



بررسی عددی جذب انرژی در سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی تحت ضربه کم سرعت

سامان جعفری^۱ و سعید رهنما^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۲ استادیار، دانشگاه بیرجند، بیرجند

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۱/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۳

چکیده

هدف از این تحقیق، مدل‌سازی چند نمونه‌ی آزمایشگاهی از سایر مراجع، جهت بررسی قابلیت جذب انرژی در سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی توسط نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس و اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی، با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. سازه‌های مورد بررسی در این تحقیق، بلوک‌های فومی تقویت‌شده با لایه‌های کامپوزیتی حاوی الیاف آرامید است. در نمونه‌های بررسی شده، خواص مواد استفاده شده در لایه‌های کامپوزیتی به‌عنوان تقویت‌کننده و همچنین در هسته‌های فومی یکسان بوده اما، در شکل هسته‌های فومی و تعداد لایه‌های کامپوزیتی تفاوت وجود دارد. در این تحقیق، مدل‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی، روند تخریب نمونه‌ها، نمودار نیرو-تغییر مکان و انرژی-تغییر مکان حاصل از بارگذاری ضربه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله برای هر نمونه، مشخصه‌های تخریب از جمله؛ میزان جذب انرژی، بار بیشینه، تغییر شکل کلی نمونه، نیروی مؤثر، طول تخریب نشده و میانگین بار بررسی شده است که نتایج مشخصه‌های حاصل از تحلیل عددی با نتایج روش آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده که دارای تطابق خوبی می‌باشد.

کلمات کلیدی: بلوک فومی تقویت‌شده؛ جذب انرژی؛ سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی؛ روش اجزا محدود.

Numerical study of Energy Absorption in Composite Sandwich Structures under Low Velocity Impact

S. Jafari¹, S. Rahnema^{2,*}

¹ M.S. Student, Mech. Eng., University of Birjand., Birjand, Iran

² Assist. Prof., Mech. Eng., University of Birjand., Birjand, Iran

Abstract

The aims of this research are simulating and modeling laboratory samples from other references to investigate the absorption ability of sandwich composite structures by the finite element method and validating the modeling results with laboratory ones. Structures investigated in this study are foam blocks reinforced by braided composite structures containing aramid fibers. In all samples examined, the properties of woven fabric as well as the core are the same, but there is the difference in the form of core and the number of woven composite fabric layers. In modeling laboratory samples, the destruction process of samples, force-displacement and energy-displacement curve under load impact, have been studied. As a result of this study, for each sample, including the features of degradation; energy absorption, maximum load, deformation structure, effective force, length of the sample that is almost undamaged after the test and average load experimented have been investigated and the results have been validated with the laboratory results.

Keywords: Reinforced Foam Blocks; Energy Absorption; Composite Sandwich Structures; Finite Element Method.

۱- مقدمه

امروزه، استفاده از مواد کامپوزیتی به‌عنوان ماده انتخابی به جای مواد فلزی در بسیاری از کاربردهای فناوری مشاهده می‌شود. مزایای خاص کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزات، نظیر نسبت استحکام و سفتی به وزن زیاد، عایق بودن نسبی در برابر گرما و صدا، مقاومت خستگی و مقاومت خوردگی آن‌ها را برای استفاده در بسیاری از اجزای خودروها، هواپیماها و کشتی‌ها مورد توجه قرار داده است. در صنعت هوایی، سازه‌های اصلی هواپیما، همچون بال‌ها و پره‌های توربین، به‌واسطه برخورد پرندگان یا اشیای خارجی دیگر در معرض ضربه با سرعت زیاد قرار دارند. همچنین، سازه‌های دریایی، خودرو و ساختمان نیز در معرض ضربه به‌واسطه اجسام خارجی هستند در نتیجه یکی از مسائل مرتبط با سازه‌های کامپوزیتی، تأثیر ضربات اجسام خارجی بر روی آن‌هاست. همچنین ممکن است خرابی‌های قابل توجهی در داخل آن رخ دهد، بدون این‌که خرابی توسط چشم غیر مسلح قابل دیدن باشد. چنین خرابی‌هایی می‌تواند، در گستره وسیعی از سرعت‌های اجسام ضربه‌زننده رخ دهد. از جمله این موارد می‌توان به ضربه در سرعت‌های پایین (مانند سقوط یک ابزار بر روی یک قطعه) که بسیار متداول است و یا برخورد در سرعت‌های بسیار بالا به سبب برخورد اجرام آسمانی بر روی یک سفینه فضایی اشاره کرد. بنابراین، در سازه‌های کامپوزیتی دستیابی به یک طراحی با شکل مناسب و میزان جذب انرژی بهینه در اثر ضربه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱]. در گذشته، محققین زیادی به بررسی جذب انرژی در سازه‌های کامپوزیتی پرداخته‌اند. راماکریشنا^۱ و همکارانش از آزمون شبه-استاتیکی و دینامیکی استفاده کرده و مشخصه‌های جذب انرژی را در مواد کامپوزیتی پایه پلیمری بررسی کردند [۲]. ژانگ^۲ و همکارانش قابلیت جذب انرژی و مقاومت ضربه‌ای را در سرعت‌های پایین برای صفحات ساندویچی با هسته فومی از جنس پلی‌اورتان، مورد بررسی قرار دادند [۳]. پالانیولو^۳ و همکارانش به بررسی قابلیت جذب انرژی در دو نمونه با سطح مقطع مربعی و دایره‌ای

تقویت‌شده با لایه‌های کامپوزیتی توسط روش تجربی و عددی، پرداختند. در روش عددی از المان‌های پوسته‌ای برای تعریف لایه‌های کامپوزیتی و از تحلیل‌گر دینامیک صریح^۴ استفاده شده است [۴]. همچنین خیا فان^۵ و همکارانش به بررسی تأثیر اندازه ترک، زاویه تخریب و عمق نفوذ ضربه‌زننده بر قابلیت جذب انرژی در سازه ساندویچی با هسته فومی و رویه‌های کامپوزیتی با الیاف شیشه‌ای توسط آزمون ضربه سقوطی، پرداختند [۵]. کارلا^۶ و همکارانش تخریب در سازه‌های مربعی کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت ۷/۱ متربرثانیه و جرم ضربه‌زننده ۱۴۰ کیلوگرم را توسط آزمون تجربی و تحلیل عددی، بررسی کردند [۶]. بوریا^۷ و همکارانش رفتار نمونه‌ی ذوزنقه‌ای شکل دارای کامپوزیت الیاف کربن را تحت بارگذاری ضربه‌ای توسط روش تجربی و عددی، بررسی کردند [۷]. سامر^۸ و همکارانش به بررسی عددی تخریب در مقاطع جدار نازک با ضخامت‌های مختلف، پرداختند. با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس برای هر کدام از نمونه‌ها بار بیشینه، نیروی مؤثر تخریب و جذب انرژی را بررسی کردند [۸]. پیتارسی^۹ و همکارانش به بررسی تخریب در شش نمونه‌ی ساندویچی کامپوزیتی، پرداختند. در نهایت، مقدار بار بیشینه و جذب انرژی ویژه در نمونه‌های مختلف، بررسی گردید [۹]. اووال محمد^{۱۰} و همکارانش به بررسی قابلیت جذب انرژی ضربه در لوله‌های تقویت‌شده با لایه‌های کامپوزیتی کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی در بارگذاری فشاری توسط روش تجربی و عددی، پرداختند [۱۰]. فیضل مصطفی^{۱۱} و همکارانش به بررسی مقاومت در محل اتصال دو بدنه تقویت‌شده با لایه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری پرداختند. آن‌ها از روش حل دینامیک صریح در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس جهت پیش‌بینی رفتار تخریب و بررسی مقاومت اولیه تا شکست نهایی سازه استفاده کردند [۱۱]. گروه تحقیقاتی شرکت

⁴ Dynamic, Explicit

⁵ Xia fan

⁶ Carla

⁷ Boria

⁸ Samer

⁹ Pitarresi

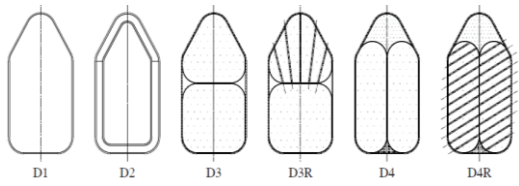
¹⁰ Auwal Muhammad

¹¹ Faizal Mustapha et al

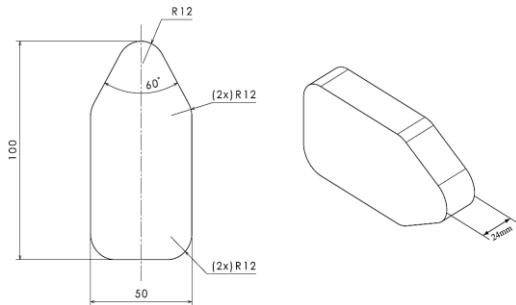
¹ Ramakrisna

² Zhang

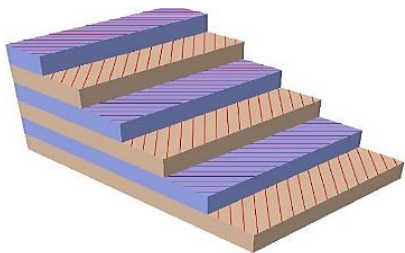
³ Palanivelu



شکل ۱- شش نمونه مورد مطالعه [۱۲]



شکل ۲- اندازه خارجی نمونه‌ها [۱۲]



شکل ۳- چیدمان لایه‌ها به صورت نمایش سه‌بعدی

۲-۱- خواص مواد

در این بخش خواص مکانیکی مواد استفاده شده در نمونه‌ها، ارائه می‌گردد. هسته مرکزی در همه مدل‌ها از جنس فوم پلی‌متاکریلیمید بوده و در جدول ۱ خواص مکانیکی فوم ارائه شده است.

از المان‌های چسبیده برای مدل‌سازی چسب به‌عنوان اتصال بین هسته مرکزی و لایه‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. خواص مکانیکی چسب استفاده شده در نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است [۱۲].

الیاف لایه‌های کامپوزیتی از نوع آرامید ۱۲K می‌باشد که خواص مکانیکی آن در جدول ۳ آمده است [۱۲].

در نمونه‌های آزمایشگاهی، نمونه‌ی چهارم D3R و ششم D4R دارای سوراخ‌هایی می‌باشند که با کرین 6K پر شده‌اند. در جدول ۴ خواص مکانیکی کرین 6K ارائه شده است [۱۳ و ۱۴].

ایرباس^۱ فرانسه به همراه محققین دانشگاه تولوس، مقدار جذب انرژی ضربه را در سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی، توسط آزمون تجربی بررسی کردند. نمونه‌های بررسی شده، بلوک‌های فومی پلی‌متاکریلیمید^۲ بوده که توسط لایه‌های کامپوزیتی دارای الیاف آرامید^۳ ۱۲K تقویت شده بودند. در همه‌ی این نمونه‌ها خواص مواد در لایه‌های کامپوزیتی و فوم یکسان بوده، ولی در شکل فوم و تعداد لایه‌های کامپوزیتی تفاوت وجود دارد [۱۲]. هدف در تحقیق حاضر، مدل‌سازی چند نمونه‌ی آزمایشگاهی از مرجع [۱۲]، جهت بررسی قابلیت جذب انرژی در سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی توسط نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس و اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی، با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

۲-۲ مدل‌سازی

در این بخش مشخصات هندسی و خواص مکانیکی مواد، شرایط مرزی، شرایط بارگذاری و نحوه شبکه‌بندی نمونه‌های مورد بررسی که در شکل ۱ آمده، در نرم‌افزار اجزا محدود ارائه شده است [۱۲].

هسته مرکزی به‌صورت جسم جامد، سه‌بعدی^۴ و تغییر شکل‌پذیر^۵ مدل‌سازی شده است. در شکل ۲ اندازه خارجی نمونه‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته، مشاهده می‌شود.

المان‌های پوسته‌ای^۶، سه‌بعدی و تغییرشکل‌پذیر برای مدل‌سازی لایه‌های کامپوزیتی بکار رفته است. ضخامت هر لایه مطابق نمونه‌های آزمایشگاهی مرجع [۱۲]، ۰/۱۶ میلی-متر می‌باشد. چیدمان لایه‌ها در شکل ۳ آمده است. همچنین یک جسم صلب دو‌بعدی با المان‌های پوسته‌ای برای مدل‌سازی ضربه‌زننده در نظر گرفته می‌شود و با توجه به مرجع [۱۲] سرعت ضربه‌زننده ۶/۵ متر بر ثانیه و جرم آن ۴ کیلوگرم می‌باشد.

¹ Airbus Group

² Polymethacrylimide foam

³ Aramid

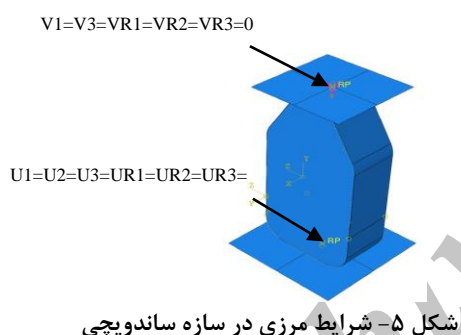
⁴ 3D

⁵ Deformable

⁶ Shell

کامپوزیتی با تکیه‌گاه به صورت سطح به سطح در نرم‌افزار مدل شده است. با توجه به اینکه در نمونه‌های آزمایشگاهی فوم توسط چسب با لایه‌های کامپوزیتی تقویت شده است، در نرم‌افزار اجزا محدود نیز، تماس در همه نمونه‌ها در محل‌های اتصال اجزا به همدیگر با استفاده از قید Tie تعریف شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، ضربه‌زننده در راستای y دارای سرعت می‌باشد و تکیه‌گاه سازه نیز، در تمام جهات مقید می‌باشد.

برای مدل‌سازی فوم از المان‌های سه‌بعدی، هشت گرهی و انتگرال کاهشی (D3D8R)، لایه‌های کامپوزیتی از المان‌های پوسته‌ای، هشت گرهی و انتگرال کاهشی (S8R) و برای چسب از المان چسبنده سه‌بعدی، هشت گرهی (COH3D8) استفاده شده است. در جدول ۵ اندازه، تعداد المان‌ها و تعداد گره‌ها در نمونه‌های مختلف آمده است.



جدول ۵- اندازه، تعداد المان‌ها و تعداد گره‌ها در مدل‌های مختلف

مدل	D1	D2	D3	D3R	D4	D4R
اندازه المان	۴	۴	۴	۴	۴	۴
تعداد گره‌ها	۴۳۸۴	۵۹۱۵	۵۹۲۹	۷۶۵۲	۵۱۵۲	۷۷۱۸
تعداد المانها	۳۱۹۰	۴۴۷۰	۴۰۲۶	۴۳۲۵	۳۶۴۲	۴۷۶۲

۳- روابط حاکم

تئوری شکست تی‌سای-وو^۱ بر پایه تئوری شکست انرژی کرنشی کل بلترامی^۲ استوار است. تی‌سای-وو از این تئوری برای یک تک‌لایه در حالت تنش صفحه‌ای استفاده کردند.

¹ Tsai-Wu Failure Theory
² Beltrami

جدول ۱- خواص مکانیکی فوم [۱۲]

مقادیر	ویژگی‌ها
۷۵	چگالی (kg/m ³)
۱۰۵	مدول الاستیک (MPa)
۴۲	مدول برشی (MPa)
۰/۳	ضریب پواسون
۱/۷	استحکام فشاری (MPa)
۲/۲	استحکام کششی (MPa)
۱/۴	استحکام برشی (MPa)

جدول ۲- خواص چسب [۱۲]

مقادیر	ویژگی‌ها
۲/۸۹	مدول کششی (GPa)
۷۵	استحکام کششی (MPa)
۳/۳	مدول پیچشی (GPa)
۱۱۱۰	چگالی (kg/m ³)
۱۳۲	استحکام پیچشی (MPa)

جدول ۳- مشخصات الیاف آرامید [۱۲]

مقادیر	ویژگی‌ها
۱۷۶	وزن سطحی (g/m ²)
۲/۹۲	استحکام کششی (Gpa)
۱۰۵	مدول کششی (Gpa)

جدول ۴- خصوصیات مکانیکی کربن [۱۳ و ۱۴]

مقادیر	ویژگی‌ها
۱۷۶	چگالی (kg/m ³)
۲۲۳	مدول الاستیک (GPa)
۰/۳	ضریب پواسون
۱۵۰۰	استحکام فشاری (MPa)
۲۵۰۰	استحکام کششی (MPa)
۵۹	استحکام برشی (MPa)

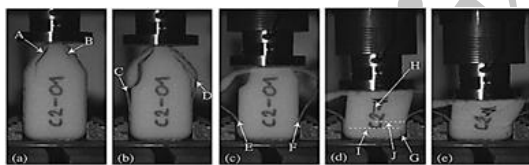
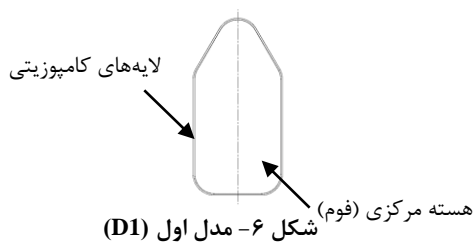
۲-۲- مراحل حل

با توجه به اینکه نمونه‌های آزمایشگاهی مرجع [۱۲]، تحت بارگذاری ضربه‌ای می‌باشند، جهت شبیه‌سازی بارگذاری ضربه‌ای، از تحلیل گر دینامیکی صریح در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس استفاده شده است.

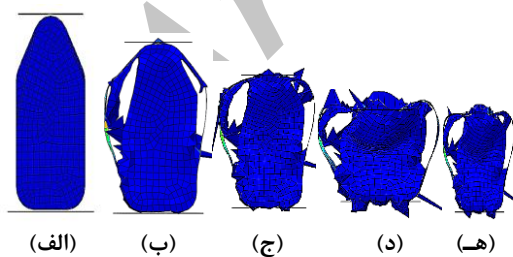
۲-۳- سطوح مشترک، شرایط مرزی و شرایط بارگذاری

اتصال لایه‌های کامپوزیتی به فوم، تماس جسم صلب ضربه‌زننده به لایه‌های کامپوزیتی و همچنین اتصال لایه‌های

شکل ۷ و شکل ۸ فرآیند ضربه را به ترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار نشان می‌دهد. در شکل (۸-ب)، ترک‌هایی در امتداد ارتفاع فوم ایجاد شده که این ترک‌ها مطابق شکل (۸-ج) در طول ضربه رشد کرده و موجب تخریب نمونه می‌گردند. پس از رشد ترک اولیه در سمت چپ، ترک ریزتری در سمت راست نمونه ایجاد شده و این ترک با ادامه فرآیند ضربه رشد می‌کند. در شکل (۸-د) هم‌زمان با رشد ترک در حین تخریب، چسب قادر به مقاومت نبوده و لایه‌های کامپوزیتی از فوم جدا می‌شوند. در شکل (۸-ه) پس از متوقف شدن جدایش لایه‌ها از فوم، نمونه تا حد نهایی خود در برابر ضربه مقاومت کرده تا جایی که جسم ضربه‌زننده دیگر قادر به تغییر شکل سازه نمی‌باشد و تغییر مکان سازه متوقف می‌گردد.



شکل ۷- روند تخریب آزمایشگاهی مدل اول [۱۲]



شکل ۸- روند تخریب عددی مدل اول

در شکل ۹ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه اول نشان داده شده است. بعد از شروع ترک در تحلیل عددی با حذف المان‌های تخریب شده نیرو افت کرده ولی با برخورد

یک تک‌لایه در صورتی به شکست خواهد رسید که نامساوی رابطه ۱ صادق باشد [۱۵].

$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\tau_{12} + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 > 1 \quad (۱)$$

عامل‌های H از پنج ویژگی استحکام تک‌لایه‌ی تک‌جهته به دست می‌آیند [۱۵].

$$H_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}} \quad (۲)$$

$$H_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}} \quad (۳)$$

$$H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}} \quad (۴)$$

$$H_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}(\sigma_2^C)_{ult}} \quad (۵)$$

$$H_6 = 0 \quad (۶)$$

$$H_{66} = \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2} \quad (۷)$$

$$H_{12} = \frac{2}{\sigma^2} - \frac{(H_1 + H_2)}{\sigma} - \frac{1}{2}(H_{11} + H_{22} + H_{66}) \quad (۸)$$

در روابط فوق، $(\sigma_1^T)_{ult}$ استحکام کششی طولی نهایی در راستای الیاف، $(\sigma_1^C)_{ult}$ استحکام فشاری طولی نهایی در راستای الیاف، $(\sigma_2^T)_{ult}$ استحکام کششی عرضی نهایی در راستای عمود بر الیاف، $(\sigma_2^C)_{ult}$ استحکام فشاری عرضی نهایی در راستای عمود بر الیاف و $(\tau_{12})_{ult}$ استحکام برشی نهایی درون صفحه‌ای در صفحه‌ی ۱-۲ می‌باشد.

۴- نتایج

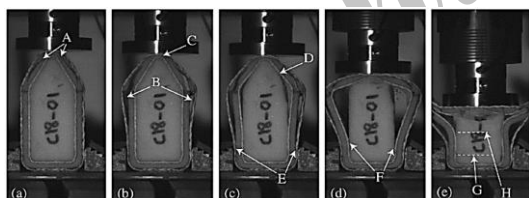
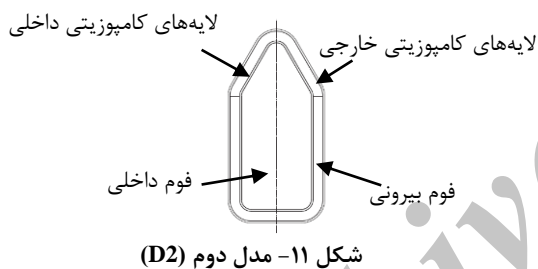
در این بخش نتایج حاصل از آزمایشات مرجع [۱۲] با نتایج حاصل از مدل‌سازی در این تحقیق مقایسه و برای هر کدام از نمونه‌ها نمودار نیرو-تغییر مکان، انرژی-تغییر مکان و نحوه تخریب به‌عنوان خروجی از نرم‌افزار استخراج شده است.

۴-۱- شبیه‌سازی تخریب در مدل اول (D1)

با توجه به شکل ۶ این مدل از ترکیب هسته از جنس فوم یک‌تکه تقویت‌شده با لایه‌های کامپوزیتی می‌باشد. لایه‌های کامپوزیتی با استفاده از المان‌های چسبنده به هسته مرکزی متصل شده‌اند. در این مدل، شش لایه کامپوزیتی با زاویه الیاف $\pm 45^\circ$ فوم را تقویت می‌کند.

کامپوزیتی تقویت شده و بلوک خارجی نیز با چهار لایه‌ی کامپوزیتی تقویت شده است. شکل ۱۱ مدل دوم را نشان می‌دهد.

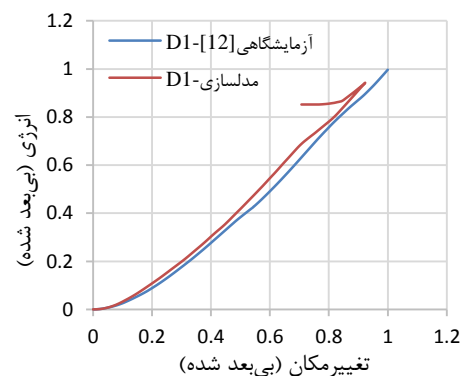
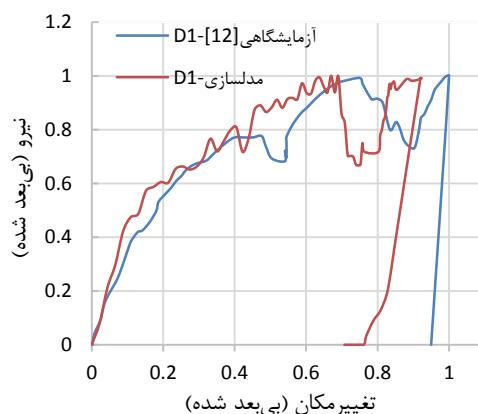
شکل ۱۲ و شکل ۱۳ فرآیند ضربه را به ترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۳-ب) در لحظات اول برخورد ضربه‌زننده به نمونه، در سمت چپ بخش فوقانی فوم خارجی یک ترک ایجاد شده است. در شکل (۱۳-ج) ترک‌های فوم فوقانی رشد کرده و موجب تخریب فوم فوقانی می‌شود. در طی تخریب همانطور که در شکل (۱۳-د) نشان داده شده، در ناحیه‌ای که لایه‌های کامپوزیتی روی فوم مرکزی به وسیله چسب متصل شده‌اند، نیروی تخریب بر مقاومت چسب غلبه کرده و حین تخریب این لایه‌ها از هسته مرکزی جدا شده‌اند. در نهایت، مقاومت ماده مانع افزایش تغییر شکل در نمونه شده و مطابق شکل (۱۳-ه) تغییر مکان سازه متوقف می‌گردد.



شکل ۱۴ نمودار نیرو-تغییر مکان مدل دوم را نشان می‌دهد. در این مدل بار بیشینه، در نتایج آزمایشگاهی و

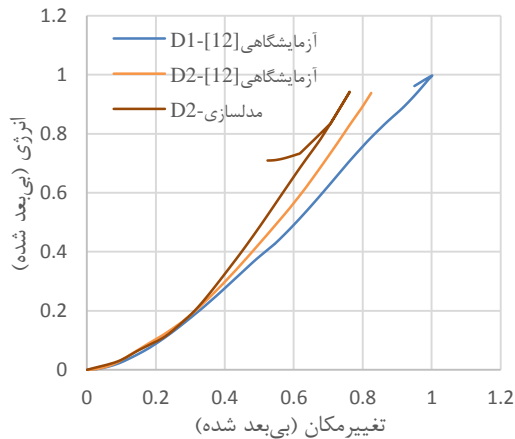
ضربه‌زننده به المان‌های بعدی باز هم نیرو افزایش پیدا می‌کند و این امر موجب ایجاد تغییرات نامنظم نمودار نیرو-تغییر مکان در طی تخریب می‌گردد.

در شکل ۱۰ نمودار انرژی-تغییر مکان مدل اول نشان داده شده است. با توجه به اینکه تغییر مکان این مدل در نتایج عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد در نتیجه، جذب انرژی در نتایج عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است.

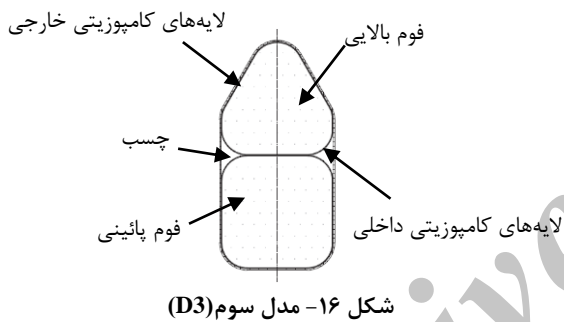


۴-۲- شبیه‌سازی تخریب در مدل دوم (D2)

خواص مواد استفاده شده در این مدل مانند مدل اول می‌باشد. در این مدل تأثیر دو تکه شدن سازه بر قابلیت جذب انرژی بررسی می‌گردد. بلوک داخلی توسط دولایه‌ی

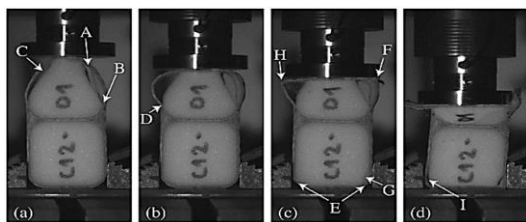


شکل ۱۵- نمودار انرژی-تغییر مکان نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول و دوم



شکل ۱۶- مدل سوم (D3)

شکل ۱۷ و شکل ۱۸ فرآیند ضربه را به ترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار نشان می‌دهد. پس از برخورد ضربه‌زننده مطابق شکل (۱۸-ب)، ترک در فوم بالایی ایجاد شده که حین فرآیند تخریب رشد کرده است. در شکل (۱۸-ج) اندازه‌ی این ترک در طول تخریب بزرگ‌تر شده تا به لبه‌های بیرونی لایه‌های کامپوزیتی می‌رسد. در نهایت، در شکل (۱۸-ه) تغییر شکل در سازه متوقف می‌گردد.



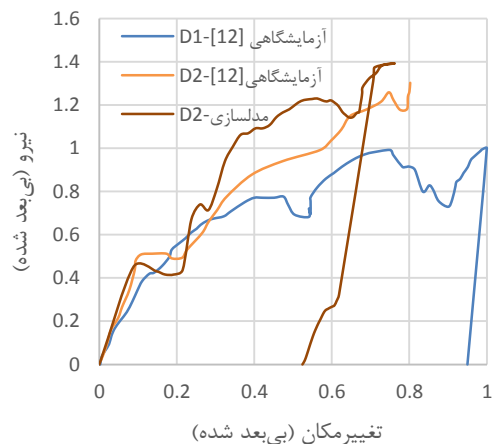
شکل ۱۷- روند تخریب آزمایشگاهی مدل سوم [۱۲]

عددی از نمونه اول بیشتر می‌باشد. در روش آزمایشگاهی، چسب بین فوم مرکزی و لایه‌های کامپوزیتی داخلی به صورت کامل در یک منطقه جدا شده است. همچنین، اتصال مابین لایه‌های بیرونی کامپوزیتی و فوم بیرونی از بین رفته که در تحلیل عددی این لایه‌ها از فوم بیرونی جدا نشده است. در تحلیل عددی اتصال بین هسته مرکزی و لایه‌های داخلی از هم جدا نشده و در طول تخریب چسب در مقابل جدا شدن مقاومت می‌کند که این پدیده می‌تواند دلیلی بر اختلاف این مقدار نیرو در نتایج آزمایشگاهی و عددی باشد.

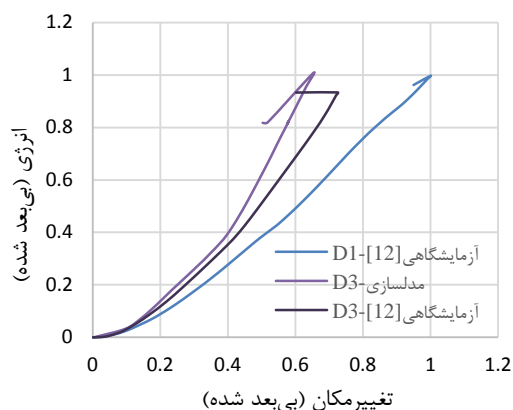
در شکل ۱۵ نمودار انرژی-تغییر مکان مدل دوم نشان داده شده است. با وجود اینکه بار بیشینه در این مدل از مدل اول بیشتر است اما چون مقدار تغییر مکان این نمونه در هر دو روش آزمایشگاهی و عددی کمتر از مدل اول می‌باشد، میزان جذب انرژی این نمونه کمتر از نمونه اول می‌باشد. در این مدل مشخص می‌شود با ایجاد دو بلوک در سازه قبلی، سازه میزان جذب انرژی پایین‌تری داشته است.

۴-۳- شبیه‌سازی تخریب در مدل سوم (D3)

در این نمونه همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده ابتدا سطح جانبی دو هسته فومی توسط دولایه کامپوزیت پوشانده شده، سپس بعد از قرار دادن فوم‌ها روی یکدیگر توسط چسب دور تا دور سطح خارجی فوم توسط چهار لایه کامپوزیت تقویت می‌شود.



شکل ۱۴- نمودار نیرو-تغییر مکان نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول و دوم

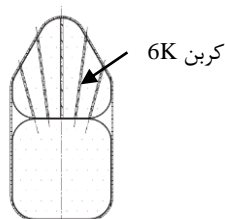


شکل ۲۰- نمودار انرژی-تغییر مکان حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول و سوم.

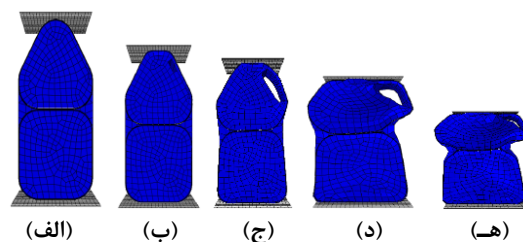
۴-۴- شبیه‌سازی تخریب در مدل چهارم (D3R)

این مدل مانند مدل سوم طراحی شده است با این تفاوت که در فوم بالایی سوراخ‌هایی ایجاد شده و این سوراخ‌ها با کربن ۶K پر شده‌اند. فوم بالایی، نقش یک سپر دفاعی در برابر ضربه را ایفا می‌کند، لذا میزان مقاومت این نمونه نسبت به نمونه سوم بررسی می‌گردد. فاصله بین سوراخ‌ها ۶ میلی‌متر و قطر سوراخ‌ها ۱/۵ میلی‌متر است. شکل ۲۱ مدل چهارم را نشان می‌دهد.

شکل ۲۲ و شکل ۲۳ فرآیند ضربه به ترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. در شکل (۲۳-ب) پس از برخورد ضربه‌زننده با سازه در فوم بالایی در امتداد سوراخ‌ها ترک ایجاد شده و در شکل (۲۳-ج) مشاهده می‌شود که این ترک‌ها در حین ضربه رشد کرده تا جایی که در فصل مشترک فوم بالایی و پایینی رشد ترک متوقف می‌گردد. پس از توقف ترک‌ها مطابق شکل (۲۳-د) تخریب در نمونه ادامه پیدا می‌کند. در شکل (۲۳-ه) تغییر مکان سازه متوقف شده است.



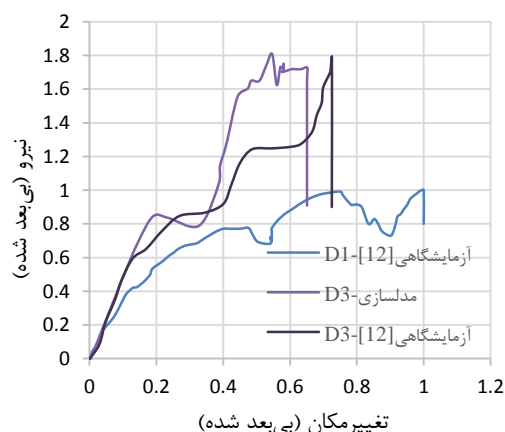
شکل ۲۱- مدل چهارم (D3R)



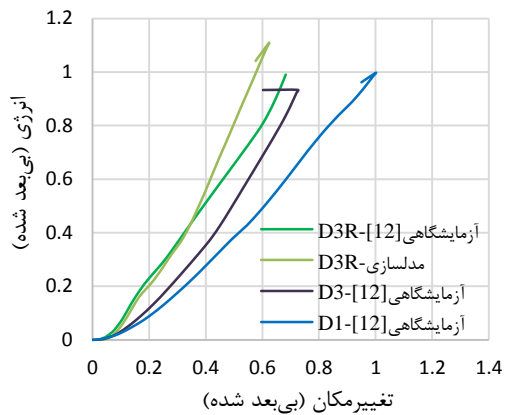
شکل ۱۸- روند تخریب عددی مدل سوم

در شکل ۱۹ نتایج نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه سوم آمده است. بار بیشینه در نتایج آزمایشگاهی و عددی در مقایسه با مدل اول ۸۰ درصد بیشتر می‌باشد. در نتایج آزمایشگاهی نیرو پس از رشد ترک، افزایش پیدا می‌کند تا در ۰/۴۸ الی ۰/۶۳ تغییر مکان ثابت باقی می‌ماند، سپس نیرو تا جایی که تغییر شکل متوقف می‌شود، افزایش می‌یابد اما در نتایج عددی نیرو پس از رشد ترک اول، تا زمانی که تغییر مکان متوقف می‌شود، زیاد می‌شود. این اختلاف می‌تواند به این دلیل باشد که در نتایج آزمایشگاهی، چسب بین لایه-های کامپوزیتی و فوم در بلوک بالایی از همدیگر جدا شده ولی در مدل‌سازی، تخریب بدون جدا شدن لایه‌ها از فوم صورت گرفته است.

شکل ۲۰ نمودار انرژی-تغییر مکان مدل سوم را نشان می‌دهد. این مدل، در نتایج آزمایشگاهی و عددی تغییر مکان کمتری نسبت به مدل اول، داشته است. با وجود تغییر مکان کمتر به دلیل نیروی بیشتر در نتایج عددی، میزان جذب انرژی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.



شکل ۱۹- نمودار نیرو-تغییر مکان نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول و سوم

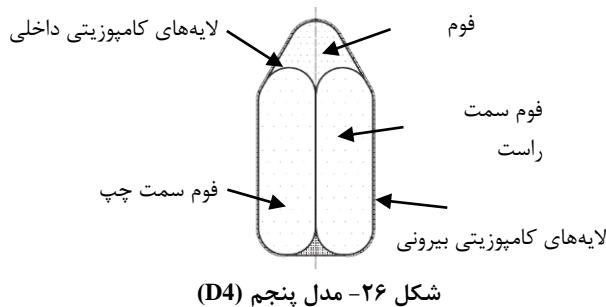


شکل ۲۵- نمودار انرژی-تغییر مکان تحلیل آزمایشگاهی و عددی مدل اول، سوم و چهارم.

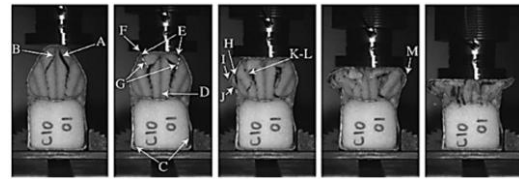
۴-۵- شبیه‌سازی تخریب در مدل پنجم (D4)

همانطور که در شکل ۲۶ نشان داده شده در این مدل از سه بلوک فومی تشکیل شده است. فوم سمت چپ و راست پائینی و فوم بالایی توسط دو لایه کامپوزیتی با زاویه الیاف $\pm 45^\circ$ تقویت شده است. سپس، دور تا دور کل سازه با چهار لایه کامپوزیتی دیگر، پوشانده شده است. هدف از طراحی این مدل، بررسی تأثیر بلوک‌های طولی در قابلیت جذب انرژی می‌باشد.

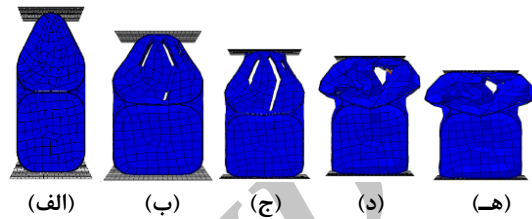
شکل ۲۷ و شکل ۲۸ فرآیند ضربه را به ترتیب در نمونه آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار نشان می‌دهد. اولین ترک در این مدل در فوم سمت چپ اتفاق افتاده است (شکل ۲۸-ب). سپس، این ترک مطابق شکل (۲۸-ج) رشد کرده و فوم سمت چپ را تخریب می‌کند. با توجه به شکل (۲۸-د) در فوم سمت راست نیز ترکی ایجاد شده که این ترک نیز، در طول فرآیند ضربه رشد کرده و موجب تخریب فوم سمت راست شده و در نهایت، تخریب در سازه مطابق شکل (۲۸-ه) متوقف می‌شود.



شکل ۲۶- مدل پنجم (D4)



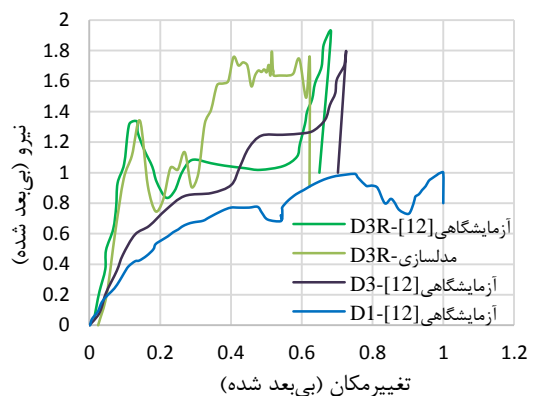
شکل ۲۲- روند تخریب آزمایشگاهی مدل چهارم [۱۲]



شکل ۲۳- روند تخریب در سازه ساندویچی مدل چهارم

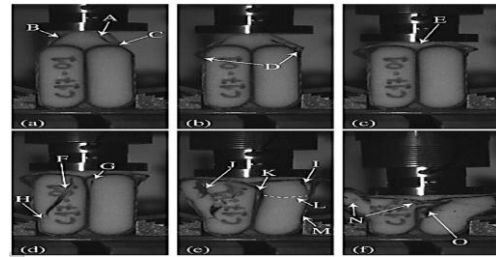
مقدار تغییر مکان نمونه (D3R) هم در نتایج آزمایشگاهی و هم عددی مقدار کمتری را نسبت به نمونه اول (D1) نشان می‌دهد. در این مدل، مقدار تغییر مکان در نتایج آزمایشگاهی و عددی از مدل سوم، کمتر به دست آمده است. مقدار بار بیشینه در نتایج عددی ۷۰ درصد و در نتایج آزمایشگاهی ۸۰ درصد بیشتر از مدل اول می‌باشد. در شکل ۲۴ نمودار نیرو-تغییر مکان مدل چهارم نشان داده شده است.

این مدل، در مقایسه با مدل سوم جذب انرژی بیشتری داشته است. مطابق شکل ۲۵ جذب انرژی در این نمونه در نتایج آزمایشگاهی از نتایج عددی کمتر می‌باشد. همچنین، مقدار جذب انرژی در نتایج عددی از مدل اول و مدل سوم بیشتر و در نتیجه‌ی آزمایشگاهی با مدل اول تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل ۲۴- نمودار نیرو-تغییر مکان نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول، سوم و چهارم

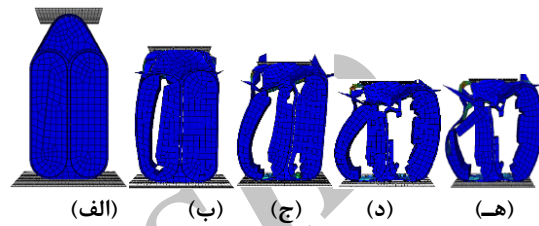
در این مدل تغییرمکان در هر دو روش از نمونه اول کمتر می‌باشد. همچنین تغییرمکان در نتایج عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است. مقدار جذب انرژی در این مدل در هر دو روش آزمایشگاهی و عددی، کمتر از مدل اول می‌باشد. شکل ۳۰ نمودار انرژی-تغییرمکان مدل پنجم را نشان می‌دهد.



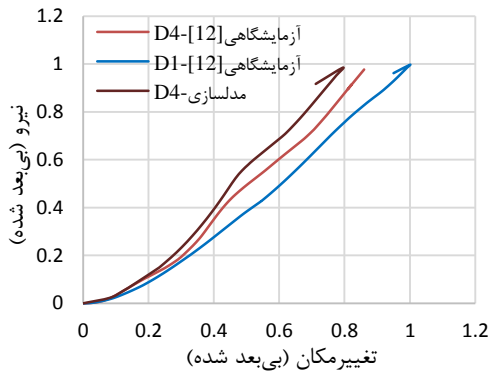
شکل ۲۷- روند تخریب آزمایشگاهی مدل پنجم [۱۲]

۴-۶- شبیه‌سازی تخریب در مدل ششم (D4R)

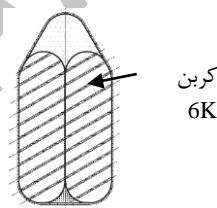
این مدل مانند مدل پنجم می‌باشد، با این تفاوت که در این مدل سوراخ‌هایی با قطر ۱/۵ میلی‌متر با زوایای ۶۰ درجه و فاصله ۶ میلی‌متری از هم در بلوک‌های فومی پائینی ایجاد شده که با کربن ۶K پر شده‌اند. در این مدل تأثیر پر کردن سوراخ‌ها با کربن ۶K در بلوک‌های فومی در سازه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۳۱ مدل ششم نشان داده شده است.



شکل ۲۸- روند تخریب عددی مدل پنجم



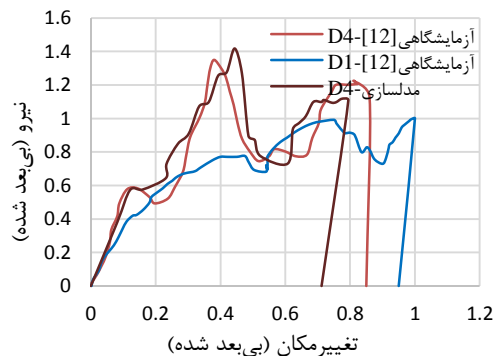
شکل ۳۰- نمودار انرژی-تغییرمکان تحلیل آزمایشگاهی و عددی مدل اول، سوم و چهارم



شکل ۳۱- مدل ششم (D4R)

در شکل ۳۲ و شکل ۳۳، تخریب آزمایشگاهی و عددی مدل ششم نشان داده شده است. شکل (۳۳-الف) برخورد ضربه‌زننده با سازه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳۳-ب) نشان داده شده است، زمانی که سازه تحت ضربه

تغییر مکان در مدل پنجم در نتایج آزمایشگاهی و عددی کمتر از مدل اول می‌باشد. در نتایج عددی بار بیشینه ۴۱ درصد و در نتایج آزمایشگاهی ۳۷ درصد (این مقدار مربوط به اختلاف بار بیشینه در نمونه پنجم نسبت به نمونه اول در نتایج تجربی می‌باشد) بیشتر از مدل اول می‌باشد. در نتایج عددی نمونه پس از ۰/۱۶ تغییرمکان و ۰/۵۷ نیرو دچار اولین ترک شده سپس، تغییرمکان افزایش پیدا می‌کند. پس از متوقف شدن ترک اولیه، نیرو باز هم افزایش پیدا می‌کند تا اینکه باز هم ترک جدید موجب افت نیرو می‌گردد. این ترک نیز، متوقف شده تا جایی که تغییرمکان در جسم متوقف می‌گردد. شکل ۲۹ نمودار نیرو-تغییرمکان مدل پنجم را نشان می‌دهد.

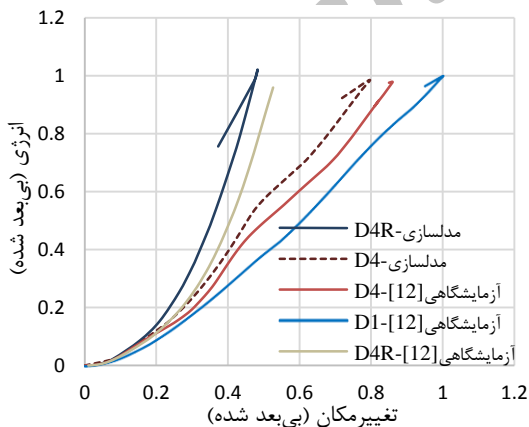


شکل ۲۹- نمودار نیرو-تغییرمکان نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول و چهارم

در شکل ۳۵ نمودار انرژی-تغییر مکان مدل ششم نشان داده شده است. مقدار تغییر مکان در این مدل از همه مدل‌ها کمتر بوده ولی مقدار بار بیشینه از همه مدل‌ها بیشتر می‌باشد. جذب انرژی در نتایج عددی بیشتر از مدل اول بوده اما در نتایج آزمایشگاهی مقدار جذب انرژی کمتر به دست آمده است.

۵- بحث

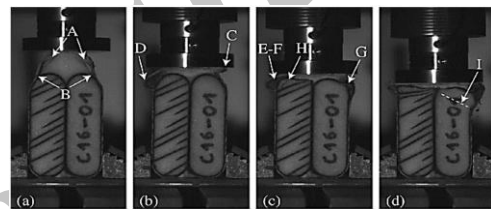
در این بخش، مشخصه‌های تخریب حاصل از نتایج آزمایشگاهی با مشخصه‌های تخریب حاصل از تحلیل عددی نمونه‌ها مقایسه می‌گردد. در نتایج آزمایشگاهی و عددی حاصل از نمونه‌ی اول، مقدار نیرو، تغییر مکان و انرژی بر حسب بیشترین مقدار حاصل، بی‌بعد شده‌اند. همچنین، نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های دیگر، بر حسب بیشترین مقادیر حاصل از تحلیل نمونه اول بی‌بعد شده‌اند. مشخصه‌های تخریب مورد بررسی در نتایج تجربی و عددی عبارتند از: بار بیشینه، میانگین بار، تغییر مکان، طول تخریب نشده، جذب انرژی و نیروی مؤثر. بار بیشینه، بیشترین نیرو در نمودار نیرو-تغییر مکان است. میانگین بار، متوسط نیروی نمودار نیرو-تغییر مکان، تغییر مکان بیشینه، مقدار حداکثر تغییر شکل سازه و طول تخریب نشده، بخشی از نمونه که دچار تخریب نشده است. مقدار انرژی جذب شده مساحت زیر نمودار نیرو-تغییر مکان بوده و نیروی مؤثر، نسبت بار



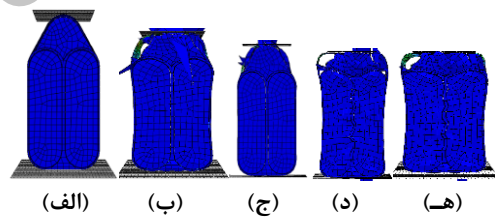
شکل ۳۵- نمودار انرژی-تغییر مکان تحلیل آزمایشگاهی و عددی مدل اول، پنجم و ششم

قرار می‌گیرد لایه‌های بالایی از فوم جدا می‌شود. در شکل (۳۳-ج و د) حین ضربه سازه دچار تغییر شکل بیشتری شده است و در نهایت، در شکل (۳۳-ه) نیروی ضربه‌زننده به حداقل رسیده و تخریب در نمونه متوقف می‌گردد.

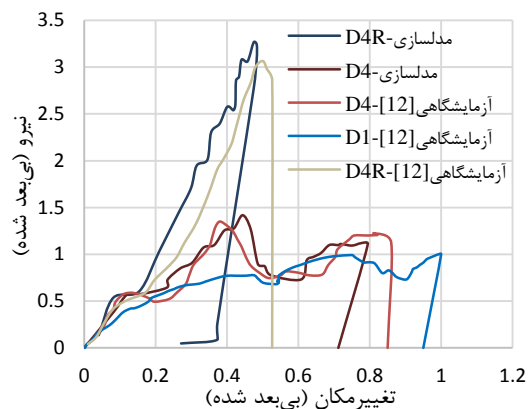
در شکل ۳۴ نمودار نیرو-تغییر مکان مدل ششم نشان داده شده است. در نتایج آزمایشگاهی و عددی مقاومت سازه در مقابل تخریب از دیگر سازه‌ها بیشتر است. به دلیل استفاده از کربن فوم پائینی دچار تخریب نشده و سازه مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. در این مدل بار بیشینه در نتایج آزمایشگاهی و عددی تقریباً سه برابر مدل اول می‌باشد.



شکل ۳۲- روند تخریب آزمایشگاهی مدل ششم [۱۲]



شکل ۳۳- روند تخریب عددی مدل ششم



شکل ۳۴- نمودار نیرو-تغییر مکان نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل اول، چهارم و پنجم

جذب انرژی این نمونه در نتایج عددی، بیشتر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. وجود دیواره‌های داخلی فومی سبب افزایش مقاومت در برابر تخریب سازه و همچنین، طول تخریب نشده بیشتری می‌شود.

با توجه به جدول ۶ و شکل ۳۷ مدل D3R، نسبت به مدل‌های قبلی دارای بار بیشینه و میانگین بار بیشتری می‌باشد که در نتایج عددی بار بیشینه D3R کمتر از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است. در نتایج عددی، مقدار تغییرشکل D3R از نتایج آزمایشگاهی کمتر به دست آمده است. مقدار تغییرمکان حاصل از تحلیل عددی D3R، از مدل‌های قبلی نیز کمتر می‌باشد. با توجه به شکل ۳۶ مقدار جذب انرژی مدل D3R در تحلیل عددی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است که این مقدار در تحلیل عددی از نمونه‌های دیگر نیز بیشتر می‌باشد.

در نتایج آزمایشگاهی و عددی، مدل D4 نسبت به مدل‌های دیگر، دچار تخریب بیشتری شده است. با توجه به شکل ۳۷، بار بیشینه در این مدل از مدل اول بیشتر بوده که بار بیشینه حاصل از نتایج عددی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. با توجه به شکل ۳۶ جذب انرژی در این مدل کمتر از مدل اول بوده که نسبت به تحلیل تجربی D4 جذب انرژی بیشتری دارد.

با توجه به جدول ۶ تقویت‌کننده‌های موجود در مدل D4R موجب افزایش بار بیشینه و افزایش میانگین بار به نسبت مدل‌های دیگر شده است. همچنین، تغییرمکان در این مدل، در هر دو نوع روش عددی و آزمایشگاهی از همه مدل‌ها پایین‌تر می‌باشد که با توجه به جدول ۶ و شکل ۳۶ مقدار تغییرمکان حاصل نتایج عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی است. طبق جدول ۶ مقدار طول سالم مدل D4R در هر دو روش بررسی، از دیگر مدل‌ها بیشتر که در نتایج عددی طول تخریب نشده، بیشتر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. مدل D4R دارای بیشترین بار بیشینه، بار میانگین و مقدار جذب انرژی در این مدل در تحلیل عددی غیر از مدل D3R، از همه مدل‌ها بیشتر بوده که در نتایج آزمایشگاهی از مدل D1 کمتر است. نیروی مؤثر در این مدل از همه مدل‌ها کمتر بوده و این مقدار در نتایج آزمایشگاهی، کمتر از نتایج عددی به دست آمده است.

میانگین به بار بیشینه است. در جدول ۶ مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای همه نمونه‌ها ارائه شده است. در جدول ۶، شکل ۳۶ و شکل ۳۷، E نمایان‌گر نتایج آزمایشگاهی و N، نتایج عددی را نشان می‌دهد.

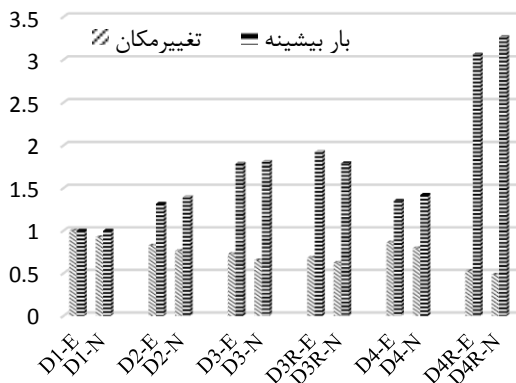
با توجه به جدول ۶ مدل D1 دارای کمترین بار بیشینه و میانگین بار در نتایج آزمایشگاهی و عددی و بیشترین آن‌ها مربوط به نمونه‌ی D4R می‌باشد. بیشترین تغییرمکان نیز، در هر دو نوع بررسی، مربوط به سازه D1 می‌باشد. مقدار نیروی مؤثر مدل D1، در هر دو روش بیشتر از دیگر مدل‌ها می‌باشد که در نتایج عددی از نتایج آزمایشگاهی بیشتر مشاهده می‌گردد. با توجه به شکل ۳۶، مقدار تغییرمکان در تحلیل عددی کمتر از روش آزمایشگاهی می‌باشد همچنین، مقدار جذب انرژی در نتایج عددی کمتر از مقدار آزمایشگاهی مشاهده می‌گردد، یکی از دلایل عمده جذب انرژی کمتر در مدل‌سازی عددی مقدار تغییرمکان کمتر سازه نسبت به نمونه تجربی می‌باشد به این دلیل که در مدل‌سازی عددی ساختار ماده به صورت ایده‌ال در نظر گرفته می‌شود اما در نمونه تجربی وجود عیوب ساختاری موجب تغییرمکان بیشتر و به تبع آن افزایش مساحت زیر نمودار نیرو-تغییرمکان می‌گردد.

در مدل D2 نتایج عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارای بار بیشینه بیشتر و تغییرمکان کمتری نسبت به مدل D1 می‌باشد. طول تخریب نشده این مدل به نسبت مدل اول بیشتر می‌باشد که در تحلیل عددی این مقدار کمتر از نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌گردد. نیروی مؤثر در D2 غیر از مدل D1 از دیگر مدل‌ها بیشتر می‌باشد. مقدار جذب انرژی در مدل D2 به مقدار ناچیزی از مدل D1 کمتر است. این اختلاف کم ناشی از افزایش بار بیشینه و کاهش تغییرمکان نهایی در مدل D2 است که باعث می‌شود، سطح زیر نمودار با سطح زیر نمودار نیرو-تغییرمکان مدل D1 تفاوت چندانی نکند.

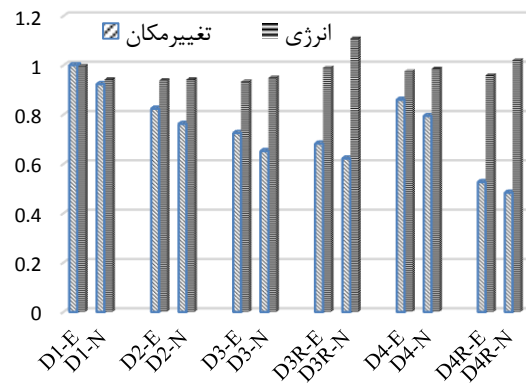
در هر دو روش عددی و آزمایشگاهی، مدل D3 دارای مقدار بار بیشینه و میانگین بار بیشتری از مدل D1 و D2 می‌باشد. در این مدل به دلیل اینکه تکه فوم پایینی دچار تخریب نشده است، سازه نسبت به مدل‌های قبلی مقاومت بیشتری را از خود نشان داده است. مقدار جذب انرژی D3 از مدل D1 و D2 بیشتر می‌باشد که با توجه به شکل ۳۶ مقدار

جدول ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در همه نمونه‌ها

مدل	D1		D2		D3		D3R		D4		D4R	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
بار بیشینه (%)	۱	۰/۹۹	۱/۳۱	۱/۳۹	۱/۷۸	۱/۸۰	۱/۷۹	۱/۹۲	۱/۴۲	۱/۳۵	۳/۰۶	۳/۲۶
میانگین بار (%)	۰/۹۶	۰/۸۰	۰/۹۵	۰/۹۸	۱/۱	۱/۱۰	۱/۳۰	۱/۲۱	۰/۹۰	۰/۹۲	۶/۵	۱/۹۰
نیروی مؤثر (%)	۷۹	۸۰	۱/۶۲	۱/۲۹	۰/۹	۱/۱۰	۱/۷۰	۶۲	۲/۲	۷۳	۱۱/۷	۱۱/۷
طول تخریب نشده (%)	۱	۰/۷۹	۲۰/۸	۰/۹۳	۰/۵	۱/۰	۰/۶۸	۰/۶۲	۰/۶۶	۰/۲۹	۷/۲	۵۹
تغییر شکل (%)	۱	۰/۹	۸/۴	۰/۹۴	۲	۱/۷۵	۱۲/۰	۱/۷۵	۵۶/۰	۲/۸۵	۲/۳۷	۲/۳۷
جذب انرژی (%)	۰/۹۹	۰/۹۴	۵/۴	۰/۹۴	۰/۷	۰/۵	۷/۳	۰/۷	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۴۸	۰/۴۸
					۰/۹۳	۰/۹۵	۱/۷	۰/۹۳	۱/۰	۱۲/۵	۱/۰۲	۱/۰۲
										۶/۳	۶/۳	۶/۳



شکل ۳۷- مقدار بار بیشینه و بیشترین تغییر مکان در تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی



شکل ۳۶- مقدار جذب انرژی و بیشترین تغییر مکان در تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل‌سازی سازه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس با نتایج آزمایشگاهی، مقایسه شد. اختلافاتی در نتیجه‌ی تحلیل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد که این اختلافات ممکن است به دلایل مختلفی از جمله: با توجه به توضیحات فوق در مورد مشخصه‌های حاصل از آزمون ضربه دینامیکی، نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل D4R و مدل D1 نسبت به مدل‌های دیگر دارای نتایج بهتری می‌باشد. با توجه به نتایج تخریب و شکل تخریب مدل پنجم در تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی، مدل خوبی جهت طراحی نیست.

شرایط محیطی آزمایشگاه آزمون ضربه و اعمال نکردن آن در تحلیل عددی، فرض ایده‌آل در تعریف خواص مواد در تحلیل عددی و وجود عیوب ساختاری در مواد آزمایشگاهی، خطاهای عددی در تعریف تماس بین المان‌ها دوبعدی با المان‌های سه‌بعدی، اعمال سرعت بارگذاری دقیق در حل اجزا محدود که در آزمون آزمایشگاهی ممکن است با چند درصد خطا اعمال گردد. با توجه به نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی بخش فومی تأثیر بیشتری در جذب انرژی در این گونه سازه‌ها نسبت به لایه‌های کامپوزیتی دارد. افزایش ارتفاع بلوک‌های فومی موجب کاهش استحکام سازه می‌شود. شکل فوم تأثیر قابل توجهی در جذب انرژی داشته و نمونه‌هایی که بلوک فومی آن‌ها به‌صورت دیواره عرضی بوده، نتایج

- [3] Zhang G, Wang B, Ma L, Wu L, Pan S, Yang J (2014) Energy absorption and low velocity impact response of polyurethane foam filled pyramidal lattice core sandwich panels. *Compos Struct* 108: 304-310.
- [4] Palanivelu S, Van Paeppegem W, Degrieck J, Kakogiannis D, Van Ackeren J, Wastiels J (2009) Numerical energy absorption study of composite tubes for axial impact loadings. In 17th International Conference on Composite Materials (ICCM-17).
- [5] Xia F, Wu X (2010) Study on impact properties of through-thickness stitched foam sandwich composites. *Compos Struct* 92: 412-421.
- [6] McGregor C, Vaziri R, Poursartip A, Xiao X, Johnson N (2006) Simulation of progressive damage development in braided composite tubes undergoing dynamic axial crushing. in 9th International LS-DYNA Users Conference: 4-6.
- [7] Boria S, Obradovic J, Belingardi G (2015) Experimental and numerical investigations of the impact behaviour of composite frontal crash structures. *Compos Part B-Eng* 79: 20-27.
- [8] Samer F, Abdullah A, Sameer JO (2015) Enhancement of energy absorption for crashworthiness application: Octagonal-shape longitudinal members. *IJAENT* 2(2): 1-9.
- [9] Pitarresi G, Carruthers J, Robinson A, Torre G, Kenny JM, Ingleton S (2007) A comparative evaluation of crashworthy composite sandwich structures. *Compos Struct* 78: 34-44.
- [10] Muhammad A (2014) Energy absorption behaviour of filament wound glass and carbon epoxies composite tubes. *IOSR-JAP* 6(4): 30-37.
- [11] Mustapha F, Shahjerdi A, Sim N (2012) Finite element validation on adhesive joint for composite fuselage model. *J Braz Soc Mech Sci & Eng* 34: 69-74.
- [12] Dorival O, Navarro P, Marguet S, Petiot C, Bermudez M, Mesnagé D (2015) Experimental study of impact energy absorption by reinforced braided composite structures: dynamic crushing tests. *Compos Part B-Eng* 78: 244-255.
- [13] Mayer R, Hancox N (2012) Design data for reinforced plastics: a guide for engineers and designers. Springer Science & Business Media.
- [14] Giovedi C, Machado LDB, Augusto M, Pino ES, Radino P (2005) Evaluation of the mechanical properties of carbon fiber after electron beam irradiation. *Nucl Instrum Meth B* 236(1): 526-530.
- [15] Kaw AK (2005) Mechanics of composite materials. CRC Press.

تخریب و قابلیت جذب انرژی بهتری نسبت به دیواره‌های طولی از خود نشان داده‌اند. همچنین، چند بخش کردن هسته موجب افزایش استحکام هسته می‌شود.

۷- علائم و نشانه‌ها

انرژی جذب شده، J	E_{abs}
بار بیشینه، N	F_{peak}
نیروی میانگین، N	F_{aver}
نیرو، N	F
ضخامت چندلایه، m	h
پارامتر شکست کشش طولی، MPa^{-1}	H1
پارامتر شکست فشاری طولی، MPa^{-2}	H11
پارامتر شکست کشش عرضی، MPa^{-1}	H2
پارامتر شکست فشاری عرضی، MPa^{-2}	H22
پارامتر شکست برشی در جهت منفی، MPa^{-2}	H66
پارامتر شکست کششی در مختصات کلی، MPa^{-2}	H12
پارامتر شکست برشی در جهت مثبت، بی‌بعد	H6
زمان، s	t
تغییر مکان، m	U
سرعت، m/s	V

علائم یونانی

تنش در راستای الیاف، MPa	σ_1
تنش در راستای عمود بر الیاف، MPa	σ_2
استحکام کششی طولی در راستای ۱، MPa	$(\sigma_1^T)_{ult}$
استحکام فشاری طولی در راستای ۱، MPa	$(\sigma_1^C)_{ult}$
استحکام کششی عرضی در راستای ۲، MPa	$(\sigma_2^T)_{ult}$
استحکام فشاری طولی در راستای ۲، MPa	$(\sigma_2^C)_{ult}$
تنش برشی درون صفحه‌ای، MPa	τ_{12}
استحکام برشی نهایی درون صفحه‌ای، MPa	$(\tau_{12})_{ult}$

۸- مراجع

- [1] Abrate S (2005) Impact on composite structures. Cambridge University Press.
- [2] Ramakrishna S, Hamada H (1998) Energy absorption characteristics of crash worthy structural composite materials. in Key Engineering Materials: Vols. 141-143. 585-622.