تغییر شکل پانل‌های TRAPF1I5E1 و TRAPF1I5E1 نیز نشان داد که در حالت بدون فوم، ضربه‌زننده ورق بالایی و هسته موجدار را سوراخ کرده و سبب تغییر شکل شدید ورق پایینی شده ولی در بالای آن متوقف شده است؛ در حالی که در پانل دارای فوم، ضربه‌زننده فقط باعث تغییر شکل موضعی شده و موفق به سوراخ کردن کامل پانل نشده است. در این حالت نیز هسته موجدار در اثر ضربه دچار گسیختگی و خمش قابل‌توجه شده است. حالت‌های تغییر شکل پانل‌های TRII5E1 و TRII5E1 نشان داد که اگرچه در پانل بدون فوم گسیختگی زیادی در ورق پشتی مشاهده شده اما ضربه‌زننده نتوانسته پانل را به‌طور کامل سوراخ نماید؛ در حالی که در پانل دارای فوم،





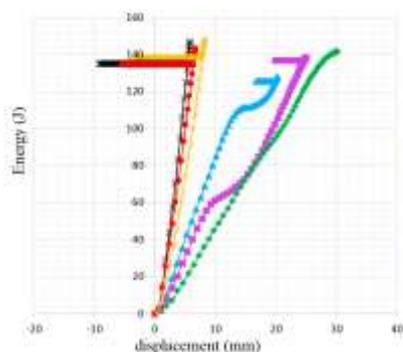
فقط ورق بالایی سوراخ شده و تغییر شکل موضعی ایجاد شده است. بررسی نحوه سوراخ شدن ورق‌ها در تمامی حالات نشان داد که در اثر نفوذ ضربه‌زننده، ورق از اطراف ناحیه برخورد جدا شده است. از نظر ظاهری، کمترین میزان نفوذ ضربه‌زننده در پانل‌های دارای فوم مربوط به پانل با هسته مستطیلی و بیشترین مربوط به پانل با هسته مثلثی است که این روند در پانل‌های بدون فوم نیز دیده می‌شود؛ از این توضیحات می‌توان نتیجه گرفت که هرچه یال‌های تشکیل‌دهنده تک‌سلول هسته‌ها به مرکز ناحیه برخورد نزدیک‌تر باشند یا قطر ضربه‌زننده بزرگ‌تر باشد، یال‌های هسته در اثر برخورد دچار کم‌انرژی‌تری شده و انرژی بیشتری را مستهلک می‌کنند. نمودار انرژی برحسب زمان برای پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول در شکل ۱۶ ارائه شده است.



شکل ۱۶. نمودار انرژی-زمان پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول.

همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده شد پانل‌های دارای فوم نسبت به پانل‌های بدون فوم روند جذب انرژی بیشتر و سریع‌تری دارند و انرژی حاصل از ضربه را بسیار سریع‌تر و بهتر جذب می‌نمایند. به‌طوریکه در لحظه ۰,۰۰۱۵ ثانیه پانل با هسته موجدار مستطیلی بدون فوم ۶۸,۸ ژول انرژی و پانل با هسته موجدار

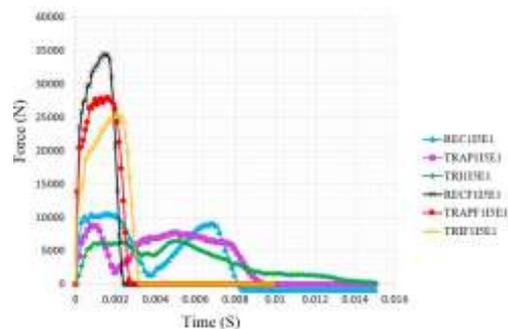
مستطیلی دارای فوم ۱۴۵ ژول انرژی جذب می‌کند؛ که این موضوع حاکی از افزایش ۱۱۰,۷٪ در میزان جذب انرژی است. در مورد پانل‌های با هسته موجدار ذوزنقه‌ای و مثلثی با فوم نیز روند جذب انرژی بسیار سریع‌تر از حالت مشابه بدون فوم است. در بین پانل‌های بدون فوم نیز پانل با هسته موجدار مستطیلی تقریباً تا لحظه ۰,۰۰۵ ثانیه روند و مقدار جذب انرژی بیشتری از خود نشان داده است؛ در صورتیکه پس از آن پانل‌های با هسته موجدار ذوزنقه‌ای و مثلثی مقدار بیشتری از انرژی را جذب نموده‌اند. همچنین پانل‌های با هسته موجدار ذوزنقه‌ای و مثلثی بدون فوم در کل روند جذب انرژی تقریباً یکسانی از خود نشان داده‌اند. نمودار انرژی برحسب جابجایی برای پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول در شکل ۱۷ ارائه شده است.



شکل ۱۷. نمودار انرژی-جابجایی پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول.

با توجه به شکل ۱۷ مشاهده شد که پانل‌های با هسته موجدار دارای فوم نسبت به پانل‌های با هسته مشابه بدون فوم با مقدار جابجایی کمتر انرژی بیشتری را جذب نموده‌اند. به‌طور مثال در جابجایی ۵ میلی‌متر پانل با هسته موجدار مستطیلی ۴۳ ژول انرژی و پانل با هسته موجدار مستطیلی با فوم ۱۲۴ ژول انرژی جذب نموده است؛ که این مقدار ۱۸۸,۳٪ افزایش جذب انرژی

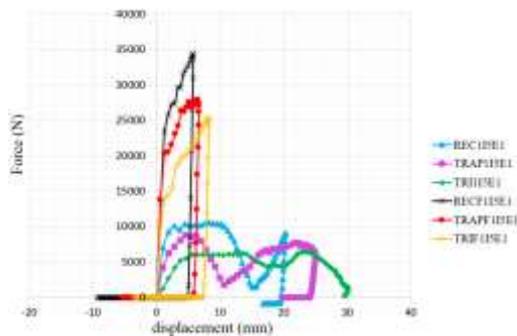
را به سبب حضور فوم نشان می‌دهد. همچنین مقدار جابجایی حداکثر در پانل با هسته مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب ذکر شده در حدود ۵,۷، ۶,۶ و ۸,۲ میلی‌متر است و در این مقادیر انرژی بیشتری را نسبت به پانل‌های مشابه بدون فوم جذب نموده‌اند. الحاق فوم در هسته ساختار ساندویچی سبب شده است تا مقدار نفوذ ضربه‌زننده در پانل‌های دارای فوم در مقایسه با پانل‌های بدون فوم کمتر شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که هسته موجدار مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی در پانل‌های با و بدون فوم به ترتیبی که اشاره شد؛ افزایش مقادیر جابجایی را در سازه‌های ساندویچی ایجاد نموده‌اند. نمودار نیرو برحسب زمان برای پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول در شکل ۱۸ ارائه شده است. با بررسی شکل ۱۸ مشاهده شد که پانل‌های بدون فوم دارای نمودارهای دو قله‌ای هستند که این امر به دلیل سوراخ شدن ورق بالایی پانل در اثر برخورد ضربه‌زننده و سپس برخورد با ساختار هسته و ورق پایینی پانل است؛ در صورتیکه پانل‌های دارای فوم همگی دارای نمودارهای تک قله‌ای هستند.



شکل ۱۸. نمودار نیرو-زمان پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول.

همچنین نمودارهای شکل ۱۸ حاکی از آن است که پانل‌های دارای فوم قله‌های بزرگ‌تری از

نیرو را ایجاد کرده‌اند؛ به‌طوری‌که پانل با هسته مستطیلی نسبت به دو پانل دیگر با هسته دوزنقه‌ای و مثلثی دارای فوم حداکثر نیروی بزرگ‌تری دارد. به‌طور مثال در پانل مستطیلی بدون فوم حداکثر نیرو ۱۰۵۷۸,۱ نیوتن و در پانل با هسته مستطیلی با فوم حداکثر نیرو ۳۴۴۸۲,۱ نیوتن است که این مقدار ۲۲۵,۹٪ افزایش مقدار نیرو را به دلیل حضور فوم نشان می‌دهد. در مورد پانل‌های با هسته موجدار دوزنقه‌ای و مثلثی دارای فوم نیز نسبت به پانل با هسته مشابه بدون فوم حداکثر مقادیر نیرو بیشتر است. نمودار نیرو برحسب جابجایی برای پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول در شکل ۱۹ ارائه شده است.



شکل ۱۹. نمودار نیرو-جابجایی پانل‌های تحت برخورد ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری و انرژی ۱۵۰ ژول.

با بررسی شکل ۱۹ مشاهده شد که پانل‌های دارای فوم نسبت به پانل‌های بدون فوم، در عمق نفوذ کمتر، حداکثر نیروی بزرگ‌تری ایجاد نموده‌اند؛ به‌طوری‌که پانل با هسته مستطیلی دارای کمترین میزان عمق نفوذ و بیشترین مقدار نیرو بوده است که این امر به استحکام بالای فوم آلومینیومی نسبت داده می‌شود. روند کاهش مقدار جابجایی و افزایش نیروی حداکثر در پانل‌های دارای فوم نسبت به نمونه‌های بدون فوم کاملاً مشهود است. همچنین نوع ساختار موجدار

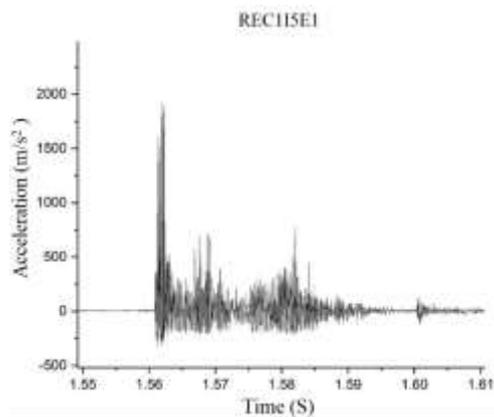


هسته نیز نقش مؤثری در کاهش جابجایی و افزایش نیرو داشته است؛ به طوری که ترتیب ساختارهای مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب باعث افزایش جابجایی و کاهش نیرو شده‌اند. نکته مهم آن است که افزودن فوم آلومینیومی در ساختار هسته موجدار، به طور متوسط حدود ۷۰ درصد از مقدار جابجایی ضربه‌زننده در پانل کاسته است. در مقابل، بررسی روند تغییرات نیروی حداکثر نشان داد که این نیرو در پانل‌های دارای فوم با هسته‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی به ترتیب حدود ۲۲۵، ۲۱۷ و ۲۹۰ درصد افزایش یافته است؛ که این افزایش به دلیل ارتقاء مقاومت سازه‌ای پانل و در واقع، افزایش نیروی عکس‌العمل در برابر ضربه به واسطه وجود فوم بوده است. در بخش‌های آینده، نتایج حاصل از این گروه از شبیه‌سازی‌ها به طور کامل با آزمون تجربی متناظر مورد بحث قرار خواهد گرفت.

#### ۵.۴ نتایج آزمون تجربی

با توجه به موارد اشاره شده در بخش قبل، آزمون‌های تجربی بر روی پانل‌های ساخته شده با ورق آلومینیوم با ضخامت ۱ میلی‌متر در حالت بدون فوم و پر شده با فوم تحت انرژی ۱۵۰ ژول و ضربه‌زننده تخت با قطر ۲۵ میلی‌متر انجام گرفته است که نتایج آن در این قسمت ارائه می‌شود. نکته حائز اهمیت آن است داده‌های سنسور نیرو-زمان دارای خطای زیادی است و قابل اتکا نیست و داده‌های سنسور شتاب نیز دارای نویز زیادی است؛ که به ناچار داده‌های آزمون تجربی بر اساس سنسور شتاب-زمان ارائه شده‌اند. واحد سنجش شتاب دستگاه بر اساس متر بر مجذور ثانیه است که می‌بایست در صورت نیاز برای

تطابق با خروجی‌های شبیه‌سازی تبدیل واحد انجام پذیرد. پس از بررسی داده‌های شتاب-زمان، یک نمونه از داده‌های شتاب-زمان خام آزمون تجربی پیش از اعمال هرگونه عملیات ریاضی بر روی آن در شکل ۲۰ ارائه شده است.

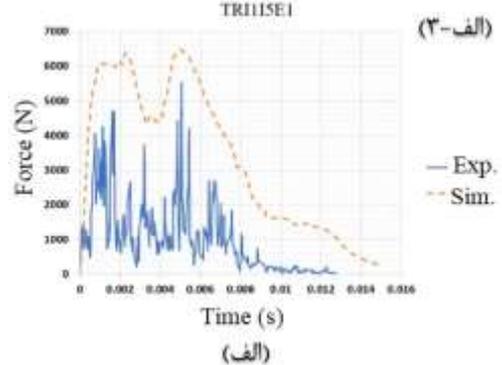
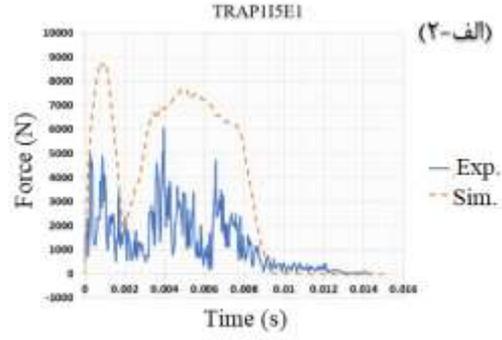
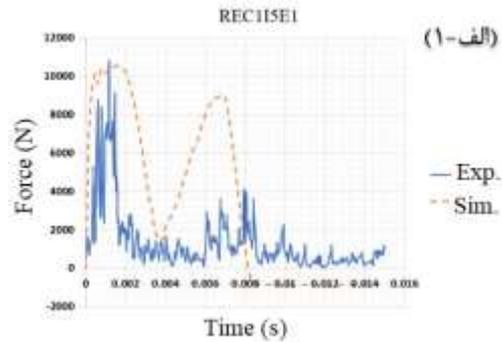
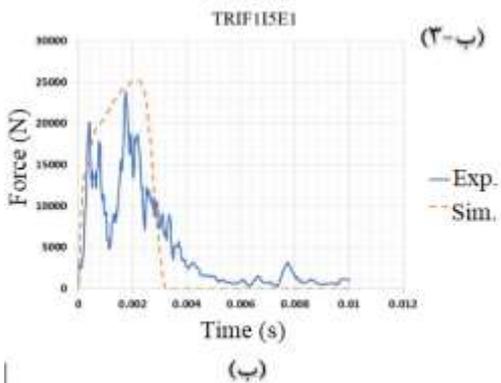
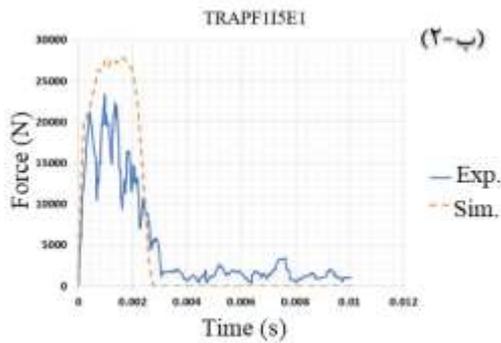
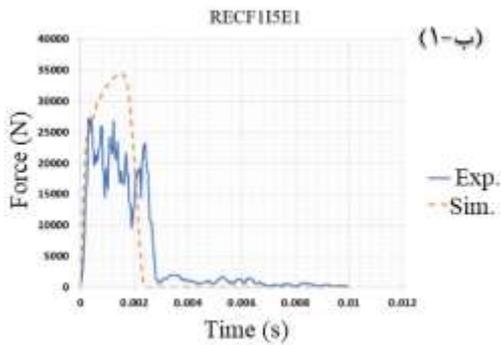


شکل ۲۰. نمودار خام شتاب-زمان تجربی نمونه REC115E1

پس از انجام یک سری کار محاسباتی شامل تبدیل واحدها، یافتن نمودار مربوطه اولین برخورد و انتقال به مبدأ مختصات، حذف شتاب-های منفی و در نهایت کاهش نویز از طریق اعمال فیلتر، نمودارها در شکل ۲۱ قابل مشاهده است. شایان ذکر است که فرآیند نویزگیری و استفاده از فیلتر، خود دارای خطای زیادی است و کیفیت داده‌ها را دستخوش تغییرات قابل توجهی خواهد نمود. همچنین به علت حجم بالای داده‌های شتاب-زمان کار بر روی داده‌ها در نرم‌افزار اکسل<sup>۴</sup> بسیار دشوار است و گاهی سیستم در حین رسم نمودارها بسیار کند شده یا به طور کامل قفل می‌شود؛ لذا برای عبور از این مسئله در کنار نرم‌افزار اکسل از نرم‌افزار ترسیم حرفه‌ای نمودار اریجین<sup>۵</sup> نیز استفاده شده است. این نرم‌افزار علاوه بر سادگی، قابلیت‌های بسیار فراوان و متنوعی در رسم انواع نمودار دارد و امکان استفاده از

4 Excel  
5 Origin

فیلترهای مختلف در آن مهیاست. زمان کل تنظیم شده در آزمون تجربی ۴ ثانیه است و دستگاه نمونه برداری در این زمان ۳۸۴۰۰۰ ردیف داده ثبت می کند.



شکل ۲۱. نمودارهای نیرو-زمان تجربی و شبیه سازی (الف) بدون فوم، (الف-۱) مستطیلی توخالی، (الف-۲) دوزنقه توخالی، (الف-۳) مثلثی توخالی، (ب) با فوم، (ب-۱) مستطیلی با فوم، (ب-۲) دوزنقه با فوم و (ب-۳) مثلثی با فوم.

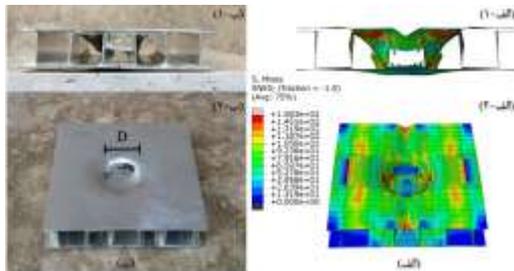
مقایسه با نتایج عددی وجود دارد بنابراین خطا در برخی از مقادیر محاسباتی وجود دارد. در ادامه حالت های تغییر شکل آزمون تجربی در مقایسه با شبیه سازی های نرم افزاری ارائه شده است و برای مثال دو نمونه از مقایسه ها به همراه شکل توضیح داده شده است. با مقایسه این نتایج

با بررسی نمودارهای شکل ۲۱ نوسان و نویز زیادی در نتایج آزمون تجربی نسبت به شبیه سازی نرم افزاری مشاهده شد. در ادامه به کمک این نمودارها مقدار انرژی جذب شده محاسبه شد؛ اختلاف بین مقادیر حداکثر در این نمودارها قابل توجه است و روند متفاوتی در



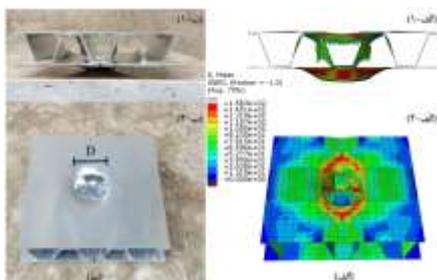
می توان تطابق مناسبی مابین این نتایج به لحاظ ظاهری مشاهده نمود. مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی حالت های تغییر شکل پانل REC115E1 در شکل ۲۲ ارائه شده است. با توجه به شکل ۲۲ الف و ب مشاهده شد ورق رویه یا همان ورق بالایی در اثر ضربه دچار سوراخ شدگی کامل شده است و صفحه پشتی یا همان ورق پایینی در اثر ضربه دچار تغییر شکل جزئی شده است؛ اما با توجه به شکل ۲۲ ب-۱ میزان نفوذ ضربه زننده در حالت تجربی کمتری کمتر از حالت شبیه سازی نشان داده شده در شکل ۲۲ الف-۱ است. علت این امر می تواند به سبب کاهش انرژی برخورد به دلیل عدم روان کاری مناسب راهنماها و یا گیر کردن جزئی مجموعه رها شونده در هنگام سقوط باشد. همچنین به علت آنکه دهانه باز هسته موجدار مستطیلی پانل های ساخته شده کمی به سمت هم متمایل هستند (با زاویه کم)، همین امر سبب شده پس از آزمون تجربی، هسته مستطیلی در اثر کمناش ناشی از برخورد ضربه زننده کمی به سمت داخل متمایل شود؛ در صورتیکه در حالت شبیه سازی دهانه باز هسته مستطیلی در اثر کمناش هسته به سمت خارج متمایل شده است. از آنجاکه در آزمون تجربی ضربه زننده با کمی انحراف از مرکز پانل به آن برخورد کرده است مقداری انحراف نسبت به قسمت میانی در حالت آسیب دیده می- شود (شکل ۲۲ ب). با توجه به شکل ۲۲ ب-۲ اندازه قطر محل سوراخ ایجاد شده در ناحیه ضربه که با علامت D مشخص شده است به اندازه قطر ضربه زننده و برابر با ۲۵ میلی متر بوده است. مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی حالت های تغییر شکل پانل TRAP115E1 در شکل ۲۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۲۳ الف و ب، در

اثر ضربه وارده ورق بالایی پانل به طور کامل سوراخ و دیواره های دوزنقه ای شکل هسته تخریب شده است و در نهایت با ایجاد یک تغییر شکل زیاد در ورق پایینی در بالای آن متوقف شده است.



شکل ۲۲. حالت های تغییر شکل پانل REC115E1 (الف) نتایج شبیه سازی، الف-۱) نمای جانبی، الف-۲) نمای سه بعدی، ب) نتایج تجربی، ب-۱) نمای جانبی و ب-۲) نمای سه بعدی.

همچنین از آنجاکه در آزمون تجربی ضربه زننده با کمی انحراف از مرکز پانل به آن برخورد کرده است مقداری انحراف نسبت به قسمت میانی در حالت آسیب دیده می شود (شکل ۲۳ ب). در نهایت با بررسی کلی شکل های ۲۳ الف و ب تطابق مناسبی بین نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی مشاهده می شود. ضمناً با توجه به شکل ۲۳ ب-۲ اندازه قطر محل سوراخ ایجاد شده در ناحیه ضربه که با علامت D مشخص شده است به اندازه قطر ضربه زننده و برابر با ۲۵ میلی متر بوده است.



شکل ۲۳. حالت های تغییر شکل پانل TRAP115E1 (الف) نتایج شبیه سازی، الف-۱) نمای جانبی، الف-۲) نمای سه بعدی، ب) نتایج تجربی، ب-۱) نمای جانبی و ب-۲) نمای سه بعدی.

با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی حالت‌های تغییر شکل پانل TR115E1، ضربه-زنده ورق بالا و هسته موجدار را به‌طور کامل سوراخ نموده و با تخریب نسبتاً کامل ورق پایینی بدون خروج از آن متوقف‌شده است. نحوه گسیختگی در ورق پایینی در حالت شبیه‌سازی و تجربی کمی با یکدیگر متفاوت است؛ بطوریکه در حالت تجربی به صورت یک طرفه در حال جداشدن است. ضمناً اندازه قطر محل سوراخ ایجاد شده در ناحیه ضربه به اندازه قطر ضربه-زنده و برابر با ۲۵ میلی‌متر بوده است. در مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی حالت‌های تغییر شکل پانل RECF115E1 سطح روی پانل ساندویچی در اثر ضربه وارده دچار تغییر شکل موضعی شده است؛ به نحوی که این مقدار تغییر شکل به وجود آمده صفحه پشتی را نیز دچار تغییر شکل جزئی نموده و در اثر این برخورد ورق رویه دچار پارگی نشده است. از آنجایی که هسته مستطیلی دارای یال‌هایی عمودی در قسمت میانی سازه ساندویچی و دقیقاً در زیر ضربه است؛ در اثر ضربه نیروی زیادی را به سمت صفحه پشتی هدایت می‌کند؛ لذا میزان جابجایی ورق پشتی نسبت به دو پانل دیگر دارای فوم بیشتر است. ضمناً اندازه قطر محل تغییر شکل یافته در ناحیه ضربه که با علامت D مشخص شده است به اندازه قطر ضربه‌زنده و برابر با ۲۵ میلی‌متر بوده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی حالت‌های تغییر شکل پانل TRAPF115E1 نشان داد در اثر برخورد ضربه‌زنده با سطح بالای پانل، در محل برخورد تغییر شکل موضعی ایجاد شده است و این مقدار تغییر شکل ورق پشتی را نیز دچار تغییر شکل محدودی نموده است. مقدار تغییر شکل ورق پشتی پانل با هسته دوزنقه‌ای

دارای فوم نسبت به پانل با هسته موجدار مستطیلی با فوم مقداری کمتر است که علت این امر را می‌توان در ایجاد کماتش بیشتر در هسته مستطیلی و انتقال نیرو به سمت ورق پشتی دانست. مقدار جزئی پارگی در صفحه بالایی پانل می‌تواند به علت عدم برخورد دقیق ضربه‌زنده در مرکز پانل و یا به علت عدم توازی سطح زیرین ضربه‌زنده با صفحه رویی پانل ساندویچی رخ داده باشد. اندازه قطر محل تغییر شکل یافته به اندازه قطر ضربه‌زنده و برابر با ۲۵ میلی‌متر بوده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی حالت‌های تغییر شکل پانل TRIF115E1 نشان داد که در اثر برخورد، ضربه‌زنده کمی در داخل پانل فرو رفته و سپس متوقف‌شده است. میزان نفوذ ضربه-زنده نسبت به دو پانل دارای فوم دیگر بیشتر است، به‌طوری‌که منجر به سوراخ‌شدگی کامل ورق بالایی شده است. مقدار تغییر شکل ورق پشت نیز نسبت به دو پانل دارای فوم دیگر کمتر است. ورق بالای پانل در اطراف محل برخورد کمی به سمت بالا تغییر شکل داده است که این امر می‌تواند به دلیل انرژی برگشت ضربه‌زنده پس از اولین برخورد با سطح پانل و یا به دلیل تلاش اپراتور دستگاه برای جدا نمودن ضربه‌زنده گیر کرده در پانل باشد. اندازه قطر محل تغییر سوراخ شده در ناحیه ضربه به اندازه قطر ضربه‌زنده و برابر با ۲۵ میلی‌متر بوده است. برای مقایسه مقدار نفوذ ضربه‌زنده در پانل و ایجاد تغییر شکل پلاستیک ماندگار مقدار جابجایی مرکز صفحه بالایی و مرکز صفحه پشتی پانل به همراه درصد خطا در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. مقادیر جابجایی ذکر شده در این جداول به دلیل اینکه نمودارهای شتاب-زمان تجربی دارای نویز زیادی است و منجر به بروز خطای زیادی در محاسبه مقادیر جابجایی



می‌شود، توسط کولیس از روی خود پانل اندازه‌گیری شده‌اند.

جدول ۲. جابجایی مرکز صفحه بالایی پانل‌های REC115E1, TRAP115E1, TRI115E1, RECF115E1

TRIF115E1 و TRAPF115E1

کد نمونه	مقدار جابجایی عددی (mm)	مقدار جابجایی تجربی (mm)	درصد خطا (%)
REC115E1	۱۸/۸	۱۳/۳	۴۱/۳
TRAP115E1	۲۳/۹	۲۲/۵	۶/۲
TRI115E1	۲۹	۲۷/۱	۷
RECF115E1	۴/۴	۳/۲	۳۷/۵
TRAPF115E1	۵/۶	۴/۷	۱۹/۱
TRIF115E1	۷	۶/۴	۹/۳

جدول ۳. جابجایی صفحه پشتی پانل‌های REC115E1, TRAP115E1, TRI115E1, RECF115E1 و TRAPF115E1

TRIF115E1

کد نمونه	مقدار جابجایی عددی (mm)	مقدار جابجایی تجربی (mm)	درصد خطا (%)
REC115E1	۲/۵	۲	۲۵
TRAP115E1	۷/۵	۷/۲	۴/۱
TRI115E1	۱۲	۱۰/۹	۱۰
RECF115E1	۲	۲/۳	-۱۳
TRAPF115E1	۰/۹	۲/۳	-۶۰/۸
TRIF115E1	۰/۶	۲/۱	-۷۱/۴

سختی مؤثر ناشی از چسبندگی و قیود سطحی است. در مدل عددی، معمولاً تماس بین اجزا به صورت ساده‌سازی شده با ضریب اصطکاک کم یا بدون پیوستگی کامل مدل می‌شود، در حالی که در شرایط واقعی، تماس کامل، اصطکاک بالا، و گاهی قفل‌شدگی مکانیکی بین دیواره‌های موج و فوم موجب افزایش سختی موضعی و کاهش جابه‌جایی کل می‌شود. همچنین، موج‌های قائم در هسته مستطیلی نسبت به هندسه‌های مثلثی و دوزنقه‌ای، به دلیل زاویه برخورد عمودی با ضربه‌زننده، زودتر وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند و در نتیجه، جذب انرژی آن‌ها در عمق کمتری اتفاق می‌افتد. این رفتار موجب می‌شود در شرایط تجربی، تغییر شکل محدودتر و نفوذ کمتر رخ دهد. در مقابل، مدل عددی که فاقد بسیاری از ویژگی‌های مکانیکی واقعی نظیر اصطکاک موضعی، سخت‌شوندگی کرنشی و میرایی تماس است، پایداری کمتری در برابر بارگذاری نشان داده و جابه‌جایی نهایی بیشتری را گزارش می‌کند. بنابراین، هندسه خاص هسته مستطیلی با دیواره‌های عمود و سطوح تماس گسترده، بیشترین حساسیت را نسبت به دقت مدل‌سازی تماس در تحلیل عددی دارد و همین مسئله، علت اصلی اختلاف چشم‌گیرتر در جابه‌جایی عددی و تجربی در این نوع هسته نسبت به هندسه‌های دیگر محسوب می‌شود. از آنجاکه انجام آزمون‌ها طی چند مرحله صورت گرفته است در هر مرحله باید با توجه به ارتفاع زیاد سقوط، بوش‌های راهنماها روغن‌کاری شوند تا هنگام سقوط، اتلاف انرژی اصطکاکی به حداقل مقدار خود رسیده و از گیرکردن مجموعه رها شونده در هنگام رها شدن جلوگیری به عمل آورد؛ اما متأسفانه این کار در نمونه‌هایی که

با مشاهده جدول ۲ در تحلیل‌های ضربه سرعت پایین بر پانل‌های ساندویچی با هسته موجدار، همواره اختلافی میان نتایج عددی و تجربی در پارامتر جابه‌جایی مشاهده می‌شود، به طوری که معمولاً مقدار جابه‌جایی پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی عددی بیشتر از مقدار به دست آمده از آزمون تجربی است. این اختلاف در نمونه‌های دارای هسته مستطیلی به صورت برجسته‌تری مشاهده شده است. در ساختارهای مستطیلی، به دلیل وجود دیواره‌های کاملاً قائم که تماس مستقیم و پیوسته‌ای با فوم آلومینیومی و ورق‌های رویه دارند، رفتار مکانیکی این بخش از سازه به شدت وابسته به نحوه تعریف تماس و



درصد خطای آن‌ها زیاده‌تر است، انجام نشده است و صرفاً در دو نمونه دوزنقه و مثلثی بدون فوم آن هم به صورت کاملاً اتفاقی انجام گرفته است. یکی دیگر از عوامل مؤثر در ایجاد اختلاف مابین نتایج، عدم برخورد دقیق ضربه‌زننده در مرکز پانل ساندویچی است؛ که به دلیل عوامل زیادی از جمله عیوب ابعادی در هنگام ساخت و مونتاژ پانل‌ها، لقی مجموعه رها شونده، عدم هم‌مرکزی ضربه‌زننده و مرکز سوراخ دنیروی گیره، دقیق نبودن برخی از سوراخ‌های میز اصلی دستگاه و سازه‌ای که گیره‌ها روی آن‌ها سوار است و دیگر عوامل تأثیرگذار رخ داده است. همه این عوامل سبب می‌شود ضربه‌زننده دقیقاً در مرکز پانل و در بین فضای باز هسته سلول برخورد نماید و بر میزان جابجایی‌ها اثر منفی بگذارد. یکی دیگر از دلایلی که بر عدم تطابق بین نتایج می‌افزاید عدم توزیع یکنواخت خواص مکانیکی در فوم خریداری شده است، که عموماً به دلیل توزیع غیریکنواخت چگالی در فوم ایجاد می‌گردد. در هنگام ریخته‌گری فوم معمولاً هرچقدر در جهت ارتفاع قالب به سمت پایین پیش برویم با افزایش چگالی فوم روبرو می‌شویم و بالعکس؛ که این موضوع در اثر وجود جاذبه رخ می‌دهد. همانند جدول ۲ در جدول ۳ نیز مشاهده شد که درصد خطای بین نتایج تجربی و عددی به‌جز دو نمونه دوزنقه و مثلثی پرشده با فوم در محدوده قابل قبولی است؛ که مانند توضیحات بخش قبل احتمالاً به دلیل عوامل مطرح‌شده رخ داده است. در نهایت با توجه به آنچه که تاکنون گفته شد و جداول ۲ و ۳ اگر نتایج شبیه‌سازی را ملاک عمل باشد می‌توان گفت که پانل‌های ساندویچی با هسته‌های موجدار مستطیلی، دوزنقه و مثلثی به ترتیب ذکر شده عملکرد بهتری در جلوگیری از نفوذ ضربه‌زننده

دارند؛ به‌طوری‌که هسته مستطیلی بیشترین تأثیر و مثلثی کمترین تأثیر را داراست. اما در مقابل باید اشاره نمود که میزان تغییر شکل ورق پشتی بر عکس مورد قبل است و جابجایی ورق پشتی هسته مستطیلی نسبت به مثلثی بیشتر است.

#### ۶.۴ پارامترهای شاخص در جذب انرژی

با توجه به آنچه که تاکنون گفته شد و با توجه به روابط ۱ تا ۴ بیان شده در بخش ۲ می‌توان پارامترهای شاخص در جذب انرژی هر پانل را محاسبه نمود. میزان جذب انرژی ویژه در پانل‌های دارای فوم کمتر از پانل‌های بدون فوم است؛ که علت این موضوع  $W_m$  یا جرم نمونه‌های پانل ساندویچی است؛ که با توجه به رابطه ۴ از آنجاکه مقدار جرم سازه با میزان جذب انرژی ویژه رابطه عکس دارد؛ لذا افزایش جرم نمونه‌ها به سبب حضور فوم آلومینیومی با چگالی بالا در ساختار هسته موجدار پانل‌ها سبب کاهش مقدار جذب انرژی ویژه می‌شود. نکته حائز اهمیت دیگر در اختلاف مقادیر جذب انرژی ویژه بین پانل‌های دارای فوم و بدون فوم آن است که در پانل‌های بدون فوم از تمام ظرفیت جذب انرژی پانل استفاده شده است، در حالیکه پانل‌های دارای فوم ظرفیت جذب انرژی بسیار بالاتری نسبت سازه‌های ساندویچی مشابه بدون فوم دارند. در حقیقت با توجه به رابطه ۴ هرچقدر مقدار صورت کسر یا به عبارتی انرژی جذب شده بیشتر شود مقدار جذب انرژی ویژه نیز بیشتر می‌شود. بیشترین مقدار مربوط به مدل TRIF110E1 و کمترین مقدار آن مربوط به مدل RECF110E1 می‌باشد. مقادیر  $\eta$  نیز در پانل‌های با و بدون فوم تقریباً به یکدیگر نزدیک‌اند و بیشترین مقدار آن مربوط به مدل TRIF110E1 و کمترین مقدار



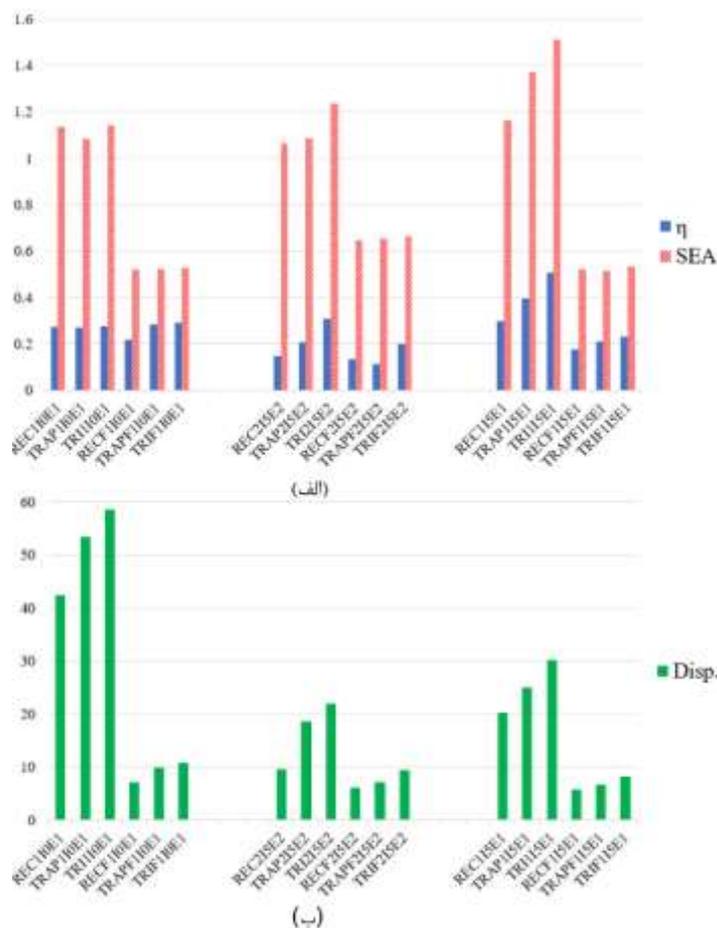


مربوط به مدل RECF110E1 می‌باشد. راندمان نیروی لهدیگی برای یک جاذب ایده‌آل ۱ است اما دستیابی به این عدد بسیار مشکل است. میزان SEA در پانل‌های دارای فوم کمتر از پانل‌های بدون فوم است که دلیل آن جرم نمونه‌های پانل ساندویچی است؛ چرا که افزایش جرم نمونه‌ها به سبب حضور فوم آلومینیومی با چگالی بالا سبب کاهش مقدار جذب انرژی ویژه آن‌ها می‌شود. نکته مهم دیگر آن است که پانل‌های دارای فوم نسبت به پانل‌های بدون فوم ظرفیت جذب انرژی بالاتری دارند و هر چه مقدار انرژی جذب شده بیشتر شود مقدار SEA نیز بیشتر می‌شود. بیشترین مقدار مربوط به مدل TRI2I5E2 و کمترین مقدار آن مربوط به مدل RECF2I5E2 می‌باشد. مقادیر  $\eta$  نیز در پانل‌های با و بدون فوم با یکدیگر متفاوت است و مقادیر آن در پانل‌های با فوم از پانل‌های بدون فوم کمتر است؛ بطوریکه بیشترین مقدار آن مربوط به مدل TRI2I5E2 و کمترین مقدار مربوط به مدل TRAPF2I5E2 می‌باشد. میزان جذب انرژی ویژه در پانل‌های دارای فوم کمتر از پانل‌های بدون فوم است؛ که علت این موضوع همانند مدل‌های قبلی اشاره شده  $W_m$  یا جرم نمونه‌های پانل ساندویچی است؛ چرا که افزایش جرم نمونه‌ها به دلیل الحاق فوم آلومینیوم سبب کاهش مقدار SEA می‌شود. همچنین در پانل‌های بدون فوم به صورت تقریبی از تمام ظرفیت جذب انرژی پانل استفاده شده و پانل تحت انرژی ضربه تقریباً به‌طور کامل سوراخ شده است (مدل با هسته دوزنقه‌ای و مثلثی)، در حالیکه در پانل‌های دارای فوم ظرفیت جذب انرژی بسیار بالاتری نسبت سازه‌های ساندویچی مشابه بدون فوم وجود دارد و از تمام ظرفیت جذب انرژی آن‌ها استفاده نشده است. در حقیقت

با توجه به رابطه ۴ هرچه قدر مقدار صورت کسر یا به عبارتی انرژی جذب شده بیشتر شود مقدار جذب انرژی ویژه نیز بیشتر می‌شود. اگر انرژی ضربه در پانل‌های این دسته به صورت تقریبی تا حدود ۳ برابر افزایش یابد قطعاً مقادیر جذب انرژی ویژه پانل‌های دارای فوم نسبت به پانل‌های بدون فوم افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار مربوط به مدل TRI1I5E1 و کمترین مقدار آن مربوط به مدل TRAPF1I5E1 می‌باشد. مقادیر  $\eta$  نیز در پانل‌های با و بدون فوم با یکدیگر متفاوت است و مقادیر آن در پانل‌های با فوم از پانل‌های بدون فوم کمتر است؛ بطوریکه بیشترین مقدار مربوط به مدل TRI1I5E1 و کمترین مقدار مربوط به مدل RECF1I5E1 می‌باشد. اختلاف بین جرم‌های ارائه‌شده در جداول ۷ الی ۹ خصوصاً در پانل‌های بدون فوم به دلیل آن است که طول هسته مستطیلی از دوزنقه و دوزنقه از مثلثی بیشتر است و با توجه به چگالی ورق آلومینیوم این مقدار اختلاف در جرم‌های ذکر شده طبیعی است. با توجه به نمودارهای شتاب-زمان به دست آمده از آزمون تجربی و به کمک روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ و نرم‌افزار متلب می‌توان مقدار جابجایی ضربه‌زننده را محاسبه نمود. برای به دست آوردن مقدار انرژی جذب‌شده در آزمون تجربی نیز از رابطه ۱ استفاده می‌شود؛ که تمامی این فرمول‌ها در قالب یک کد متلب نوشته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. این کد، داده‌های شتاب-زمان را از یک فایل اکسل فراخوانی نموده و بر اساس آن سرعت، جابجایی و نیرو را محاسبه می‌نماید و داده‌های نیرو-جابجایی را در یک فایل اکسل دیگر ذخیره می‌کند و نهایتاً با انتگرال‌گیری از داده‌های نیرو-جابجایی مقدار انرژی جذب‌شده کل را محاسبه می‌نماید. درصد

خطای انرژی جذب شده بر واحد وزن پانل‌های بدون فوم نسب به پانل‌های دارای فوم بیشتر است؛ که علت بروز این امر کیفیت پایین داده‌های خروجی از دستگاه و وجود نویز بسیار زیاد در آن‌ها و استفاده از فیلتر برای کاهش نویز در آن است. بیشترین درصد خطا مربوط به مدل TR1I15E1 و کمترین آن مربوط به مدل

TRIF1I5E1 می‌باشد. در بخش آینده دلایل اصلی و مهم در بروز عدم تطابق بین نتایج آزمون تجربی و شبیه‌سازی شرح داده خواهد شد. در شکل ۲۴ نمودار میله‌ای مقادیر جذب انرژی ویژه و  $\eta$  هر سه نوع شبیه‌سازی و نمودار میله‌ای مقادیر جابجایی، جهت مقایسه بهتر ارائه شده است.



شکل ۲۴. الف) نمودار میله‌ای SEA و  $\eta$  شبیه‌سازی (ب) نمودار میله‌ای مقادیر جابجایی شبیه‌سازی

نتایج مقایسه‌ای شکل ۲۴ الف نشان داد که مقادیر جذب انرژی ویژه و  $\eta$  برای پانل‌های ساندویچی بدون فوم که تحت ضربه با انرژی ۱۵۰ ژول و ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری قرار گرفته‌اند به‌طور قابل توجهی بیشتر است. اما در مقابل، همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد

در مورد پانل‌های ساندویچی دارای فوم به دلیل افزایش جرم پانل به سبب الحاق فوم به ساختار هسته مقادیر جذب انرژی ویژه نسبت به پانل‌های بدون فوم کمتر است. همچنین افزایش مقدار انرژی ضربه سبب افزایش جذب انرژی و افزایش مقادیر جذب انرژی ویژه در پانل‌های دارای فوم



جذب سریع انرژی و مقاومت در برابر نفوذ نشان داده است، در حالی که ساختار مثلثی ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. همچنین، نتایج سهم جذب انرژی نشان داد که در پانل‌های دارای فوم، بخش عمده انرژی توسط فوم جذب شده و در پانل‌های بدون فوم، بیشترین انرژی توسط هسته موجدار جذب شده است. با وجود آنکه در پانل‌های بدون فوم مقدار جذب انرژی ویژه بیشتر است، در سازه‌های دارای فوم، توزیع انرژی بهتر و کنترل ضربه مؤثرتر انجام شده است.

#### ۶. منابع

- [1] K. Malekzade Fard and A. Pourmoud, "Static and dynamic analysis of sandwich structures," *Tarbiat Modares University Journal System*, vol. 16, no. 9, pp. 113–134, 2016. [In Persian]
- [2] M. A. Tarabizadeh, "Behavior of sandwich aluminum foam against low speed impact load," *Scientific Research Journal of Composite Science and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 177–184, 2017. [In Persian]
- [3] J. Liu, W. He, D. Xie, and B. Tao, "The effect of impactor shape on the low-velocity impact behavior of hybrid corrugated core sandwich structures," *Composites Part B: Engineering*, vol. 111, pp. 315–331, 2017.
- [4] Q. H. Qin, W. Zhang, S. Liu, J. Li, J. Zhang, and L. H. Poh, "On dynamic response of corrugated sandwich beams with metal foam-filled folded plate core subjected to low-velocity impact," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 114, pp. 107–116, 2018.
- [5] L. L. Yan, B. Yu, B. Han, Q. C. Zhang, T. J. Lu, and B. H. Lu, "Effects of aluminum foam filling on the low-velocity impact response of sandwich panels with corrugated cores," *Journal of Sandwich Structures & Materials*, vol. 22, no. 4, pp. 1–19, 2018.
- [6] Y. Cheng, M. Liu, P. Zhang, W. C. Zhang, J. Liu, and H. Hou, "The effects of foam filling on the dynamic response of metallic corrugated core sandwich panel under air blast loading: Experimental investigations," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 145, pp. 378–388, 2018.
- [7] Y. Rong, J. Liu, W. Luo, and W. He, "Effects of geometric configurations of corrugated cores on the local impact and

خواهد شد؛ که این موضوع در نمودارهای پانل‌های تحت ضربه ۲۵۰ ژول و ضربه‌زننده ۲۵ میلی‌متری کاملاً مشهود است؛ به‌طوریکه در این پانل‌ها به دلیل افزایش انرژی ضربه، جذب انرژی ویژه در پانل‌های بدون فوم کمتر شده و در پانل‌های دارای فوم بیشتر شده است. در کنار بررسی میزان جذب انرژی بر واحد وزن می‌بایست مقادیر جابجایی ضربه‌زننده در پانل را نیز مورد توجه قرار داد. در شکل ۲۴ ب نمودار میله‌ای مقادیر جابجایی ضربه زننده در پانل، جهت مقایسه بهتر ارائه شده است. با توجه به شکل ۲۴ ب مشاهده شد که چه در ساختارهای بدون فوم و چه در ساختارهای دارای فوم، هسته موجدار مستطیلی کمترین میزان نفوذ و هسته مثلثی بیشترین مقدار نفوذ را داراست.

#### ۵. نتیجه‌گیری

بررسی نتایج این پژوهش نشان داد که الحاق فوم آلومینیوم به ساختار هسته، به‌طور قابل‌توجهی عملکرد سازه ساندویچی را در جذب انرژی و کاهش نفوذ ضربه‌زننده بهبود داده است. حضور فوم باعث توزیع یکنواخت نیرو، کاهش تمرکز تنش، و افزایش مقاومت در برابر نفوذ شده و به‌ویژه در هسته‌های مستطیلی تأثیر چشمگیری در کاهش جابجایی و افزایش نیروی عکس‌العمل دارد. به‌طور خاص، میزان کاهش نفوذ در نمونه‌های دارای فوم تا حدود ۸۰ درصد و افزایش نیروی حداکثر تا بیش از ۲۵۰ درصد گزارش شده است. همچنین، در برخوردهای شدیدتر نیز عملکرد فوم مؤثر باقی مانده و ساختارهای دارای فوم توانسته‌اند بین ۳۵ تا ۷۰ درصد از نفوذ را کاهش دهند. در مقایسه بین اشکال هندسی مختلف، ساختار مستطیلی بهترین عملکرد را در



- [17] R. Maher, S. M. R. Khalili, and R. Eslami-Farsani, "The effect of shape memory wire on the ballistic behavior of smart corrugated core sandwich panels," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 8, no. 2, pp. 1617–1627, 2021. [In Persian]
- [18] H. Zniker, B. Ouaki, S. Bouzakraoui, M. Touhami, and M. Hicham, "Energy absorption and damage characterization of GFRP laminated and PVC-foam sandwich composites under repeated impacts with reduced energies and quasi-static indentation," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, pp. 443–459, 2022.
- [19] S. Itxaro, M. Unai, E. Aritz, A. Jon, and E. Borja, "Low-velocity impact performance of integrally-3D printed continuous carbon fibre composite sandwich panels," *Materials Letters*, vol. 324, pp. 691–711, 2024.
- [20] K. Malekzade Fard and H. Taghipoor, "Experimental and numerical study of energy absorption in foam filled trapezoidal compound core sandwich panels subjected to quasi-static loading," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 5, no. 4, pp. 565–574, 2019. [In Persian]
- planar compression of sandwich panels," *Composites Part B: Engineering*, vol. 152, pp. 324–335, 2018.
- [8] C. Xiang, Q. H. Qin, X. Yu, S. Chen, W. Zhang, Y. Xia, M. Wang, and T. J. Wang, "Dynamic failures of metal sandwich beams subjected to low-velocity impact," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 59, no. 4, pp. 1413–1420, 2019.
- [9] Y. Rong, W. Luo, J. Liu, Z. Shen, and W. He, "Effect of core materials on the low-velocity impact behaviour of trapezoidal corrugated sandwich panels," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 25, no. 5, pp. 505–516, 2019.
- [10] L. Yan, P. Su, Y. Han, and B. Han, "Effects of aluminum foam filling on compressive strength and energy absorption of metallic Y-shape cored sandwich panel," *Metals*, vol. 10, no. 12, pp. 1–11, 2020.
- [11] N. Hayta and G. Kaya, "Experimental investigation on impact response of sandwich composites integrated with a novel 3D multi-layer stitched core," *Composite Structures*, vol. 296, pp. 205–231, 2022.
- [12] X. Zhou and L. Jing, "Low-velocity impact response of sandwich panels with layered-gradient metal foam cores," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 184, pp. 112–123, 2024.
- [13] A. M. Zakizadeh, A. Refahi Oskouei, and R. Hamzeloo, "Damages evaluation of low velocity impact on glass/polyester-foam sandwich panels using the acoustic technique," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 6, no. 2, pp. 319–329, 2019.
- [14] E. Heidari-Shahmaleki and A. Zeinedini, "Application of cotton/epoxy laminated composites to fabricate the uni- and bi-directional cosine corrugated cores sandwich panels," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 7, no. 2, pp. 863–872, 2020.
- [15] R. Maher, S. M. R. Khalili, and R. Eslami-Farsani, "The effect of shape memory wire on the ballistic behavior of smart corrugated core sandwich panels," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 8, no. 2, pp. 1612–1627, 2021.
- [16] M. Rezvani Tavakol, M. Yarmohammad Tooski, M. Jabbari, and M. Javadi, "The effect of graphene nanoparticles on the strength of sandwich panel structure under quasi-static loading and low-velocity impact," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 9, no. 3, pp. 1994–2005, 2022.

