



## بررسی رفتار فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub> تحت بار ضربه‌ای با سرعت پائین

حسین فراهات<sup>۱\*</sup> و سید یوسف احمدی بروغنی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۱۸

### چکیده

فوم‌های فلزی به دلیل نسبت استحکام به وزن و جذب انرژی بالا، کاربرد گسترده‌ای در صنایع خودرو و هوافضا دارند؛ بنابراین اطلاع از رفتار مکانیکی این مواد، به‌خصوص تحت بار دینامیکی ضروری است. در مقاله حاضر، پاسخ ضربه فوم آلومینیوم A356 تقویت‌شده توسط ذرات SiC مورد مطالعه قرار گرفته، نتایج عددی به‌دست آمده از شبیه‌سازی رفتار ضربه فوم، با اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه و اعتبارسنجی گردید. به‌منظور استخراج پارامترهای ماده در مدل اساسی دشیپند-فلک، از داده‌های آزمایش فشار روی نمونه‌های فوم بهره گرفته شده است. نتایج FEM نشان داد که تغییرات نیرو بر حسب زمان، مطابقت بسیار خوبی با داده‌های آزمایش ضربه دارد. مدل عددی می‌تواند مقدار نیرو در محدوده پلاتو، زمان ضربه، انرژی جذب شده توسط فوم و حالت شکست ماده را با دقت مناسبی پیش‌بینی نماید؛ همچنین نمودارهای بالانس انرژی و حساسیت به مش، صحت شبیه‌سازی انجام گرفته را تأیید می‌کند. نظریه اینکه شبیه‌سازی رفتار دینامیکی یک ماده کامپوزیت و متخلخل، با چالش‌های متعددی مواجه است، در کار حاضر به ارائه راهکارهایی جهت رفع آنها پرداخته شده است. با توجه به عدم وجود نتایج عددی و تجربی روی رفتار ضربه فوم A356/SiC<sub>p</sub>، می‌توان از نتایج تحقیق حاضر جهت توسعه مواد کامپوزیتی پیشرفته استفاده کرد.

**کلمات کلیدی:** فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub>؛ مدل مادی دشیپند-فلک؛ شبیه‌سازی ضربه؛ جذب انرژی.

## Studying the Behavior of A356/SiC<sub>p</sub> Composite Foam under Low-Velocity Impact Loading

H. Farahat<sup>1,\*</sup>, S.Y. Ahmadi Brooghani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Birjand Branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran.

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

### Abstract

Metallic foams are used widely in the automotive and aerospace industries due to high strength to weight ratio and high energy absorption capacity. Knowledge of the mechanical behavior of these materials, especially under dynamic loadings, is thus necessary. In this paper, the impact response of A356 aluminum foams reinforced by SiC particles was studied. Predicted numerically results, which are obtained from the simulation of impact behavior at the foam material, were compared and validated with the experimental measurements. For determination of the material parameters in Deshpande-Fleck constitutive model, the uniaxial compression test data have been used. The FEM results showed that the changes in load with time are in a good agreement with the impact experiment. The numerical model can predict accurately the plateau load, the impact time, the energy absorbed by foam and the failure mode of the material. The energy balance diagram and convergence test confirm the simulation. Considering that the simulation of porous and composite material behavior is faced with numerous challenges, this work presents effective ways to solve them. Regarding the lack of numerical and experimental results on the impact behavior of A356/SiC<sub>p</sub> foam, the obtained results can be used to develop advanced composite materials.

**Keywords:** A356/SiC<sub>p</sub> Composite Foam; Deshpande-Fleck Material Model; Impact Simulation; Energy Absorption

## ۱- مقدمه

فلزات صلب و غیرمتخلخل، معمولاً جاذب‌های خوبی برای انرژی نیستند. این مواد هنگامی که تحت تنش یا نیرو قرار می‌گیرند، به سختی دچار تغییر شکل شده، مقدار زیادی از این تنش یا نیرو را منتقل می‌کنند؛ بنابراین به اجسام و قطعات، ضربه وارد کرده، باعث آسیب رساندن به آنها می‌شوند. در مقابل، فوم‌های فلزی<sup>۱</sup> و به ویژه فوم‌های آلومینیوم، علاوه بر داشتن وزن سبک و نسبت استحکام به وزن بالا، ظرفیت بی‌نظیری در جذب انرژی موقع بارگذاری تحت فشار و ضربه را دارند. ریز ساختار سلولی این مواد، به آنها این قابلیت را می‌دهد که بتوانند تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگ را در یک تنش تقریباً ثابت (تنش پلاتو<sup>۲</sup>) تحمل کنند؛ لذا می‌توانند بخش قابل توجهی از انرژی ضربه را جذب نمایند قبل از اینکه موجب تخریب سازه گردد. از این رو فوم‌های آلومینیومی در کاربردهایی که مقاومت در برابر ضربه یا نفوذ مورد نیاز است و نیز به طور گسترده در صنایع خودرو، هوافضا و کشتی‌سازی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۴].

تاکنون مطالعات متعددی روی تعیین مدل‌های رفتار ماده، در فوم‌های آلومینیوم انجام گرفته است. هانسن و همکاران [۵]، تلاش کردند تا مدل‌های اساسی مختلف ارائه شده توسط چند محقق [۶-۹] را اعتبارسنجی کنند. آنها دریافتند که این مدل‌ها، ممکن است برای پیش‌بینی دقیق رفتار مکانیکی ماده (که در آزمایش‌های مختلف مشاهده شده)، مفید و مؤثر واقع نشوند. سپس ریس و همکاران [۱۰]، مدل اساسی ارائه شده توسط دشپند و فلک [۸] را بهبود بخشیدند. آنها با افزودن معیارهای شکست مناسب، مدل رفتار ماده را در محیط نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌آ<sup>۳</sup> و با استفاده از امکانات برنامه‌نویسی توسط کاربر<sup>۴</sup> اجرا کردند. بعدها محققان دیگری [۱۱-۱۴]، صحت و اعتبار مدل را از طریق انجام آزمایشات روی ماده، تحت شرایط بارگذاری مختلف بررسی کردند. بررسی آنها نشان داد که مدل ارائه شده، نتایج خوب و مطلوبی را برای پیش‌بینی رفتار ماده و نیز خواص فشاری و شکست فوم آلومینیوم ارائه می‌دهد.

در زمینه شبیه‌سازی عددی، هانسن و همکاران [۱۵] برخورد یک پرنده به صفحات ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم را با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌آ مطالعه نمودند. آنها از مدل دشپند-فلک برای رفتار فوم آلومینیوم و از معیار کرنش حجمی برای شکست ماده استفاده کردند. میراندا و همکاران [۱۶]، نیز از مدل دشپند-فلک در بررسی نقش تغییرشکل پلاستیک روی رفتار ضربه مقاطع پر شده با فوم آلومینیوم استفاده کردند. لو و همکاران [۱۷]، پدیده نفوذ و فرورفتگی دینامیکی فوم‌های آلومینیوم<sup>۵</sup> (با چگالی‌های مختلف) تحت یک فرورونده صلب با انتهای تخت را به روش المان محدود تحلیل کردند. با توجه به اینکه در مدل فوم با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک<sup>۶</sup> در کد تجاری آباکوس<sup>۷</sup>، معیاری برای شبیه‌سازی شکست فوم وجود ندارد، آنها یک مدل ساده شده را با معرفی المان‌های چسبنده<sup>۸</sup> اتخاذ کردند و رفتار شکست فوم را مدل‌سازی کردند. لایه‌های این المان‌های چسبنده که در امتداد ضخامت فوم تعریف می‌شوند، به اِزاء یک مقدار معین از انرژی شکست<sup>۹</sup> از بین می‌روند. راجندران و همکاران [۱۸]، رفتار تغییرشکل فوم آلومینیوم تحت ضربه سقوطی را با استفاده از نرم‌افزار انسیس<sup>۱۰</sup> بررسی کردند. آنها برای این منظور، از مدل ماده فوم قابل له‌شدن<sup>۱۱</sup> استفاده نموده، نتایج شبیه‌سازی را با استفاده از نتایج تجربی دیگران، صحت‌گذاری کردند. آیوانز و همکاران [۱۹ و ۲۰]، ضربه سرعت پائین و سرعت بالا اعمال شده به تیرها و صفحات ساندویچی با هسته فومی را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی کردند و با انجام برنامه‌نویسی VUMAT، شکست فوم را مدل‌سازی کردند. مشخصات جذب انرژی دینامیکی در لوله‌های مخروطی پر شده با فوم تحت بار ضربه‌ای توسط احمد و همکاران [۱۳]، مطالعه شد. آنها در تحلیل المان-محدود، از مدل فوم دشپند-فلک برای تعیین خواص ماده استفاده کردند. چو و همکاران [۲۱]، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس تحلیل ضربه کم‌سرعت به فوم را انجام

<sup>5</sup> Dynamic Indentation and Penetration of Al Foams

<sup>6</sup> Isotropic Hardening

<sup>7</sup> ABAQUS

<sup>8</sup> Cohesive Elements

<sup>9</sup> Fracture Energy

<sup>10</sup> ANSYS

<sup>11</sup> Crushable Foam Material Model

<sup>1</sup> Metal Foams

<sup>2</sup> Plateau Stress

<sup>3</sup> LS-DYNA

<sup>4</sup> User Subroutine

روش تحلیلی، سرعت حد بالستیک، سرعت باقیمانده و انرژی جذب شده توسط لایه‌های مختلف سازه ساندویچی را محاسبه نمودند. زمانی و همکاران [۲۵]، یک مدل ریاضی برای توصیف فروریزش پیشرونده فوم آلومینیوم تحت بار ضربه‌ای ارائه کرده، نتایج آن را با نتایج شبیه‌سازی، صحت‌سنجی نمودند. ملاطفی و مظفری [۲۶]، به بررسی عددی رفتار هسته لانه‌زنبوری پر شده با فوم پلی‌اورتان تحت بارگذاری فشاری در شرایط شبه‌استاتیکی و دینامیکی پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش سرعت برخورد و در شرایط دینامیکی، تأثیر فوم بر بهبود خواص مکانیکی ماده کاهش می‌یابد، به طوری که در سرعت برخورد ۱۰۰ m/s، میزان انرژی جذب شده توسط هسته لانه‌زنبوری خالی و هسته لانه‌زنبوری پر شده با فوم یکسان است. شبیه‌سازی ضربه عرضی لوله‌های جدارنازک توخالی و توپر (با فوم پلی‌اورتان)، با هندسه مقاطع دایره و مربعی، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس توسط چوبینی و همکاران [۲۷] انجام شده، با نتایج آزمایش مقایسه گردیده است. علوی‌نیا و کاظمی [۲۸]، با انجام اصلاحاتی روی مدل تحلیلی ارائه شده توسط هوفت<sup>۱۰</sup> (که بر مبنای مدل انتشار امواج تنش در راستای ضخامت پانل می‌باشد)، به بررسی ضربه سرعت بالا (نفوذ بالستیک پرتابه) روی پانل‌های ساندویچی پرداختند و برای ارزیابی مدل، از نتایج آزمایشگاهی موجود روی دو نوع پانل با رویه آلومینیومی و هسته‌های فوم پلیمری و فلزی استفاده کردند. علوی‌نیا و فرشاد [۲۹]، تأثیر هندسه مقطع و وجود پرکننده فوم فلزی را بر تغییر شکل و ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های جدار نازک مطالعه نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مقدار جذب انرژی سازه پر شده از فوم، از مجموع انرژی‌های جذب شده توسط لوله تو خالی و فوم تنها بیشتر است. آذرخش و همکاران [۳۰]، به تحلیل فروریزش محوری و مایل پوسته‌های مخروطی توخالی و تقویت شده با فوم (تحت شرایط مرزی گیردار) پرداختند و تأثیر پارامترهای ضخامت دیواره و زاویه نیم‌رأس را بر عملکرد جاذب انرژی مطالعه کردند. آنها برای بررسی اثر سرعت بر پاسخ دینامیکی، از نسبت انرژی جذب شده در بارگذاری دینامیکی به انرژی جذب شده در بارگذاری شبه‌استاتیکی استفاده کردند. مقایسه

داده و رفتار آسیب<sup>۱</sup>، تاریخچه بار ضربه‌ای و انرژی تلف شده در حین نفوذ را مطالعه کردند. آنها از مدل پلاستیسیته جانسون- کوک<sup>۲</sup> برای رفتار ماده و از معیار کرنش پلاستیک معادل در نقاط انتگرال‌گیری المان<sup>۳</sup> برای شکست ماده استفاده کردند. شکست فوم موقعی اتفاق می‌افتد که پارامتر آسیب<sup>۴</sup>، از مقدار ۱ (یک) تجاوز کند. پارامتر آسیب  $w$  به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$w = \frac{\bar{\epsilon}_0^{pl} + \sum \Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \quad (1)$$

که در آن،  $\bar{\epsilon}_0^{pl}$  مقدار اولیه کرنش پلاستیک معادل،  $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$  نمو کرنش پلاستیک معادل و  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  کرنش شکست<sup>۵</sup> است و عملگر مجموع<sup>۶</sup> روی همه نموها<sup>۷</sup> در تحلیل اجرا می‌شود. موقعی که معیار شکست برشی<sup>۸</sup> در یک نقطه انتگرال‌گیری ارضاء می‌شود، همه مؤلفه‌های تنش برابر صفر خواهد شد و آن نقطه از ماده شکسته می‌شود (از بین می‌رود).

هوسان و همکاران [۲۲]، با ایجاد یک مدل سه‌بعدی توسط نرم‌افزار کتیا<sup>۹</sup>، رفتار نفوذ و آسیب فوم آلومینیوم را در انرژی‌های مختلف ضربه بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که انرژی ضربه جذب شده با عمق نفوذ چکش ضربه‌زننده به درون فوم متناسب است.

در داخل کشور نیز، تعدادی از مطالعات تحلیلی و عددی روی ساختارهای فومی تحت ضربه انجام شده است. ضیاء شمامی و همکاران [۲۳]، پدیده نفوذ پرتابه صلب با انتهای تخت در ساختار ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم را مدل-سازی نموده، با نتایج آزمایش بالستیکی (سیستم پرتابگر گازی) مقایسه کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش چگالی و ضخامت فوم و نیز با افزایش سرعت برخورد، میزان جذب انرژی سازه بیشتر می‌شود. جعفری و فعلی [۲۴]، فرآیند نفوذ و سوراخ شدن صفحات ساندویچی آلومینیوم با هسته فوم تحت ضربه بالستیک را بررسی کرده، با ارائه یک

<sup>1</sup> Damage Behavior

<sup>2</sup> Johnson-Cook Plasticity Model

<sup>3</sup> Equivalent Plastic Strain at Element Integration Points

<sup>4</sup> Damage Parameter

<sup>5</sup> Strain at Failure

<sup>6</sup> Summation

<sup>7</sup> Increments

<sup>8</sup> Shear Failure Criterion

<sup>9</sup> CATIA

<sup>10</sup> Hoo Fatt

نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داد که مدل عددی ارائه‌شده، روش مناسبی برای تعیین پاسخ فروریزش و نمودار نیرو-جابجایی فراهم می‌آورد.

پژوهش حاضر، به تحلیل عددی صفحات فوم آلومینیومی تحت ضربه سرعت پائین و مقایسه نتایج آن با داده‌های آزمایش می‌پردازد. ماده مورد مطالعه، فوم آلومینیوم A356 تقویت شده به وسیله ذرات کاربید سیلیسیم SiC (فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub>) است. روش تولید ماده، روش ذوبی می‌باشد که در آن از پودر کربنات کلسیم CaCO<sub>3</sub>، به عنوان عامل فوم‌ساز استفاده شده است. با استفاده از مدل ارائه شده برای رفتار ماده فوم آلومینیوم (مدل دشنند-فلک)، ضربه اعمال شده به نمونه فومی در محیط نرم‌افزار ال‌اس‌داینما شبیه‌سازی شده، پاسخ به‌دست آمده از شبیه‌سازی (رفتار مکانیکی ماده در طی زمان ضربه)، با داده‌های آزمایش مقایسه و صحت‌سنجی شده است. به منظور تعیین خواص فوم آلومینیوم در مدل اساسی رفتار ماده (دشنند-فلک)، از داده‌های آزمایش فشار بهره گرفته شده است. مدل مادی دشنند-فلک، صرفاً مختص فوم فلزی بوده، لذا استفاده از آن نسبت به مدل‌های دیگر نظیر مدل جانسون-کوک ارجحیت دارد. به منظور تحلیل شکست ماده، در کار حاضر از دو معیار مختلف استفاده شده است: (۱) معیار کرنش حجمی (۲) معیار کرنش اصلی ماکزیمم. شکست برشی ماده، بر اساس مقدار این دو پارامتر در نقاط انتگرال‌گیری المان تعریف می‌شود. حالت شکست به‌دست آمده از معیارهای مذکور، با مشاهدات آزمایش مقایسه گردیده است.

ماهیت کامپوزیتی و متخلخل ماده، توزیع ناهمگن و تصادفی سلول‌های فوم، توزیع غیریکنواخت چگالی موضعی در فوم و نواقص ساختاری موجود در فوم، چالش‌های جدی برای شبیه‌سازی عددی پاسخ ضربه فوم به شمار می‌آیند؛ همچنین با توجه به شرایط مذکور، تعیین پارامترهای ماده در مدل اساسی رفتار ماده با مشکلات عدیده‌ای مواجه است و این امر سبب خواهد شد تا نتایج شبیه‌سازی، به طور قابل ملاحظه‌ای از یک نمونه به نمونه دیگر متفاوت باشد. در کار حاضر، در فرآیند تولید ماده سعی شده که تا حد امکان، مشکلات ذکر شده رفع و یک محصول فوم نسبتاً همگن

تولید شود. پراکندگی کم نتایج، در تحلیل آماری داده‌های آزمایش ضربه (مرجع [۳۱] از همین نویسندگان) و آزمایش فشار (مقاله حاضر)، به خوبی این موضوع را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در کارهای محققان قبلی، به رویکرد آماری، بررسی تکرارپذیری ۲ و گزارش درصد پراکندگی نتایج نتایج توجه نشده است؛ در حالی که به منظور تحلیل کمی نتایج (علاوه بر توصیف کیفی) و استناد به مقادیر کمی گزارش‌شده، بررسی این موضوع به‌خصوص برای ماده مطالعه شده مؤکداً ضرورت دارد و این یکی از جنبه‌های نوآوری در تحقیق حاضر به شمار می‌آید. ماده خاص و جدید مورد مطالعه در کار حاضر، فوم کامپوزیتی با زمینه آلومینیوم A356 و تقویت‌شده با ذرات SiC (فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub>) است که رفتار مکانیکی آن، برای اولین بار به صورت عددی و تجربی بررسی گردیده است. در حقیقت، با انجام آزمایش‌های تجربی روی ماده (آزمایش فشار و آزمایش ضربه)، تعیین پارامترهای ماده در "مدل اساسی دشنند-فلک" و نیز شبیه‌سازی رفتار ماده مشابه شرایط آزمایش، به مشخصه‌سازی این نوع فوم فلزی خاص پرداخته شده است. همچنین در مقاله حاضر، سعی شده تا کاربرد نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA به عنوان یک حلگر قدرتمند در زمینه مکانیک ضربه و بررسی پدیده‌های برخورد و نفوذ، جهت استفاده سایر محققان بیان شود. لازم به ذکر است که نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، همانند تمام کدهای المان محدود دیگر، قابل اطمینان نبوده، ضرورتاً بایستی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و اعتبارسنجی شود. بعلاوه، اگر چه با توجه به پیشینه پژوهش، به شبیه‌سازی ساختارهای فومی تحت ضربه پرداخته شده است، اما تحلیل عددی صفحات فوم کامپوزیتی با زمینه آلومینیوم تحت ضربه کم‌سرعت، بررسی نشده است. اثر معیار فرسایش به منظور شبیه‌سازی صحیح حالت شکست فوم تحت ضربه، نیز بررسی نشده است. مقاله حاضر، با این رویکردها ارائه شده است.

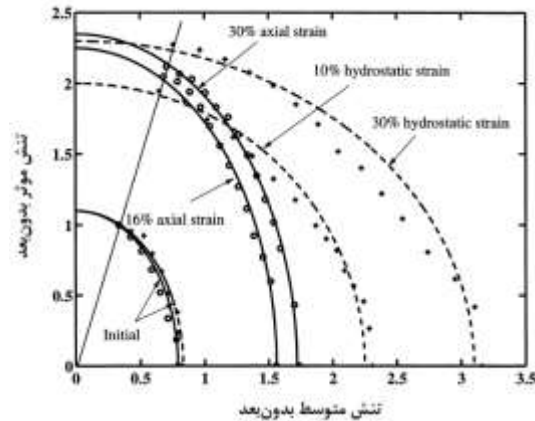
## ۲- تعیین پارامترهای ماده

ماده مورد بررسی در تحقیق حاضر، فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub> است که جزئیات کامل در مورد مواد استفاده -

<sup>2</sup> Repeatability

<sup>1</sup> Imperfection

شده است. تابع تسلیم اولیه، درجه دو<sup>۱۰</sup> بوده، با افزایش کرنش پلاستیک تحت فشار تک‌محوری<sup>۱۱</sup>، همچنان درجه دو



شکل ۱- تغییر سطح تسلیم فوم آلومینیوم تحت بارگذاری تک‌محوری و هیدرواستاتیکی [۸]، تنش‌ها به وسیله استحکام تسلیم تک‌محوری ماده بی‌بعد شده‌اند.

باقی می‌ماند؛ اما تحت فشار هیدرواستاتیکی، سطح تسلیم در امتداد محور هیدرواستاتیک کشیده می‌شود که بیانگر سخت‌شوندگی بیشتر تحت بارگذاری هیدرواستاتیکی است. دشپند و فلک، بر اساس فرض جریان پلاستیک وابسته<sup>۱۲</sup>، یک مدل اساسی برای پیش‌بینی رفتار فوم‌های فلزی ارائه نمودند که در حال حاضر، در نرم‌افزار المان محدود ال‌اس‌داینما قابل اجرا است. در مدل دشپند-فلک، تابع تسلیم  $\Phi$  به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود [۸]:

$$\Phi = \hat{\sigma} - \sigma_y \leq 0 \quad (2)$$

که  $\sigma_y$  تنش تسلیم است و تنش معادل<sup>۱۳</sup>  $\hat{\sigma}$  با رابطه (۳) داده می‌شود:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sigma_e^2 + \alpha^2 \sigma_m^2}{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2} \quad (3)$$

که  $\sigma_e$  و  $\sigma_m$ ، به ترتیب تنش مؤثر فون‌میسز<sup>۱۴</sup> و تنش متوسط<sup>۱۵</sup> (هیدرواستاتیکی) هستند:  $\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}}$  و

شده و روش تولید فوم، در مرجع [۳۲] توسط همین نویسندگان توضیح داده شده است. به منظور تعیین خواص ماده، آزمایش فشار روی نمونه‌های فوم انجام شد. این نمونه‌ها از همان دسته تولیدی<sup>۱</sup> که روی آنها آزمایش ضربه انجام شده است، انتخاب گردید. جزئیات مربوط به مدل رفتار ماده، آزمایش فشار، تحلیل آماری داده‌های آزمایش و استخراج پارامترهای مدل، در بخش‌های ۲-۱ تا ۲-۴ ارائه شده است.

## ۲-۱- مدل اساسی رفتار ماده

در کار حاضر، برای رفتار فوم آلومینیوم، از مدل اساسی پیشنهاد شده توسط دشپند-فلک<sup>۲</sup> [۸]، استفاده شده است. این مدل، غالباً به دلیل کارایی آن انتخاب می‌شود. در فوم فلزی (با ساختار سلولی)، با توجه به تراکم‌پذیری ماده و سخت‌شوندگی سریع آن پس از فشردگی، نمی‌توان از تئوری پلاستیسیته J-2<sup>۳</sup> برای مدل‌سازی فوم استفاده کرد؛ زیرا تغییر و تحول سطح تسلیم<sup>۴</sup>، نه تنها به نامتغیر تنش انحرافی<sup>۵</sup>  $J_2$  بستگی دارد، بلکه همچنین به تریس تانسور تنش<sup>۶</sup>  $J_3$  نیز وابسته است. بنابراین تابع تسلیم برای یک ماده متخلخل، بایستی جمله تنش‌های هیدرواستاتیکی را نیز شامل شود. در این رابطه، دشپند و فلک [۸] فرمول‌بندی پلاستیسیته فون‌میسز<sup>۷</sup> را تعمیم دادند تا وابستگی سطح تسلیم به تنش‌های هیدرواستاتیکی لحاظ شود. آنها شکل سطح تسلیم و نیز روند تغییر و تحول سطح تسلیم را برای فوم‌های آلومینیوم با مشخصات و خواص مکانیکی مختلف بررسی کردند. نتایج این بررسی‌ها، به صورت تغییرات تنش مؤثر<sup>۸</sup> بر حسب تنش متوسط<sup>۹</sup> (هیدرواستاتیک) ارائه شده است. در شکل ۱، گسترش سطح تسلیم فوم آلومینیوم تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری و هیدرواستاتیکی نشان داده

<sup>1</sup> Batch

<sup>2</sup> Deshpande-Fleck

<sup>3</sup> J-2 Plasticity Theory

<sup>4</sup> Evolution of the Yield Surface

<sup>5</sup> Deviatoric Stress Invariant

<sup>6</sup> Trace of the Stress Tensor

<sup>7</sup> Von Mises Plasticity Formulation

<sup>8</sup> Effective Stress

<sup>9</sup> Mean (Hydrostatic) Stress

<sup>10</sup> Quadratic

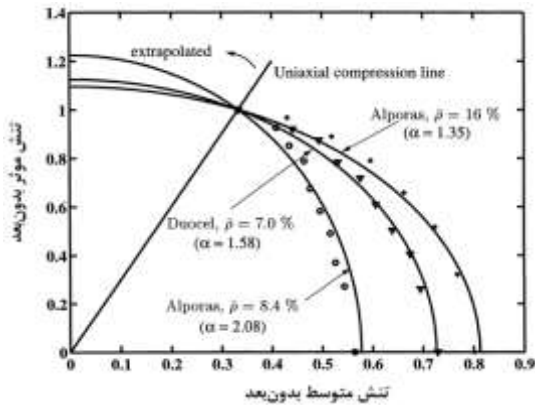
<sup>11</sup> Uniaxial Loading

<sup>12</sup> Associated Plastic Flow

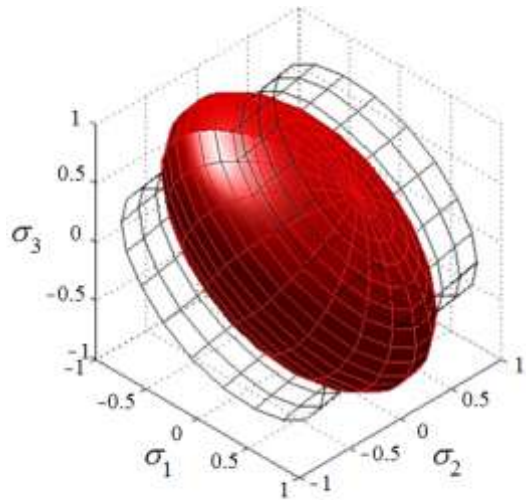
<sup>13</sup> Equivalent Stress

<sup>14</sup> Von Mises Effective Stress

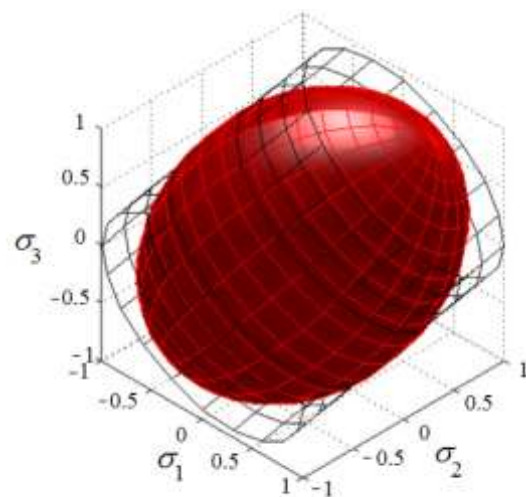
<sup>15</sup> Mean Stress



شکل ۲- سطح تسلیم ارائه شده برای سه نوع فوم مختلف [۸]



$v^p = 0$  ( $\alpha = 2.12$ )  
(الف)



$v^p = 0.4$  ( $\alpha = 0.81$ )  
(ب)

بر حسب نسبت پواسون  $v^p$ ، تعریف می‌گردد [۸]:

$$\alpha = \sqrt{\frac{9}{2} \frac{1 - 2v^p}{1 + v^p}} \quad (۴)$$

سطح تسلیم تعریف شده توسط روابط (۲) و (۳)، در شکل ۲ نشان داده شده است. مدل محاسباتی با خط توپر و داده‌های تجربی با نقطه (یا علائم گسسته) مشخص شده‌اند. ملاحظه می‌شود که برازش سطح تسلیم ارائه شده، با داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده برای سه نوع فوم مختلف به نحو بسیار مطلوبی صورت گرفته است و این تطابق، به علت انتخاب مناسب پارامتر  $\alpha$  است [۸].

مشخصه کلیدی فرمول بندی دشیپند- فلک این است که تسلیم را تحت فشار هیدرواستاتیکی پیش‌بینی می‌کند. در مدل دشیپند- فلک، قابلیت فشرده شدن<sup>۱</sup> همه مواد فومی لحاظ می‌گردد و مقدار آن توسط پارامتر  $\alpha$  کنترل می‌شود. این ویژگی سطح تسلیم در شکل ۳ ارائه شده است. در این شکل، سطح تسلیم بیضی‌گون دشیپند- فلک و نیز سطح تسلیم استوانه‌ای فون میسر نشان داده شده‌اند. شکل ۳-الف مربوط به فوم تراکم‌پذیر با  $v^p = 0$  است. ملاحظه می‌شود که با کاهش مقدار  $\alpha$  و نزدیک شدن  $v^p$  به ۰/۵ (شکل ۳-ب)، سطح تسلیم بیضی‌گون به استوانه فون میسر نزدیک می‌شود. همچنین با توجه به شکل مشاهده می‌شود که ممکن است قطر بیضی‌گون دشیپند-فلک از قطر استوانه فون میسر تجاوز کند و این یعنی آنکه امکان دارد تحت شرایط بارگذاری مشخصی، فوم قابل فشرده شدن از یک ماده غیر قابل فشرده شدن (با رفتار تک‌محوری یکسان<sup>۲</sup>) قوی‌تر<sup>۳</sup> به نظر برسد [۳۳].

<sup>1</sup> Crushability

<sup>2</sup> A Non-Crushable Material with the Same Uniaxial Behavior

<sup>3</sup> Stronger

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{\alpha^2 \dot{\epsilon}}{\left[1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2\right]} \frac{\sigma_m}{\hat{\sigma}} \quad (10)$$

$$\dot{\epsilon}_e = \frac{\dot{\epsilon}}{\left[1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2\right]} \frac{\sigma_e}{\hat{\sigma}} \quad (11)$$

در تحلیل المان محدود، شکست ماده غالباً به وسیله حذف المان‌ها (فرسایش المانها) موقعی مدل می‌شود که به یک مقدار بحرانی از کرنش می‌رسند، مدل می‌شود. با در نظر گرفتن کرنش حجمی پلاستیک<sup>۱۱</sup>  $\epsilon_m$ ، به عنوان معیار شکست، با رسیدن مقدار این پارامتر به یک حد بحرانی  $\epsilon_{cr}$ ، حذف یا فرسایش المان<sup>۱۲</sup> اتفاق می‌افتد [۳۴]، که به صورت رابطه (۱۲) بیان می‌شود:

$$\epsilon_m \geq \epsilon_{cr} \quad (12)$$

### ۲-۲- آزمایش فشار

برای شبیه‌سازی رفتار ضربه فوم، لازم است تا در مدل رفتار ماده، خواص فوم آلومینیوم تعیین گردد. برای این منظور، آزمایش فشار روی نمونه‌های فومی مطابق با استاندارد ISO/DIS 13314 [۳۵] انجام شد. نمونه‌ها به ابعاد ۴۸ mm × ۳۵ mm × ۳۵ mm انتخاب و تحت فشار شبه-استاتیکی قرار گرفت. برای انجام آزمون، از دستگاه آزمایش GOTECH (GT-7001-LS100) استفاده شد (شکل ۴). سرعت بارگذاری، برابر با ۲/۴ mm/min در نظر گرفته شد. نمودار تنش-کرنش به دست آمد. به ازاء نمو کرنش محوری ۵ درصد، تغییر ابعاد جانبی نمونه‌ها با استفاده از یک میکرومتر اندازه‌گیری شد و نسبت پواسون پلاستیک<sup>۱۳</sup> تعیین گردید [۸]. آزمایش، برای پنج نمونه تکرار شد.

### ۳-۲- تحلیل آماری داده‌های آزمایش

شکل ۵، نمودار تنش-کرنش مهندسی به دست آمده از آزمون فشار را روی پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub> نشان می‌دهد. مطابق شکل، در رفتار فوم سه ناحیه تغییر شکل مشاهده می‌شود: ۱- ناحیه خطی الاستیک اولیه، ۲- ناحیه پلاتو که در آن تنش تقریباً ثابت است (تنش پلاتو

### شکل ۳- تغییر شکل سطح تسلیم برای مقادیر مختلف

پارامتر  $\alpha$  [۳۳]

مدل سخت‌شوندگی ماده، به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$\sigma_y = \sigma_p + R(\dot{\epsilon}) = \sigma_p + \gamma \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_D} - \alpha_2 \ln \left[ 1 - \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_D} \right)^\beta \right] \quad (5)$$

که در آن  $R(\dot{\epsilon})$ ، بیانگر کرنش‌سختی است.  $\sigma_p$  (تنش پلاتو)،  $\gamma$ ،  $\alpha_2$  و  $\beta$  پارامترهای ماده بوده، مقادیر آنها می‌تواند از آزمایش فشار تک‌محوری به دست آید [۵].  $\epsilon_D$ ، کرنش فشردگی<sup>۱</sup> نام دارد و مطابق رابطه (۶)، با چگالی نسبی فوم  $\bar{\rho}$  (نسبت چگالی فوم به چگالی فلز پایه آلومینیوم)، مرتبط است:

$$\epsilon_D = -\frac{9 + \alpha^2}{3\alpha^2} \ln(\bar{\rho}) \quad (6)$$

با فرض جریان وابسته، نرخ کرنش پلاستیک<sup>۲</sup>  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ ، با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید [۸]:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{1}{H} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{kl}} \dot{\sigma}_{kl} \quad (7)$$

که در آن،  $H$  مدول سخت‌شوندگی<sup>۳</sup> و  $\dot{\sigma}_{kl}$  نرخ تنش جانوم<sup>۴</sup> است. برای جریان پلاستیک پیوسته<sup>۵</sup>، از رابطه سازگاری<sup>۶</sup> نتیجه می‌شود که:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{\dot{Y}}{H} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (8)$$

در آن،  $\dot{Y}$  نرخ تنش تسلیم<sup>۷</sup> است. دشتیند و فلک با توجه به روابط (۷) و (۸)، نشان دادند که نرخ کرنش پلاستیک معادل<sup>۸</sup>  $\dot{\epsilon}^A$ ، به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود [۸]:

$$\dot{\epsilon}^2 = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{3} \right)^2 \right] \left( \dot{\epsilon}_e^2 + \frac{1}{\alpha^2} \dot{\epsilon}_m^2 \right) \quad (9)$$

نرخ کرنش پلاستیک حجمی<sup>۹</sup>  $\dot{\epsilon}_m$  و نرخ کرنش پلاستیک مؤثر فون میسز<sup>۱۰</sup>  $\dot{\epsilon}_e$ ، به صورت روابط (۱۰-۱۱) تعریف می‌شود:

<sup>1</sup> Densification Strain (Equivalent Strain at Compaction)

<sup>2</sup> Plastic Strain Rate

<sup>3</sup> Hardening Modulus

<sup>4</sup> Jaumann Stress Rate

<sup>5</sup> Continued Plastic Flow

<sup>6</sup> Consistency Relation

<sup>7</sup> Yield Stress Rate

<sup>8</sup> Equivalent Plastic Strain Rate

<sup>9</sup> Volumetric Plastic Strain Rate

<sup>10</sup> Von Mises Effective Plastic Strain Rate

<sup>11</sup> Plastic Volumetric Strain

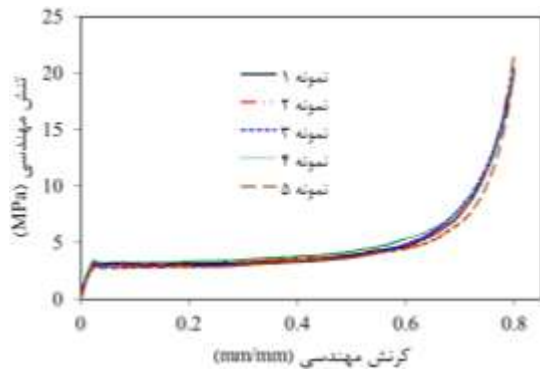
<sup>12</sup> Erosion of Element

<sup>13</sup> Plastic Poisson's Ratio

نمونه‌های فوم گزارش شده‌اند. همچنین مقدار متوسط، انحراف استاندارد و درصد پراکندگی نتایج، برای این پارامترها گزارش شده است. مقادیر کم انحراف استاندارد و ضریب پراکندگی داده‌های آزمایش، نشان می‌دهد که فرآیند تولید فوم استفاده شده در کار حاضر، توانسته تا حد زیادی چالش‌هایی های ذکر شده در انتهای بخش مقدمه را رفع کند؛ چالش‌هایی که هرکدام، می‌تواند فرآیند شبیه‌سازی را مختل و با مشکلات جدی روبرو سازد. از این رو محققان علاقه‌مند به کار در زمینه تولید فوم آلومینیوم و به خصوص فوم کامپوزیتی تقویت شده، می‌توانند جزئیات بیشتر تولید آن را در مرجع [۳۲] ملاحظه نمایند. لازم به ذکر است که در



شکل ۴- نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub> تحت آزمایش فشار



شکل ۵- داده‌های تجربی به‌دست آمده از آزمایش فشار، برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub>

فرآیند تولید، سعی شده تا پارامترهای بهینه تولید، مانند دما در مراحل مختلف فوم‌سازی، حجم و اندازه و نوع ذرات تقویت‌کننده، حجم و نوع عامل فوم‌ساز، نوع و درصد عناصر

$\sigma_p$ ، ۳- ناحیه‌ای که در آن تنش شدیداً افزایش می‌یابد و این امر، در اثر فروپاشی دیواره سلول‌هایی است که به یکدیگر فشرده شده‌اند [۱].

کرنش حدی<sup>۱</sup>  $\epsilon_0$ ، نقطه‌ای است که در آن غالب فضای حفره‌ها فشرده شده، دیواره‌های سلول با هم تماس پیدا کنند؛ به گونه‌ای که ماده فومی، در کرنش‌های بیشتر از  $\epsilon_0$  خاصیت جذب انرژی خود را از دست می‌دهد. بر اساس استاندارد ISO/DIS 13314 [۳۵] (استاندارد مربوط به آزمایش فشار برای فلزات سلولی و متخلخل)، تنش پلاتو  $\sigma_p$  برابر با میانگین مقادیر تنش در بازه کرنش بین  $0.2$  تا  $0.3$  است؛ همچنین کرنش حدی  $\epsilon_0$ ، مقدار کرنشی است که در آن، تنش مساوی است با  $1/3$  برابر مقدار تنش پلاتو یعنی:  $\sigma_p \times 1/3$  [۳۵]. سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا کرنش  $\epsilon_0$ ، بیانگر میزان انرژی جذب شده توسط فوم در واحد حجم اولیه است:

$$W = \int_0^{\epsilon_0} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (13)$$

در تحلیل آماری داده‌ها، مقدار متوسط  $\bar{x}$ ، انحراف استاندارد<sup>۲</sup>  $S$  و ضریب پراکندگی<sup>۳</sup>  $CV$  برای پارامترهای مختلف، طبق روابط (۱۴-۱۶) محاسبه می‌شود [۳۶ و ۳۷]:

$$\bar{x} = \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (14)$$

$$S = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) / (n-1)} \quad (15)$$

$$CV = 100 \times S / \bar{x} \quad (16)$$

که در این روابط،  $n$  تعداد نمونه‌ها و  $x_i$  پارامتر اندازه-گیری شده برای یک نمونه است. ضریب پراکندگی  $CV$ ، بر حسب درصد بیان می‌شود.

نتایج آماری مربوط به پنج نمونه فوم تحت آزمایش فشار شبه‌استاتیکی، در جدول ۱ ارائه شده است؛ پارامترهای گزارش شده در این جدول، مطابق استاندارد ISO/DIS 13314 [۳۵] است. این پارامترها عبارتند از: تنش پلاتو، کرنش حدی و میزان جذب انرژی فوم؛ مقادیر این پارامترها، برای همه

<sup>1</sup> Upper Limit of the Compressive Strain

<sup>2</sup> Standard Deviation

<sup>3</sup> Coefficient of Variation



عنوان مثال اگر  $\epsilon_{eng} = -0.65$  باشد، آنگاه  $\epsilon_{true} = -1.05$  خواهد بود.

ابتدا با توجه به روابط (۱۷) و (۱۸)، داده‌های تنش- کرنش مهندسی به دست آمده از آزمایش فشار به تنش- کرنش حقیقی تبدیل شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب<sup>۳</sup>، برازش منحنی<sup>۴</sup> رابطه (۵) بر داده‌های تنش-کرنش حقیقی انجام شد (مطابق شکل ۶) و پارامترهای مربوط به مدل اساسی دشیپند- فلک محاسبه شد. مقادیر این پارامترها و سایر خواص مکانیکی فوم آلومینیوم، در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه مدل سخت- شونده‌گی ماده، بر داده‌ها برازش شده است، داده‌های آزمایش در محدوده الاستیک حذف گردیده است.

جدول ۱- نتایج آماری مربوط به داده‌های آزمایش فشار روی

پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub>

شماره نمونه/ پارامتر آماری	تنش پلاتو	کرنش حدی	جذب انرژی
نمونه ۱	۳/۱۵ MPa	۰/۵۲ mm/mm	۱/۶۵ MJ/m <sup>3</sup>
نمونه ۲	۳/۰۹ MPa	۰/۵۱ mm/mm	۱/۶۰ MJ/m <sup>3</sup>
نمونه ۳	۲/۹۹ MPa	۰/۵۱ mm/mm	۱/۵۲ MJ/m <sup>3</sup>
نمونه ۴	۳/۳۹ MPa	۰/۵۲ mm/mm	۱/۷۵ MJ/m <sup>3</sup>
نمونه ۵	۲/۹۱ MPa	۰/۵۱ mm/mm	۱/۴۸ MJ/m <sup>3</sup>
مقدار متوسط	۳/۱۱ MPa	۰/۵۱ mm/mm	۱/۶۰ MJ/m <sup>3</sup>
انحراف استاندارد	۰/۱۸ MPa	۰/۰۱ mm/mm	۰/۱۱ MJ/m <sup>3</sup>
ضریب پراکندگی	۵/۹۰ %	۱/۵۱ %	۶/۸۷ %

جدول ۲- خواص ماده فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub>

مقدار	خاصیت
۵۰۰ kg/m <sup>3</sup>	چگالی $\rho$
۱۵۰۰ MPa	مدول الاستیک E
۰/۱	نسبت پواسون $\nu^p$
۲/۹۳۳۹ MPa	تنش پلاتو $\sigma_p$
۱/۸۰۹	ضریب شکل سطح تسلیم $\alpha$
۲/۱۰۹۴	کرنش فشردگی $\epsilon_D$
۱/۰۳۱۲ MPa	پارامتر $\gamma$
۴۶/۳۲ MPa	پارامتر $\alpha_2$

<sup>3</sup> MATLAB

<sup>4</sup> Curve Fitting

آلیازی اضافه شده به مذاب آلومینیوم، سرعت هم زدن مذاب و ... به دست آید.

با توجه به جدول ۱، ملاحظه می‌شود که داده‌های تنش- کرنش مربوط به "نمونه شماره ۲" (در شکل ۵)، دارای کمترین انحراف نسبت به مقادیر متوسط اطلاعات آزمایش است.

## ۲-۴- تعیین پارامترها در مدل مادی دشیپند- فلک

برای به دست آوردن نتایج عددی مطلوب، انتخاب مدل ماده و نیز دقت داده‌های ورودی به نرم‌افزار برای تعریف خواص مواد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ لذا قبل از انجام شبیه‌سازی عددی ضربه با سرعت پایین روی نمونه‌های فومی، لازم است که خواص ورودی مربوط به مدل اساسی رفتار ماده (مدل دشیپند- فلک) تعیین گردد.

برای منحنی سخت‌شوندگی در رابطه (۵)، از داده‌های تنش-کرنش حقیقی<sup>۱</sup> استفاده شد. تنش‌ها و کرنش‌ها در رابطه (۵)، تنش و کرنش حقیقی هستند و ضرایب مدل مادی دشیپند- فلک، برای تنش و کرنش حقیقی تعیین می‌شود [۵، ۱۷، ۳۳ و ۳۴]؛ بنابراین نیاز است تا داده‌های تنش و کرنش مهندسی<sup>۲</sup> حاصل از آزمایش فشار، به تنش و کرنش حقیقی تبدیل شوند و با برازش رابطه (۵) بر داده‌ها، خواص ماده فوم به دست آید. روابط تبدیل استفاده شده، به صورت رابطه (۱۷-۱۸) است [۳۳]:

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (17)$$

$$\sigma_{true} = \frac{P}{b^2} = \frac{P}{b_0^2(1 + \epsilon_{trans.eng})^2} = \sigma_{eng} \cdot (1 - \nu \epsilon_{eng})^{-2} \quad (18)$$

که در این روابط،  $\epsilon_{true}$  کرنش حقیقی،  $\epsilon_{eng}$  کرنش مهندسی،  $\sigma_{true}$  تنش حقیقی و  $\sigma_{eng}$  تنش مهندسی است.  $P$  نیروی اعمالی،  $\nu$  نسبت پواسون،  $b$  و  $b_0$  به ترتیب اندازه بعد سطح مقطع جاری و اولیه نمونه (مربعی) و  $\epsilon_{trans.eng}$  کرنش جانبی مهندسی است. لازم به ذکر است که برای شرایط فشار، مطابق رابطه (۱۷)، مقدار کرنش در تبدیل آن از مهندسی به حقیقی افزایش می‌یابد و نه کاهش. به-

<sup>1</sup> True Stress Versus True Strain

<sup>2</sup> Engineering (Nominal) Stress Versus Engineering Strain Data

### ۳- تحلیل اجزاء محدود ضربه به فوم

روش‌های حل عددی، به عنوان ابزارهای کارآمد در علوم مهندسی به شمار می‌آیند. در میان روش‌های عددی، روش اجزاء محدود یکی از روش‌های توانمند در حل مسائل مهندسی علوم شناخته شده است. نرم‌افزار اجزاء محدود ال-اس‌داینما [۳۸ و ۳۹]، یک حل‌گر قدرتمند جهت تحلیل مسائل دینامیکی به روش صریح<sup>۲</sup> است. در این پژوهش به کمک نرم‌افزار مذکور، ضربه سرعت پایین روی صفحات فوم آلومینیوم به ضخامت ۲۰ mm، مشابه شرایط آزمایش شبیه‌سازی شد. جزئیات کامل روند آزمایش ضربه روی فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub>، در مرجع [۳۲] توسط نویسندگان توضیح داده شده است. در شبیه‌سازی، یک صفحه فومی به قطر ۷۶ mm در نظر گرفته شد و شرط مرزی گیردار در محیط آن اعمال گردید (کلیه گره‌های گرداگرد محیط صفحه، در تمام درجات آزادی خود مقید شد)؛ همچنین از یک ضربه‌زن با نوک نیم‌کروی به قطر ۱۳ mm استفاده شد. خواص ماده مربوط به فوم آلومینیوم، مطابق جدول ۲ استفاده شد. برای ضربه‌زن، خواص ماده صلب در نظر گرفته شد. با توجه به حجم محاسبات و ابعاد هندسی قطعه، مش مناسب مطابق شکل ۸ انتخاب گردید. تعداد المان‌ها و گره‌ها، به ترتیب برابر با ۱۲۵۶۳۱ و ۱۳۳۸۲۷ است. آزمون همگرایی<sup>۳</sup> یا حساسیت به مش، در قسمت نتایج ارائه شده است.

خواص ماده فوم آلومینیوم که در تحلیل اجزاء محدود استفاده شده است، از آزمایش فشار شبه‌استاتیکی به‌دست آمده است. همان‌طور که محققان پیشنهاد داده‌اند، برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی فوم‌های فلزی، می‌توان از خواص

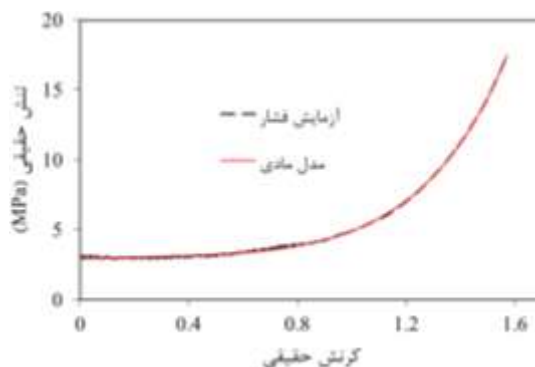
۴/۶۱۴۸

۰/۱

پارامتر  $\beta$

کرنش شکست حجمی  $\epsilon_{cf}^{(*)}$

<sup>(\*)</sup> حالت شکست مناسب با استفاده از معیار کرنش اصلی ماکزیمم ( $\epsilon_{cr}=0.15$ ) به دست می‌آید.



شکل ۶- برازش منحنی مدل سخت‌شوندگی ماده بر داده‌های تجربی (تنش - کرنش حقیقی)، داده‌ها در محدوده الاستیک حذف شده‌اند.

با توجه به شکل ۶، انطباق بسیار خوب داده‌های آزمایش بر مدل تحلیلی دشپند-فلک، دلالت بر دقت، صحت و کارایی این مدل دارد.

در مرحله بعد، مدل اجزاء محدود تست فشار بررسی شد. برای این منظور، شبیه‌سازی آزمایش فشار تک‌محوری<sup>۱</sup> روی یک مدل مکعبی اجرا شد. گره‌های پایینی مکعب مقید شد و سرعت بارگذاری روی گره‌های بالایی آن اعمال شد، به نحوی که مکعب تا کرنش ۸۰٪ (شبیه آزمایش) فشرده شود. از مقادیر جدول ۲، به عنوان پارامترهای ورودی در تست فشار عددی استفاده شد.

بر اساس روند ذکر شده در فوق، می‌توان قابلیت مدل دشپند-فلک برای بازسازی صحیح و دقیق رفتار فوم، را ارزیابی کرد. شکل ۷، منحنی تنش-کرنش مهندسی به‌دست‌آمده از آزمایش (مقادیر متوسط تجربی) و نیز منحنی تنش-کرنش مهندسی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی تست فشار را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که نتایج پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی عددی، مطابقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

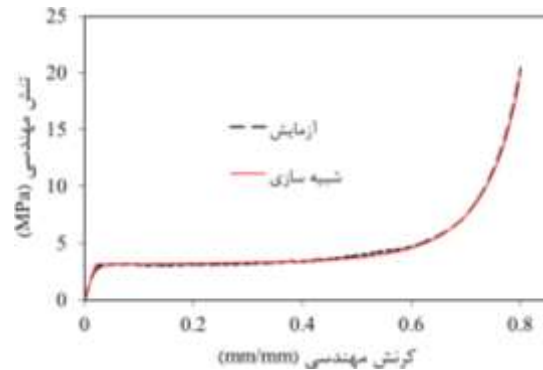
<sup>2</sup> Explicit Dynamic Analysis

<sup>3</sup> Convergence Test

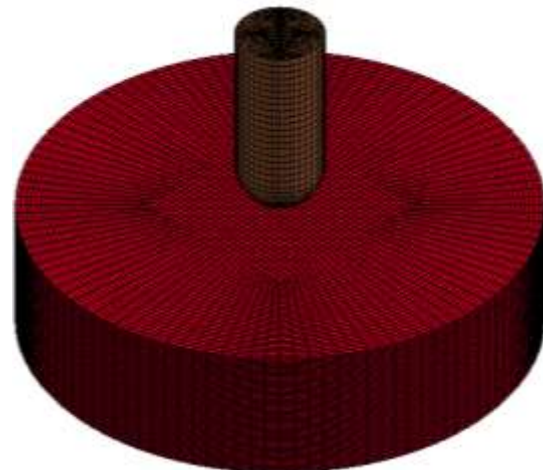
<sup>1</sup> Uniaxial Compression Test

حذف آسان المان و حجم محاسبات کمتر، از مزایای دیگر المان‌های تقلیل یافته است. این موضوع، در شبیه‌سازی ضربه و حذف المان‌های فوم در مسیر نفوذ ضربه‌زن، حائز اهمیت است. علی‌رغم مزایای ذکر شده، المان‌های تقلیل یافته از بروز رفتار غیر فیزیکی مربوط به مودهای اورگلاس (ساعت‌شنی)<sup>۶</sup> رنج می‌برند. برای رفع این مشکل، برای المان‌های تعریف شده مقدار کمی سفتی مصنوعی در نظر گرفته می‌شود تا انتشار مود اورگلاس را محدود نماید. به این منظور، در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا از کنترل ساعت‌شنی<sup>۷</sup> استفاده گردید. همچنین برای پرهیز از سخت‌شوندگی بیش از حد، مراقبت شد تا انرژی ساعت‌شنی<sup>۸</sup> از یک حد مجاز بیشتر نشود [۳۹].

برای از بین بردن المان‌های فوم در مسیر نفوذ ضربه‌زن، از مدل فرسایشی<sup>۹</sup> استفاده شد که یک مدل کمکی برای حذف المان‌ها است. در این مدل فرسایشی، شکست ماده به وسیله حذف المان‌ها موقعی مدل‌سازی می‌شود که به یک مقدار بحرانی از کرنش می‌رسند (که در بخش ۲-۱ توضیح داده شد). برای تعیین وضعیت تماس بین ضربه‌زن و صفحه فومی، از الگوریتم تماس فرسایشی سطح به سطح<sup>۱۰</sup> استفاده شد؛ همچنین برای در نظر گرفتن تماس بین ماده فومی فرسایش یافته و ماده فومی اولیه (منشأ)، تماس تک‌سطح<sup>۱۱</sup> تعریف گردید. به دلیل تفاوت زیاد بین ثوابت ماده (فوم منعطف و ضربه‌زن صلب)، فوم به درون سطح ضربه‌زن یا پنچ نفوذ می‌کند. برای برطرف ساختن این رفتار نامطلوب، از گزینه تماس بر مبنای قیود نرم و انعطاف‌پذیر<sup>۱۲</sup> استفاده شد. ممکن است در المان‌های سطح تماس، خواص مواد دو جسم تفاوت زیادی نسبت به یکدیگر داشته باشند. بسیاری از مواد نرم، تأثیر نامطلوبی روی سفتی تماس<sup>۱۳</sup> دارند؛ به طوری که مقدار آن را کاهش داده، باعث نفوذ بیش از حد<sup>۱۴</sup> می‌شوند؛ به عنوان مثال ماده نرم به درون سطح ماده صلب نفوذ



شکل ۷- منحنی تنش-کرنش مهندسی (مقایسه داده‌های آزمایش و پاسخ شبیه‌سازی شده)



شکل ۸- مدل هندسی و مش

استاتیکی آنها با در نظر گرفتن اثرات اینرسی استفاده کرد [۱۷، ۱۸، ۴۰ و ۴۱]. در کار حاضر، جرم ضربه‌زن (۴/۷ kg) و سرعت اولیه آن (۶/۷۰ m/s)، با استفاده از گزینه اینرسی<sup>۱</sup> لحاظ گردید. در مش‌زدن صفحه فوم، از المان‌های حجمی هشت-گرهه‌ای، با یک نقطه انتگرالگیری<sup>۲</sup> (المان‌های حجمی تنش ثابت)، استفاده شد؛ زیرا المان‌های تقلیل یافته<sup>۳</sup>، انتخاب مناسبی در تحلیل‌های غیرخطی و برای غلبه بر حجم‌های منفی محسوب می‌شوند (در المان‌های با نقاط انتگرالگیری کامل<sup>۴</sup>، امکان وقوع حجم منفی<sup>۵</sup> وجود دارد). علاوه بر این،

<sup>6</sup> Nonphysical Spurious/Hourglass Modes

<sup>7</sup> Hourglass Control

<sup>8</sup> Hourglass Energy

<sup>9</sup> Add Erosion

<sup>10</sup> Eroding Surface to Surface Contact

<sup>11</sup> Single Surface Contact

<sup>12</sup> Soft Constraint Based Contact

<sup>13</sup> Contact Stiffness

<sup>14</sup> Excessive Penetration

<sup>1</sup> Part Inertia Option

<sup>2</sup> Single Integration Point Elements

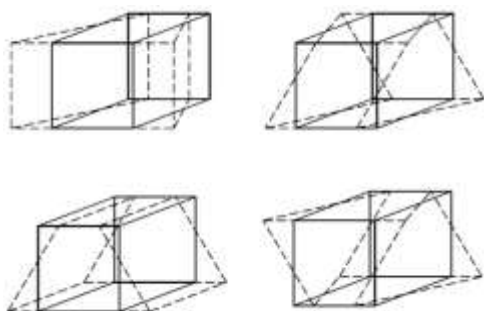
<sup>3</sup> Reduced Integration Elements

<sup>4</sup> Full Integration Elements

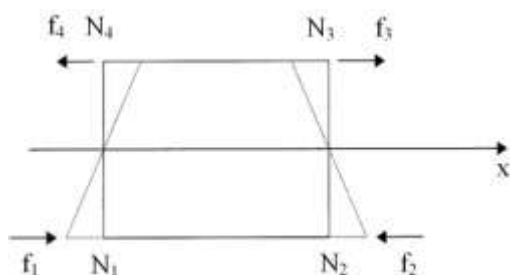
<sup>5</sup> Negative Volumes

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \sum_{k=1}^8 \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \dot{x}_j^k + \frac{\partial \phi_k}{\partial x_j} \dot{x}_i^k \right) \quad (20)$$

موقعی که گره‌های مقابل هم در جهت قطری<sup>۹</sup> دارای سرعت‌های یکسانی باشند، یعنی:  $\dot{x}_i^2 = \dot{x}_i^8$ ،  $\dot{x}_i^1 = \dot{x}_i^7$ ،  $\dot{x}_i^4 = \dot{x}_i^6$  و  $\dot{x}_i^3 = \dot{x}_i^5$  نرخ کرنش برابر صفر خواهد بود. با توجه به تعامد بردارهای پایه اورگلاس<sup>۱۰</sup>  $\Gamma_{\alpha k}$  با مشتقات توابع شکل<sup>۱۱</sup>  $\phi$  داریم:



شکل ۹- انتشار مودهای اورگلاس در یک المان [۳۹]



شکل ۱۰- نیروهای داخلی اعمال شده جهت مقابله با مودهای اورگلاس [۳۹]

$$\sum_{k=1}^8 \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \Gamma_{\alpha k} = 0 \quad (21)$$

که در آن:  $i = 1, 2, 3$  و  $\alpha = 1, 2, 3, 4$  [۳۹]. (با توجه به شکل ۶، بردارهای  $\Gamma_{\alpha k}$  در جدول ۳ لیست شده‌اند.)

حاصلضرب بردارهای  $\Gamma_{\alpha k}$  و سرعت‌های گرهی عبارت است از:

$$h_{i\alpha} = \sum_{k=1}^8 \dot{x}_i^k \Gamma_{\alpha k} = 0 \quad (22)$$

می‌یابد. برای اعمال تماس بین اجسام با رفتار مواد متفاوت (مانند تماس مواد فومی با فلزات) و حذف اثرات نفوذ بیش از حد، استفاده از تماس بر اساس قیود نرم و انعطاف‌پذیر مناسب است؛ زیرا سفتی تماس به دست آمده از این روش، از ثوابت ماده<sup>۱</sup> مستقل است. الگوریتم روش مذکور بر این اساس است که سفتی تماس را حداکثر نماید و در عین حال، پایداری رفتار تماس (پایداری روش عددی) نیز حفظ شود؛ بنابراین علاوه بر سفتی تماس موجود بین دو جسم در تماس با هم، یک سفتی اضافه نیز بر اساس پایداری سیستم دو جرم متصل به وسیله یک فنر، محاسبه می‌شود. مطابق رابطه زیر:

$$k_{cs}(t) = 0.5 \cdot \text{SOF SCL} \cdot m^* \cdot \frac{1}{\Delta t_c(t)} \quad (19)$$

این سفتی، بر حسب جرم‌های گرهی در تماس با هم<sup>۲</sup> ( $m^*$ ) و اندازه گام زمانی<sup>۴</sup>  $\Delta t_c(t)$  فرمول‌بندی شده، برای اطمینان از پایداری حل، یک ضریب مقیاس<sup>۵</sup> (SOF SCL) نیز به آن داده می‌شود [۳۸ و ۳۹].

همان‌طور که ذکر شد، به منظور غلبه بر مودهای اورگلاس یعنی حالت‌های تغییر شکل نامناسب المان‌ها (که در آن هیچ تنشی ایجاد نمی‌شود) از "کنترل ساعت‌شنی" استفاده شده است. شکل ۹، چهار نمونه از مودهای اورگلاس در یک المان هشت‌گره‌ای با یک نقطه انتگرالگیری را نشان می‌دهد [۳۹].

در کنترل ساعت‌شنی، متناسب با مؤلفه‌های سرعت (و یا تغییرمکان) گرهی که در انتشار مودهای اورگلاس مشارکت دارند، نیروهای داخلی مقاوم در برابر مودهای اورگلاس<sup>۷</sup> اعمال می‌شوند (شکل ۱۰). کار انجام‌شده توسط این نیروها، انرژی ساعت‌شنی می‌باشد که در واقع از انرژی فیزیکی سیستم فاصله می‌گیرد<sup>۸</sup>؛ بنابراین بایستی مقدار آن به کمتر از ۱۰ درصد انرژی داخلی محدود شود [۳۹].

در یک المان حجمی هشت‌گره‌ای، نرخ کرنش برابر است با:

<sup>1</sup> Material Constants

<sup>2</sup> Numerical Stability

<sup>3</sup> The Interacting Nodal Masses

<sup>4</sup> Global Time Step Size

<sup>5</sup> Scale Factor

<sup>6</sup> Produce No Sterss (Zero Energy Modes)

<sup>7</sup> Hourglass-Resisting Forces (Internal Forces)

<sup>8</sup> Takes away from Physical Energy of the System

<sup>9</sup> Diagonally Opposite Nodes

<sup>10</sup> Hourglass Base Vectors (Hourglass Shape Vectors)

<sup>11</sup> Shape Functions

برطرف ساختن مشکل ذکر شده، با در نظر گرفتن مقدار محدودی سفتی مصنوعی برای المان‌های فوم (به کمک گزینه کنترل ساعت‌شنی در نرم‌افزار)، از مدل دشیپند-فلک با معیار فرسایش کرنش اصلی ماکزیمم<sup>۳</sup> استفاده شد. نتیجه شبیه‌سازی، در شکل ۱۲ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که معیار مذکور، حالت شکست برشی فوم<sup>۴</sup> را به نحو بسیار مناسبی پیش‌بینی می‌نماید و با مشاهدات آزمایشگاهی مرجع [۳۲] نیز مطابقت دارد. پلاگ<sup>۵</sup> جدا شده از ماده، پس از نفوذ کامل ضربه‌زننده داخل فوم، نیز به خوبی مشاهده می‌شود (بر خلاف شکل ۱۱).

شاید دلیل این موضوع را بتوان این‌گونه توجیه کرد که موقعی که از معیار شکست کرنش حجمی استفاده می‌شود، فقط تغییر شکل هیدرواستاتیکی<sup>۶</sup> در نظر گرفته می‌شود؛ اما منطقی است که فرض شود که علاوه بر تغییر شکل هیدرواستاتیکی، تغییر شکل انحرافی<sup>۷</sup> نیز می‌تواند باعث بروز شکست شود؛ زیرا در تحلیل المان محدود، تانسور کرنش  $\bar{\epsilon}$  مطابق رابطه (۲۵) است:

$$\bar{\epsilon} = \bar{E} + \bar{\epsilon}_v \quad (25)$$

شامل دو کرنش انحرافی  $\bar{E}$  و هیدرواستاتیکی  $\bar{\epsilon}_v$  است. فرض مذکور، در معیار فرسایش کرنش اصلی ماکزیمم لحاظ می‌شود.

جهت اطمینان از عدم وابستگی پاسخ به اندازه المان‌ها، لازم است که در تحلیل المان محدود، نمودار همگرایی مش بررسی شود. هر چقدر تعداد المان‌ها بیشتر شود، دقت نتایج پیش‌بینی شده بالاتر و همگرایی جواب‌ها به سمت مقدار دقیق بیشتر خواهد بود؛ با این حال، افزایش تعداد المان‌ها از یک حد معین، تأثیر چندانی بر افزایش دقت جواب‌ها نخواهد داشت و تنها زمان شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد. برای تعیین تعداد بهینه المان‌ها، شش اندازه مش مختلف در مدل بررسی شده، مقدار حداکثر انرژی جذب شده توسط فوم برای هر کدام، مقایسه شده است. شکل ۱۳، نتایج آزمون حساسیت به مش را نشان می‌دهد. در این نمودار، محور افقی تعداد المان-

در صورت وجود موده‌های اورگلاس، این حاصلضرب صفر نخواهد بود و بردارهای نیروی مقاوم در برابر موده‌های اورگلاس  $f_{i\alpha}^k$  طبق رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$f_{i\alpha}^k = a_h h_{i\alpha} \Gamma_{ak} \quad (23)$$

که:

$$a_h = Q_{hg} \rho v_e^{\frac{2}{3}} \frac{c}{4} \quad (24)$$

و در آن  $\rho$  چگالی،  $v_e$  حجم المان،  $c$  سرعت صوت و  $Q_{hg}$  یک عدد ثابت بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ (که توسط کاربر تعریف می‌گردد) می‌باشد [۳۹].

جدول ۳- بردارهای پایه اورگلاس  $\Gamma_{ak}$  [۳۹]

	$\alpha = 4$	$\alpha = 3$	$\alpha = 2$	$\alpha = 1$	
$k = 1$	۱	۱	۱	۱	
$k = 2$	-۱	-۱	-۱	۱	
$k = 3$	۱	۱	-۱	-۱	
$k = 4$	-۱	-۱	۱	-۱	
$k = 5$	-۱	۱	-۱	-۱	
$k = 6$	۱	-۱	۱	-۱	
$k = 7$	-۱	۱	۱	۱	
$k = 8$	۱	-۱	-۱	۱	

#### ۴- نتایج و بحث

به منظور تشخیص یک مدل صحیح و بهینه برای حل مسئله، از دو معیار فرسایش مختلف [۳۴] استفاده شد و تحلیل ضربه در محیط نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا، انجام گردید (در مرجع [۳۴]، از این دو معیار به منظور شبیه‌سازی فرورفتگی شبه‌استاتیکی<sup>۱</sup> استفاده شده است). ابتدا از مدل دشیپند-فلک با معیار شکست کرنش حجمی<sup>۲</sup>، برای از بین رفتن المان‌ها استفاده شد. مطابق شکل ۱۱، ملاحظه می‌شود که معیار مذکور قادر نیست که حالت شکست فوم را به طور منطقی و صحیح پیش‌بینی کند. انتشار قطری شکست، یک رفتار نامناسب است که در این شکل دیده می‌شود. برای

<sup>3</sup> Maximum Principal Strain Erosion Criterion

<sup>4</sup> Failure Mode

<sup>5</sup> Plug

<sup>6</sup> Hydrostatic Deformation

<sup>7</sup> Deviatoric Deformation

<sup>1</sup> Quasi-static Indentation

<sup>2</sup> Volumetric Strain Failure Criterion

شود. همان‌طور که در این شکل مشخص است، میزان انرژی ساعت‌شنی، به کمتر از ۱۰٪ مقدار انرژی داخلی ماکزیمم<sup>۱</sup>، محدود شده است (انرژی داخلی<sup>۲</sup>، همان انرژی تغییر شکل است که جذب ماده شده است). انرژی لغزشی<sup>۳</sup> منفی بسیار کوچک، بیانگر صحت تعریف تماس است.

همچنین، نسبت انرژی بسیار نزدیک به عدد یک و حداکثر با ۰/۳۸ درصد اختلاف (مطابق شکل ۱۵)، تعادل کلی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. منظور از نسبت انرژی، حاصل تقسیم مجموع انرژی‌های داخلی، جنبشی<sup>۴</sup>، ساعت‌شنی و لغزشی به انرژی ضربه اعمال‌شده<sup>۵</sup> (۱۰۶ ژول) است.

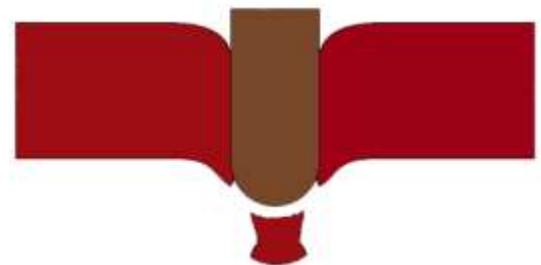
منظر دیگر مورد مطالعه در تحقیق حاضر، پاسخ ضربه فوم آلومینیوم تحت بار ضربه‌ای با سرعت پایین است که در آن نتایج عددی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار، با داده‌های تجربی به دست آمده از آزمایش ضربه مقایسه می‌شود. شکل ۱۶، نمودار نیروی ضربه بر حسب تابعی از زمان (نتایج آزمایشگاهی و عددی) را برای فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub> نشان می‌دهد. شکل ۱۷، نتایج آزمایشگاهی و عددی تغییرات بار (نیروی ضربه) بر حسب تغییر مکان را نشان می‌دهد. تغییر مکان جابجا شده توسط نمونه فوم، معادل عمق نفوذ چکش (ضربه‌زننده) است؛ همچنین در شکل ۱۸، نمودار تغییرات انرژی جذب شده توسط فوم بر حسب زمان ضربه نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که جزئیات مربوط به طراحی، ساخت، کالیبراسیون و صحت‌سنجی ماشین آزمون ضربه سقوطی سرعت‌پایین و نحوه تجهیزسازی آن به حسگرهای الکترونیکی و نیز جزئیات آزمایش‌های انجام شده روی فوم، در مرجع [۳۲] توسط نویسندگان توضیح داده شده است. داده‌های تجربی نیرو بر حسب زمان در شکل ۱۶، توسط مدار لودسل دینامیکی گزارش شده است (که جزئیات کامل طراحی و نصب مدار لودسل روی دستگاه آزمون ضربه سقوطی، در مرجع [۳۲] با دقت و به تفصیل بیان شده است). با داشتن نیرو و جرم ضربه‌زننده، مقادیر شتاب بر حسب زمان به دست

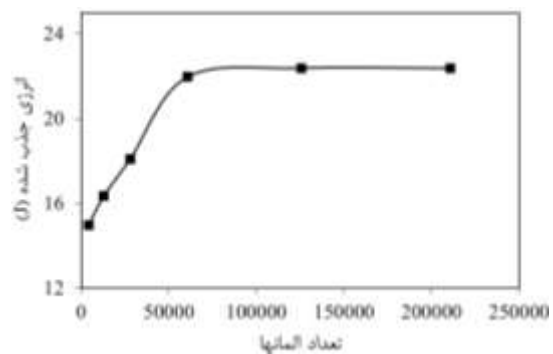
ها در مش و محور قائم ظرفیت جذب انرژی فوم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- پیش‌بینی نامناسب حالت شکست فوم



شکل ۱۲- حالت صحیح شکست فوم و پلاگ جدا شده از آن



شکل ۱۳- نمودار حساسیت مدل به تعداد المانها

ملاحظه می‌شود که جواب به دست آمده از مدل عددی، برای المانها با تعداد ۱۲۵۶۳۱ و ۲۱۰۸۴۸ یکسان است و جواب مدل همگرا شده است؛ بنابراین برای مش‌بندی مدل هندسی، تعداد المانها برابر با ۱۲۵۶۳۱ در نظر گرفته شده است.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب نمودار موازنه انرژی و نمودار نسبت انرژی را نشان می‌دهند. شکل ۱۴، در واقع به عنوان یک شاخص، برای کنترل صحت شبیه‌سازی تلقی می-

<sup>1</sup> Peak Value of Internal Energy

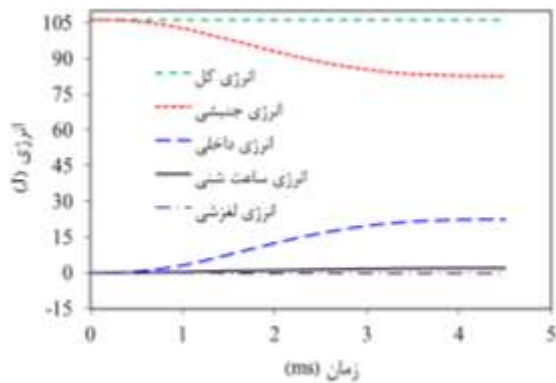
<sup>2</sup> Internal Energy

<sup>3</sup> Sliding Interface Energy

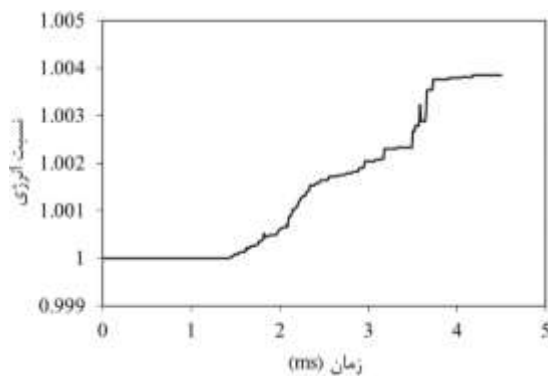
<sup>4</sup> Energy Ratio

<sup>5</sup> Kinetic Energy

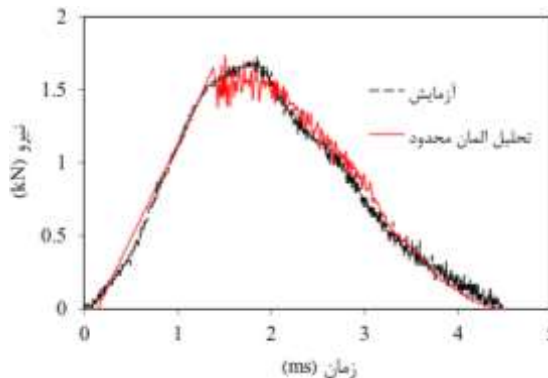
<sup>6</sup> Total Energy



شکل ۱۴- نمودار موازنه انرژی



شکل ۱۵- نمودار نسبت انرژی



شکل ۱۶- مقایسه پاسخ عددی به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی نیرو- زمان برای فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub> (برای نمونه با کمترین اختلاف نسبت به متوسط اطلاعات تجربی)

می‌آید. با انتگرال‌گیری عددی از داده‌های شتاب، مقادیر سینماتیکی مربوطه مانند سرعت و تغییر مکان محاسبه شده و نمودار نیرو- تغییر مکان (شکل ۱۷) حاصل می‌شود؛ همچنین انرژی جذب شده توسط فوم، با توجه به سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان تعیین گردیده است.

لازم به ذکر است که جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه-سازی در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸، از داده‌های تجربی مربوط به نمونه‌ای استفاده شده است که در مقایسه با سایر نمونه‌ها، دارای اختلاف کمتری نسبت به متوسط اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌ها (برای پارامترهای مختلف) است؛ برای این منظور، به نتایج حاصل از تحلیل آماری داده‌های آزمایش ضربه روی پنج نمونه شاهد [۳۱] استناد شده است.

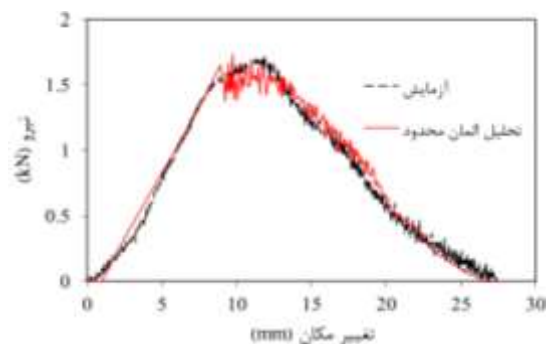
همچنین در شکل ۱۹، داده‌های تجربی نیرو در هر لحظه زمانی برای همه نمونه‌های فوم متوسط‌گیری شده، پاسخ میانگین به دست آمده با نتایج مدل مقایسه گردیده است. ملاحظه می‌شود که داده‌های تجربی شکل ۱۶ (در مقایسه با شکل ۱۹)، انطباق بهتری با نتایج عددی را نشان می‌دهد؛ زیرا اولاً نتایج به دست آمده از آزمایش روی هر نمونه، ارزشمند بوده و بیانگر رفتار واقعی ماده است. مثلاً در کار حاضر، برای نمودار نیرو- زمان فوم حدود ۲۵۰۰ داده ثبت شده است که تک‌تک این داده‌ها مهم و ارزشمند هستند؛ ثانیاً انجام متوسط‌گیری از داده‌های ثبت شده برای نمونه‌های مختلف، این امکان را فراهم می‌آورد که پاسخ به دست آمده در یک قسمت از نمودار، به سمت یک نمونه و در قسمت دیگر نمودار، به سمت نمونه دیگر منحرف شود و در مجموع رفتار ماده از واقعیت فاصله داشته باشد. نکته قابل تأمل دیگر این است که در شکل ۱۹ پاسخ ضربه به دست آمده از اطلاعات تجربی به صورت یک نمودار نسبتاً صاف و هموارتری (در مقایسه با شکل ۱۶) است؛ در حقیقت می‌توان گفت نمودار شکل ۱۶ نشان‌دهنده حساسیت مدار لودسل و صحت کار نیروسنج است که کمترین تغییرات نیرو در زیر چکش ضربه‌زننده را هم دریافت کرده و نمایش می‌دهد.

پارامترهای ماده در آن و نیز تکیه بر داده‌های مستند بر اساس تحلیل آماری نتایج آزمایش فشار و آزمایش ضربه، اشاره کرد.

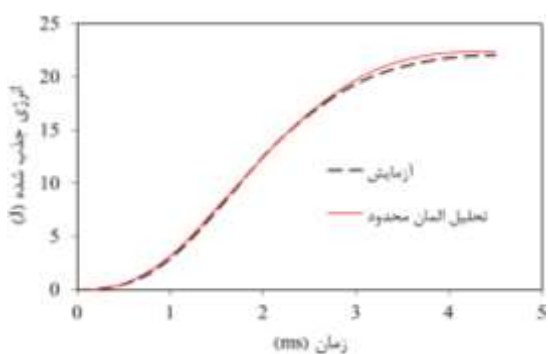
پاسخ ضربه سرعت‌پایین فوم آلومینیومی (شکل ۱۶ و ۱۷)، می‌تواند به سه ناحیه تقسیم شود: ۱- ناحیه الاستیک، ۲- ناحیه بار پلاتو<sup>۲</sup> و ۳- ناحیه شکست کامل. همانطور که ملاحظه می‌شود، در ابتدا نیرو، به‌طور تقریباً خطی زیاد می‌شود تا اینکه به یک مقدار حداکثر اولیه می‌رسد. این امر، مقاومت سلول‌های فوم در برابر نفوذ را نشان می‌دهد. سپس ناحیه بار پلاتو مشاهده می‌شود. این ناحیه پلاتو نسبتاً وسیع، باعث جذب انرژی بالای فوم می‌شود. در حقیقت، ساختار سلولی ماده سبب می‌شود که فوم بتواند قبل از شکست، تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگ را در یک بار تقریباً ثابت (بار پلاتو) تحمل کند و بخش زیادی از انرژی ضربه را جذب نماید. نهایتاً، نیرو با زمان کاهش یافته و هنگام نفوذ کامل چکش به داخل نمونه فوم به صفر می‌رسد.

مطابق شکل ۱۸، رفتار جذب انرژی فوم نسبت به زمان، به صورت تجمعی است. به بیان دیگر، در هر مرحله و به تدریج، میزان جذب انرژی با زمان افزایش یافته تا اینکه به حداکثر مقدار خود برسد. این مقدار حداکثر، به عنوان ظرفیت جذب انرژی فوم تلقی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ظرفیت جذب انرژی فوم برابر ۲۲/۳۸ ژول است که این مقدار، برای نتایج آزمایش برابر ۲۲/۰۴ ژول بوده و ۱/۵ درصد اختلاف دارد. حالت‌های مختلف تغییر شکل فوم که باعث جذب انرژی در طی ضربه می‌گردد، شامل خمش و فروپاشی دیواره‌های سلول فوم، لهیدگی سلول‌های فوم در زیر نوک چکش و نیز پارگی سلول‌های پیرامون ضارب است [۴۲].

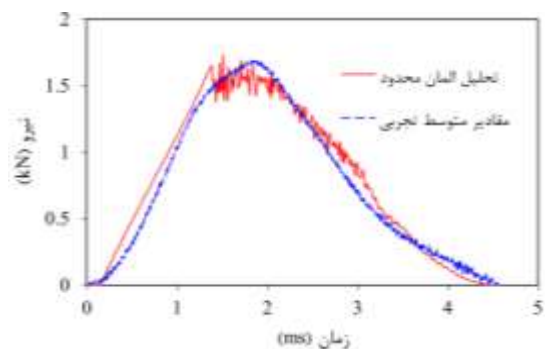
نکته قابل تأمل در اشکال ۱۶ و ۱۸، این است که پایان ناحیه پلاتو و شروع ناحیه شکست، در لحظه‌ای اتفاق می‌افتد که در آن، نرخ انرژی جذب شده توسط فوم<sup>۴</sup> کاهش می‌یابد. این یعنی آنکه مقاومت سلول‌های فوم در برابر نفوذ، روبه زوال می‌رود و در نتیجه، مقدار نیرو کاهش یافته تا در نهایت به صفر برسد.



شکل ۱۷- نمودار نیرو- تغییر مکان (نتایج تجربی و عددی)



شکل ۱۸- نتایج تجربی و عددی جذب انرژی فوم بر حسب زمان



شکل ۱۹- مقایسه پاسخ عددی به‌دست آمده از تحلیل المان محدود با مقادیر متوسط به‌دست آمده از آزمایش‌ها

همانطور که در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ دیده می‌شود، پاسخ شبیه‌سازی شده، مطابقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. از دلایل اصلی این انطباق، می‌توان به استفاده از مدل مادی خیره و هوشمند<sup>۱</sup> دشنند- فلک و تعیین صحیح

<sup>۲</sup> Plateau of Load Region

<sup>۳</sup> Initial Peak Load

<sup>۴</sup> The Rate of Energy Absorbed by the Foam

<sup>۱</sup> Sophisticated



جدول ۴- مقایسه نتایج عددی و تجربی

درصد اختلاف	شبیه سازی	آزمایش	کمیت	نقاط خاص
۲/۹ %	۱/۳۲ ms	۱/۳۶ ms	زمان	در نقطه پایان
۳/۳ %	۸/۵۲ mm	۸/۸۱ mm	تغییر مکان	ناحیه الاستیک
۵/۷ %	۱/۴۷ kN	۱/۵۶ kN	نیرو	
۲/۸ %	۵/۹۰ J	۶/۰۷ J	انرژی	
۶/۴ %	۲/۱۴ ms	۲/۰۱ ms	زمان	در نقطه پایان
۵/۷ %	۱۳/۶۱ mm	۱۲/۸۷ mm	تغییر مکان	ناحیه پلاتو
۵/۷ %	۱/۴۷ kN	۱/۵۶ kN	نیرو	
۸/۵ %	۱۳/۷۳ J	۱۲/۶۵ J	انرژی	
۱/۱ %	۴/۵۰ ms	۴/۴۵ ms	زمان	در نقطه پایان
۰/۴ %	۲۷/۶۱ mm	۲۷/۵۰ mm	تغییر مکان	ضربه
۰ %	۰ kN	۰ kN	نیرو	
۱/۵ %	۲۲/۳۸ J	۲۲/۰۴ J	انرژی	

گردید و با استفاده از معیار فرسایش کرنش اصلی ماکزیمم، شکست برشی ماده به طور صحیح و همانند مشاهدات آزمایش، شبیه سازی شد؛ در معیار مذکور، علاوه بر تغییر شکل هیدرواستاتیکی، تغییر شکل انحرافی نیز لحاظ می شود (اما در معیار شکست کرنش حجمی، این طور نیست و لذا این معیار، قادر به مدل سازی مناسب شکست ماده نمی باشد). با بررسی نمودار همگرایی مش، تعداد بهینه المان ها در مدل عددی به دست آمد؛ به گونه ای که زمان حل شبیه سازی و نیز دقت جواب ها به طور همزمان بهینه سازی شود. صحت تعریف تماس و نیز ارضاء شرایط تعادل شبیه سازی در طی زمان ضربه، نقاط قوت مدل عددی را نشان می دهد.

نتایج عددی به دست آمده از شبیه سازی رفتار ضربه فوم (نمودار تغییرات نیرو بر حسب زمان)، مطابقت بسیار خوبی با نتایج آزمایش دارد. نتایج پاسخ ضربه فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub> نشان داد که آنچه این فلز سلولی را از فلزات جامد غیرمتخلخل متمایز می سازد، وجود ناحیه پلاتو وسیع در نمودار نیرو- زمان است؛ بنابراین بخش قابل توجهی از انرژی جذب شده، مربوط به ناحیه پلاتو است.

پاسخ به ضربه سرعت پائین فوم که توسط شبیه سازی پیش بینی شده است، شامل سه ناحیه الاستیک، پلاتو و شکست است. انطباق این نواحی بر داده های آزمایش ضربه و

مطابق شکل ۱۶، زمان کل ضربه که توسط شبیه سازی پیش بینی شده است، برابر ۴/۵ میلی ثانیه بوده، با نتایج آزمایش مطابقت دارد. محدوده های الاستیک، بار پلاتو و شکست، به طور مطلوب توسط مدل عددی پیش بینی شده، با نتایج آزمایش همخوانی بسیار خوبی دارد. مقدار بار پلاتو (متوسط مقادیر نیرو در ناحیه پلاتو)، برابر ۱/۶۲ kN بر اساس نتایج آزمایش و برابر ۱/۵۴ kN بر اساس نتایج عددی است. این، به معنای آن است که مدل المان محدود می تواند مقدار بار حداکثر را با خطای نسبی ۴/۹ درصد پیش بینی کند.

در جدول ۴، اطلاعات به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود با نتایج آزمایش مقایسه شده و مقدار خطای نسبی (بر حسب درصد) گزارش شده است. این اطلاعات شامل، زمان، نیروی ضربه، تغییر مکان ضربه زننده و انرژی جذب شده در نقطه پایان ناحیه الاستیک، نقطه پایان ناحیه پلاتو و نقطه پایان ضربه است. مقادیر کم خطای به دست آمده، دلالت بر کارایی مناسب مدل عددی در پژوهش حاضر دارد.

## ۵- نتیجه گیری

در کار حاضر، رفتار فوم کامپوزیتی آلومینیوم A356/SiC<sub>p</sub> تحت ضربه سقوطی با سرعت پایین بررسی شد. نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایش ضربه روی نمونه های فوم مقایسه و تأیید شد. به منظور استخراج ثوابت مدل اساسی رفتار ماده (دشپند-فلک)، آزمایش فشار مطابق استاندارد مربوطه روی نمونه های فوم انجام شد و با برازش مدل تحلیلی سخت-شوندگی ماده بر داده های آزمایش، خواص و پارامترهای ماده به دست آمد.

شبیه سازی رفتار فوم تحت آزمون فشار انجام شد و پاسخ شبیه سازی شده، با نتایج تجربی به دست آمده از آزمایش فشار مقایسه گردید. مطابقت بسیار خوب نتایج عددی و تجربی، بر کارایی و دقت بالای مدل مادی دشپند- فلک صحه می گذارد. یکی از موارد مهم در پذیرش یا رد نتایج عددی حاصل از شبیه سازی، پیش بینی حالت شکست مناسب است. در واقع ابتدا روی حالت شکست فوم، تمرکز شد و پس از حصول نتیجه مناسب، پاسخ عددی ضربه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تحلیل شکست ماده، نیاز است که علاوه بر مدل اساسی مناسب برای رفتار ماده، از یک معیار فرسایش مناسب نیز استفاده شود. در کار حاضر، این امر با موفقیت انجام

پراکندگی کم نتایج آزمایش‌های فشار و ضربه، بر این امر صحت می‌گذارد.

(۴) بررسی تکرارپذیری نتایج و تحلیل آماری داده‌های آزمایش فشار شبه‌استاتیکی و آزمایش ضربه سقوطی برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC<sub>p</sub> و گزارش درصد پراکندگی نتایج. برای اطمینان از صحت مقادیر کمی گزارش شده، آزمایش برای حداقل پنج نمونه تکرار شده است. با توجه به ماهیت کامپوزیت و متخلخل ماده و عدم امکان کنترل برخی از عوامل تولید، بررسی تکرارپذیری و مستندسازی داده‌ها جهت تحلیل کمی نتایج، مهم و قابل توجه است. برای مقایسه با نتایج مدل‌سازی، نمونه‌ای به عنوان معیار انتخاب گردیده که کمترین اختلاف را با متوسط اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌ها داشته باشد.

#### ۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله، مراتب سپاس و قدردانی خود را از آقای دکتر سید حجت هاشمی، بابت در اختیار قراردادن تجهیزات آزمایشگاه ضربه و نیز همکاری بی‌دریغ ایشان در انجام آزمایش‌ها ابراز می‌دارند.

#### ۷- مراجع

- [1] Ashby MF, Evans AG, Fleck NA, Gibson LJ, Hutchinson JW, Wadley HNG (2000) Metal Foams: a Design Guide. Boston, Butterworth: Heinemann.
- [2] Banhart J (2001) Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Prog Mater Sci 46(6): 559-632.
- [3] Michailidis N, Stergioudi F, Tsouknidas A (2011) Deformation and energy absorption properties of powder-metallurgy produced Al foams. Mat Sci Eng A 528(24): 7222-7227.
- [4] Alizadeh M, Mirzaei-Aliabadi M (2012) Compressive properties and energy absorption behavior of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite foam synthesized by space-holder technique. Mater Design 35: 419-424.
- [5] Hanssen AG, Hopperstad OS, Langseth M, Ilstad H (2002) Validation of constitutive models applicable to aluminium foams. Int J Mech Sci 44(2): 359-406.
- [6] Schreyer HL, Zuo QH, Maji AK (1994) Anisotropic Plasticity Model for Foams and Honeycombs. J Eng Mech 120(9): 1913-1930.

نیز پیش‌بینی مناسب محدوده بار پلاتو، بیانگر قابلیت مدل در بازسازی دقیق رفتار مکانیکی فوم است. مقدار (و درصد) انرژی جذب شده در نواحی الاستیک، پلاتو و شکست بترتیب برابر با J ۵/۹۰ (% ۲۶/۴)، J ۷/۸۳ (% ۳۵/۰) و J ۸/۶۵ (% ۳۸/۶) می‌باشد.

نرخ انرژی جذب شده توسط فوم در نواحی الاستیک، پلاتو و شکست به ترتیب افزایش می‌یابد، ثابت است و کاهش می‌یابد. این رفتار ماده دلالت بر آن دارد که در مرحله اول فوم در مقابل ضربه مقاومت می‌کند، در مرحله دوم در فوم تغییرشکل پلاستیک ایجاد می‌شود و در مرحله سوم مقاومت فوم در برابر ضربه کاهش یافته تا اینکه نهایتاً شکست ماده اتفاق می‌افتد.

مدل عددی، قادر است مقدار بار پلاتو و انرژی ضربه جذب‌شده را به خوبی و با درصد خطای قابل‌قبولی پیش‌بینی نماید. مقدار بار پلاتو و انرژی جذب‌شده که توسط شبه‌سازی برآورد شده است، به ترتیب برابر با J ۲۲/۳۸ و kN ۱/۵۴ بوده که در مقایسه با نتایج آزمایش، دارای خطای نسبی ۴/۹ و ۱/۵ درصد است.

علت تطابق خوب نتایج تجربی و عددی، علی‌رغم مشکلات مربوط به ماهیت ساختاری ماده (فوم متخلخل کامپوزیتی) را می‌توان در چند عامل دانست:

- (۱) کارایی و دقت بالای مدل مادی دشیپند- فلک و مطابقت بسیار خوب آن با داده‌های آزمایش فشار
- (۲) استفاده از یک معیار فرسایش مناسب برای پیش-بینی حالت شکست ماده

(۳) تولید فوم به روش ذوبی با کمک عامل فوم‌ساز که محصول آن یک فوم نسبتاً همگن از لحاظ توزیع چگالی موضعی و اندازه سلول‌ها است؛ همچنین فوم تولیدشده، با قابلیت چکش‌خواری<sup>۱</sup> و دارای ساختار سلول بسته<sup>۲</sup> بوده که برای کاربردهای جذب انرژی ضربه بسیار مناسب است. در مقایسه با سایر روش‌های تولید، حفره‌های فوم در روش مذکور کوچک‌ترند و لذا فضای خالی بزرگ در ساختار ماده، کمتر دیده می‌شود. در فرآیند تولید تلاش شده که تا حد ممکن، رفتار مکانیکی نمونه‌ها به یکدیگر نزدیک باشد.

<sup>۱</sup> Ductile

<sup>۲</sup> Closed-Cell

- sandwich plates under high-velocity impact. *Compos Struct* 93(9): 2392-2399.
- [21] Cho JU, Hong SJ, Lee SK, Cho C (2012) Impact fracture behavior at the material of aluminum foam. *Mat Sci Eng A* 539: 250-258.
- [22] Hosun C, Jaeung C (2014) Damage and penetration behavior of aluminum foam at various impacts. *J Central South Univ* 21(9): 3442-3448.
- [۲۳] ضیاء شماری م، خدارحمی ح، واحدی خ، پل مح (۱۳۹۲) بررسی تجربی و عددی نفوذ پرتابه صلب سرتخت در سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۱۳-۱: ۱۳(۵).
- [۲۴] جعفری س، س، فعلی س (۱۳۹۴) بررسی تحلیلی برخورد پرتابه استوانه‌ای با دماغه‌های مختلف به ورق‌های ساندویچی. *مجله مدل‌سازی در مهندسی* ۶۵-۷۷: ۱۳(۴۲).
- [۲۵] زمانی ا، لیاقت غ، شاهوردی ح (۱۳۹۱) مطالعه تحلیلی و عددی فروریزش فوم آلومینیوم در برابر ضربه صفحه‌ای سرعت بالا. *مجله علمی-پژوهشی مواد پزانرژی* ۶۲-۵۵: ۷(۱).
- [۲۶] ملاطقی ح، مظفری ه (۱۳۹۳) بررسی رفتار صفحه‌ای لانه‌زنبوری پرشده با فوم تحت شرایط شبه‌استاتیکی و دینامیکی با استفاده از روش عددی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۱۸۵-۱۷۷: ۱۴(۱۵).
- [۲۷] چوبینی م، لیاقت غ، پل مح (۱۳۹۴) بررسی تجربی و عددی جذب انرژی و تغییرشکل لوله‌های جدارنازک توخالی و توپر با هندسه مقاطع دایره و مربع تحت بار ضربه‌ای عرضی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۸۳-۷۵: ۱۵(۱).
- [۲۸] علوی‌نیا ع، کاظمی م (۱۳۹۴) بررسی تحلیلی ضربه سرعت‌بالا بر روی پانل‌های ساندویچی با هسته فوم و رویه‌های آلومینیومی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۲۳۹-۲۳۱: ۱۵(۶).
- [۲۹] علوی‌نیا ع، فرشاد ع (۱۳۹۳) بررسی تجربی و عددی تأثیر هندسه مقطع و فوم فلزی بر روی تغییرشکل و ویژگی‌های جذب انرژی لوله‌های جدارنازک. *مجله علمی-پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۶۳-۵۱: ۴(۱).
- [۳۰] آذرخش س، قمریان ع، خدارحمی ح (۱۳۹۵) تحلیل فروریزش محوری و مایل پوسته‌های مخروطی توخالی و تقویت‌شده با فوم تحت شرایط مرزی گیردار. *مجله علمی-پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۱۵۹-۱۳۹: ۶(۴).
- [۳۱] فراغت ح، احمدی بروغنی سی (۱۳۹۵) بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر روی پاسخ ضربه فوم آلومینیوم با رویکرد تحلیل آماری. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۲۰۶-۱۹۹: ۱۶(۱۰).
- [7] Ehlers W, Mullerschön H, Klar O (1999) On the behaviour of aluminum foams under uniaxial and multiaxial loading. *Proceedings of the Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures*, Bremen, Germany, pp. 255-262.
- [8] Deshpande VS, Fleck NA (2000) Isotropic constitutive models for metallic foams. *J Mech Phys Solids* 48(6-7): 1253-1283.
- [9] Miller RE (2000) A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behavior of foamed metals. *Int J Mech Sci* 42(4): 729-754.
- [10] Reyes A, Hopperstad OS, Berstad T, Langseth M (2004) Implementation of a Constitutive Model for Aluminum Foam Including Fracture and Statistical Variation of Density. *8th International LS-DYNA Users Conference*, Michigan, pp. 11-24.
- [11] Song HW, Fan ZJ, Yu G, Wang QC, Tobota A (2005) Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections. *Int J Solids Struct* 42(9-10): 2575-2600.
- [12] Gameiro CP, Cirne J (2007) Dynamic axial crushing of short to long circular aluminium tubes with agglomerate cork filler. *Int J Mech Sci* 49(9): 1029-1037.
- [13] Ahmad Z, Thambiratnam DP, Tan AC (2010) Dynamic energy absorption characteristics of foam-filled conical tubes under oblique impact loading. *Int J Impact Eng* 37(5): 475-488.
- [14] Bi J, Fang H, Wang Q, Ren X (2010) Modeling and optimization of foam-filled thin-walled columns for crashworthiness designs. *Finite Elem Anal Des* 46(9): 698-709.
- [15] Hanssen AG, Girard Y, Olovsson L, Berstad T, Langseth M (2006) A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels. *Int J Impact Eng* 32(7): 1127-1144.
- [16] Miranda V, Teixeira-Dias F, Pinho-da-Cruz J, Novo F (2010) The role of plastic deformation on the impact behaviour of high aspect ratio aluminium foam-filled sections. *Int J Nonlinear Mech* 45(5): 550-561.
- [17] Lu G, Shen J, Hou W, Ruan D, Ong LS (2008) Dynamic indentation and penetration of aluminium foams. *Int J Mech Sci* 50(5): 932-943.
- [18] Rajendran R, Moorthi A, Basu S (2009) Numerical simulation of drop weight impact behaviour of closed cell aluminium foam. *Mater Design* 30(8): 2823-2830.
- [19] Ivaiez I, Santiuste C, Sanchez-Saez S (2010) FEM analysis of dynamic flexural behavior of composite sandwich beams with foam core. *Compos Struct* 92(9): 2285-2291.
- [20] Ivaiez I, Santiuste C, Barbero E, Sanchez-Saez S (2011) Numerical modeling of foam-cored

- [37] American Society for Testing and Materials (2002) Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors, ASTM D 3763.
- [38] LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 971 R6.1 (2012) Livermore Software Technology Corporation.
- [39] J. O. Hallquist (2006) LS-DYNA Theory Manual. Livermore software technolog Corporation.
- [40] Ramachandra S, Kumar PS, Ramamurty U (2003) Impact energy absorption in an Al foam at low velocities. Scripta Mater 49(8): 741-745.
- [41] Li QM, Maharaj RN, Reid SR (2005) Penetration resistance of aluminium foam. Int J Vehicle Des 37(2-3): 175-183.
- [42] K. Mohan, T. H. Yip, S. Idapalapati, Z. Chen (2011) Impact response of aluminum foam core sandwich structures. Mat Sci Eng A 529: 94-101.
- [۳۲] فراغت ح، احمدی بروغنی سی (۱۳۹۵) ساخت و تجهیزسازی ماشین ضربه سقوطی کم‌سرعت جهت تعیین ظرفیت جذب انرژی در فوم کامپوزیتی با زمینه آلومینیوم. مجله مهندسی مکانیک مدرس ۲۲۸-۲۱۹: ۱۶(۷).
- [33] Szyniszewski ST, Smith BH, Hajjar JF, Schafer BW, Arwade SR (2014) The mechanical properties and modeling of a sintered hollow sphere steel foam. Mater Design 54: 1083-1094.
- [34] Reyes A, Hopperstad OS, Berstad T, Hanssen AG, Langseth M (2003) Constitutive modeling of aluminum foam including fracture and statistical variation of density. Eur J Mech A-Solid 22(6): 815-835.
- [35] Technical Committee ISO/TC 164 (2011) Compression test for porous and cellular metals-ISO 13314.
- [36] Standard Test Method: JIS (2008) Comprssion test of porous metals- JIS H 7902.