



بررسی عددی و تجربی پاسخ پروفیل مربعی آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی در برابر ضربه جانبی و محوری

پویا پیرعلی^{۱*}، محسن حیدری بنی^۲، سید محمدرضا قادری^۳، جعفر اسکندری جم^۴

- ۱- استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
 ۲- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
 ۳- کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.
 ۴- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

کلمات کلیدی

فوم فلزی، پروفیل مربعی پر شده، ضربه جانبی، ضربه محوری، استهلاک و جذب انرژی.

چکیده

فوم‌های فلزی به دلیل ظرفیت بالا در جذب انرژی و در عین حال چگالی پایین، کاربردهای زیادی در ساخت سازه‌های مختلف مانند انواع سپرهای محافظ و سازه‌های محافظ جهت جلوگیری از بار ناشی از انفجار و جذب بارها به‌ویژه بارهای ضربه‌ای دارند. هدف از این پژوهش، بررسی نحوه پاسخ پروفیل در حالت تک جداره و دوجداره تحت بار ضربه‌ای جانبی و محوری با هدف ارزیابی مقدار تأثیر استفاده از فوم آلومینیومی بر استهلاک انرژی وارده ناشی از ضربه است. ابتدا پروفیل‌های مربعی تک جداره و دوجداره در محیط نرم‌افزار تحلیلی آباکوس شبیه‌سازی و تأثیر پارامترهایی مانند چگالی فوم آلومینیوم، استفاده از یک جداره یا دوجداره، تأثیر برهم‌کنش بین فوم و دیواره بر رفتار عمومی سازه مورد بررسی قرار گرفت. پس از ساخت نمونه‌ها، آزمون‌های اعمال ضربه جانبی و محوری با استفاده از سقوط وزنه انجام گرفت و جهت صحت‌سنجی با نتایج شبیه‌سازی ضربه جانبی و محوری مقایسه شدند. نتایج نشان داد که فوم آلومینیومی عملکرد مناسبی بر مقدار لهیدگی و جذب انرژی سازه تحت بار ضربه محوری دارد اما در حالت ضربه جانبی، به دلیل خاصیت شکنندگی (تردی) زیاد، استفاده از فوم تهیه‌شده در سازه تحت ضربه مناسب نبود. پر شدن پروفیل آلومینیومی به‌صورت کامل با فوم آلومینیومی سبب کاهش ۱۸ درصدی مقدار تغییر طول پروفیل تحت ضربه محوری شد. در نمونه‌های محوری پروفیل خالی تحت ضربه مقدار ۱۶ میلی‌متر تغییر طول داشت که ماکزیم نیروی لهیدگی آن ۳۰ کیلو نیوتون اندازه‌گیری شد. اما برای مقاوم‌ترین پروفیل که پروفیل دوجداره با جدار داخلی ۲۰*۲۰ میلی‌متر است، مقدار لهیدگی ۴ میلی‌متر و ماکزیم نیروی لهیدگی در حدود ۱۲۳ کیلو نیوتون ثبت شد.

۱- مقدمه

امروزه، استفاده از سازه‌های سبک و در عین حال مقاوم، در صنایع مختلف خودروسازی، کشتی‌سازی، هواپیماسازی و ... گسترش پیدا کرده است. فوم‌های فلزی گونه جدیدی از مواد هستند که دارای ساختار سلولی و متخلخل بوده و به دلیل ظرفیت بالای جذب انرژی و در عین حال چگالی پایین، کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارند. ساخت فوم‌های فلزی از دهه ۱۹۲۰ در فرانسه شروع گردید، از اواسط دهه ۱۹۵۰ تجاری‌سازی شد و در اواخر ۱۹۹۰ شتاب گرفت [۱-۳]. در سال‌های اخیر، پیشرفت فوم‌های فلزی سبب بهبود خواص آن‌ها در

مقایسه با نوع غیرفلزی و فلزات جامد شده است. فوم‌های فلزی در مقایسه با نوع غیرفلزی دارای مقاومت بهتر و در مقایسه با فلزات جامد، دارای استحکام بالا نسبت به وزن (استحکام ویژه) هستند [۴ و ۵]. به‌طور کلی خواص فیزیکی و مکانیکی این مواد وابسته به چگالی فوم، ریخت‌شناسی حفره‌ها (باز یا بسته بودن حفره‌ها، سایز حفره‌ها) و خواص فلز پایه است. فوم آلومینیومی، به دلیل شکل اسفنجی، تحت ضربه و یا فشار، متراکم شده و حفره‌های آن پر می‌گردد. با پر شدن حفره‌ها به‌طور کامل نیز رفتار فوم به رفتار فلز پایه نزدیک‌تر می‌گردد.

* نویسنده مسئول: ppirali@mut.ac.ir

بررسی نحوه پاسخ پروفیل با سطح مقطع مربعی پر شده با فوم آلومینیومی در حالت تک جداره و دوجداره تحت بار ضربه جانبی و محوری با هدف ارزیابی مقدار تأثیر استفاده از فوم آلومینیومی بر استهلاک انرژی وارده ناشی از ضربه است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد تشکیل‌دهنده و خواص مکانیکی

جهت ساخت نمونه‌ها، پروفیل آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر و ابعاد سطح مقطع ۲۰*۲۰ میلی‌متر، ۳۰*۳۰ میلی‌متر و ۵۰*۵۰ میلی‌متر از شرکت آهن یکتا تهیه شد [۲۱] و پس از برش به صورت نمونه‌هایی با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر آماده گردید. فوم آلومینیومی تخلخل بسته، به صورت بلوک‌های برش خورده از شرکت دانش‌بنیان علوم و فناوری‌های نوین رهیافت تهیه گردید. جهت تعیین خواص فوم آلومینیومی، آزمون فشار شبه استاتیک با سرعت فک ۲ میلی‌متر بر دقیقه بر روی نمونه‌ی فوم آلومینیومی با ابعاد ۵۲۰*۵۲۰*۱۵۰ میلی‌متر انجام شد. شبیه‌سازی عددی مسئله‌ی این پروژه، با نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس انجام گرفته است. لذا در ادامه روند شبیه‌سازی انجام شده ارائه می‌شود. شبیه‌سازی ضربه جانبی و محوری در نمونه‌های تجربی و نرم‌افزاری یکسان است و تنها تفاوت آن‌ها در وجود ایرادات ناخواسته در مدل تجربی و بدون خطا بودن نمونه نرم‌افزاری است.

۲-۲- ابعاد و کدگذاری نمونه‌ها

در این مطالعه، پروفیل‌های آلومینیومی به صورت تک جداره خالی، تک جداره پر شده با فوم آلومینیومی و دوجداره پر شده با فوم آلومینیومی، تحت ضربه جانبی و محوری به صورت جداگانه توسط یک ضربه‌زننده با سطح مقطع دایره قرار گرفتند. جهت انجام این مطالعه، ۸ نمونه برای آزمون آماده گردید که ۴ نمونه برای ضربه محوری و ۴ نمونه دیگر نیز برای ضربه جانبی ساخته شد. همچنین جهت جلوگیری از تکرار نام کامل هر نمونه، کدهایی برای شناسایی نمونه‌ها در نظر گرفته شد. در جدول ۱ ابعاد، نام کامل نمونه‌ها، کد نمونه‌ها و نحوه کدگذاری ارائه شده است. از این پس جهت سادگی، کد مربوط به هر نمونه به جای مشخصات آن بیان می‌شود.

۲-۳- فرآیند آزمون

جهت فرآیند آزمون، از دستگاهی با قابلیت تنظیم ارتفاع پرتابه تا ۲ متر و اتصال وزنه تا جرم ۴۵ کیلوگرم با سطوح مقطع مختلف استفاده شد. عملکرد این دستگاه به این صورت است که ضربه‌زننده به همراه کالسکه متصل شده به آن که دارای جرم ۴۵ کیلوگرم است، توسط

درصد تخلخل فوم به نسبت مقدار حجم حفره‌های فوم به حجم کل فوم گفته می‌شود. هرچه درصد تخلخل فوم بیشتر باشد، فوم سبک‌تر بوده و چگالی آن کمتر است [۸-۶]. به دلیل خاصیت جذب انرژی فوم‌های فلزی، ساخت سازه‌های مختلف مانند انواع سپرهای محافظ، پروفیل‌ها و پنل‌های ساندویچی و سازه‌های محافظ در برابر بار ناشی از انفجار و برخورد گلوله با هدف استهلاک و جذب بارها به‌ویژه بارهای ضربه‌ای گسترش پیدا کرده‌اند [۹ و ۱۰]. از پژوهش‌های انجام شده بر روی این نوع کامپوزیت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

بررسی پاسخ پروفیل مستطیلی پر شده با فوم پلی‌یورتان به روش تجربی و تئوری تحت بار شبه استاتیک جانبی [۱۱]. بررسی عددی پاسخ پروفیل‌های آلومینیومی پر شده با ۴ نوع فوم آلومینیومی، پلی‌یورتانی، پلی‌اتیلنی و پلی‌استایرنی تحت بار ضربه دینامیکی محوری [۱۲]. بررسی رفتار لوله پر شده با فوم فلزی به روش عددی تحت ضربه سرعت پایین شبه استاتیکی [۱۳]. بررسی تجربی و عددی پاسخ لوله‌های فولادی پر شده با فوم آلومینیوم-سنوسفر، تحت بار فشاری شبه استاتیکی [۸]. بررسی رفتار لوله‌های پر شده با فوم‌های درجه‌بندی شده به روش تجربی تحت بار ضربه‌ای با فوم‌های آلومینیوم، آلیاژ A356 [۱۴]. بررسی تجربی جذب انرژی پروفیل‌های پر شده با فوم آلومینیوم تحت ضربه با سرعت کم [۱۵]. بررسی تجربی ضربه با سرعت کم روی لامینات‌های فلزی پر شده با فوم در کاربردهای ایمنی تصادف [۱۶]. بررسی عددی و تجربی قابلیت‌های جذب انرژی تحت بارگذاری دینامیکی سازه‌های موج‌دار فلزی پر شده با فوم آلومینیومی [۱۷]. بررسی ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های بسته سلولی آلومینیومی با چگالی‌های یکنواخت و درجه‌بندی شده [۱۸]. بررسی تجربی و عددی رفتار کامپوزیت‌های لانه‌زنبوری آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی [۱۹]. بررسی تجربی و عددی پاسخ فشاری یک‌محوری سازه لانه‌زنبوری آلومینیومی پر شده با فوم پلی‌اورتان [۲۰].

با توجه به مطالعات انجام‌گرفته، در اکثر آن‌ها، مواردی از قبیل استفاده از فوم پرکننده سازه به‌ویژه فوم آلومینیومی و همچنین نوع بارگذاری اعم از جانبی و محوری بررسی شده است. اما موردی که با دقت در مطالعات بالا قابل توجه است، عدم بررسی پروفیل‌های پر شده با فوم آلومینیومی در حالت تک جداره و دوجداره تحت بار ضربه دینامیکی محوری و جانبی با انرژی ضربه یکسان و مقایسه نتایج می‌باشد. از این‌رو در این مطالعه، نحوه پاسخ پروفیل‌های مربعی پر شده با هسته‌ی فوم آلومینیومی تحت بارگذاری ضربه محوری و جانبی با ساختار تک جداره و دوجداره بررسی می‌گردد. هدف از این پژوهش،

گیره آهنربایی تا ارتفاع قابل تنظیم بالا رفته و سپس با قطع مگنت، وزنه رها می‌شود.

جدول ۱: ابعاد، نام کامل و کد نمونه‌ها و نحوه کدگذاری

ردیف	مشخصات کامل	نوع آزمون	ابعاد جدار داخلی (mm)	ابعاد جدار بیرونی (mm)	کد*
۱	پروفیل تک جداره خالی آلومینیومی	ضربه جانبی	جدار داخلی ندارد	۵۰*۵۰*۵۰	1E0L2
۲	پروفیل تک جداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه جانبی	جدار داخلی ندارد	۵۰*۵۰*۵۰	1F0L2
۳	پروفیل دوجداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه جانبی	۲۰*۲۰*۵۰	۵۰*۵۰*۵۰	2F2L2
۴	پروفیل دوجداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه جانبی	۳۰*۳۰*۵۰	۵۰*۵۰*۵۰	2F3L2
۵	پروفیل تک جداره خالی آلومینیومی	ضربه محوری	جدار داخلی ندارد	۵۰*۵۰*۵۰	1E0A2
۶	پروفیل تک جداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه محوری	جدار داخلی ندارد	۵۰*۵۰*۵۰	1F2A2
۷	پروفیل دوجداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه محوری	۲۰*۲۰*۵۰	۵۰*۵۰*۵۰	2F2A2
۸	پروفیل دوجداره آلومینیومی پر شده با فوم آلومینیومی	ضربه محوری	۳۰*۳۰*۵۰	۵۰*۵۰*۵۰	2F3A2

*روش نام‌گذاری (کد) نمونه‌ها: رقم اول از سمت چپ یعنی اعداد ۱ و ۲، بیانگر تعداد جدار نمونه است. کاراکتر دوم از سمت چپ یعنی حروف E و F به ترتیب بیانگر خالی و پر بودن نمونه از فوم آلومینیومی است. رقم سوم یعنی اعداد ۰، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر ابعاد جداره داخلی ندارد، ۲۰*۲۰ و ۳۰*۳۰ میلی‌متر است. کاراکتر چهارم از سمت چپ یعنی حروف L و A به ترتیب بیانگر ضربه جانبی و محوری است. رقم آخر یعنی عدد ۲ به معنای ضخامت جداره‌های پروفیل آلومینیومی (۲ میلی‌متر) است.

بهینه ۲ میلی‌متر برای کل مدل به دست می‌آید، برابر با ۱۸۲۵۰ عدد است.

۳-۱- نتایج مربوط به آزمون ضربه محوری

پس از انجام آزمون ضربه از ارتفاع ۱/۲ متری توسط دستگاه آزمون سقوط وزنه، شکل نهایی نمونه‌های محوری تحت ضربه صورت شکل ۲ است.



شکل ۲: تغییر شکل نهایی و لهیدگی نمونه‌های موردنظر تحت آزمون ضربه محوری.

با توجه به شکل ۲، مقدار لهیدگی هر نمونه و همچنین شکل چین‌خوردگی هر نمونه وابسته به وجود فوم آلومینیومی و تعداد جدار

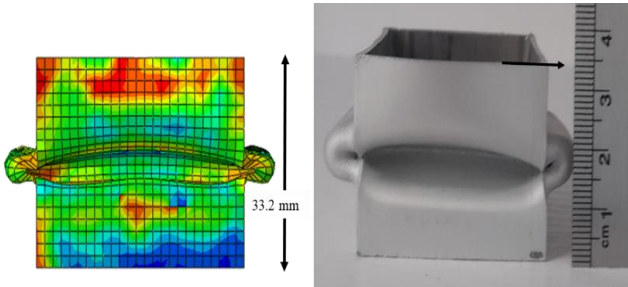
وزنه با نمونه برخورد می‌کند و لهیدگی^۱ در اثر تغییر شکل پلاستیک و عملکرد نمونه‌ها در برابر ضربه قابل بررسی است. در حین فرود وزنه، داده‌ی شتاب وزنه توسط حس‌گر به کامپیوتر وارد می‌گردد و نمودار شتاب-زمان وزنه قابل دسترس است.

۳-۲ نتایج و بحث

جهت اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، بررسی استقلال از مش انجام گردید تا بهترین اندازه مش برای انجام شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گیرد. پس از انجام این بررسی مشخص شد که مش با سایز ۲ میلی‌متر برای مدل، با نوع S4R برای پروفیل و C3D8R برای فوم آلومینیومی بهترین سایز برای شبیه‌سازی نمونه‌ها می‌باشد. زیرا در این سایز، همگرایی نتایج مربوط به مقدار تغییر طول نمونه‌ها حاصل شد. در شکل ۱، نمودار مربوط به استقلال از مش نمونه 1E0A2 به‌عنوان مثال ارائه شده و در شکل ۱-الف مدل مش زده شده نشان داده شده است. برای این نمونه تعداد مشی که با توجه به سایز

¹ Crushing

روش حل عددی، این مقدار نسبت به مدل تجربی دارای ۵٪ خطا می‌باشد. در شکل ۳، مقایسه‌ی طول ثانویه تجربی و عددی برای پروفیل IE0A2 ارائه شده است.

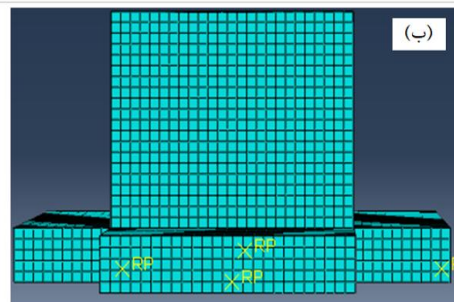
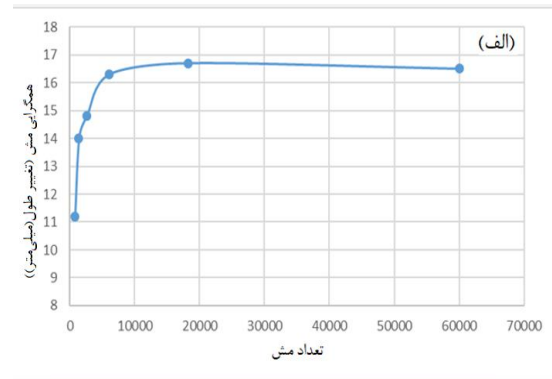


شکل ۳: مقایسه طول ثانویه تجربی و عددی پروفیل IE0A2 پس از آزمون ضربه محوری.

با توجه به شکل ۳، در پروفیل IE0A2 پس از آزمون ضربه محوری نحوه چین خوردگی مدل عددی، تا حد بسیار زیادی به مدل تجربی نزدیک است. دیواره‌ی پروفیل از ناحیه وسط دچار چین خوردگی و تابندگی شده و شکل آکاردئونی به خود گرفته است. همچنین در مدل عددی نیز این چین خوردگی از ناحیه وسط اتفاق افتاده است و تطابق بسیاری با نتیجه تجربی دارد. تغییر طول در مدل عددی ۱۶/۸ میلی‌متر و در مدل تجربی ۱۶ میلی‌متر است. اختلاف ۵ درصد به وجود آمده در مقدار تغییر طول پروفیل در دو حالت عددی و تجربی به وجود آمده ممکن است، ناشی از وجود عیوب احتمالی در فرآیند اکستروژن پروفیل آلومینیوم و همچنین اختلاف ناچیز بین خواص مکانیکی پروفیل ساخته شده با خواص وارد شده در نرم‌افزار آباکوس باشد. در شکل ۴- الف نیز نمای بالای تجربی و عددی پروفیل IE0A2 قابل مشاهده است.

در شکل ۴- ب مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 1F0A2 تحت ضربه محوری، ارائه شده است. تفاوت پروفیل 1F0A2 و IE0A2 فقط در پر بودن پروفیل 1F0A2 و خالی بودن پروفیل IE0A2 از فوم آلومینیوم است. طول پروفیل 1F0A2، پس از آزمون ۳۷ میلی‌متر و پس از شبیه‌سازی عددی ۳۸/۷ میلی‌متر به دست آمده است که بین مقادیر تغییر طول عددی و تجربی حدود ۱۳٪ خطا وجود دارد. به طور کلی مقدار تغییر طول پروفیل 1F0A2 در حالت تجربی نسبت به مدل IE0A2 (پروفیل خالی)، به مقدار ۳ میلی‌متر کمتر شده است که این تفاوت به دلیل استفاده از فوم آلومینیومی در ساختار پروفیل و عملکرد فوم به لحاظ جذب انرژی ناشی از ضربه و کاهش مقدار لهیدگی پروفیل است. همچنین در نتیجه تجربی پروفیل 1F0A2، در قسمت بالای پروفیل چین خوردگی و تابندگی به سمت

پروفیل آلومینیومی استفاده شده در ساخت آن نمونه می‌باشد. در قسمت‌های بعدی به صورت کامل تر بر روی مقدار لهیدگی، شکل کلی نمونه، نمودار نیرو-زمان هر نمونه و همچنین مقدار جذب انرژی هر نمونه بحث می‌شود.



شکل ۱: الف) نمودار استقلال مش (ب) مدل مش‌زنی شده جهت نمایش نوع مش در مدل نرم‌افزاری

۲-۳- مقدار لهیدگی و چین خوردگی

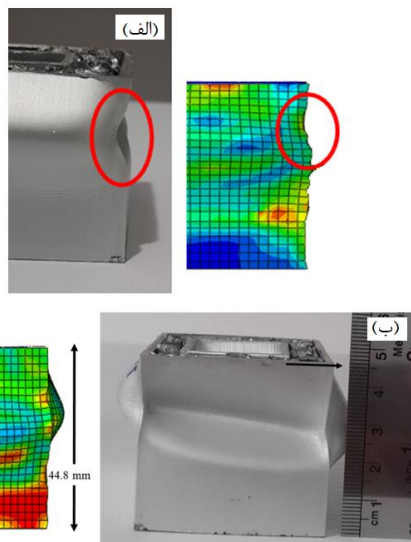
در جدول ۲، مقدار لهیدگی و تغییر طول هر نمونه بر اساس نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی ارائه شده است. لازم به ذکر است، مبنای درصد خطا، طول تجربی می‌باشد.

جدول ۲: مقدار لهیدگی و تغییر طول نمونه‌ها بر اساس نتایج شبیه‌سازی و تجربی آزمون ضربه محوری.

درصد خطا (%)	تغییر طول عددی (میلی‌متر)	تغییر طول تجربی (میلی‌متر)	طول اولیه پروفیل (میلی‌متر)	کد مدل
۵٪	۱۶/۸	۱۶	۵۰	IE0A2
۱۳٪	۱۱/۳	۱۳	۵۰	1F0A2
۲۲/۵٪	۴/۹	۴	۵۰	2F2A2
۶٪	۵/۲	۵	۵۰	2F3A2

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۲، طول پروفیل پس از آزمون در نمونه IE0A2، ۳۴ میلی‌متر و پس از شبیه‌سازی عددی، ۳۳/۲ میلی‌متر به دست آمده است که مطابق مقادیر تغییر طول پروفیل به

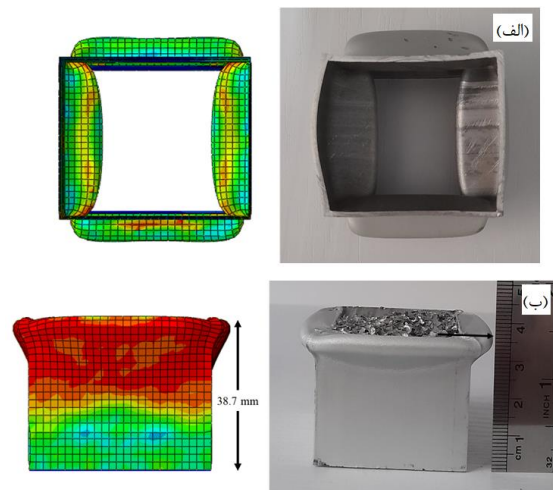
پروفیل یکنواخت نبوده و دارای اعوجاج می‌باشد. به‌طور کلی این مقدار تغییر طول در این پروفیل، نسبت به مدل 1E0A2 (پروفیل خالی) و مدل 1F0A2 (پروفیل پر شده با فوم آلومینیومی) بسیار کمتر است زیرا استفاده از پروفیل دو جداره و همچنین فوم آلومینیومی، سبب افزایش مقدار استهلاک و جذب انرژی و همچنین بهبود عملکرد پروفیل در برابر بار ضربه محوری با انرژی یکسان نسبت به سایر مدل‌ها شده است. همچنین با توجه به مدلهای پروفیل 2F2A2، بادکردگی و فرورفتگی در قسمت بالای جداره پروفیل به‌صورت متقارن در نمونه تجربی دیده می‌شود که در نمونه عددی نیز این طرح قابل‌رؤیت است. در شکل ۶-الف نیز نمای جانبی فرورفتگی در بدنه مدل تجربی و عددی پروفیل 2F2A2 قابل‌مشاهده است. در بدنه پروفیل فرورفتگی ایجاد شده است که این فرورفتگی به‌صورت کمتر در شکل عددی نیز دیده می‌شود. در شکل ۶-ب مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 2F3A2، ارائه شده است.



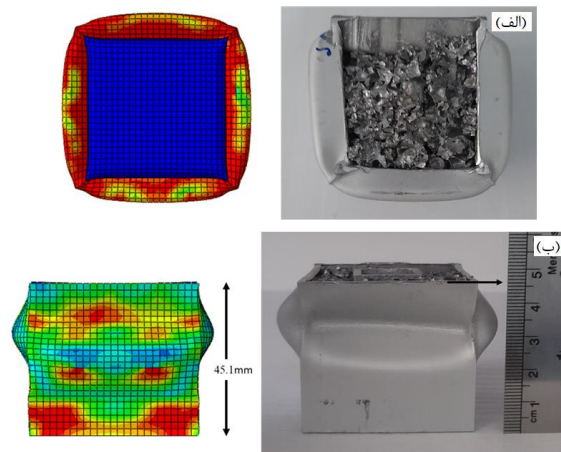
شکل ۶: الف) نمای جانبی فرورفتگی در بدنه مدل تجربی و عددی پروفیل 2F2A2 ب) مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 2F3A2

تفاوت این پروفیل با پروفیل 2F2A2، فقط در ابعاد جدار داخلی پروفیل استفاده‌شده در ساخت پروفیل‌ها است. طول پروفیل 2F3A2، پس از آزمون ۴۵ میلی‌متر و پس از شبیه‌سازی عددی ۴۴/۸ میلی‌متر به‌دست آمده است. همچنین بین مقدار تغییر طول بین دو مدل عددی و تجربی ۶ درصد خطا و اختلاف وجود دارد. مقدار تغییر طول تجربی این پروفیل نسبت به پروفیل 2F2A2 (جدار داخلی ۲۰*۲۰ میلی‌متر) به مقدار ۱ میلی‌متر بیشتر است که این مقدار به دلیل وجود مقدار کمتری از فوم در پروفیل 2F3A2 و استحکام کمتر در برابر ضربه

داخل دیواره قابل‌رؤیت است که در مدل عددی نیز تا حد زیادی این تغییر شکل به دست آمده است. در شکل ۵-الف نیز نمای بالا مدل تجربی و عددی پروفیل 1F0A2 قابل‌مشاهده است. در شکل ۵-ب مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 2F2A2، ارائه شده است.



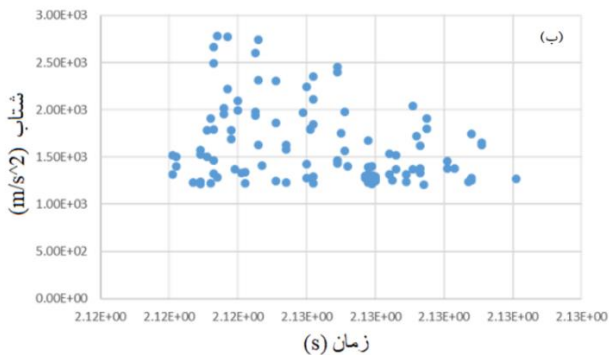
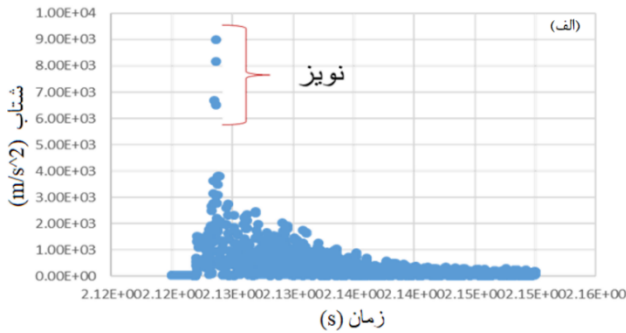
شکل ۴: الف) نمای بالا تغییر شکل تجربی و عددی پروفیل 1E0A2 ب) مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 1F0A2 پس از آزمون ضربه محوری.



شکل ۵: الف) نمای بالای تجربی و عددی پروفیل 1F0A2 ب) مقایسه طول ثانویه عددی و تجربی برای پروفیل 2F2A2

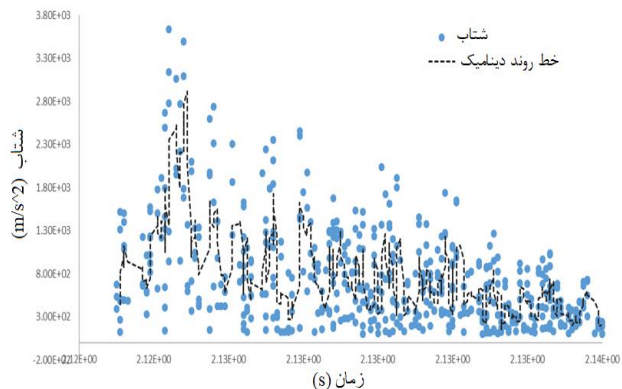
با توجه به جدول ۲ و شکل ۵-ب، طول پروفیل 2F2A2 پس از آزمون، ۴۶ میلی‌متر و پس از شبیه‌سازی ۴۵/۱ میلی‌متر، به‌دست آمده است که بین مقدار تغییر طول پروفیل در ۲ حالت تجربی و عددی، حدود ۲۲٪ خطا وجود دارد. علت زیاد بودن مقدار خطا، این است که پروفیل آلومینیومی تهیه‌شده با اندازه ۲۰*۲۰ میلی‌متر، برخلاف پروفیل ۵۰*۵۰ و ۳۰*۳۰ میلی‌متری، پروفیل مهندسی نبوده و به‌صورت دستی ریخته‌گری شده است. به همین خاطر ضخامت

همراه با نویز) و بعد از فیلتر کردن که در نرم‌افزار اکسل^۱ انجام شده است، مشاهده می‌گردد.



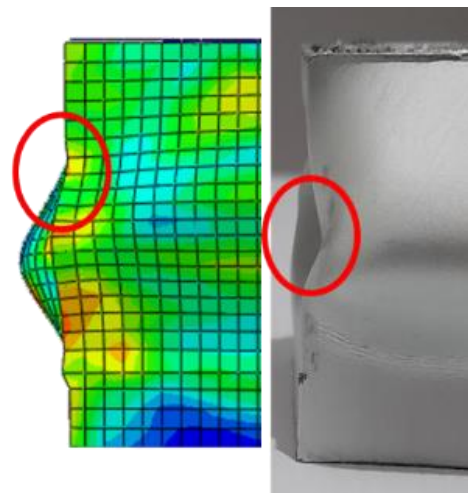
شکل ۸: الف) نمودار شتاب - زمان مربوط به مدل 2F2A2 در حالت عادی بدون فیلتر برای آزمون ب) نمودار شتاب - زمان مربوط به مدل 2F2A2 بعد از فیلتر برای آزمون.

در شکل ۹ نمودار شتاب-زمان تجربی نمونه 2F2A2 قابل مشاهده است.



شکل ۹: نمودار شتاب - زمان تجربی نمونه 2F2A2

حاصل شد. همچنین باز هم به دلیل وجود دو جدار و فوم آلومینیومی در ساختار پروفیل، مقدار لهیدگی این پروفیل (2F3A2) نسبت به پروفیل‌های پر شده با فوم و خالی، بسیار کمتر است. با توجه به شکل ۶-ب، در مدل تجربی بادکردگی به صورت نامتقارن دیده می‌شود و بادکردگی جدار سمت راست پایین‌تر از بادکردگی جدار سمت چپ است که این طرح در شکل حاصل از نتیجه عددی نیز قابل مشاهده می‌باشد. در شکل ۷ نیز نمای جانبی فرورفتگی در بدنه مدل تجربی و عددی پروفیل 2F3A2 قابل مشاهده است.



شکل ۷: نمای جانبی فرورفتگی در بدنه مدل تجربی و عددی پروفیل 2F3A2

طبق شکل ۷، در بدنه پروفیل فرورفتگی ایجاد شده است که این فرورفتگی به صورت کمتر در شکل عددی نیز دیده می‌شود. اما در مدل عددی در پایین فرورفتگی، برآمدگی ایجاد شده است که در شکل تجربی دیده نمی‌شود و این نشان از اختلاف رفتار پروفیل و فوم مدل شده با مدل تجربی دارد.

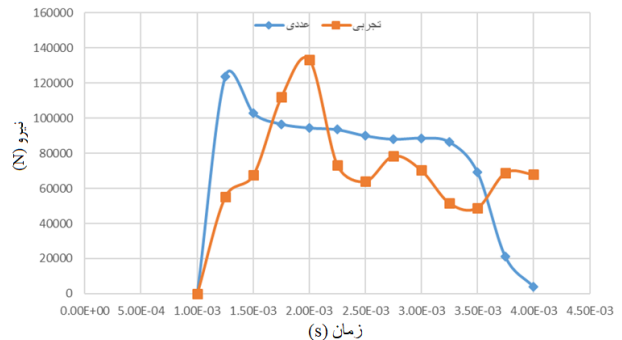
۳-۳- نمودار نیرو-زمان و شتاب-زمان

داده‌هایی که در حین انجام آزمون از دستگاه آزمون سقوط وزنه به عنوان خروجی دریافت شد، داده‌های مربوط به نمودار شتاب - زمان ضربه‌زننده است. اما با توجه به اینکه حس‌گر شتاب‌سنج دارای نویز زیادی است، جهت دریافت نمودار شتاب - زمان برای هر مدل، لازم شد تا نتایج خروجی فیلتر و نویزگیری شود که این امر بسیار وقت‌گیر بوده و با خطای زیادی همراه است. در شکل ۸ الف و ب، نمودار شتاب زمان مربوط به مدل 2F2A2 در حالت عادی بدون فیلتر

¹ Microsoft Office Excel

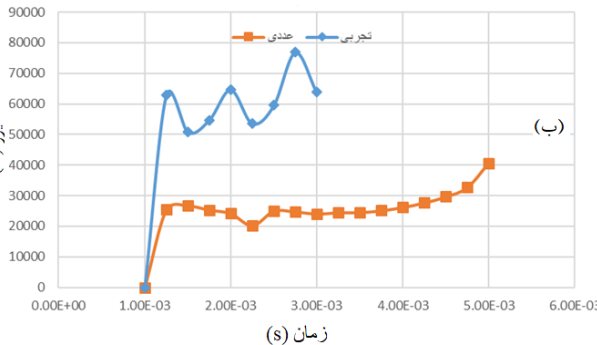
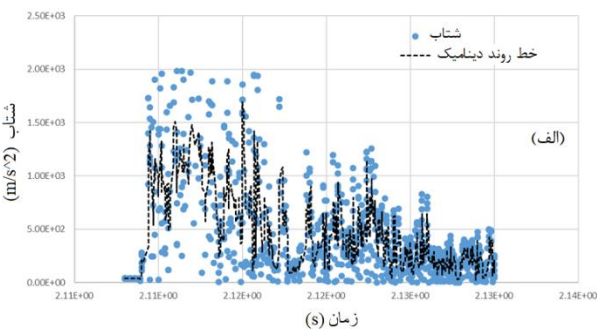
با توجه به نمودار ۱۱-ب، مقدار نیروی لهیدگی ماکزیمم عددی پروفیل 2F3A2، ۱۲۵ کیلو نیوتون می‌باشد اما این پارامتر در مدل تجربی حدود ۱۴۰ کیلو نیوتون است. با توجه به نزدیک بودن مقدار تغییر طول این پروفیل و پروفیل 2F2A2، نزدیک بودن مقدار نیروی لهیدگی ۲ پروفیل نیز تا حدودی قابل انتظار است زیرا هر دو پروفیل دارای جنس مشابه و ساختار نزدیک به هم هستند. به‌طور کلی با توجه به خطای حس‌گر دستگاه آزمون نتایج تجربی به‌دست‌آمده قابل‌اتکا نبوده و بهتر است از نتایج عددی استفاده شود. در شکل ۱۲ الف و ب نمودار شتاب زمان تجربی و نمودار نیرو-زمان تجربی و عددی نمونه 1E0A2 قابل مشاهده است.

با توجه به نمودار بالا که حاوی روند دینامیک شتاب نیز می‌باشد، نمودار نیرو - زمان تجربی و همچنین عددی نمونه 2F2A2 مطابق شکل ۱۰ به دست می‌آید.



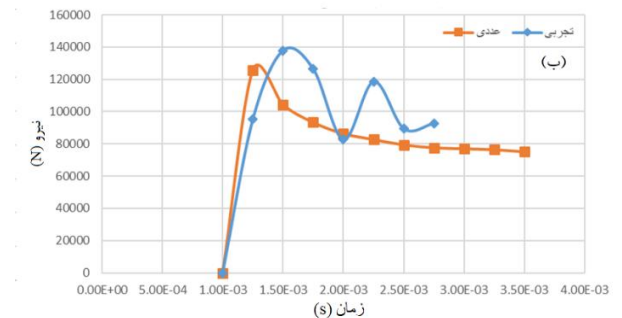
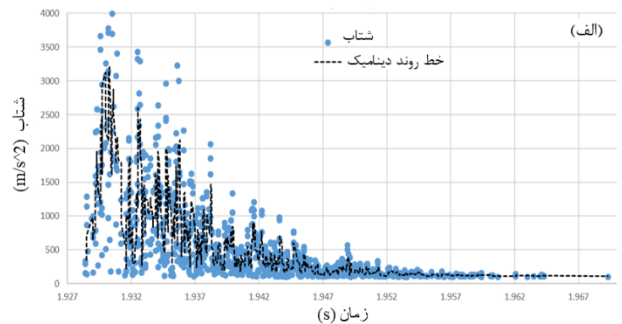
شکل ۱۰: نمودار نیرو - زمان تجربی و عددی نمونه 2F2A2.

با توجه به نمودار ۱۰، مقدار نیروی ماکزیمم لهیدگی شبیه‌سازی عددی به مقدار حدودی ۱۲۳ کیلو نیوتون و برای مدل تجربی در حدود ۱۳۳ کیلو نیوتون می‌باشد. اما با توجه به تغییرات زیاد و همچنین ایجاد نویز در دستگاه آزمون، این مقدار از نیروی لهیدگی برای مدل تجربی دارای خطا است. همچنین مقدار نیروی میانگین در مدل تجربی کمتر از نیروی میانگین مدل عددی است که با توجه به خطای موجود، این مقدار قابل‌بحث نیست. در شکل ۱۱ الف و ب نمودار شتاب - زمان تجربی و نمودار نیرو-زمان تجربی و عددی نمونه 2F3A2 قابل مشاهده است.



شکل ۱۲: الف) نمودار شتاب - زمان تجربی نمونه 1E0A2 (ب) نمودار نیرو - زمان تجربی و عددی نمونه 1E0A2.

با توجه به شکل‌های ۱۲ الف و ب، مقدار نیروی لهیدگی ماکزیمم پروفیل 1E0A2، خیلی کمتر از سایر نمونه‌ها است زیرا پروفیل خالی مقاومت زیادی در برابر ضربه از خود نشان نداده است. اما مقدار نیرو در نمونه تجربی تقریباً ۲ برابر مدل عددی است که حکایت از خطای بیش‌از حد حس‌گر دارد زیرا تمامی نمودارهای تجربی حاصل‌شده دارای نویز بسیار زیاد هستند که نمی‌توان مقدار دقیقی از آن به‌عنوان نتیجه استخراج کرد. همچنین با دقت در نمودار شتاب زمان، نیروی لهیدگی ماکزیمم در انتهای نمودار حاصل‌شده است که این امر به دلیل وجود یک چین‌خوردگی کامل در جدار پروفیل می‌باشد. مقدار



شکل ۱۱: الف) نمودار شتاب - زمان تجربی نمونه 2F3A2 (ب) نمودار نیرو - زمان تجربی و عددی نمونه 2F3A2.

جدول ۳: مقادیر نیروی لهیدگی ماکزیمم و میانگین نمونه‌ها در حالت عددی و تجربی.

کد مدل	نیروی ماکزیمم (KN)		نیروی میانگین (KN)	
	عددی	تجربی	عددی	تجربی
1E0A2	۴۰/۶	۷۶/۸	۲۶/۶	۵۴/۰۶
1F0A2	۶۱/۰۲	۸۰/۲	۴۵/۲	۴۹/۸
2F2A2	۱۲۲/۹	۱۳۳/۳	۹۳/۳	۷۲/۹
2F3A2	۱۲۵/۶	۱۳۷/۸	۸۷/۸	۱۰۶/۱

مقدار انرژی جذب شده برابر با مساحت زیر نمودار نیرو جابه‌جایی است که طبق رابطه ۱ [۲۲] تعریف می‌شود که در آن p مقدار نیرو و dx تغییرات طول می‌باشد.

$$E = \int P dx \quad (1)$$

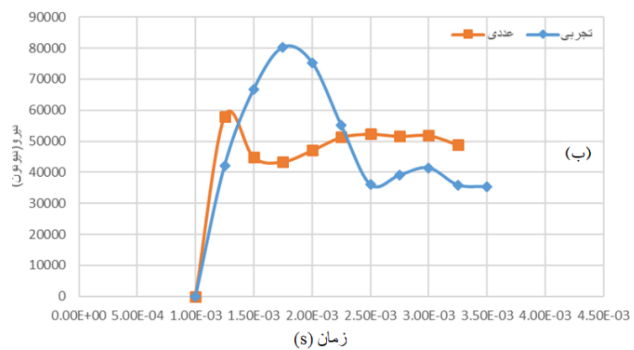
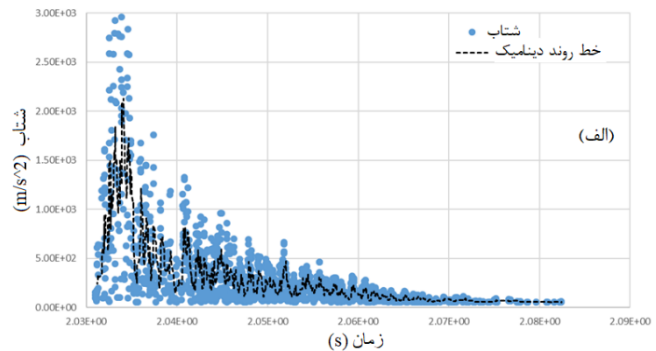
در جدول ۴، مقدار جذب انرژی هریک از مدل‌ها طبق نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی عددی و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است. لازم به ذکر است به دلیل خطا و نویز زیاد در داده‌های نتایج تجربی، این نتایج قابل استناد نبوده و از نتایج شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود.

جدول ۴: مقادیر انرژی جذب شده برای مدل‌های تحت ضربه محوری (نتایج عددی).

کد مدل	انرژی جذب شده (ژول)	
	کل	X=۴/۹ mm
1E0A2	۴۴۶/۸۸	۱۳۰/۳۴
1F0A2	۵۱۰/۷۶	۲۲۱/۴۸
2F2A2	۴۵۷/۱۷	۴۵۷/۱۷
2F3A2	۴۵۶/۵۶	۴۳۰/۲

مقدار انرژی وارده به مدل‌ها در اثر ضربه محوری برابر با ۵۳۰ ژول است. با توجه به مقادیر جدول ۴، مقدار انرژی جذب شده کل در سازه برای همه‌ی مدل‌ها تقریباً بیش از ۸۰ درصد انرژی وارده است. با توجه به اینکه مقدار تغییر طول در مقدار انرژی جذب شده عامل تأثیرگذار است لذا باید این پارامتر در شرایط تعادلی برای هر ۴ نمونه موجود مقایسه شود. جهت این کار، با لحاظ کمترین مقدار تغییر طول که متعلق به نمونه 2F2A2 است، مقدار تغییر طولی که در آن انرژی جذب شده اندازه‌گیری می‌شود، برابر با ۴/۹ میلی‌متر

نیروی لهیدگی تا کامل شدن چین افزایش یافته و در حالتی که چین خوردگی کامل می‌شود، نیروی لهیدگی به ماکزیمم حد خود می‌رسد. در شکل ۱۳ الف و ب نمودار شتاب زمان تجربی و نمودار نیرو زمان تجربی و عددی نمونه 1F0A2 قابل مشاهده است.



شکل ۱۳: الف) نمودار شتاب - زمان تجربی نمونه 1F0A2 ب) نمودار نیرو - زمان تجربی و عددی نمونه 1F0A2.

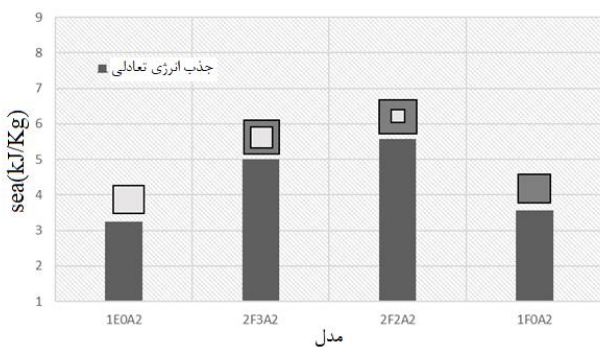
با توجه به شکل ۱۳-ب، مقدار نیروی ماکزیمم لهیدگی عددی تقریباً برابر با ۶۰ کیلو نیوتون است و برای آزمون برابر با ۸۰ کیلو نیوتون می‌باشد که به نسبت مدل پروفیل خالی (1E0A2)، دو برابر بیشتر است زیرا وجود فوم آلومینیومی در این مدل سبب بهبود عملکرد سازه شده و مقدار تغییر طول این مدل نسبت به مدل پروفیل خالی کمتر است. پس مقاومت بیشتری در برابر لهیدگی در نمونه پر شده با فوم انتظار می‌رود که این نتیجه با توجه به نمودار نیرو زمان قابل مشاهده است.

۳-۴- نیروی لهیدگی، انرژی جذب شده و کارایی نیروی

لهیدگی

برای بررسی مقدار مقاومت در برابر ضربه هریک از نمونه‌ها، مقادیر مربوط به نیروی لهیدگی ماکزیمم و میانگین هر نمونه با توجه به نمودار نیرو-زمان مدل‌ها که در بخش قبل ارائه گردید، محاسبه شد. در جدول ۳ مقادیر مربوط به نیروی لهیدگی ماکزیمم و میانگین نمونه‌ها در حالت تجربی و عددی دیده می‌شود.

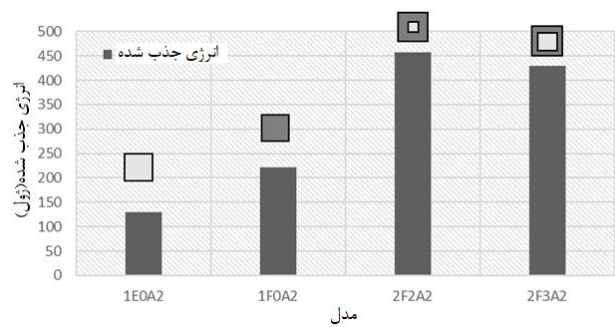
طول پروفیل، جذب انرژی ویژه تعادلی پروفیل در طول تعادلی محاسبه شده است. بر این اساس با افزایش وزن پروفیل، مقدار انرژی جذب شده ویژه پروفیل افزایش یافته و در نمونه 2F2A2 به ماکزیم مقدار خود می‌رسد. اما با توجه به اینکه وزن پروفیل 2F3A2 از 2F2A2 بیشتر است، این افزایش وزن تأثیر منفی بر انرژی جذب شده ویژه گذاشته و این مقدار برای پروفیل 2F3A2 کاهش پیدا کرده است. در شکل ۱۵ نمودار انرژی جذب شده تعادلی ویژه نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱۵: نمودار جذب انرژی تعادلی ویژه نمونه‌های محوری.

با توجه به شکل ۱۵، می‌توان به این صورت نیز نتیجه گرفت که با افزایش مقدار فوم به کاررفته در پروفیل، مقدار جذب انرژی ویژه نیز تا یک نقطه افزایش می‌یابد و پس از آن، افزایش بیشتر مقدار فوم سبب کاهش مقدار جذب انرژی ویژه می‌شود. راندمان نیروی لهیدگی یا به اختصار CFE^۲، به صورت نیروی میانگین لهیدگی تقسیم بر نیروی ماکزیم لهیدگی تعریف می‌شود. افزایش مقدار فوم در پروفیل، فوم می‌تواند به خوبی انرژی را جذب کرده و فشار را توزیع کند، که باعث افزایش انرژی جذب شده ویژه می‌شود. فوم باعث می‌شود که نیروی وارد شده به ساختار در طول فرآیند لهیدگی به طور یکنواخت تر توزیع شود و در نتیجه، جذب انرژی بیشتری را امکان پذیر می‌سازد. هنگامی که مقدار فوم به حدی برسد که فضای خالی بین فوم و دیواره پروفیل کاهش یابد، خاصیت الاستیکی فوم می‌تواند موجب افزایش فشار و در نتیجه کاهش ظرفیت جذب انرژی شود. در این حالت، فوم ممکن است به حدی فشرده شود که دیگر نتواند انرژی بیشتری را جذب کند و این می‌تواند منجر به کاهش انرژی جذب شده ویژه شود. با افزایش فوم، ممکن است در ابتدا نیروی میانگین لهیدگی افزایش یابد (به دلیل بهبود جذب انرژی)، اما پس از رسیدن به یک نقطه بحرانی، نیروی ماکزیم لهیدگی ممکن است کاهش یابد، که می‌تواند

در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۴ مقدار انرژی جذب شده در این طول نمایش داده شده است. کمترین مقدار انرژی جذب شده مربوط به نمونه 1E0A2 است که در آن از هیچ فومی استفاده نشده است. بیشترین مقدار انرژی جذب شده که ۲/۵ برابر انرژی جذب شده پروفیل خالی می‌باشد نیز متعلق به نمونه 2F2A2 است که دارای ساختار ۲ جداره بوده و از فوم نیز در ساخت آن استفاده شده است. در شکل ۱۴ نمودار جذب انرژی تعادلی نمونه‌ها در طول تعادلی ۴/۹ میلی‌متر دیده می‌شود.



شکل ۱۴: نمودار انرژی جذب شده تعادلی نمونه‌ها در ۴/۹ میلی‌متر.

انرژی جذب شده ویژه یا به اختصار SAE^۱ به صورت نسبت انرژی جذب شده به وزن نمونه بیان می‌شود [۲۳]. در جدول ۵، مقادیر انرژی جذب شده ویژه و انرژی جذب شده تعادلی ویژه در $x=4.9 \text{ mm}$ ارائه شده است.

جدول ۵: مقادیر انرژی جذب شده ویژه مدل‌های محوری.

کد مدل	انرژی جذب شده ویژه (Kj/Kg)		وزن مدل (Kg)
	کل	X=۴/۹ mm	
1E0A2	۱۱/۱۷	۳/۲۵	۰/۰۴۰
1F0A2	۸/۲۳	۳/۵۷	۰/۰۶۲
2F2A2	۵/۵۷	۵/۵۷	۰/۰۸۲
2F3A2	۵/۳	۵	۰/۰۸۶

با توجه به جدول ۵، مقدار انرژی جذب شده ویژه پروفیل خالی که دارای کمترین وزن است، برابر با ۱۱/۱۷ کیلوژول بر کیلوگرم است. بر شدن پروفیل با فوم و جدار داخلی، سبب کاهش مقدار انرژی جذب شده ویژه پروفیل می‌شود که این امر به دلیل افزایش وزن پروفیل است. به دلیل وابستگی مقدار انرژی جذب شده ویژه به تغییر

¹ Specific Absorbed Energy

² Crush force efficiency

کامل پروفیل از فوم، این نسبت کاهش می‌یابد. پس ایدئال‌ترین مدل جاذب انرژی، مدل دوجداره با جدار داخلی 20×20 میلی‌متر یا همان 2F2A2 می‌باشد. به‌طور کلی و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برحسب پارامترهای مقدار تغییر طول، مقدار جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و راندمان نیروی لهیدگی، نمونه 2F2A2 بهترین عملکرد را در برابر بار ضربه محوری به نسبت مدل‌های دیگر دارد. همچنین در صورت استفاده از فوم با چگالی بالاتر ممکن است این مدل عملکرد بسیار بهتری را ارائه دهد اما با توجه به خطوط تولید فوم فلزی در حال حاضر در ایران و امکانات داخلی لازم است مطالعات بیشتری جهت امکان‌سنجی تولید این مدل برای استفاده در سازه‌های جاذب انرژی در صنایع مختلف انجام شود.

۳-۵- نتایج مربوط به آزمون ضربه جانبی

پس از انجام آزمون ضربه جانبی، به دلیل عملکرد بسیار ضعیف فوم در برابر ضربه و ساختار فوم که برخلاف تصور بسیار شکننده بوده و به دلیل خاصیت تراکم‌پذیری بالا، رفتاری همانند فوم‌های تولیدشده در خارج از ایران که در مقالات یافت می‌شود، نداشت، لذا نمونه‌های جانبی تحت ضربه کاملاً له شدند و فوم‌هایی که درون پروفیل‌ها قرار داشت خورد و به بیرون ریخته شد. در شکل ۱۷، مدل‌های جانبی پس از ضربه نمایش داده شده است.



شکل ۱۷: مدل‌های جانبی پس از آزمون ضربه.

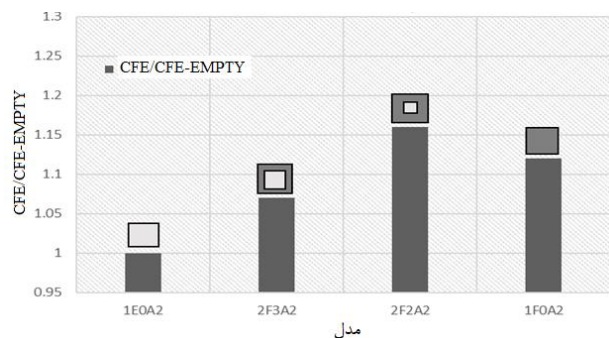
با دقت در نمونه 1EOL2 و 1FOL2، مشاهده می‌شود که وجود فوم در سازه در برابر ضربه جانبی بی‌تأثیر بوده و مقدار لهیدگی هر دو نمونه به یک اندازه می‌باشد حتی قسمتی هم از فوم در اثر ضربه خورد شده و به بیرون ریخته است درحالی‌که فوم‌هایی که در خارج از ایران تولید می‌شوند تراکم‌پذیری بالایی دارند و احتمال خورد شدن آن‌ها بسیار پایین است. در شکل ۱۸ الف تا ت، مقایسه هندسه عددی و تجربی مدل‌های جانبی ارائه شده است.

منجر به کاهش CFE شود. در این نقطه، افزایش بیشتر فوم می‌تواند به عدم کارایی ساختار در جذب انرژی منجر شود، چرا که در این حالت نیروی ماکزیمم لهیدگی به دلیل فشردگی فوم یا شکست آن ممکن است کاهش یابد. [۱۲]. در جدول ۶ مقادیر راندمان نیروی لهیدگی برای مدل‌های محوری بر طبق نتایج عددی ارائه شده است.

جدول ۶: مقادیر راندمان نیروی لهیدگی مدل‌های محوری.

کد مدل	CFE	CAE/CFE-EMPTY
1E0A2	۰/۶۵	۱
2F3A2	۰/۷	۱/۰۷
2F2A2	۰/۷۶	۱/۱۵
1F0A2	۰/۷۳	۱/۱۲

با توجه به جدول ۶ کمترین مقدار راندمان نیروی لهیدگی متعلق به مدل 1E0A2 (پروفیل خالی) و بیشترین آن متعلق به 2F2A2 می‌باشد. مقدار راندمان نیروی لهیدگی برای یک جاذب انرژی ایدئال ۱ (۱۰۰٪) می‌باشد اما دستیابی به این عدد بسیار مشکل است. در جدول ۶ همچنین نسبت راندمان نیروی لهیدگی هر مدل به راندمان مدل 1E0A2 (پروفیل خالی) دیده می‌شود که این عدد برای پروفیل خالی برابر با ۱ است. به‌طور کلی و با توجه به مقادیر درج‌شده در جدول ۶، مدل 2F2A2 دارای بیشترین راندمان در مقایسه با سایر مدل‌ها و همچنین بیشترین نسبت راندمان در مقایسه با مدل پروفیل خالی به مقدار ۱۵٪ تفاوت می‌باشد. در شکل ۱۶ نمودار مربوط به نسبت راندمان نیروی لهیدگی مدل‌ها ارائه شده است.



شکل ۱۶: نمودار نسبت راندمان نیروی لهیدگی (CFE/CFE-EMPTY) نمونه‌های محوری.

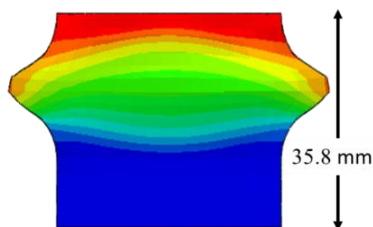
با توجه به شکل ۱۶، با افزایش مقدار فوم استفاده‌شده در سازه، مقدار نسبت راندمان نیروی لهیدگی افزایش یافته و در نمونه 2F2A2 به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. اما با حذف پروفیل داخلی و پر شدن

با نمونه محوری، شبیه‌سازی مدل‌های جانبی این بار با استفاده از خواصی که در جدول ۴ ارائه شده است، انجام شد [۲۴]. همچنین به دلیل اینکه بهتر است تا فوم آلومینیومی در پروفیل ریخته‌گری شود تا کاملاً به جداره پروفیل بچسبد و از شکستگی و خورد شدگی احتمالی ناشی از عدم چسبندگی در حین ضربه جلوگیری شود، این بار، فوم‌ها کاملاً چسبیده به دیواره و با قید Tie مدل شدند تا اثر برهم‌کنش بین دیواره و فوم نیز بررسی شود. در شکل‌های ۱۹ تا ۲۲، هندسه‌ی مدل عددی با خواص فوم پژوهش مرجع ۳۲ قابل مشاهده است [۲۴].



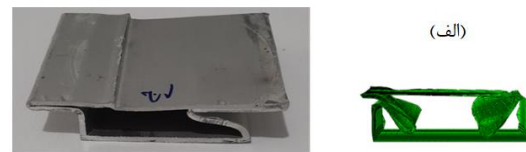
شکل ۱۹: هندسه عددی مدل 1E0L2.

طبق شکل ۱۹ مدل 1E0L2 در اثر بار ضربه جانبی به‌طور کامل له شده است و وجود نگهدارنده مانع از ادامه لهیدگی آن شده است. همچنین این مدل برخلاف مدل 1E0A2 که به‌صورت محوری تحت بار ضربه‌ای قرار گرفت، مقدار تغییر طول و لهیدگی بسیار بیشتری را داشته است.

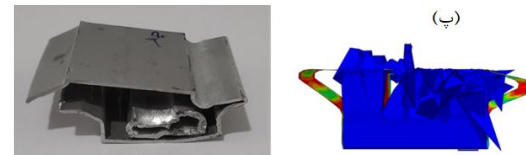


شکل ۲۰: هندسه عددی مدل 1F0L2 با خواص فوم پژوهش [۲۴].

طبق شکل ۲۰، پروفیل مدل شده با فوم مقاوم‌تر از ناحیه وسط جداره‌ها دچار بادکردگی و چین شده است. اما در پروفیل با خواص فوم خریداری شده، مقدار لهیدگی بسیار بیشتر بوده و فوم عملکرد مناسبی از خود نشان نداده و خورد شده است. عملکرد فوم به این شکل است که تحت ضربه فشرده شده و حفره‌های فوم به تدریج در اثر تراکم، بسته می‌شود و رفتار فوم به رفتار آلومینیوم جامد نزدیک‌تر می‌گردد. در اثر ممزوج شدن فوم و جداره آلومینیومی در حین ریخته‌گری، احتمال جدایش فوم از دیواره بسیار کم است و فوم ناحیه بادکردگی پروفیل را پر می‌کند.



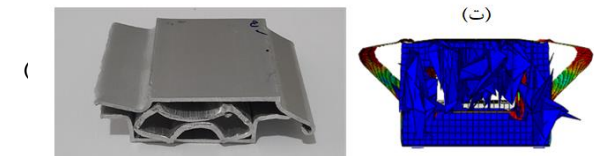
(الف)



(ب)



(ب)



(ت)

شکل ۱۸: (الف) مقایسه هندسه عددی و تجربی مدل 1F0L2 (ب) مقایسه هندسه عددی و تجربی مدل 1F0L2 (پ) مقایسه هندسه عددی و تجربی مدل 2F2L2 (ت) مقایسه هندسه عددی و تجربی مدل 2F3L2

با توجه به شکل ۱۸، مدل عددی پس از شبیه‌سازی و با تغییر شکل نادرست المان‌ها، با خطا مواجه شده و بر اساس خطا متوقف شده است. زیرا تغییر شکل المان‌های فوم آلومینیومی بیش از حد معمول بوده و نشان‌دهنده‌ی عملکرد نادرست فوم آلومینیومی در این شبیه‌سازی است که با توجه به نتایج تجربی نیز فوم تهیه شده عملکرد قابل قبولی در برابر ضربه نداشته و بسیار شکننده است. در حین ضربه فوم آلومینیومی درون پروفیل خورد شده و به بیرون ریخته شده است که نشان از عملکرد نامناسب و شکننده بودن فوم دارد. همچنین نمونه‌ها به‌صورت کامل له شده‌اند.

۳-۶- لهیدگی و تغییر طول مدل‌های عددی جدید

جهت بررسی رفتار فوم استفاده شده در پژوهش لو و همکاران جهت استفاده در ساخت پروفیل‌های تحت بار ضربه جانبی و مقایسه مقدار انرژی جذب شده و لهیدگی پروفیل با فوم مقاوم‌تر تحت ضربه جانبی

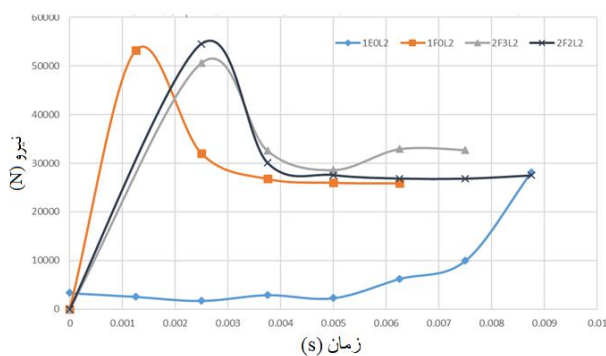
جدول ۷: مقدار تغییر طول عددی مدل‌های جانبی با در نظر گرفتن خواص فوم پژوهش [۲۴].

کد مدل	تغییر طول (میلی‌متر)
1E0L2	۴۰
1F0L2	۱۴/۲
2F2L2	۱۵/۲
2F3L2	۱۴/۳

با توجه به جداول ۷ و ۲، می‌توان دریافت که به‌طور کلی مقدار لهیدگی مدل‌های جانبی حتی با استفاده از فوم مقاوم‌تر نسبت به فوم مدل محوری، در مقایسه با مقدار لهیدگی مدل‌های محوری با احتساب انرژی ضربه یکسان ۵۳۰ ژول، بیشتر است. بر اساس پارامتر تغییر طول می‌توان گفت استفاده از مدل جانبی در مقایسه با مدل محوری عملکرد قابل قبولی در برابر ضربه ندارد اما می‌بایست سایر پارامترها نظیر جذب انرژی و راندمان نیروی لهیدگی نیز بررسی گردد تا بتوان مدل بهینه را انتخاب کرد.

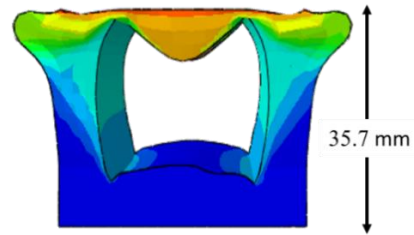
۳-۷- نمودار نیرو-زمان مدل‌های عددی جدید

در شکل ۲۳ نمودار نیرو-زمان عددی مدل‌های جانبی با در نظر گرفتن خواص فوم پژوهش مرجع ۳۲ ارائه شده است.



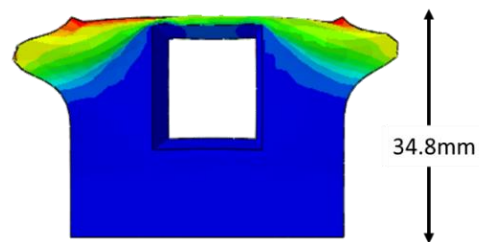
شکل ۲۳: نمودار نیرو-زمان عددی مدل‌های جانبی با در نظر گرفتن خواص فوم پژوهش [۲۴].

با توجه به شکل ۲۳، مقدار نیروی ماکزیمم همه نمونه‌ها به‌جز 1E0L2، در محدوده ۵۰ تا ۵۵ کیلو نیوتون می‌باشد و نشان از پاسخ یکسان آن‌ها در برابر بار ضربه جانبی را نشان می‌دهد. برای مدل 1E0L2، مقدار نیروی ماکزیمم به‌طور حدودی برابر با ۲۸ کیلو نیوتون است که کاهش تقریباً ۱۰۰ درصدی نسبت به سایر مدل‌های جانبی داشته و در انتهای فرآیند لهیدگی اتفاق افتاده است. زیرا در



شکل ۲۱: هندسه عددی مدل 2F3L2 با خواص فوم پژوهش [۲۴].

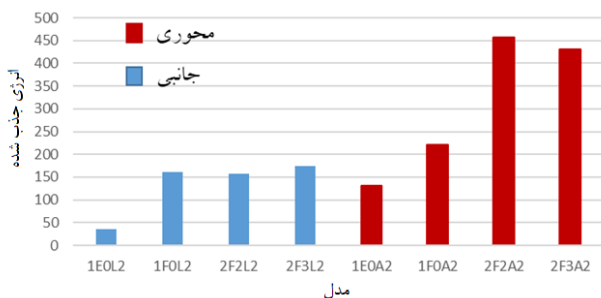
طبق شکل ۲۱، مقدار تغییر طول پروفیل 2F3L2، برابر با ۱۴/۳ میلی‌متر می‌باشد که نسبت به مدل محوری 2F3A2، ۹ میلی‌متر بیشتر دچار لهیدگی شده است. همچنین نسبت به مدل 1F0L2 (پروفیل کاملاً پر) مقدار لهیدگی تقریباً بدون تغییر بوده است. اما در مدل تجربی با فوم خریداری شده، پروفیل به‌صورت کامل له شده و تمامی فوم به‌کاررفته در آن به بیرون ریخته است. طرح لهیدگی پروفیل داخلی در دو حالت تجربی و عددی تقریباً شباهت دارد اما وجود فوم قوی‌تر در مدل عددی، مانع لهیدگی بیشتر پروفیل داخلی نیز شده است.



شکل ۲۲: هندسه عددی مدل 2F2L2 با خواص فوم پژوهش [۲۴].

طبق شکل ۲۲، مقدار تغییر طول مدل 2F2L2، برابر با ۱۵/۲ میلی‌متر است که به‌طور تقریبی با سایر مدل‌های جانبی به‌جز مدل پروفیل خالی برابر است. اما در مدل تجربی با فوم خریداری شده پروفیل به‌طور کامل له شده است. لازم به ذکر است در تمامی مدل‌های بالا شرط ریخته‌گری فوم در پروفیل لحاظ شده است. در صورت برش فوم و مونتاژ کردن آن در پروفیل ممکن است به دلیل عدم چسبندگی به دیواره، فوم تحت ضربه دچار شکستگی شود و مدل عملکرد درستی در برابر ضربه نداشته باشد. در جدول ۷ مقدار تغییر طول عددی مدل‌های جانبی با در نظر گرفتن خواص فوم پژوهش مرجع ۳۲ ارائه شده است [۲۴].

برای این منظور مقدار جذب انرژی هر ۸ مدل در طول ۴/۹ میلی‌متر اندازه‌گیری و در شکل ۲۴ نمودار آن ارائه شده است.



شکل ۲۴: نمودار جذب انرژی مدل‌های محوری و جانبی در $x=4.9mm$.

بر طبق شکل ۲۴، به‌طور کلی مقدار جذب انرژی تعادلی در طول ۴/۹ میلی‌متر، برای مدل‌های محوری بیشتر از مدل‌های جانبی است و بهینه‌ترین مدل، مدل 2F2A2 است که در آن حدود ۴۵۰ ژول از ۵۳۰ ژول انرژی کل، جذب شده است. در جدول ۱۰ مقادیر راندمان نیروی لهیدگی برای نمونه‌های جانبی با فوم مقاوم بر طبق نتایج تحلیل عددی ارائه شده است.

جدول ۱۰: مقادیر راندمان نیروی لهیدگی برای نمونه‌های جانبی با فوم مقاوم بر طبق نتایج تحلیل عددی.

کد مدل	CFE	CAE/CFE-EMPTY
1E0L2	۰/۲۵	۱
2F3L2	۰/۶۹	۲/۷۶
2F2L2	۰/۵۹	۲/۳۶
1F0L2	۰/۶۱	۲/۴۴

با توجه به جدول ۱۰، کمترین مقدار راندمان نیروی لهیدگی متعلق به نمونه 1E0L2 و بیشترین آن متعلق به نمونه 2F3L2 می‌باشد. اما با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۶، راندمان نیروی لهیدگی مدل‌های محوری بیشتر از مدل‌های جانبی است و از این رو، ایدئال‌ترین جاذب انرژی در بین ۸ مدل شبیه‌سازی شده محوری و جانبی، نمونه 2F2A2 می‌باشد. در شکل ۲۵، نمودار راندمان نیروی لهیدگی مدل‌های محوری و جانبی قابل مشاهده است.

انتهای فرآیند ضربه، پروفیل به‌طور کامل له‌شده و نیروی بیشتری صرف کامل کردن لهیدگی آن شده است. به‌طور کلی با بررسی مقدار نیروی ماکزیمم لهیدگی مدل‌های جانبی و مقایسه آن با مدل‌های محوری، مشخص می‌شود که نیروی ماکزیمم برای مدل‌های محوری بیشتر است و این نشان از مقاومت بیشتر مدل‌های محوری در مقابل ضربه را نشان می‌دهد.

۳-۸- نیروی لهیدگی، انرژی جذب‌شده و کارایی نیروی

لهیدگی مدل‌های عددی جدید

در جداول ۸ و ۹ مقادیر مربوط به نیروی لهیدگی ماکزیمم و میانگین و مقادیر انرژی جذب‌شده مدل‌های عددی جانبی با در نظر گرفتن فوم مقاوم‌تر نشان داده شده است.

جدول ۸: مقادیر نیروی لهیدگی میانگین و ماکزیمم مدل‌های عددی جانبی با فوم مقاوم‌تر.

کد مدل	نیروی ماکزیمم (کیلو نیوتن)	نیروی میانگین (کیلو نیوتن)
1E0L2	۲۸/۱	۷/۱
1F0L2	۵۳/۲	۳۲/۷
2F0L2	۵۴/۵	۳۲/۲
2F3L2	۵۰/۶	۳۵/۴

جدول ۹: مقادیر انرژی جذب‌شده مدل‌های عددی جانبی با فوم مقاوم‌تر.

کد مدل	انرژی جذب‌شده (ژول)	
	کل	$X=14/2 mm$
1E0L2	۲۸۴	۱۰۰/۸۲
1F0L2	۴۶۴/۳۴	۴۶۴/۳۴
2F2L2	۴۸۹/۲	۴۵۷/۲۴
2F3L2	۵۰۶/۲۲	۵۰۲/۶۸

با توجه به جدول ۹ مقدار انرژی جذب‌شده نمونه 2F3L2، برابر با ۵۰۶/۲۲ ژول و بیشتر از سایر مدل‌هاست. به دلیل وابستگی مقدار جذب انرژی به تغییر طول، جذب انرژی تعادلی در طول ۱۴/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. به ازای این تغییر طول، کمترین جذب انرژی متعلق به پروفیل خالی (1E0L2) و بیشترین آن متعلق به مدل 2F3L2 است. برای مقایسه جذب انرژی مدل‌های محوری و جانبی، لازم است تا همه مدل‌ها در یک طول یکسان مقایسه شوند.

جذب انرژی و راندمان نیروی لهدیگی دارند. همچنین مقدار تغییر طول و لهدیگی مدل‌های محوری در مقایسه با مدل جانبی با در نظر گرفتن انرژی ضربه یکسان بسیار کمتر است.

- استفاده از فوم خریداری شده در ساخت پروفیل‌های جذب انرژی، عملکرد مناسبی بر جذب انرژی و تغییر طول نمونه‌های محوری داشت اما به دلیل اینکه فوم به صورت برش خورده داخل پروفیل قرار داده شد و همچنین ضعف فوم از لحاظ ساختار که سبب شکننده بودن آن شده است، جهت استفاده در پروفیل تحت ضربه جانبی، مناسب نیست.

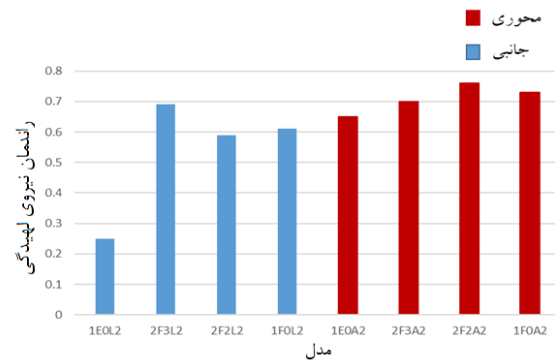
- طبق نتایج تجربی، پر شدن پروفیل آلومینیومی به صورت کامل با فوم آلومینیومی سبب کاهش ۱۸ درصدی مقدار تغییر طول پروفیل تحت ضربه محوری شد.

- مدل‌های جانبی تحت ضربه تجربی، مقاومت بسیار کمی در برابر ضربه از خود نشان دادند و به صورت کامل دچار لهدیگی شدند. همچنین فوم‌های استفاده شده در ساختار مدل‌های جانبی به دلیل عملکرد ضعیف و شکنندگی بسیار زیاد، خورد شده و همگی به بیرون ریخته شد.

- با شبیه‌سازی مدل‌های عددی متشکل از فوم با خواص مکانیکی بهتر نسبت به فوم خریداری شده و در نظر گرفتن ریخته‌گری فوم به داخل پروفیل، مشخص شد که پروفیل تحت ضربه جانبی مقاومت بیشتری در برابر ضربه با انرژی یکسان نسبت به استفاده از فوم ضعیف‌تر دارد اما همچنان مقدار لهدیگی نمونه‌های محوری کمتر از نمونه‌های جانبی با فوم مقاوم‌تر است.

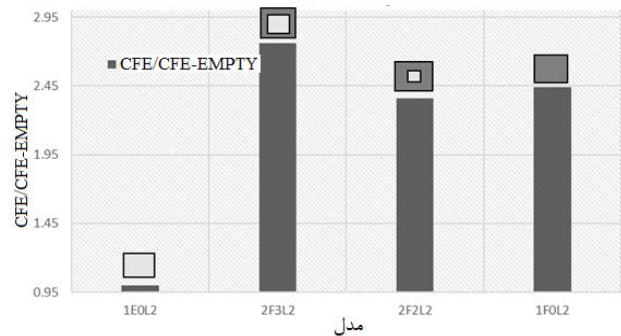
- با در نظر گرفتن فوم مقاوم‌تر به عنوان پرکننده سازه، مقدار تغییر طول پروفیل بر اساس نتایج عددی به مقدار ۶۲ درصد به نسبت پروفیل خالی تحت بار ضربه جانبی کاهش می‌یابد.

- با بررسی نتایج، مشخص شد مدل پروفیل دوجداره پر شده با فوم با جدار داخلی ۲*۲ سانتی‌متر در حالت محوری (2F2A2)، با دارا بودن بیشترین مقدار جذب انرژی، کمترین مقدار لهدیگی تحت ضربه و همچنین بیشترین راندمان نیروی لهدیگی و بیشترین نیروی لهدیگی ایدئال‌ترین مدل جهت استفاده در سازه‌های جذب انرژی می‌باشد. در این سازه ترکیب مقدار فوم استفاده شده در سازه و همچنین وجود جداره داخلی عامل مثبت



شکل ۲۵: نمودار راندمان نیروی لهدیگی عددی مدل‌های جانبی (فوم مقاوم و محوری).

در شکل ۲۶، نمودار نسبت راندمان نیروی لهدیگی برای مدل‌های جانبی با فوم مقاوم ارائه شده است.



شکل ۲۶: نمودار نسبت راندمان نیروی لهدیگی مدل‌های جانبی با فوم مقاوم‌تر.

با توجه به شکل ۲۶، با افزایش مقدار فوم استفاده شده در سازه، نسبت راندمان نیروی لهدیگی در مقایسه با پروفیل خالی بسیار افزایش می‌یابد و حالت 2F3L2 ایدئال‌ترین حالت جانبی است. سپس با کاهش اندازه جدار داخلی، نسبت راندمان نیز کاهش می‌یابد تا در نهایت در مدل تک جداره کاملاً پر نیز نسبت راندمان باز هم کمتر از نمونه 2F3L2 است.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مطالعه، بررسی عددی و تجربی پاسخ پروفیل‌های پر شده با فوم آلومینیومی در حالت تک جداره و دوجداره در برابر بار ضربه جانبی و محوری بود. در ادامه، خلاصه‌ای از نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی عددی و تجربی مدل‌ها ارائه می‌شود:

- به طور کلی، با جمع‌بندی نتایج مدل‌های جانبی و محوری، مدل‌های محوری عملکرد بهتری در مقابل ضربه از لحاظ مقدار

[5] Yu, X., Qin, Q., Zhang, J., He, S., Xiang, C., Wang, M., et al., "Crushing and energy absorption of density-graded foam-filled square columns: Experimental and theoretical investigations," *Composite Structures*, Vol. 201, pp. 423-433. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.06.014, 2018.

[6] Yin, H., Dai, J., Wen, G., Tian, W., Wu, Q., "Multi-objective optimization design of functionally graded foam-filled graded-thickness tube under lateral impact," *International Journal of Computational Methods*, Vol. 16, No. 1, pp. 1850088. DOI: 10.1142/S0219876218500889, 2019.

[7] Yao, R.-Y., Zhao, Z.-Y., Yin, G.-S., Zhang, B., "Attempt to improve the material utilisation and crashworthiness of grooved tube subjected to axial crushing," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 26, No. 1, pp. 77-86. DOI: 10.1080/13588265.2020.1745598, 2021.

[8] Zhang, B., Wang, L., Zhang, J., Jiang, Y., Wang, W., Wu, G., "Deformation and energy absorption properties of cenosphere/aluminum syntactic foam-filled circular tubes under lateral quasi-static compression," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 192, pp. 106126. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106126, 2021.

[9] Rajak, D. K., Kumaraswamidhas, L., Das, S., "Technical overview of aluminum alloy foam," *Reviews on Advanced Materials Science*, Vol. 49, No. 1. DOI: 10.1515/rams-2017-0012, 2017.

[10] Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams," *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6, pp. 559-632. DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00010-5, 2001.

[11] Niknejad, A., Elahi, S. A., Elahi, S. M., Elahi, S. A., "Foam-filled columns with rectangular cross-section during the flattening process: Theory and experiment," *Mechanical and*

مؤثر بر عملکرد سازه در استهلاک و جذب انرژی ناشی از ضربه است.

• هرچه مقدار لهیدگی (تغییر طول) نمونه تحت ضربه بیشتر باشد، ماکزیمم نیروی لهیدگی و مقاومت نمونه در برابر ضربه کمتر است. بر طبق این اصل بدیهی است که پروفیل‌های خالی دارای کمترین مقاومت در برابر ضربه هستند. در نمونه‌های محوری پروفیل خالی تحت ضربه مقدار ۱۶ میلی‌متر تغییر طول داشت که ماکزیمم نیروی لهیدگی آن ۳۰ کیلو نیوتون اندازه‌گیری شد. اما برای مقاوم‌ترین پروفیل که پروفیل دوجداره با جدار داخلی ۲*۲ سانتیمتر است، مقدار لهیدگی ۴ میلی‌متر و ماکزیمم نیروی لهیدگی در حدود ۱۲۳ کیلو نیوتون ثبت شد که این مقادیر نشان‌دهنده رابطه تغییر طول و ماکزیمم نیروی لهیدگی است.

۵- منابع:

[1] Singh, S., Bhatnagar, N., "A survey of fabrication and application of metallic foams," *Journal of Porous Materials*, Vol. 25, pp. 537-540. DOI: 10.1007/s10934-018-0462-8, 2018.

[2] Yan, W., Durif, E., Yamada, Y., Cui, E. W., "Crushing simulation of foam-filled aluminium tubes," *Materials Transactions*, Vol. 48, No. 7, pp. 1901-1906. DOI: 10.2320/matertrans.M2007108, 2007.

[3] Abedi, M. M., Niknejad, A., Liaghat, G. H., Nejad, M. Z., "Theoretical and experimental study on empty and foam-filled columns with square and rectangular cross section under axial compression," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 65, No. 1, pp. 134-146. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2012.03.012, 2012.

[4] Fang, J., Gao, Y., Sun, G., Zhang, Y., Li, Q., "Parametric analysis and multiobjective optimization for functionally graded foam-filled thin-wall tube under lateral impact," *Computational Materials Science*, Vol. 90, pp. 265-275. DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.04.020, 2014.

- [18] Ruan, D., Lu, G., Chen, F. L., Siores, E., "Dynamic mechanical properties of closed-cell aluminum foams with uniform and graded densities," *Journal of Materials Research*, Vol. 38, pp. 145-156. DOI: 10.1557/s43577-023-00592-5, 2023.
- [19] Peroni, M., Solomos, G., Pizzinato, V., "Compressive response and energy absorption of foam-filled aluminum honeycomb composite: Experiments and simulation," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 178, pp. 89-101. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.102346, 2023.
- [20] Wu, C., Ye, G., Zhao, Y., Ye, B., Wang, T., Wang, L., Zhang, Z., "Experimental and numerical study of in-plane uniaxial compression response of PU foam filled aluminum arrowhead auxetic honeycomb," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 502-512. DOI: 10.1108/RPJ-08-2023-0267, 2024.
- [21] Ahan Yekta Metal Store, "Ahan yekta metal store," Available from: <http://www.ahanyekta.com/>.
- [22] Gere, J. M., Timoshenko, S. P., "Mechanics of Materials," Cengage Learning, 6th ed., 2009. DOI: 10.1016/B978-0-12-374750-1.00001-3.
- [23] Abdelaziz, A. Y., & Abed, F. (2021). Special Energy Absorption: Definition, Evaluation, and Applications. *Materials*, Vol. 14, No. 14, pp. 3881. DOI: 10.3390/ma14143881.
- [24] Lu, G., Shen, J., Hou, W., Ruan, D., Ong, L. S., "Dynamic indentation and penetration of aluminium foams," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 5, pp. 932-943. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2008.03.009, 2008.
- Materials Engineering, Vol. 43, No. 1, pp. 783-795. DOI: 10.1007/s10767-019-00633-1, 2019.
- [12] Rogala, M., Ferdynus, M., "Numerical crush analysis of thin-walled aluminium columns with square cross-section and a partial foam filling," *Materials Science Forum*, Vol. 952, pp. 201-206. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.952.201, 2019.
- [13] Jianxun, Z., Yang, Y., Hui, Y., Qinghua, Q., Wang, T. J., "A theoretical study of low-velocity impact of metal foam-filled circular tubes," *Thin-Walled Structures*, Vol. 148, pp. 106525. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106525, 2020.
- [14] Salehi, M., Mirbagheri, S. M. H., Ramiani, A. J., "Efficient energy absorption of functionally-graded metallic foam-filled tubes under impact loading," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 31, No. 1, pp. 92-110. DOI: 10.1016/S1003-6326(21)64037-3, 2021.
- [15] Zhang, B., Wang, L., et al., "Deformation and energy absorption properties of cenosphere/aluminum syntactic foam-filled circular tubes under lateral quasi-static compression," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 192. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106126, 2021.
- [16] Shiravand, A., Asgari, M., et al., "Hybrid metal-composite conical tubes for energy absorption; theoretical development and numerical simulation," *Thin-Walled Structures*, Vol. 160. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109467, 2023.
- [17] Kilicaslan, C., et al., "Numerical crushing analysis of foam-filled corrugated single- and double-circular tubes subjected to axial impact," *Thin-Walled Structures*, Vol. 96. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107029, 2022.