

# عملکرد فوم‌های صلب پلی‌یورتان در کاهش خسارات سازه‌ی ناشی از برخورد پرتابه

Research Note

سید محمدحسین اندامی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

حمید توبچی نژاد\* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

در این مقاله عملکرد فوم‌های صلب پلی‌یورتان به کار رفته در زره‌های کامپوزیتی برای کاهش آثار ضربه‌ی وارده بر زره به صورت عددی -- با استفاده از روش اجزا محدود -- مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، بررسی پارامترهای مهم طراحی همانند ضخامت، چگالی فوم و نیز سرعت برخورد (نرخ کرنش) پرتابه بر عملکرد زره است. در زره‌های مورد بررسی که دارای یک ساختار دولایه‌ی فز و فوم هستند از ۴ فوم مختلف با چگالی‌های ۸۰، ۱۶۰، ۲۸۸ و ۳۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب در ۶ ضخامت متفاوت استفاده شده است. همچنین رفتار هر یک از زره‌ها تحت اثر برخورد پرتابه‌ی با سرعت‌های متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته است. پس از بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر رفتار زره، مقادیر بهینه‌ی چگالی و ضخامت فوم برای مهار ضربات وارده تعیین شده است.

واژگان کلیدی: فوم پلی‌یورتان، چگالی، ضخامت، برخورد پرتابه، زره کامپوزیت، نرخ کرنش.

hosein.andami@yahoo.com  
 h.toopchinezhad@razi.ac.ir

## ۱. مقدمه

نیز در حد فاصل لایه‌ی بیرونی و لایه‌ی جاذب استفاده می‌شود (مانند جلیقه‌های ضد گلوله‌ی چندلایه).<sup>[۶]</sup> چنان‌که اشاره شد، لایه‌ی داخلی زره در جذب و استهلاک انرژی امواج انفجار یا ضربه نقش عمده‌ی دارد. فوم‌ها از جمله مصالحی هستند که با توجه به ساختار متخلخل‌شان عملکرد مناسبی در زمینه‌ی جذب انرژی از خود نشان داده‌اند.<sup>[۶-۹]</sup> کاربرد فوم‌های پلیمری نظیر فوم‌های پلی‌استایرین و پلی‌یورتان با توجه به هزینه‌ی کم و وزن سبک، نسبت به فوم‌های فلزی از مزیت‌هایی برخوردار است. اندوو همکاران<sup>[۱۰]</sup> با بررسی تأثیر استفاده از مواد متخلخل در کاهش بیشترین اضافه‌فشار ناشی از موج شوک انفجار نشان دادند که به علت تبدیل شدن موج انفجار به امواج فشاری در اثر اندرکنش آن با فضای متخلخل سه‌بعدی، کاهش فشار در این محیط‌ها در مقایسه با هوا مدت زمان بیشتری به طول می‌انجامد. همچنین ماسه و فوم پلی‌یورتان، بیشترین اضافه‌فشار موجود در هوا بر اثر انفجار را به ترتیب ۶۰ و ۹۵ درصد کاهش دادند. مصطفی و همکاران<sup>[۱۱]</sup> با بررسی عملکرد فوم‌های سخت پلی‌یورتان مسلح در کاهش خسارات ناشی از انفجار، نشان دادند که فوم‌های پلی‌یورتان در حفاظت از ورق شاهد توانایی بالایی دارد. ماهوی و همکاران<sup>[۱۲]</sup> نیز عملکرد فشاری چهار نوع فوم سلول بسته‌ی پلی‌یورتان با چگالی‌های ۲۴، ۲۹، ۳۸ و ۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب را در ساختار یک جلیقه‌ی نجات مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فوم پلی‌یورتان می‌تواند به‌عنوان یک لایه‌ی جاذب انرژی، عملکرد مناسبی در ساختار یک جلیقه‌ی از خود نشان دهد.

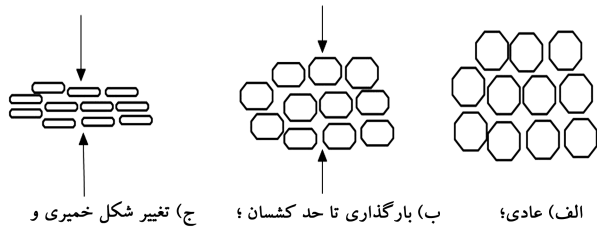
تأمین امنیت سازه‌های نظامی، شهری و صنعتی از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. به همین دلیل یافتن راهکاری برای محافظت از این قبیل سازه‌ها در برابر عوامل مخربی نظیر برخورد پرتابه‌ی سرعت بالا یا انفجار ضروری به نظر می‌رسد. از میان راهکارهای گوناگون ارائه شده در این زمینه، مفهوم سازه‌های زرهی فداشونده<sup>[۱۳]</sup> به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آنها، از قبیل نصب ساده، رفتار قابل پیش‌بینی و... با استقبال بیشتری روبه‌رو شده است. زره‌های فداشونده انواع گوناگونی دارند، در نوع خاصی از این زره‌ها، با نام زره‌های چندلایه، ساختار اصلی از دو قسمت تشکیل می‌شود:<sup>[۱]</sup> رویه‌ی سخت بیرونی و لایه‌ی جاذب داخلی؛ عملکرد رویه‌ی بیرونی در هنگام انفجار و در قبال برخورد، با هم متفاوت است. هنگام انفجار، وظیفه‌ی رویه‌ی سخت بیرونی پخش هرچه یک‌نواخت‌تر فشار ناشی از امواج انفجار است. در حالی که در صورت برخورد یک پرتابه با زره فداشونده، وظیفه‌ی اصلی این لایه خرد کردن پرتابه و ممانعت از ورود آن به لایه‌ی جاذب داخلی زره است. در هر دو مورد وظیفه‌ی لایه‌ی جاذب این است که با انجام تغییر شکل‌های خمیری زیاد، سهم قابل توجهی از انرژی ناشی از برخورد یا انفجار را جذب و مستهلک کند.<sup>[۴-۶]</sup> اگرچه در هنگام برخورد پرتابه با زره، لایه‌ی سخت بیرونی علاوه بر جلوگیری از نفوذ پرتابه تا حد زیادی با تمرکز فشار در نقطه‌ی برخورد مقابله می‌کند، در مواقعی که فشار قابل تحمل توسط هدف پایین باشد (همانند بدن انسان)، از یک لایه‌ی پخش‌کننده‌ی فشار

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴/۱۰/۱۳۹۵، اصلاحیه ۱۳/۳/۱۳۹۶، پذیرش ۲۲/۳/۱۳۹۶.

DOI:10.24200/J40.2018.6420

هدف اصلی مقاله‌ی حاضر بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد فوم‌های پلی‌یورتان



شکل ۲. ساختار سلولی فوم. (الف) عادی؛ (ب) بارگذاری تا حد کشسان؛ (ج) تغییر شکل خمیری و فروریختگی دیواره‌های سلولی.

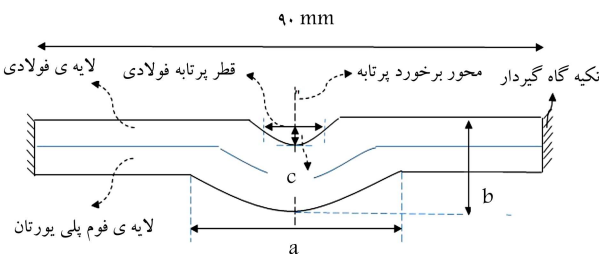
شکل ۲. ساختار سلولی فوم.

می‌شود، دیواره‌ها فرو می‌ریزد و سلول‌ها بسته می‌شوند. بسته شدن هر سلول یک تغییر شکل خمیری غیر قابل بازگشت است که مستلزم صرف انرژی است. با توجه به تعداد بسیار زیاد این سلول‌ها در ساختار فوم، برای فروریزی دیواره‌ها و بسته شدن همه‌ی سلول‌ها انرژی بسیار زیادی لازم خواهد بود که فوم را قادر می‌سازد به‌عنوان یک جاذب انرژی، عملکرد بسیار مناسبی از خود به نمایش بگذارد.

### ۳. آزمایشات مورد بررسی

در نوشتار حاضر برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری، از آزمایشات انجام شده توسط Wai<sup>[۸]</sup> در آزمایشگاه دانشگاه سانتا باربارا در کالیفرنیا آمریکا استفاده شده است. هدف از انجام این آزمایشات بررسی تأثیر استفاده از یک لایه‌ی متخلخل در ساختار یک زره چندلایه برای بهبود عملکرد زره بوده است. در مجموعه آزمایشات انجام شده توسط Wai، ابتدا هر یک از لایه‌های زره در قالب صفحات مربعی به ابعاد  $100 \times 100$  میلی‌متر آماده شده است. سپس با توجه به نوع و ترتیب لایه‌های مورد نیاز در هر آزمایش، صفحات مذکور با استفاده از نوعی چسب اپوکسی مخصوص با گرانبوی پایین به یکدیگر چسبانده شده و برای مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق، تحت فشار ثابت عمود بر صفحات قرار گرفته‌اند تا به خوبی به یکدیگر چسبند. پس از آماده شدن صفحات، آزمایش برخورد پرتابه روی آنها انجام شده است.

با توجه به هدف این مقاله، از میان مجموعه آزمایشات انجام شده، آزمایش شماره ۱۰ که شامل یک لایه‌ی فولادی در جلو و یک لایه‌ی پلی‌یورتانی در پشت آن است انتخاب و شبیه‌سازی شده است. در آزمایش مذکور پرتابه‌ی از جنس فولاد AISA-A۲ به طول ۷۵/۰ اینچ با سرعت ۵۰۹ متر بر ثانیه به زره دولایه از جنس فولاد AISA-۴۱۴۰ (لایه‌ی اول) و فوم پلی‌یورتان با چگالی ۳۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب (لایه‌ی دوم)، برخورد می‌کند. پس از برخورد، ابعاد فرورفتگی ایجاد شده توسط پرتابه در زره اندازه‌گیری و گزارش شده است (شکل ۳).



شکل ۳. ابعاد فرورفتگی ایجاد شده در زره دولایه (فولاد - فوم پلی‌یورتان) پس از برخورد پرتابه با آن.

به‌عنوان لایه‌ی جاذب در ساختار یک زره فداشونده است. برای این منظور تأثیر پارامترهایی نظیر چگالی و ضخامت فوم و همچنین سرعت برخورد پرتابه بر عملکرد یک زره دو لایه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

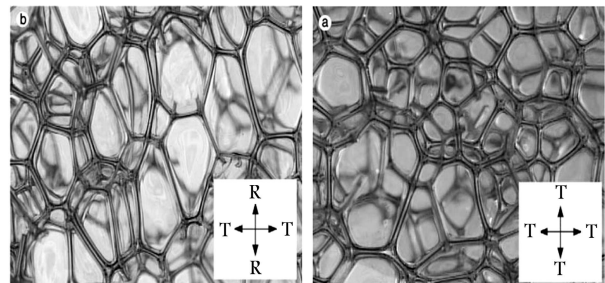
## ۲. فوم پلی‌یورتان

### ۱.۲. ماهیت شیمیایی و ساختار

پلی‌یورتان‌ها پلیمرهایی هستند با پیوندهای یورتانی که از واکنش بین دی‌ایزوسیانات‌ها با پلی‌ال‌ها، عوامل پف‌زا و کاتالیزورهای مشخص تولید می‌شوند. پلی‌ال یک پلیمر با وزن مولکولی کم با گروه‌های انتهایی هیدروکسیل (پلی‌استر یا پلی‌اتر) است و دی‌ایزوسیانات‌ها غالباً ایزومری از تولوئن دی‌ایزوسیانات (TDI) یا دی‌فنیل متان دی‌ایزوسیانات (MDI) است. واکنش اصلی بین دی‌ایزوسیانات و پلی‌ال که منجر به تولید پلی‌یورتان می‌شود یک واکنش گرمازا است.<sup>[۱۳،۱۴]</sup> در تولید فوم سخت پلی‌یورتان -- که فوم‌های مورد بررسی در این مقاله از این نوع هستند -- پلیمر مربوطه باید به‌وسیله‌ی یک عامل پف‌زا حجیم شود. یکی از راه‌های پف‌زایی افزودن گازی با نقطه‌ی جوش اندکی بالاتر از دمای محیط به مخلوط ایزوسیانات و پلی‌ال است، که در این حالت حرارت ناشی از واکنش تولید پلی‌یورتان باعث تبخیر ماده‌ی پف‌زا و حجیم شدن پلیمر شده و ساختار آن را به شکل سلولی درمی‌آورد.<sup>[۱۵،۱۶]</sup> خواص فوم پلی‌یورتان به ساختار سلولی آن وابسته است و چون رشد سلول‌ها یکنواخت نیست، خواص فوم شدیداً تابع جهت‌گیری این سلول‌هاست.<sup>[۱۷]</sup> چنان‌که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، انبساط فوم در راستای بالا آمدن آن با راستای عمود بر بالا آمدن متفاوت است؛ از این رو خواص مکانیکی فوم نیز در این دو جهت یکسان نیست.

### ۲.۲. توانایی بالا در جذب انرژی

تحقیقات انجام شده روی فوم پلی‌یورتان نشان می‌دهد که در صورت استفاده از این فوم به‌عنوان واسطی به جای هوا می‌توان بیشینه فشار ناشی از انفجار را بین ۱۰ تا ۵۰ درصد،<sup>[۱۸]</sup> و بیشینه فشار ناشی از ضربه را تا ۹۸ درصد<sup>[۸،۱۶]</sup> کاهش داد. علت این توانایی بالا در جذب انرژی در ساختار متخلخل این ماده است. در ساختار این فوم تعداد زیادی سلول کوچک (حاوی یک سیال و اغلب گاز) وجود دارد که با دیواره‌هایی نازک از جنس پلی‌یورتان از هم جدا شده‌اند. چنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، دیواره‌ی این سلول‌ها هنگام قرار گرفتن فوم در معرض ضربه یا انفجار، ابتدا دچار تغییر شکل کشسان می‌شود که در آن نیروی وارده صرف غلبه بر پیوندهای بین اتمی و کووالانسی می‌شود. با افزایش نیروی ماده از فاز کشسان خارج



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ نوری از فوم پلی‌یورتان پف شده با CFC-۱۱ (T) نشان‌گر راستای عرضی و R نشان‌گر راستای رشد فوم است.)

شکل ۱. تصویر میکروسکوپ نوری از فوم پلی‌یورتان پف شده با CFC-۱۱ (T) نشان‌گر راستای عرضی و R نشان‌گر راستای رشد فوم است.)

جدول ۱. پارامترهای مورد نیاز برای معرفی فوم پلی یورتان FR-۶۷۲۰ در نرم افزار.

جنس ماده	فوم پلی یورتان
چگالی مرجع ( $\text{kg/m}^3$ )	۱۲۶۵
معادله‌ی حالت	$P - \alpha$
چگالی حالت متخلخل ( $\text{kg/m}^3$ )	۳۲۰
سرعت صوت در ماده‌ی متخلخل ( $\text{m/s}$ )	۸۵۹٫۹۲
بیشینه فشار کشسان ( $\text{MPa}$ )	۹٫۶۴
فشار تراکم غیر متخلخل ( $\text{MPa}$ )	۱۱۲٫۵۴
پارامترهای هوگونویوت ماده‌ی متخلخل	$C(\text{m/s})$
	$S$
	۱٫۵۶

به دست آمده را در معادله‌ی ۱ جای‌گذاری می‌کنیم تا مقدار  $P_s$  به دست آید. [۲۱]

$$\sigma_{HEL} = C_y \left( \frac{\rho_s}{\rho_0} \right)^{2/3} \left[ 1 + \left( \frac{\rho_s}{\rho_0} \right)^{1/3} \right] \quad (3)$$

در معادله‌ی ۳،  $\rho_s$  و  $\rho_0$  به ترتیب معرف چگالی فوم و چگالی ماده‌ی سازنده‌ی فوم هستند.  $C_y$  ثابتی است که با روش کم‌ترین مربعات برای فوم‌هایی با چگالی‌های متفاوت ساخته شده از یک نوع رزین قابل محاسبه است. [۲۱] پارامترهای  $S$  و  $C$  به ترتیب برابر عرض از مبدا و شیب معادله‌ی خطی موجود بین سرعت موج شوک و سرعت حرکت ذرات ماده‌اند که برای هر ماده دارای مقادیر ثابت است. مقادیر این پارامترها برای فوم پلی‌یورتان در کتابخانه‌ی نرم‌افزار اتوداین و مراجع دیگر [۲۳، ۲۱] موجود است.

فوم به کار رفته در این آزمایش محصول شرکت ژنرال پلاستیک [۲۲] با نام تجاری FR-۶۷۲۰ است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. جنس پرتابه‌ی استفاده شده در آزمایش از نوع فولاد AISI-A۲ است که برای مدل‌سازی آن از معادله‌ی حالت شوک و معادله‌ی مقاومت جانسون - کوک استفاده شده و لایه‌ی فولادی زره از جنس AISI-۴۱۴۰ و با معادله‌ی حالت خطی و معادله‌ی مقاومت جانسون - کوک مدل شده است. پارامترهای مربوط به این دو نوع فولاد در جدول ۲ ارائه شده است. [۸] شبیه‌سازی اجزا محدود به صورت دو بعدی، با المان‌های ۴ گرهی به ابعاد ۰٫۵ میلی‌متر انجام شده و برای تمامی قسمت‌ها حلال لاگرانژی به کار رفته است. دو لایه‌ی فولادی و پلی‌یورتانی در زره به یکدیگر متصل شده‌اند و بین آنها اصطکاک‌ی با ضریب پیش‌فرض ۰٫۵ اعمال شده است. همچنین با توجه به امکان بروز جداشدگی و تخریب در فوم پلی‌یورتان یک معیار تخریب از نوع کرنش هندسی با مقدار حدی ۲ برای آن تعریف شده است.

برای صحت‌سنجی مدل اجزا محدود ارائه شده در مقاله‌ی حاضر، علاوه بر مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در مطالعات پیشین، [۸] فشار ایجاد شده در مصالح زره در امتداد محور برخورد پرتابه، در ده نقطه که به فاصله‌ی ۱ میلی‌متر از هم قرار گرفته‌اند پایش شده و تاریخچه‌ی فشار وارده در محل هر یک از نقاط مذکور استخراج و با شبیه‌سازی انجام شده [۸] مقایسه شده است (شکل ۴).

در شکل ۵ تاریخچه‌ی زمانی تغییرات فشار در امتداد محور برخورد پرتابه در لایه‌ی فولادی زره نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، تاریخچه‌ی فشار محاسبه شده در ۵ نقطه‌ی مختلف صفحه‌ی فولادی (واقع در امتداد محور برخورد پرتابه) از تطابق خوبی با نتایج مدل‌سازی پیشین [۸] برخوردار است. درصد خطای موجود بین بیشینه‌ی فشار محاسبه شده در مدل اجزا محدود این مقاله و مدل‌سازی به عمل آمده در مطالعات قبلی [۸] به طور میانگین حدود ۵ درصد است.

## ۴. شبیه‌سازی و مقایسه‌ی نتایج

در این بخش به شبیه‌سازی اجزای محدود یکی از آزمایش‌های انجام شده [۸] با استفاده از نرم‌افزار انسیس - اتوداین<sup>۱</sup> پرداخته می‌شود. پس از شبیه‌سازی، نتایج به دست آمده از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی و نیز نتایج شبیه‌سازی انجام شده [۸] مورد مقایسه قرار گرفته تا از این طریق از صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده اطمینان حاصل شود. انتخاب معادله‌ی حالت<sup>۲</sup> مناسب برای مصالح<sup>۳</sup> فوم تأثیر زیادی بر کیفیت نتایج شبیه‌سازی خواهد داشت. در این مقاله رفتار مصالح فوم پلی‌یورتان با استفاده از معادله‌ی حالت  $P - \alpha$  مدل‌سازی شده است. معادله‌ی حالت  $P - \alpha$  اولین بار توسط هرمان [۱۹] ارائه شد و به علت عملکرد مناسب آن در شبیه‌سازی رفتار مصالح متخلخل، در مدل‌سازی بسیاری از مواد متخلخل از جمله بتن در نرم‌افزارهای اجزا محدود به کار گرفته می‌شود.

نظریه‌ی عمومی مدل  $P - \alpha$  یک نظریه‌ی مرتبه اول است که در آن تأثیرات مقاومت برشی به صورت ثانویه در رفتار فشاری در نظر گرفته می‌شود. از این رو تانسور تنش به صورت کروی فرض شده است. در این نظریه به عنوان یک فرض اساسی، انرژی داخلی ویژه‌ی ماده‌ی متخلخل و ماده‌ی جامد نظیر آن -- تحت شرایط یکسان از نظر فشار و دما -- برابر در نظر گرفته می‌شود. در این مدل برای پیش‌بینی رفتار مصالح متخلخل در سه ناحیه‌ی تراکم کشسان، تراکم خمیری و باربرداری، از پارامتر تخلخل ( $\alpha$ ) استفاده شده است. استفاده از پارامتر مذکور مدل را قادر می‌سازد تا «تغییر حجم ناشی از فشردن شدن ماده» را از «تغییر حجم ناشی از فروریختگی بسته شدن حفرات» جدا کند. [۱۹]

پارامترهای اصلی یک ماده‌ی متخلخل برای جای‌گذاری در معادله‌ی حالت  $P - \alpha$  در نرم‌افزار اتوداین عبارت است از:

$\rho_0$ : چگالی اولیه‌ی ماده‌ی متخلخل؛

$C_e$ : سرعت صوت در ماده‌ی متخلخل (در ناحیه‌ی کشسان)؛

$P_e$ : بیشینه‌ی فشار کشسان (بیشینه‌ی فشار هیدرواستاتیکی که تحت آن رفتار ماده در محدوده‌ی کشسان باقی می‌ماند)؛

$P_s$ : فشار تراکم حالت غیرمتخلخل (فشار هیدرواستاتیکی که در آن تمامی حفرات ماده‌ی متخلخل بسته می‌شود)؛

$C, S$ : پارامترهای هوگونویوت ماده‌ی جامد نظیر فوم.

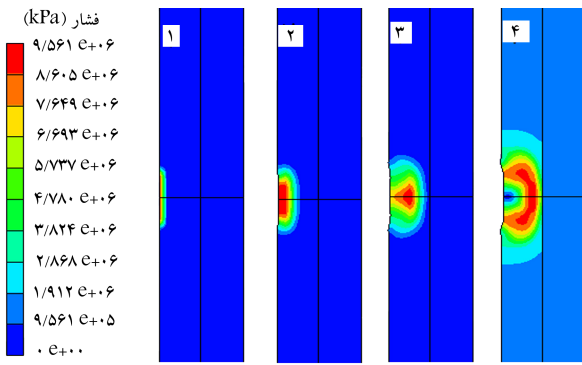
چگالی اولیه‌ی فوم را می‌توان با استفاده از روش استغراق محاسبه کرد. برای محاسبه‌ی سرعت صوت در ماده‌ی متخلخل می‌توان از روابط متعدد موجود در ادبیات تحقیق استفاده کرد. [۱۹-۲۱] در استفاده از روابط سرعت صوت همواره باید دقت داشت که به جای پارامترهای مواد اولیه، پارامترهای مربوط به فوم متخلخل محاسبه و جای‌گذاری شود. برای محاسبه‌ی فشار کشسان و فشار تراکم کامل می‌توان از رابطه‌ی ارائه شده توسط محققین [۲۱] استفاده کرد:

$$P_e = \frac{1 + \nu}{3(1 - \nu)} \times \sigma_{HEL} \quad (1)$$

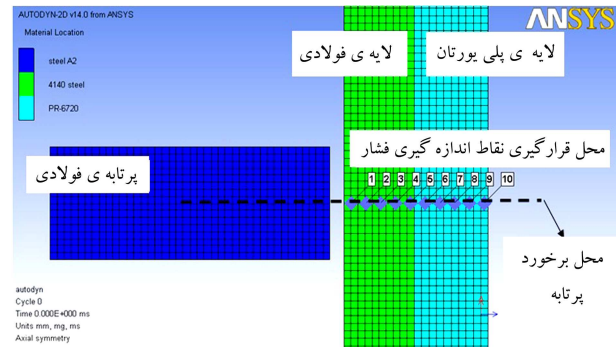
که در آن  $\nu$  ضریب پواسون فوم است که براساس داده‌های شرکت سازنده و ادبیات تحقیق مشخص می‌شود. [۲۲، ۹]  $\sigma_{HEL}$  نیز بر اساس رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{HEL} = \left( \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \right) \times \sigma_y \quad (2)$$

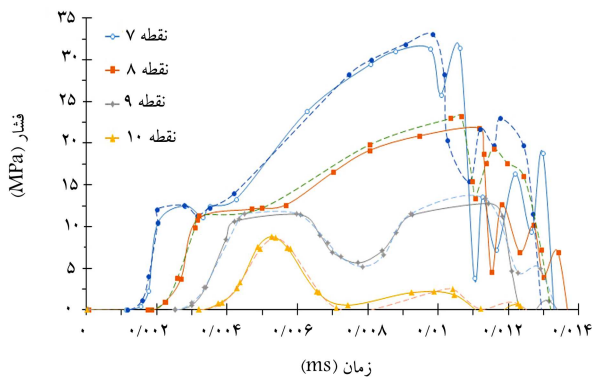
که در آن پارامتر  $\sigma_y$  معرف تنش تسلیم فوم است. برای محاسبه‌ی فشار تراکم کامل ابتدا  $\sigma_{HEL}$  را با استفاده از معادله‌ی ۳ به ازای  $\rho_s = \rho_0$  محاسبه می‌کنیم و مقدار



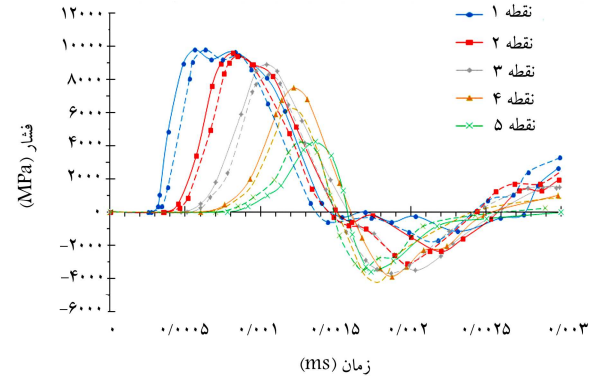
شکل ۶. نحوه‌ی انتشار موج شوک برخورد در لایه‌ی فولادی در زمان ۰/۰۰۰۰۳، ۰/۰۰۰۰۶، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۱۴ میلی ثانیه پس از برخورد.



شکل ۴. محل نقاط اندازه‌گیری فشار بر محور برخورد در زره.



شکل ۷. نمودار فشار ایجاد شده در نقاط مختلف لایه‌ی پلی‌یورتان واقع بر امتداد محور برخورد پرتابه به فواصل ۱ میلی‌متر از یکدیگر (خطوط توپر نشان‌گر نتایج ارائه شده توسط محققین<sup>[۸]</sup> و خطوط منقطع نشان‌گر نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقاله‌ی حاضر است).



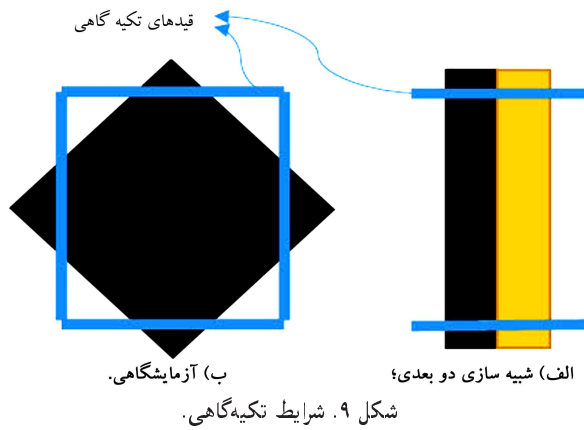
شکل ۵. نمودار فشار ایجاد شده در نقاط مختلف صفحه‌ی فولادی واقع بر امتداد محور برخورد پرتابه در فواصل ۱ میلی‌متر از یکدیگر (خطوط توپر نشان‌گر نتایج ارائه شده توسط محققین<sup>[۸]</sup> و خطوط منقطع نشان‌گر نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقاله‌ی حاضر است).

در این لایه و همچنین عدم توانایی آن در پخش و مستهلک کردن این فشار است. در شکل ۷ تاریخچه‌ی زمانی فشار حاصل در لایه‌ی پلی‌یورتان در امتداد محور برخورد پرتابه نشان داده شده است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۵ و ۷ مشاهده می‌شود که فشار حاصل از برخورد در لایه‌ی پلی‌یورتان کاهش چشمگیری داشته است و همچنین مدت زمان افزایش فشار از صفر تا فشار بیشینه در این لایه، بیشتر از لایه‌ی

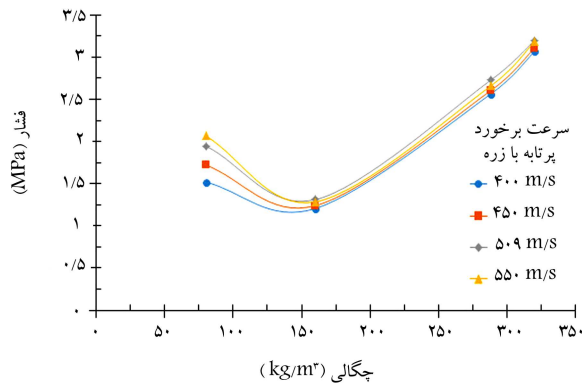
در شکل ۶ نحوه‌ی انتشار موج شوک در لایه‌ی فولادی در زمان‌های مختلف پس از برخورد پرتابه با زره نشان داده شده است. از مشاهده‌ی این شکل و نیز شکل ۵ می‌توان دریافت که بیشینه‌ی فشاری که هر نقطه از زره تجربه می‌کند، متناظر با لحظه‌ی عبور جبهه‌ی موج شوک از آن نقطه است. همچنین مشاهده می‌شود که با وجود تغییر شکل اندک ایجاد شده، موج شوک ناشی از برخورد در لایه‌ی فولادی منتقل شده و به انتهای لایه رسیده است که این نشان‌گر سرعت بالای انتشار موج

جدول ۲. مشخصات فولاد به کار رفته در پرتابه و لایه‌ی اول زره.

مصالح	Steel A2	Steel 4140
	شوک	خطی
معادله‌ی حالت	پارامترهای ماده Hugoniot $C = 4569 \text{ m/s}$ $S = 1749$	مدول بالک $K = 159 \text{ GPa}$
مدل مقاومت	جانسون - کوک مدول برشی $G = 878 \text{ GPa}$ تنش تسلیم $\sigma_y = 178 \text{ GPa}$	جانسون - کوک مدول برشی $G = 77 \text{ GPa}$ تنش تسلیم $\sigma_y = 165 \text{ GPa}$
مدل گسیختگی	Hydro ( $P_{min}$ ) $\sigma_{spall} = 2 \text{ GPa}$	جانسون - کوک $D_1 = 0.005, D_2 = 3744,$ $D_3 = 2112, D_4 = 0.002,$ $D_5 = 0.61$



شکل ۹. شرایط تکیه‌گاهی.



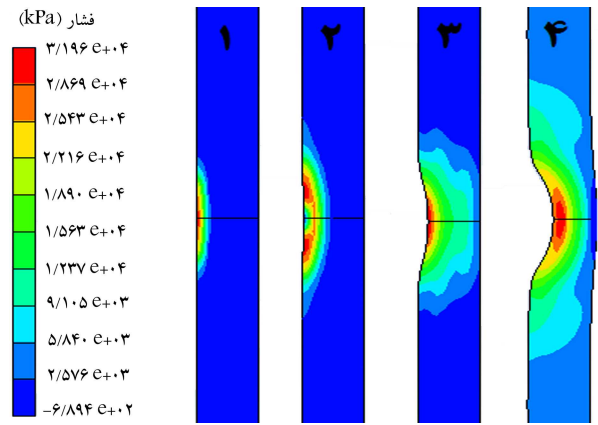
شکل ۱۰. تغییرات بیشینه فشار حاصل در انتهای لایه‌ی فوم پلی‌یورتان با چگالی فوم (در سرعت‌های مختلف).

## ۵. بررسی تأثیر چگالی فوم بر عملکرد آن

در این بخش به منظور بررسی عددی تأثیر چگالی لایه‌ی فوم در کاهش فشار ناشی از برخورد پرتابه، مدل اجزا محدود مجموعه‌ی از زره‌های مختلف دارای ابعاد هندسی یکسان اما فوم‌هایی با چگالی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فوم‌های پلی‌یورتان مورد نظر دارای چگالی‌های متفاوت ۸۰، ۱۶۰، ۲۸۸ و ۳۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و در پشت یک صفحه‌ی محافظ فولادی تعبیه می‌شوند. در تمامی زره‌های مورد بررسی ضخامت صفحه‌ی محافظ فولادی برابر ۴/۷۶ میلی‌متر و ضخامت لایه‌ی پلی‌یورتان برابر ۵ میلی‌متر است. رفتار دینامیکی زره‌ها تحت اثر برخورد پرتابه‌ی با سرعت‌های ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۹ و ۵۵۰ متر بر ثانیه تحلیل شده و مقادیر بیشینه‌ی فشار ایجادشده در انتهای لایه‌ی پلی‌یورتان واقع بر محور برخورد پرتابه محاسبه و در جدول ۴ گزارش شده است.

مقادیر پارامترهای لازم برای مدل رفتاری فوم با چگالی ۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب، با نام تجاری FR-۶۷۱۰ استخراج شده<sup>[۸]</sup> و اطلاعات مربوط به فوم‌ها با چگالی ۸۰ و ۲۸۸ کیلوگرم بر متر مکعب براساس روابط ارائه شده در مطالعات<sup>[۱۹]</sup> با استفاده از برگه‌ی اطلاعات فنی اخذ شده<sup>[۲۱]</sup> با نام تجاری به ترتیب FR-۳۷۰۵ و FR-۶۷۱۸ محاسبه، و در جدول ۵ ارائه شده است.

اطلاعات مربوط به فوم با چگالی ۳۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب نیز در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۱۰ نشان‌دهنده‌ی تغییرات فشار بیشینه‌ی حاصل در انتهای لایه‌ی پلی‌یورتان برحسب چگالی فوم تحت اثر برخورد پرتابه با چهار سرعت متفاوت



شکل ۸. نحوه‌ی انتشار موج شوک برخورد در لایه‌ی پلی‌یورتانی در زمان ۰/۰۰۱۴، ۰/۰۰۲۱، ۰/۰۰۵۶ و ۰/۰۰۱ میلی ثانیه پس از برخورد.

جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی.

آزمون شماره ۱۰	آزمایشگاه	مدل‌سازی مقاله‌ی حاضر
عرض برآمدگی a (mm)	۲۳/۸۶	۲۴/۹۶
عمق کلی b (mm)	۱۱/۶۳	۱۳/۲۱
بیشینه‌ی عمق فرورفتگی c (mm)	۱/۸۷	۱/۹۵

فولادی است که نشان‌گر سازوکار کاهش خسارت از طریق توزیع فشار در بازه زمانی گسترده‌تر است. در این مورد نیز میانگین اختلاف بین دو مدل برابر ۵/۷ درصد است.

در شکل ۸ نیز فرایند انتقال موج شوک در لایه‌ی پلی‌یورتان در زمان‌های مختلف پس از برخورد پرتابه نشان داده شده است. با توجه به تفاوت زیاد فشار در لایه‌ی فولادی و لایه‌ی فوم، برای داشتن کانتور فشار مناسب، تنها لایه‌ی پلی‌یورتانی در نظر گرفته شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که علی‌رغم تغییر شکل زیاد فوم، فشار چندانی به انتهای آن منتقل نشده است که این نشان‌گر توانایی فوم در استهلاک فشار و کاهش خسارات ناشی از آن است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۶ و ۸ درمی‌یابیم که موج شوک ناشی از برخورد در لایه‌ی فولادی دارای تمرکز بیشتری است و با عبور این موج از لایه‌ی اول و رسیدن آن به لایه‌ی پلی‌یورتانی، بازه‌ی اثر آن بیشتر شده و به عبارت دیگر موج در سطح این لایه پخش می‌شود. این امر نشان‌گر سازوکار کاهش خسارت از طریق توزیع نیرو در سطح بیشتر است که سبب کاهش میزان فشار و افزایش بازه‌ی اثر آن شود.

همچنین ابعاد فرورفتگی ایجاد شده پس از برخورد پرتابه، اندازه‌گیری شده (شکل ۳) و نتیجه‌ی آن همراه با نتایج آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه شده است. با مقایسه‌ی نتایج مشاهده می‌شود که مدل اجزا محدود اندکی نرم‌تر از زره واقعی رفتار کرده است.

تفاوت‌های اندک موجود را می‌توان ناشی از محدودیت در اعمال شرایط دقیق تکیه‌گاهی در مدل‌سازی حالت دو بعدی دانست (شکل ۹). زره آزمایش شده دارای ۴ تکیه‌گاه در ۴ لبه‌ی خود است؛ این در حالی است که در مدل‌سازی ۲ بعدی تنها امکان اعمال ۲ تکیه‌گاه در لبه‌های بالایی و پایینی زره وجود داشت. با این وجود دقت شبیه‌سازی انجام شده در مقاله‌ی حاضر، برای بسیاری از مقاصد مهندسی مطلوب ارزیابی می‌شود. پس از صحت‌سنجی مدل در بخش‌های بعد به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف طراحی بر عملکرد فوم‌های صلب پلی‌یورتان می‌پردازیم.

تنش تسلیم) در اثر کاهش بیش از حد چگالی دانست. [۲۴] بررسی دقیق شکل ۱۰ نشان می‌دهد که به‌ازای چگالی‌های حدود ۱۴۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، فوم پلی‌یورتان بیشترین بازدهی در کاهش بیشینه فشار ناشی از ضربه را خواهد داشت.

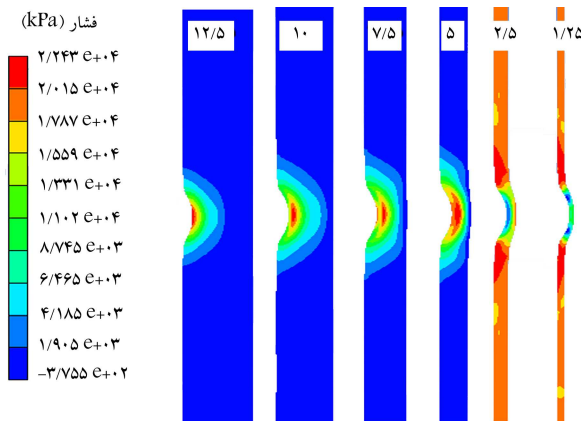
### ۶. بررسی تأثیر ضخامت فوم بر عملکرد آن

در این بخش به منظور بررسی تأثیر ضخامت لایه‌ی فوم بر عملکرد زره، مدل اجزای محدود زره‌های مختلف دارای ضخامت‌های متفاوت فوم مورد بررسی قرار گرفته است. زره‌های مورد مطالعه دارای فومی با چگالی ۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب در ضخامت‌های ۱٫۲۵، ۲٫۵، ۵، ۷٫۵، ۱۰، ۱۲٫۵ میلی‌متر هستند. پرتابه با سرعت‌های مختلف ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۹ و ۵۵۰ متر بر ثانیه به زره برخورد کرده و بیشینه فشار ایجاد شده در انتهای فوم پلی‌یورتان در امتداد محور برخورد پرتابه محاسبه شده است (جدول ۶). کانتور فشار فوم با ضخامت‌های مختلف، در زمان یکسان پس از برخورد پرتابه با زره، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود در ضخامت‌های ۱۲٫۵ و ۱۰ میلی‌متر، موج شوک هنوز به انتهای لایه‌ی فوم نرسیده و طبیعتاً فشار در انتهای فوم بسیار ناچیز است.

در شکل ۱۲ منحنی تغییرات فشار مذکور برحسب ضخامت لایه‌ی فوم به‌ازای چهار سرعت مختلف برخورد پرتابه نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود در سرعت‌های برخورد مختلف، نمودارها از روند یکسانی پیروی می‌کنند. با افزایش ضخامت تا حدود ۵ میلی‌متر، بیشینه فشار -- صرف‌نظر از سرعت برخورد پرتابه -- با آهنگ نسبتاً تندی دچار کاهش می‌شود. در ضخامت‌های بالاتر آهنگ تغییرات

جدول ۶. مقادیر بیشینه فشار حاصل در انتهای فوم پلی‌یورتان با ضخامت‌های متفاوت در امتداد محور برخورد پرتابه (مقادیر فشار برحسب مگاپاسکال است).

ضخامت فوم (mm)	سرعت برخورد پرتابه (m/s)			
	۵۵۰	۵۰۹	۴۵۰	۴۰۰
۱٫۲۵	۳٫۲۹۴	۴٫۱۷۶	۴٫۳۵۲	۵٫۰۱۱
۲٫۵	۱٫۹۸۹	۲٫۰۷۵	۲٫۱۶۵	۲٫۲۳۰
۵	۱٫۲۰۳	۱٫۲۳۹	۱٫۲۷۴	۱٫۲۹۵
۷٫۵	۰٫۸۵۰	۰٫۸۸۳	۰٫۹۱۳	۰٫۹۳۲
۱۰	۰٫۶۲۳	۰٫۶۵۱	۰٫۶۸۵	۰٫۶۹۸
۱۲٫۵	۰٫۴۷۳	۰٫۴۹۰	۰٫۵۲۴	۰٫۵۴۰



شکل ۱۱. کانتور فشار در فوم با ضخامت‌های مختلف ۱۲٫۵، ۱۰، ۷٫۵، ۵، ۲٫۵ و ۱٫۲۵ میلی‌متر، در زمان ۱/۱۰ میلی ثانیه پس از برخورد پرتابه.

جدول ۴. مقادیر بیشینه‌ی فشار در انتهای فوم‌های پلی‌یورتان با چگالی‌های متفاوت در اثر برخورد پرتابه با سرعت‌های مختلف.

سرعت برخورد پرتابه (متر بر ثانیه)	چگالی فوم پلی‌یورتان (کیلوگرم بر متر مکعب)	بیشینه فشار در انتهای فوم بر روی محور برخورد (مگاپاسکال)
۴۰۰	۸۰	۱٫۵۲
	۱۶۰	۱٫۲۰۶
	۲۸۸	۲٫۵۶۳
۴۵۰	۳۲۰	۳٫۰۶۶
	۸۰	۱٫۷۲۳
	۱۶۰	۱٫۲۴
۵۰۹	۲۸۸	۲٫۶۰۳
	۳۲۰	۳٫۱۰۵
	۸۰	۱٫۹۴
۵۵۰	۱۶۰	۱٫۳۱
	۲۸۸	۲٫۷۲
	۳۲۰	۳٫۱۹
	۸۰	۲٫۰۶۸
	۱۶۰	۱٫۲۸۵
	۲۸۸	۲٫۶۵۹
	۳۲۰	۳٫۱۸۲

جدول ۵. مشخصات مکانیکی فوم‌های مورد استفاده در مدل‌سازی.

پارامترهای مدل $P - \alpha$	چگالی حالت متخلخل فوم $\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )		
	۲۸۸	۱۶۰	۸۰
سرعت صوت در ماده‌ی متخلخل $C_e$ (m/s)	۸۳۷	۶۶۹٫۴۴	۳۱۶٫۹
فشار حالت کشسان $P_e$ (MPa)	۷٫۹۰	۲٫۶۲	۰٫۶۱۹
فشار در تراکم کامل $P_s$ (MPa)	۱۱۲٫۵۴	۱۱۲٫۵۴	۱۰٫۸٫۶
معادله‌ی حالت فاز جامد	شوک	شوک	شوک
مدول برشی (MPa)	۵۸٫۰۴۶	۱۹٫۴۶۵	۲٫۳
تنش تسلیم (MPa)	۷٫۹۰	۲٫۶۲	۰٫۶۱۹

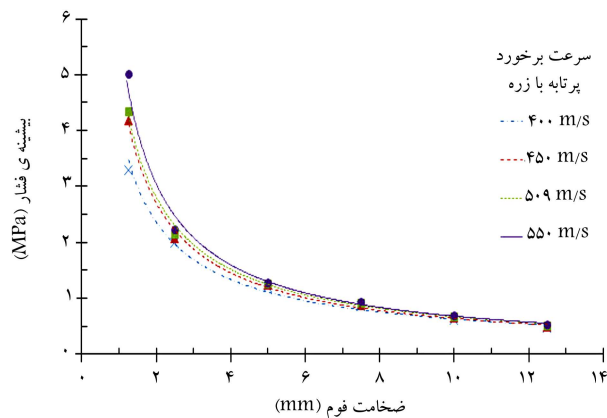
است. چنان‌که مشاهده می‌شود منحنی‌های فشار بیشینه چگالی، صرف‌نظر از سرعت برخورد پرتابه، از الگوی نسبتاً یکسانی پیروی می‌کنند.

با کاهش چگالی فوم از ۳۲۰ تا ۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب، عملکرد فوم در جذب انرژی و کاهش فشار برخورد پرتابه بهبود می‌یابد. علت این امر افزایش تعداد حفرات موجود در فوم با کاهش چگالی است. با افزایش تعداد حفرات، انرژی بیشتری برای فروریختن دیواره‌ی آنها لازم بوده و از این طریق فوم قادر است مقدار بیشتری انرژی مستهلک کند. در چگالی‌های کم‌تر از ۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب با وجود افزایش کمی مقدار حفرات در پی کاهش چگالی، فوم رفتار متفاوتی از خود نشان داده و عملکرد آن در کاهش بیشینه فشار دچار ضعف می‌شود. علت این تغییر رفتار فوم را می‌توان ضعیف شدن مشخصات مکانیکی فوم (مدول الاستیسیته -

میله‌ی متر بر عملکرد فوم تأثیر قابل توجهی داشته است. در ضخامت‌ها و چگالی‌های بالاتر می‌توان از تأثیر سرعت برخورد بر عملکرد فوم صرف‌نظر کرد.

## ۸. نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله بررسی پارامتریک نقش مؤلفه‌هایی همانند چگالی و ضخامت لایه‌ی فوم و نیز سرعت برخورد پرتابه در رانندمان زره‌های فلزی مسلح به فوم به عنوان ماده‌ی مستهلک‌کننده‌ی انرژی برخورد پرتابه است. به منظور نیل به اهداف تحقیق مدل‌های اجزای محدود مجموعه‌ی از زره‌های مختلف مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به مطالب ارائه شده، می‌توان نتیجه گرفت که در برخورد پرتابه با زره‌های مورد بررسی در این تحقیق، در صورت استفاده از فوم پلی‌یورتان به عنوان هسته‌ی جاذب، چگالی بهینه‌ی فوم را می‌توان در حدود ۱۴۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که عملکرد فوم در کاهش بیشینه فشار وارده بر زره، رابطه‌ی غیرخطی با ضخامت لایه‌ی فوم دارد. در زره‌های مورد بررسی در این تحقیق با افزایش ضخامت فوم به بیش از ۵ میلی‌متر، آهنگ کاهش بیشینه فشار به طور محسوسی کند می‌شود. بنابراین، با توجه به تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق و با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی می‌توان ضخامت ۵ میلی‌متر را برای لایه‌ی فوم در زره‌های مورد بررسی انتخاب کرد. براساس نتایج این تحقیق، تأثیر سرعت برخورد پرتابه (نرخ کرنش) بر عملکرد فوم تابع چگالی و ضخامت لایه‌ی فوم است. بیشترین حساسیت در فوم‌های با چگالی پایین‌تر از ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت‌های کم‌تر از ۵ میلی‌متر مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش سرعت برخورد پرتابه مقدار بیشینه فشار منتقل شده از فوم به سازه‌ی حفاظت شده افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲. تغییرات بیشینه‌ی فشار در انتهای لایه‌ی فوم برحسب ضخامت لایه (چگالی فوم در تمامی ضخامت‌ها برابر ۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب است).

فشار با افزایش ضخامت کاهش قابل توجهی می‌یابد. همچنین در ضخامت‌های کم‌تر از ۵ میلی‌متر، تأثیر سرعت برخورد پرتابه بر بیشینه فشار در انتهای فوم زیاد است اما با افزایش ضخامت به مقادیر بالاتر، تأثیر سرعت کاهش می‌یابد به‌گونه‌ی که در ضخامت‌های ۱۰ و ۱۲/۵ میلی‌متر مقادیر بیشینه‌ی فشار تقریباً مستقل از سرعت برخورد پرتابه است.

## ۷. تأثیر سرعت پرتابه بر عملکرد فوم

با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۲ مشاهده می‌شود که سرعت برخورد پرتابه فقط در فوم‌های با چگالی کم‌تر از ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت‌های کم‌تر از ۵

## پانویس‌ها

1. ANSYS-Autodyn
2. equation of state
3. material

## منابع (References)

1. Guruprasad, S. and Mukherjee, A. "Layered sacrificial claddings under blast loading part I-analytical studies", *Int. J. of Impact Engineering*, **24**(9), pp. 957-73 (2000).
2. Guruprasad, S. and Mukherjee, A. "Layered sacrificial claddings under blast loading part II-experimental studies", *Int. J. of Impact Engineering*, **24**(9), pp. 975-84 (2000).
3. Kotzialis, C., Derdas, C. and Kostopoulos, V. "Blast behavior of plates with sacrificial cladding", In: *5th GRACM International Congress on Computational Mechanics*, Limassol, Cyprus (29 June - 1 July 2005).
4. Palanivelu, S., Paepegem, W. and Degriek, J. "Close-range blast loading on empty recyclable metal beverage cans for use in sacrificial cladding structures", *Int. J. of Engineering Structures*, **33**, pp. 1966-1987 (2011).
5. Gama, B.A., Bogetti, T.A., Fink, B.K., Yu, C.J., Clara, T.D. and Eifert, H.H. "Aluminum foam integral armor: A new dimension in armor design", *Composite Structures*, **52**, pp. 381-395 (2001).
6. Ong, C., Boey, C., Hixson, R.S. and Sinibaldi, O. "Advanced layered personnel armor", *Impact Engineering*, **38**, pp. 369-383 (2011).
7. Roy, O.C. "Investigation of advanced personnel armor using layered construction", M.S. thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA (2009).
8. Boey, C.W. "Investigation of shock wave attenuation in porous materials", M.S. thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA (2009).
9. Gibson, L.J. and Ashby, M.F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge University Press, New York (1997).

10. Endo, K., Kitagawa, K. and Yashuhara, M. "Diffusion effect of blast pressure in porous complex media", *In Proceedings of the 39th AIAA Fluid Dynamic Conference*, San Antonio, Texas (2009).
11. Mostafa, H.E., El-Dakhakhni, W.W. and Mekky, W.F. "Use of reinforced rigid polyurethane foam for blast hazard mitigation", *J. Reinf Plast Comp*, **29**(20), pp. 3048-3057 (2010).
12. Maohui, L., Chunhua, B., Meiwu, S., Yanpeng, W., Hong, Z. and Yung, S. "Experimental study of the compressive performance of life jacket use polyurethane foam for blast wave protection", *Adv Mater Research*, **463**, pp. 457-462 (2012).
13. Sarier, N. and Onder, E. "Thermal characteristics of polyurethane foams incorporated with phase change materials", *Int. J. of Thermo. Chime. Acta*, **2**, pp. 90-98 (2007).
14. Schaumstoff, P. and Uberlingen, A. "Polyurethane rigid foam, a proven thermal insulating materials for applications between +130 C and -196 C", *Int. J. of Cryogenics*, **38**, pp. 113-117 (1998).
15. Ahern, A., Verbist, G., Weaire, D., Phelan, R. and Fleurent, H. "The conductivity of foams: A generalisation of the electrical to the thermal case", *Int. J. of Colloids Surfaces*, **263**, pp. 275-279 (2005).
16. Wu, J.W., Suang, W.F. and Chu, H.S. "Thermal conductivity of polyurethane foams", *Int. J. of Heat Mass Transfer*, **42**, pp. 2211-2217 (1999).
17. Tu, Z., Shim, V. and Lim, C. "Plastic deformation modes in rigid polyurethane foam under static loading", *Int. J. Solids. Struct.*, **38**, pp. 9267-9279 (2001).
18. Kitagawa, K., Yamashita, S., Takayama, K. and Yasuhara, M. "Attenuation properties of blast wave through porous layer", *26th. Int. Symp. on Shock Waves.*, **1**, pp. 73-78 (1997).
19. Herrmann, W. "Constitutive equation for dynamic compression of ductile porous materials", *Int. J. Appl. Phys*, **40**, pp. 2490-2499 (1969).
20. Ramakarishnan, N. "Speed of sound in porous materials", *Int. J. of Mater. Sci.*, **17**(5), pp. 499-504 (1994).
21. Grady, D. and Winfree, N. "A computational model for polyurethane foam", *Int. Conf. of Fundamental Issues and Applications of Shock-Wave and High Strain Rate Phenomena*, pp. 485-491 (2001).
22. General Plastic Manufacturing Company, FR-6710 & Pr-6720 PU Foam Data Sheets, 4910 Burlington way. Tacoma, wa98409 (2006).
23. Los Alamos Data Center for Dynamic Material Properties, *LASL Shock Hugoniot Data*, University of California Press, 675 p. (1980).
24. Lee, P., Wang, G., Sung, P. and Chang, W. "The attenuation of shock waves in PU foam and its application", *Shock Waves in Condensed Matter*, Plenum Press, New York, pp. 687-692 (1986).