

## مطالعه تحلیلی و عددی فروریزش فوم آلومینیوم در برابر ضربه صفحه‌ای سرعت بالا

احسان زمانی<sup>1</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>2</sup>، حمیدرضا شاهرودی<sup>3</sup>

تهران - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ وصول: 89/12/11، تاریخ پذیرش: 90/1/20)

### چکیده

فروریزش دینامیکی فوم‌های آلومینیوم در برابر ضربه صفحه‌ای سرعت بالا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در ضربه صفحه‌ای، فوم در اثر فشار ناشی از برخورد ورق فلزی با خود فروریخته و متراکم می‌گردد. سرعت ابتدایی ورق می‌تواند با اعمال ایمپالس ناشی از انفجار بر روی سازه تأمین گردد. در تحقیق حاضر، محاسبه ضخامت فوم برای جذب کامل انرژی تخریبی صفحه ضربه‌زن رویی، بعنوان هدف اصلی مدنظر قرار گرفته و معادلات لازم در دو رژیم انتشار یک‌بعدی موج شوک و موج الاستوپلاستیک استخراج گشته‌اند. نتایج این حل تحلیلی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی انجام شده از همخوانی خوبی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: فوم آلومینیوم، ضربه صفحه‌ای، فروریزش دینامیکی، آنالیز شوک، موج شوک، موج الاستوپلاستیک.

### 1- مقدمه

شده که از آنها و یا سازه‌هایی که در ساختمان آنها از فوم استفاده شده است، به نحو وسیعی بعنوان سپرهای حفاظتی در برابر برخورد مستقیم اجسام متصادم و نیز امواج بلاست ناشی از انفجار استفاده شود. فروریزش فوم‌های آلومینیومی در فشارش استاتیکی مشتمل بر سه مرحله کاملاً مجزا است (شکل 1). خمش الاستیک دیواره سلول‌ها، باعث ظهور یک منطقه الاستیک خطی در ابتدای منحنی تنش کرنش مهندسی ماده می‌گردد. کرنش‌های بیشتر باعث می‌شود که تغییر شکل‌های محلی پلاستیکی که قبلاً به دور عیوب ساختاری فوم بوجود آمده بوده‌اند، گسترش یافته و در نهایت برای شکل‌دهی نوارها یا لایه‌هایی از سلول‌های فرو ریخته که در کل مقطع نمونه منتشر می‌شوند، مجتمع گردند [1-3].

یک ماده سلولی، از شبکه به هم پیوسته میله‌ها و صفحات جامد که به ترتیب، لبه‌ها و وجوه سلول‌ها را می‌سازند تشکیل یافته است. چنین موادی در طبیعت بسیار فراوان هستند؛ چوب، استخوان، چوب‌پنبه و سنگ‌های آذرین قدمتی به درازای آفرینش دارند. انسان نیز در دهه‌های اخیر نمونه‌های حاصل از ابتکار خود را به این مجموعه افزوده است که هانی‌کمب<sup>4</sup>، فوم‌های پلیمری و فوم‌های فلزی از آن دسته‌اند. فوم‌های فلزی، جدیدترین نسل فوم‌ها محسوب شده و هم‌اکنون بیشتر آنها بر پایه آلیاژهای آلومینیوم و نیکل ساخته می‌شوند [1]. جذب بالای انرژی ضربه در خلال فروریزش دینامیکی ساختار متخلخل و سلولی فوم‌های آلومینیومی، باعث

\* E-mail: ghlia530@modares.ac.ir

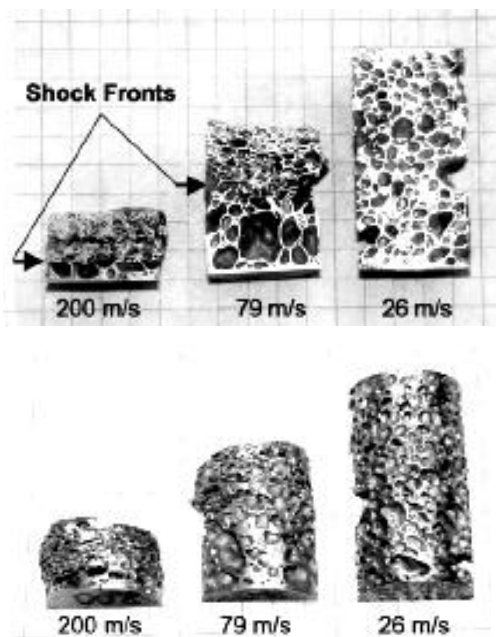
4- Honeycomb

1- دکتری

2- استاد

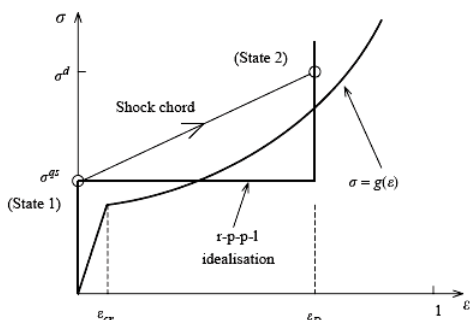
3- دانشیار

(همانند دومینو). لذا برخلاف بارگذاری استاتیکی که فروریزش سلول‌ها در نوارهای گسسته رخ می‌دهد، فروریزش پلاستیک در بارگذاری ضربه‌ای در محل «جبهه شوک» و به صورت پیوسته رخ داده و با سرعت حرکت موج شوک پیشروی می‌نماید [6].

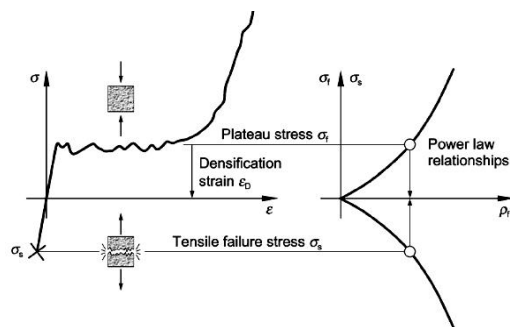


شکل 3- نحوه فروریزش سلول‌ها در بارگذاری ضربه‌ای، جبهه شوک در سرعت‌های بالای 79 m/s شکل گرفته است [7].

جهت مدل‌سازی انتشار موج شوک و تحلیل فروریزش فوم آلومینیوم در سرعت‌ها یا فشارهای فوق بحرانی، تا کنون دو مدل ارائه گردیده است. اولین مدل که بوسیله «تان<sup>1</sup>» ارائه گردیده، به اختصار (R-P-P-L<sup>2</sup>) نامیده شده و در شکل (4) نشان داده شده است [8].

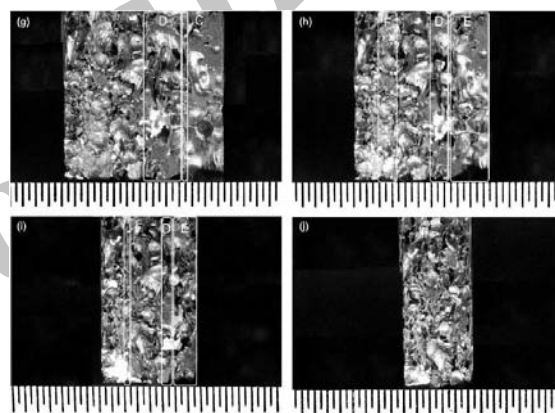


شکل 4- منحنی تنش- کرنش اسمی و مدل R-P-P-L [6].



شکل 1- منحنی تنش- کرنش فوم آلومینیومی در فشار و کشش [4].

هنگامی که دیواره‌های مقابل سلول‌ها در اولین نوار فروریزش پلاستیک به همدیگر می‌رسند، نمونه به صورت موضعی سفت‌تر شده و فروریزش در یک نوار غیر مجاور دیگر رقم خواهد خورد (شکل 2).



شکل 2- فروریزش نواری فوم آلومینیوم در فشار استاتیکی [5].

پس از پایان فروریزش پلاستیک سلول‌ها، ناحیه موسوم به چگالش فوم آغاز می‌شود که در آن، نزدیک‌تر شدن چگالی فوم ( $\rho_f$ ) به چگالی ماده سازنده خود ( $\rho_a$ ) باعث افزایش ناگهانی سطح تنش در نمونه می‌گردد. بر خلاف بارگذاری استاتیکی، الگوی فروریزش فوم‌های آلومینیومی در بارگذاری‌های ضربه‌ای پیچیده‌تر بوده و رفتار کاملاً متفاوتی از خود بروز می‌دهند (شکل 3). به نحوی که در سرعت‌های (یا فشارهای) فوق بحرانی، سلول‌هایی از فوم که درست بر روی سطح برخورد قرار دارند به سرعت فروریزش کرده و متراکم می‌شوند. با ورود تکانه به لایه مجاور، این لایه نیز همانند لایه اول با جذب قسمتی از انرژی برخورد، باقیمانده آن را به لایه مجاور منتقل کرده و این فرآیند تکراری و پی‌درپی که از سطح برخورد آغاز شده است، در امتداد محور نمونه پیشروی می‌نماید

1- Tan  
2- Rigid, perfectly-plastic, locking

## 2- فروریزش فوم - مدل سازی و استخراج معادلات

### 2-1- انتشار موج شوک

برای تعیین پارامترهای مهم فروریزش فوم، از روابط بقا استفاده شده است. همانگونه که قبلاً نیز بیان شد، در بارگذاری ضربه‌ای فوم‌های آلومینیومی در سرعت‌های (یا فشارهای) به اندازه کافی بالا، فروریزش سلول‌ها در محل جبهه شوک رخ می‌دهد. انتظار می‌رود که با پیشرفت حرکت صفحه رویی، فوم فروریزش نموده و با این عمل انرژی جنبشی برخورد را مستهلک و در نهایت حرکت صفحه ضربه‌زن را متوقف نماید. برای سادگی، یک برش یک بعدی از ضخامت سازه مرکب با پوسته با جرم واحد سطح  $m_f$  و لایه فوم با ضخامت اولیه  $C$  و چگالی نسبی  $\rho_c (= \rho_0 / \rho_a)$  مطابق شکل (6) در نظر گرفته و «تحلیل کلاسیک یک بعدی موج شوک» [9] بر روی آن انجام شده است. حل کلی مسئله، مستلزم محاسبه  $(V, h, t)$  است.

در خلال عبور موج شوک با سرعت  $V_\rho$  از هر مقطع فوم، حالات ترمودینامیکی اولیه ذرات ماده که عبارتند از چگالی  $\rho_2$ ، انرژی داخلی  $E_2$ ، فشار  $\sigma_2$  و سرعت ذره  $v_2$ ، بطور ناگهانی به حالات ثانویه  $\rho_1$ ،  $E_1$ ،  $\sigma_1$  و  $v_1$  تغییر یافته و یا به عبارت دقیقتر، پرش می‌کنند. پوسته رویی دارای سرعت اولیه  $V_0$  است و تنش‌های فشاری، مثبت در نظر گرفته می‌شوند.

در ابتدا معادلات بقای جرم و تکانه سیستم نوشته شده و همزمان شرایط  $\sigma_2(\rho_2, \rho_0) = 0$ ،  $v_1 = V$ ،  $v_2 = 0$ ،  $\rho_2 = \rho_0$  نیز اعمال می‌شوند:

$$\rho_1(V_\rho - V) = \rho_0 V_\rho \quad (1)$$

$$\rho_1(V_\rho - V)V = \sigma_1(\rho_1, \rho_0) \quad (2)$$

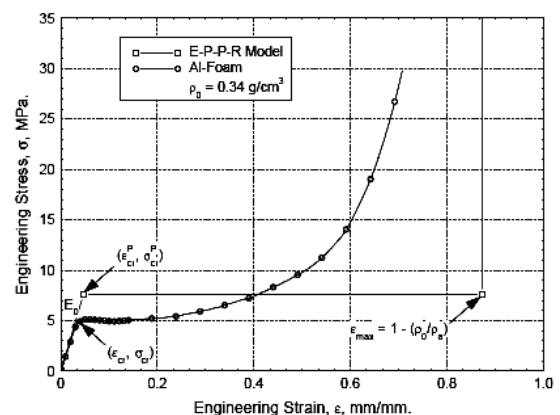
ترکیب بالا برای حذف  $V_\rho$ ، رابطه مهم زیر را بدست می‌دهد:

$$V^2 = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_1 \rho_0} \sigma_1(\rho_1, \rho_0) \quad (3)$$

برای تحلیل حرکت پوسته ضربه‌زن رویی، از قانون بقای تکانه مکانیکی کل استفاده شده است:

$$\left( m_f + \int_0^{h(t)} \rho_1(V, \rho_0) dh \right) V = m_f V_0 \quad (4)$$

مطابق با این مدل، در لحظه برخورد یا اعمال ایمپالس، سطح تنش در  $t = 0$  و در کل توده فوم تا  $\sigma^{qs}$  (تنش پایدار فروریزش استاتیکی) افزایش یافته و سپس با عبور موج شوک، تنش و کرنش ماده به  $\sigma^d$  (تنش دینامیکی ناشی از عبور شوک) و  $\epsilon_D$  (کرنش قفل شوندگی فوم) پرش می‌نمایند. مدل دوم که به نام «E-P-P-R<sup>1</sup>» شناخته می‌شود، بوسیله «لوپاتنیکوف<sup>2</sup>» و همکاران او و بر مبنای پایستار ماندن انرژی جذب شده توسط فوم ارائه گردیده است. بر اساس این مدل، چگالی انرژی واقعی جذب شده بر واحد حجم فوم با آنچه توسط این مدل محاسبه می‌شود برابر است [7].



شکل 5- منحنی تنش-کرنش اسمی و مدل E-P-P-R [7].

دو تفاوت عمده بین این مدل و مدل قبلی وجود دارد: اولاً به جهت فرض الاستیک در ابتدای تغییر شکل، موج الاستیک پیشرو با سرعتی ثابت در فوم منتشر می‌شود که برخلاف مدل اول کاملاً با فیزیک مسئله سازگار بوده و امکان تفکیک دو رژیم انتشار موج شوک و الاستوپلاستیک را فراهم می‌آورد. ثانیاً در این مدل فرض می‌شود که چگالی فوم پس از عبور موج شوک تا چگالی فلز سازنده بالا رفته و حداکثر کرنش ممکن  $\epsilon_{max}^e = (1 - \rho_0 / \rho_a)$  حاصل می‌گردد. این مدل به همراه منحنی واقعی تنش-کرنش یک فوم آلومینیومی در شکل (5) نشان داده شده است. آنچه تحقیق حاضر را از دیگر مطالعات مشابه متمایز می‌نماید، تشریح موشکافانه پدیده انتشار موج شوک و تنزل آن به یک موج الاستوپلاستیک با استفاده از مدل دوم است. همچنین معیارهای لازم برای تبدیل پیوسته رژیم انتشار موج شوک، موج الاستوپلاستیک و موج الاستیک به درستی بیان شده‌اند.

$$h(t) = \frac{\rho_0 L}{\rho_a - \rho_0} \left( \sqrt{1 + 2 \frac{V_0 t}{L}} - 1 \right) \quad (12)$$

$$\sigma_1(t) = \frac{\rho_0 V_0^2}{\varepsilon_{\max} (1 + 2V_0 t/L)} \quad (13)$$

شایان حداکثر توجه است که شوک، یک پدیده فراصوتی است و یک موج تنش الاستوپلاستیک تنها در شرایطی به یک موج شوک تبدیل می‌شود که سرعت آن از سرعت صوت محیط انتشار بیشتر باشد. مدل یک‌بعدی ارائه شده نیز بر همین مبنا بدست آمده است؛ یعنی با توجه به معادلات (1) و (10) باید:

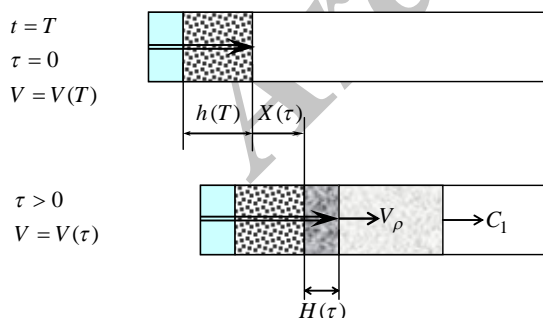
$$V_\rho = \frac{\rho_a}{(\rho_a - \rho_0)} \times \frac{V_0}{\sqrt{1 + 2V_0 t/L}} > C_1 \quad (14)$$

که  $C_1$  معرف سرعت صوت در فوم بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید [10]:

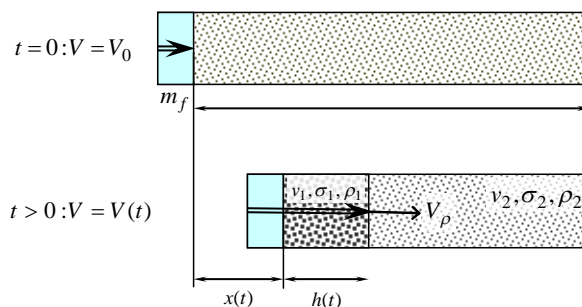
$$C_1 = \sqrt{E/\rho_0} \quad (15)$$

## 2-2- انتشار موج الاستوپلاستیک

با استهلاک انرژی ضربه و نیز انتشار «موج باربردار<sup>1</sup>»، موج شوک به تدریج جبهه تیز<sup>2</sup> خود را از دست داده و با کاهش قله فشار، در ابتدا به یک «موج الاستوپلاستیک» و سپس به یک «موج الاستیک» تبدیل می‌شود. جهت تفکیک دو رژیم انتشار موج پلاستیک و موج الاستوپلاستیک، ضروری است تا آغاز انتشار موج دوم مطابق شکل (7) از مبدأ زمان و مکان جدیدی سنجیده شود.



شکل 7- برشی با سطح مقطع واحد از سازه مرکب مورد بررسی تحت عبور موج الاستوپلاستیک.



شکل 6- برشی با سطح مقطع واحد از سازه مرکب مورد بررسی تحت عبور شوک.

مشق گیری از معادله (4)، استفاده از قضیه بنیادی حساب انتگرال و نیز استفاده ترکیبی از معادلات بقاء، دو معادله زیر را بدست می‌دهد که به همراه معادله (3)، حل کامل مسأله را ارائه می‌کنند:

$$h(V) = -m_f V_0 \int_{V_0}^V \frac{dV}{\rho_1(V, \rho_0) V^2} \quad (5)$$

و

$$t = -m_f V_0 \int_{V_0}^V \frac{\rho_1(V, \rho_0) - \rho_0}{\rho_0 \rho_1(V, \rho_0) V^3} dV \quad (6)$$

همانگونه که مشاهده می‌شود، حل صریح، مشکل و پیچیده است و به پاسخ‌هایی به فرم انتگرالی منتهی می‌گردد که عملاً ارزش کاربردی آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پیچیدگی می‌تواند با استفاده از مدل معتبر (E-P-P-R) و فرض اینکه فوم در محل جبهه شوک به حداکثر فشردگی ممکن و چگالی ماده سازنده خود (در اینجا آلومینیوم) می‌رسد ساده‌تر گردد. لذا با فرض  $\rho_1 = \rho_a$ ، معادله (4) ساده‌تر بازنویسی می‌شود:

$$\left( m_f + \frac{\rho_a \rho_0}{\rho_a - \rho_0} x \right) \dot{x} = m_f V_0 \quad (7)$$

که انتگرال‌گیری از طرفین آن و نیز تعریف پارامتر طول مشخصه  $L = \frac{(\rho_a - \rho_0) m_f}{\rho_a \rho_0}$  نتیجه می‌دهد:

$$x^2 + 2Lx - 2LV_0 t = 0 \quad (8)$$

و از حل آن، سلسله مجهولات مسئله بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$x(t) = L \left( \sqrt{1 + 2 \frac{V_0 t}{L}} - 1 \right) \quad (9)$$

$$V(t) = \dot{x}(t) = \frac{V_0}{\sqrt{1 + 2V_0 t/L}} \quad (10)$$

$$a(t) = \ddot{x}(t) = -\frac{V_0^2}{L \sqrt{(1 + 2V_0 t/L)^3}} \quad (11)$$

1- Unloading Wave  
2- Sharp

$$\left[ \frac{\rho_a h(T)}{m_f} + 1 + \frac{X}{L} \right] \dot{X} - \frac{\varepsilon_{cr} C_1}{L} X + \frac{\sigma_{cr}}{m_f} \tau = \quad (18)$$

$$V(T) \left( 1 + \frac{\rho_a h(T)}{m_f} \right)$$

که یک معادله دیفرانسیل غیرخطی مرتبه اول با شرط اولیه ( $X=0$ ;  $\tau=0$ ) و حل صریح ناممکن بوده و باید بصورت عددی حل گردد. با اتلاف بیشتر انرژی ضربه، دیری نمی‌پاید که موج الاستوپلاستیک نیز به یک موج الاستیک تنزل یافته و قدرت تخریبی خود را بطور کامل از دست می‌دهد. ضروری است که معیاری برای این تنزل ارائه گردد که بسیار مشابه معیار تنزل شوک به موج الاستوپلاستیک است؛ بدین معنی که مشابه رابطه (14)، موج الاستوپلاستیک تا جایی منتشر می‌شود که سرعت انتشار بخش پلاستیک آن ( $V_p$ )، شرط زیر را ارضاء نماید:

$$V_p(\tau) > C_2 \quad (19)$$

که  $C_2$  معرف سرعت صوت در ناحیه تنش پایدار منحنی تنش- کرنش فوم است و مشابه با  $C_1$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [11 و 12]:

$$C_2 = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \frac{(\sigma_d - \sigma_{cr})}{(\varepsilon_d - \varepsilon_{cr})}} \quad (20)$$

$\sigma_d$  و  $\varepsilon_d$  به ترتیب معرف تنش و کرنش در آغاز ناحیه چگالش فوم می‌باشند.

به این منظور لحظه تبدیل رژیم اول به دوم با  $t=T$  مشخص شده و پس از آن زمان با  $\tau$  سنجیده می‌شود. در موج الاستوپلاستیک، تنش در ماده با گذر موج پلاستیک تا سطوح بالاتر از تنش فروریزش افزایش می‌یابد؛ با این توضیح که سرعت آن از سرعت صوت در فوم کمتر است و بنابراین یک «موج پیشتاز الاستیک<sup>1</sup>» با سرعت  $C_1$  در جلوی موج پلاستیک منتشر شده و سطح تنش ماده را تا قبل از درنوردیده شدن توسط آن، تا  $\sigma_{cr}$  که آستانه فروریزش فوم است افزایش می‌دهد.

با این توضیح، مومنتوم جرم فزاینده محصور در بین دو موج برابر است با:

$$P_f = \rho_{cr} \varepsilon_{cr} C_1 \left( C_1 \tau - \int_0^\tau V_p d\tau \right) \quad (16)$$

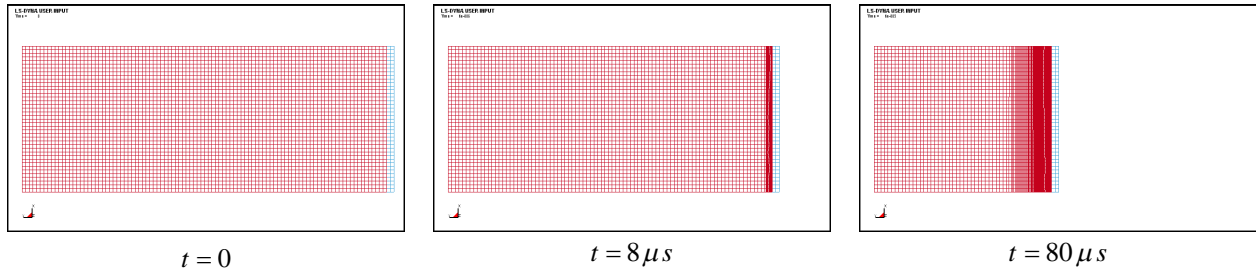
با استفاده از دو معادله (4) و (16) و اعمال مدل (E-P-P-R)، موازنه مومنتوم کل سیستم را نیز می‌توان بصورت زیر محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} & [m_f + \rho_a h(T) + \rho_a H(\tau)] V(\tau) + \\ & \rho_{cr} \varepsilon_{cr} C_1 \left( C_1 \tau - \int_0^\tau V_p d\tau \right) = \\ & [m_f + \rho_a h(T)] V(T) \end{aligned} \quad (17)$$

که  $T$  معرف زمان پایان انتشار موج پلاستیک و تبدیل آن به موج الاستوپلاستیک بوده و پس از آن زمان با  $\tau$  سنجیده می‌شود. با استفاده مجدد از طول مشخصه و اتخاذ تقریب  $\rho_{cr} \cong \rho_0$  می‌توان این معادله را بصورت بعدی ساده نمود:

جدول 1- پارامترهای مدل مواد استفاده شده در شبیه‌سازی [7].

فوم آلومینیوم MAT_HONEYCOMB	$\rho_0$ ( $Kg/m^3$ )	$E_0$ (MPa)	$\nu_{f0}$	$\varepsilon_{cr}^p$	$\sigma_{cr}^p$ (MPa)	$\varepsilon_{max}$
	370	248	0.137	0.008	4.03	0.863
ورق آلومینیوم MAT_ELASTIC	E (MPa)	$\rho$ ( $Kg/m^3$ )	$\nu$			
	70e3	2700	0.285			



$t = 0$   
مدل المان محدود

$t = 8 \mu s$   
فروریزش المانها در محل جبهه شوک و تراکم آنها در پشت شوک

$t = 80 \mu s$   
تشکیل موج الاستوپلاستیک و کاهش تدریجی تراکم المانها پس از زوال موج شوک

شکل 8- مراحل فروریزش فوم در سرعت برخورد  $V_0 = 1000 m/s$ .

### 3- شبیه‌سازی المان محدود

مراحل شکل‌گیری موج شوک، فروریزش فوم در محل جبهه شوک و تبدیل موج شوک به یک موج الاستوپلاستیک برای سرعت ضربه اولیه  $V_0 = 1000 m/s$  در شکل (8) نشان داده شده است. همانطور که پیداست، پس از برخورد در ابتدا یک موج شوک قوی در فوم منتشر می‌شود که نتیجه آن فروریزش لحظه‌ای و بلادرنگ المانها در محل جبهه تیز شوک است. به تدریج و با فروریزش لایه‌های بیشتری از ماده، موج شوک به موج الاستوپلاستیک تنزل می‌یابد. کاملاً واضح است که فروریزش المانها در خلال عبور این موج با الگوی فروریزش در جبهه شوک متفاوت است؛ بدین معنی که بجای فروریزش ناگهانی از الگویی تدریجی پیروی می‌کنند.

دو منحنی تحلیلی و عددی سرعت صفحه رویی با سرعت اولیه  $V_0 = 1000 m/s$  در شکل (9) نشان داده شده‌اند. همانطور که پیداست دو منحنی نزدیکی بسیار مطلوبی را به نمایش گذارده‌اند؛ بخصوص برای قسمتهای ابتدائی که مربوط به رژیم انتشار شوک است، این نزدیکی به کمال رسیده است.

فرآیند تدریجی تنزل موج شوک به موج الاستوپلاستیک را نیز می‌توان بخوبی در شکل (10) مشاهده نمود. همانگونه که پیداست منحنی سرعت نقطه ابتدائی که در فاصله اولیه 0.5mm از محل اعمال ضربه قرار دارد، آغازی بسیار تیز و ناگهانی دارد که بهترین شاهد بر گذر موج شوک از این نقطه است. به تدریج و با فاصله گرفتن از این نقطه که به معنی تنزل تدریجی موج شوک به موج الاستوپلاستیک است، منحنی‌های سرعت نیز افتاده‌تر شده و ذرات فوم با شیب ملایمتر و در بازه زمانی بزرگتری سرعت می‌گیرند.

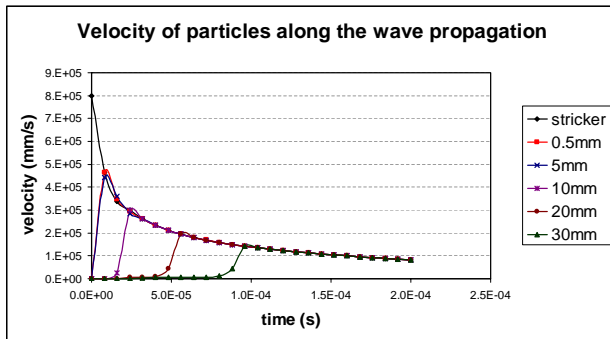
توجه بیشتر به قسمت آغازین سه منحنی آخر، نکته ظریفی را روشن می‌سازد. برای وضوح بیشتر، نمودار آخری مجدداً و با مقیاسی بزرگتر در شکل (11) نشان داده شده است.

شبیه‌سازی عددی ضربه صفحه‌ای بر روی فوم‌های آلومینیوم با استفاده از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA 971 به انجام رسیده است. مدل هندسی تولید شده مشتمل بر یک بلوک فومی با پوشش ورق آلومینیوم است که شرط تماسی سطح به سطح بین آنها تعریف گردیده است. سرعت ضربه صفحه آلومینیومی بعنوان شرط اولیه تعریف و وجه مقابل به این صفحه بر روی بلوک فوم، بعنوان شرط مرزی گیردار شده است. نوع مدل ماده استفاده شده برای دو جزء مدل و مقدار عددی پارامترهای آنها در جدول (1) ارائه شده است.

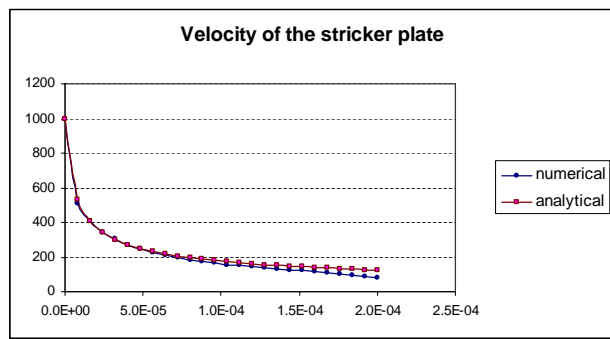
مدل ماده MAT\_HONEYCOMB توانائی مدلسازی رفتار فوم بصورت ایزوتروپ و یا اورتوتروپ را داراست؛ اما پس از فشارش فوم تا کسر حجمی نهایی خود ( $v_{f0}$ ) که برابر با نسبت حجم نهایی به حجم اولیه آن است، فوم بصورت ماده‌ای با رفتار الاستیک، کاملاً پلاستیک در نظر گرفته شده و پارامترهای شبیه به ورق آلومینیوم برای ادامه محاسبات بکار برده می‌شود.

### 4- نتایج و بحث

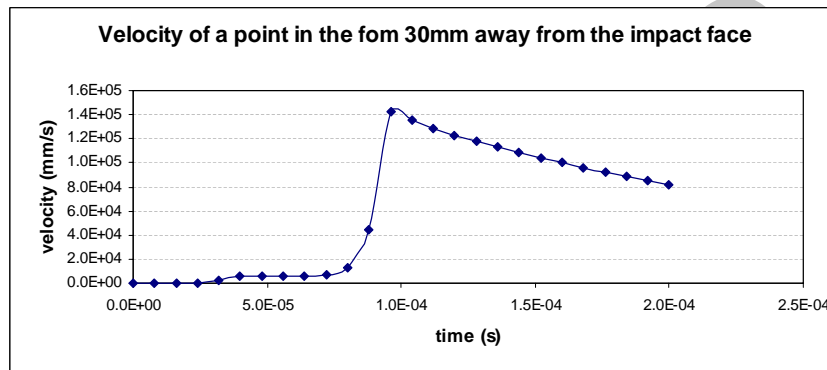
برخورد پوسته آلومینیومی به ضخامت 1mm و چگالی سطحی  $m_f = 2.7 kg/m^2$  با بلوک فوم آلومینیوم به ضخامت 50mm و مشخصات  $\rho_0 = 370 kg/m^3$ ،  $E_0 = 248 MPa$ ،  $\sigma_{cr} = 2.31 MPa$ ،  $\varepsilon_d = 0.51$ ،  $\sigma_d = 7.4 MPa$ ،  $\varepsilon_{cr} = 0.008$  (P-P-R) برابر با  $\varepsilon_{cr}^p = 0.013$  و  $\sigma_{cr}^p = 4.03 MPa$ ،  $\varepsilon_{max} = 0.863$ ، پارامتر طول مشخصه مدلسازی گردیده است. برای ترکیب انتخاب شده، پارامتر طول مشخصه برابر با  $C_1 = 819 m/s$  و  $C_2 = 166 m/s$  خواهد بود. شبیه‌سازی برای سرعت‌های اولیه مختلف به انجام رسیده است.



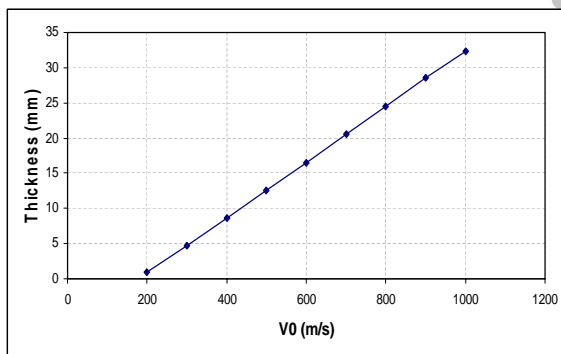
شکل 10- منحنی‌های سرعت نقاط مختلف فوم در سرعت ضربه  $V_0=800m/s$ ، اعداد مندرج در راهنمای نمودار، معرف فاصله اولیه آنها از صفحه ضربه‌زن است.



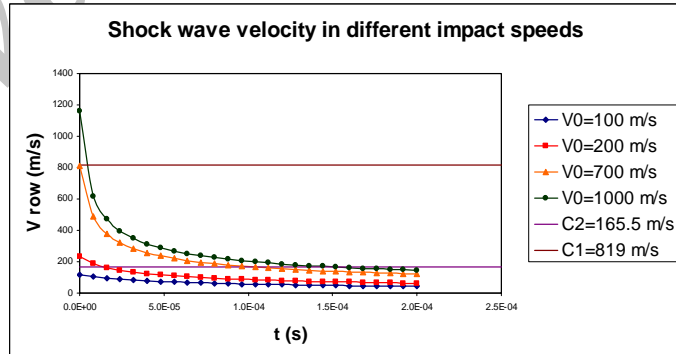
شکل 9- منحنی‌های تحلیلی و عددی سرعت صفحه رویی با سرعت برخورد  $V_0=1000m/s$ .



شکل 11- منحنی سرعت نقطه واقع در فاصله اولیه 30mm از صفحه ضربه‌زن با سرعت ضربه  $V_0=800m/s$ .



شکل 13- ضخامت فوم ( $L=0.0063$ ) مورد نیاز برای جذب کامل انرژی تخریبی ضربه با سرعت اولیه  $V_0=1000m/s$ .



شکل 12- منحنی سرعت شوک برای سرعت‌های ضربه گوناگون و  $L=0.0063$ .

این تحقیق، سرعت ذره با استفاده از رابطه آکوستیک خطی برابر با  $v_p = 6.55m/s$  محاسبه می‌شود که با توجه به شکل (11)، از همخوانی بسیار خوبی با پیش‌بینی نرم‌افزار برخوردار است. منحنی‌های سرعت انتشار موج شوک برحسب سرعت‌های برخورد مختلف، بر اساس نتایج حاصل از مدل تحلیلی توسعه داده شده (معادله 14) در شکل (12) نشان داده شده است. بر اساس توضیحات

همانطور که به خوبی پیداست، سرعت ذرات در رژیم انتشار امواج الاستوپلاستیک در طی دو مرحله افزایش می‌یابد، نخست با گذر موج الاستیک (شکل 7) سرعت ذرات مطابق با رابطه معروف آکوستیک خطی  $v_p = \epsilon_{cr} C_1$  افزایش می‌یابند. این سرعت پایدار می‌ماند تا با گذر موج پلاستیک و افزایش تنش تا سطوح بالاتر از تنش تسلیم ماده، مرحله دوم افزایش سرعت رخ دهد. برای فوم مورد استفاده در

رضایت بخش می باشد.

## مراجع

- [1] Ashby, M. F.; Evans, A.; Fleck, N. A.; Gibson, L. J.; Hutchinson, J. W.; Wadley, H. N. "Metal Foams- A Design Guide."; Butterworth Heinemann: USA, 2000.
- [2] Gibson, L. J. "Properties and Application of Metallic Foams."; In Comprehensive Composite Materials; Elsevier Science: Vol. 3, pp 821-842, 2000.
- [3] Tan, P. J.; Reid, S. R.; Harrigan, J. H.; Zou, Z.; Li, S. "Dynamic Compressive Strength Properties of Aluminum Foams. Part I- Experimental Data and Observations."; J. Mech. Phys. Solids 2005, 53, 2174-2205.
- [4] Hanssen, A. G.; Enstock, L.; Langseth, M. "Close-Range Blast Loading of Aluminum Foam Panels."; Int. J. Impact Eng. 2002, 27, 593-618.
- [5] Ruan, D.; Lu, G.; Chen, F. L.; Siores, E. "Compressive Behavior of Aluminum Foams at Low and Medium Strain Rates."; Compos. Struct. 2002, 57, 331-336.
- [6] Tan, P. J.; Reid, S. R.; Harrigan, J. H.; Zou, Z.; Li, S. "Dynamic Compressive Strength Properties of Aluminum Foams. Part II- Shock Theory and Comparison with Experimental Data and Numerical Models."; J. Mech. Phys. Solids 2005, 53, 2206-2230.
- [7] Lopatnikov, S. L.; Bazle, A. G.; Krauthausen, C.; Gillespie, J. W.; Gudan, M.; Hall, I. W. "Dynamics of Metal Foam Deformation During Taylor Cylinder-Hopkinson Bar Impact Experiments."; Compos. Struct. 2003, 61, 61-71.
- [8] Tan, P. J.; Harrigan, J. J.; Reid, S. R. "Inertia Effects in Uniaxial Dynamic Compression of Closed Cell Aluminum alloy Foam."; Mater. Sci. Technol. 2002, 18, 480-488.
- [9] Cooper, P. W. "Explosive Engineering."; Wiley-VCH: USA, 1991.
- [10] Johnson, W. "Impact Strength of Materials."; Edward Arnold Publisher: London, 1972.
- [11] Karagiozova, D.; Nurick, G. N. "Response of Flexible Sandwich-Type Panels to Blast Loading."; Compos. Sci. Technol. 2009, 69, 754-763.
- [12] Li, Q. M.; Reid, S. R. "About One-Dimensional Shock Propagation in a Cellular Material."; Int. J. Impact. Eng. 2006, 32, 1898-1906.

ارائه شده در بخش تشریح مدل تحلیلی، دستگاه مختصات ارائه شده در این شکل را می توان به سه ناحیه مجزا تقسیم نمود: ناحیه متعلق به انتشار امواج قوی شوک که نوار بالای کران  $C_2 = 819m/s$  را در برمی گیرد، ناحیه متعلق به انتشار امواج الاستوپلاستیک که نوار مابین  $C_1$  و  $C_2$  را شامل می شود و در نهایت ناحیه متعلق به انتشار امواج الاستیک. با این توضیح، مشخص است که برای ترکیب فوم و صفحه انتخاب شده، امواج قوی شوک تنها به شرط اعمال سرعت ضربه بالاتر از  $V_0 = 700m/s$  منتشر می شوند و این بدان معنیست که سرعتهای ضربه کمتر از این مقدار و بالاتر از حدود  $V_0 = 150m/s$  تنها قادر به انتشار امواج الاستوپلاستیک در فوم خواهند بود. بنابراین تحلیل بخش (1-2) تنها برای نوار بالائی و تحلیل ارائه شده در بخش (2-2) تنها برای نوار میانی اعتبار دارند. آنچه به تحقیق ارائه شده جنبه کاربردی می بخشد، حصول توانائی لازم برای طراحی پانل ها یا سپرهای محافظتی در برابر بارگذاری های ضربه ای و انفجاری است. بدین معنی که می توان با محاسبه حداقل ضخامت فوم، به جذب کامل انرژی تخریبی ضربه نایل گردید. نتیجه گیری کلی مقاله حاضر و هدف اصلی آن در شکل (13) ارائه شده است.

## 5- نتیجه گیری

در این مقاله، مدلی تحلیلی برای توصیف فرآیند فروریزش فوم های آلومینیومی با پوسته فلزی دارای سرعت اولیه ارائه گردیده است. مدل مذکور آمده بر اساس «آنالیز شوک» و استفاده از مدل معتبر (E-P-P-R) بنا گردیده و در آن دو رژیم انتشار «موج شوک» و «موج الاستوپلاستیک» کاملاً از یکدیگر تمیز داده شده اند که خود از نقاط قوت این مطالعه به شمار رفته و نسبت به تحقیقات قبلی، یک گام به جلو محسوب می گردد. بدیهی است که این تفکیک، دقت بالاتری را در تبدیل یک واقعیت فیزیکی به مدل ریاضی به ارمغان آورده و این توانایی را بوجود خواهد آورد که طراح بتواند متناسب با سطح تهدید پیش بینی شده، سپر حفاظتی مطمئنی را طراحی نماید. نتایج حاصل از این مدل تحلیلی با استفاده از شبیه سازی المان محدود در محیط نرم افزار LS-DYNA، درستی آزمایی و اعتبارسنجی گردید که نتایج آن کاملاً