



بررسی رفتار صفحه‌ای لانه‌زنبوری پرشده با فوم تحت شرایط شبه استاتیکی و دینامیکی با استفاده از روش عددی

حبیب اله ملاطفی¹، هژبر مظفری²

1- استادیار، مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

*تهران، کد پستی 13114-16846، molatefi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 30 اردیبهشت 1393
پذیرش: 11 تیر 1393
ارائه در سایت: 30 مهر 1393
کلید واژگان:
رفتار صفحه‌ای
لانه‌زنبوری
روش اجزاء محدود
استحکام فروریزی
ظرفیت جذب انرژی
بارگذاری فشاری تک جهتی

چکیده

در این پژوهش تأثیر به‌کارگیری تکنیک پرکردن هسته لانه‌زنبوری با فوم پلی اورتان سبک وزن بر رفتار صفحه‌ای هسته لانه‌زنبوری مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار مکانیکی پلاستیک هسته‌های لانه‌زنبوری با استفاده از روش عددی مورد مطالعه قرار گرفت. چهار نوع لانه‌زنبوری آلومینیومی AL 5052 به‌صورت خالی و پرشده با فوم تحت بارگذاری فشاری تک جهتی در شرایط شبه استاتیکی و دینامیکی قرار گرفتند. انتخاب هسته‌های لانه‌زنبوری به‌گونه‌ای لحاظ شد که بتوان تأثیر چگالی نسبی سلول‌های لانه‌زنبوری را بر خواص همچون استحکام فروریزی و ظرفیت جذب انرژی مورد بررسی قرار داد. نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود نشان داد که به‌کارگیری فوم در هسته لانه‌زنبوری می‌تواند استحکام فروریزی را تا 24 برابر و همچنین ظرفیت جذب انرژی را تا 11 برابر افزایش دهد. در حالی که افزایش چگالی هسته لانه‌زنبوری موجب کاهش تأثیر فوم بر خواص ذکر شده می‌شود. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در شرایط شبه استاتیکی فوم پلی اورتان به‌خوبی خواص هسته را بهبود می‌بخشد، در حالی که با افزایش سرعت برخورد و در شرایط دینامیکی تأثیر فوم پلی اورتان بر استحکام فروریزی و ظرفیت جذب انرژی کاهش چشمگیری خواهد داشت. به نحوی که در برخورد با سرعت 100 m/s میزان ظرفیت جذب انرژی در موارد خالی و پرشده با فوم تقریباً یکسان است.

Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method

Habibollah Molatefi^{1*}, Hozhabr Mozafari²

1- Department of Railway. Eng., Iran Univ. of Sci. and Tech., Tehran, Iran.

2- Department of Railway. Eng., Iran Univ. of Sci. and Tech., Tehran, Iran.

*P.O.B. 13114-16846 Tehran, Iran, molatefi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 May 2014
Accepted 02 July 2014
Available Online 22 October 2014

Keywords:

In Plane Behavior
Honeycomb
FEA
Crushing Strength
Specific Absorbed Energy
Unidirectional Compression

ABSTRACT

In this research, influence of foam filling technique in honeycomb cores by using lightweight rigid polyurethane foam is investigated. Plastic mechanical behaviors of honeycomb cores are studied by mean of numerical method. Four types of Aluminum honeycombs (Al 5052 alloy) both bare and foam-filled were subjected to unidirectional compression. Analyses were carried out for different impact velocities to survey quasi-static and dynamic crushing response of the honeycomb cores. Crushing strengths and specific absorbed energy were obtained for honeycomb cores which have different relative densities. FEM results showed that foam filling technique can increase crushing strength of honeycomb core up to 24 times, and its specific absorbed energy up to 11 times. However, it was found that in heavier honeycombs the effect of foam filling technique decreases significantly. Furthermore, it was found that in quasi-static situation, foam filling technique can enhance desired core mechanical properties. Meanwhile, in dynamic states of impact it was illustrated that polyurethane foam have not significant role in improving crushing strength and specific absorbed energy of honeycomb cores. For instance, in crushing with impact velocity of 100 m/s , amount of specific absorbed energy for bare and foam-filled cores were approximately equal.

1- مقدمه

هواپیما، خودرو، قایق و سازه‌های ساختمانی مورد توجه مهندسان قرار گرفته- اند [1-4]. این مزایای ساختاری اغلب به‌دلیل وجود هسته با چگالی پایین است که صفحات بیرونی پل را از یکدیگر جدا کرده است [5]. طراحی سازه- های ساندویچی براساس پارامترهایی چون فراهم آوردن استحکام لازم و

در سال‌های اخیر، ساختارهای ساندویچی در صنایع مدرن به‌صورت گسترده- ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پل‌های ساندویچی، به‌دلیل دارا بودن مشخصه‌هایی همچون استحکام و سفتی بالا و وزن کم، در ساخت انواع

Please cite this article using:

H. Molatefi, H. Mozafari, Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 177-185, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کمترین وزن ممکن به انجام می‌رسد [6,7]. جداسازی صفحات بیرونی از یکدیگر موجب افزایش ممان مقطع و در نتیجه مقاومت بیشتر پیل در برابر کمانش و خمش می‌شود. هسته می‌بایست دارای سفتی قابل قبول در جهت برشی باشد تا بتواند از لغزش صفحات نسبت به یکدیگر جلوگیری نماید. امروزه ساختارهای چیدمانی و مواد متنوع به منظور استفاده به‌عنوان هسته مطرح شده‌اند. پر کاربردترین این ساختارها لانه‌زنبوری شش وجهی آلومینیومی و همچنین انواع فوم‌های پلیمری هستند [5]. هسته‌های فومی هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرند که خواصی همچون مقاومت در برابر حرارت، عایق بودن در برابر نفوذ آب و سر و صدا مد نظر باشد. به‌علاوه فوم‌های پلیمری از جمله ارزان‌ترین مواد مورد استفاده در تولید هسته هستند که از لحاظ اقتصادی نقش موثری در تولید مقرون به صرفه پیل ساندویچی دارد. در مواردی که خواص بالستیک دارای اهمیت است می‌توان از فوم آلومینیومی به‌عنوان هسته استفاده کرد [8,9]. از سوی دیگر ساختارهای لانه‌زنبوری دارای نسبت سفتی به وزن بیشتری هستند که افزایش صلبیت پیل را به‌همراه دارد، اما مشکل اصلی این هسته‌ها کوچک بودن سطح تماس دیواره‌های سلولی و صفحات بیرونی است [10]. این ضعف موجب کاهش چسبندگی شده و به‌دلیلی همچون عیوب تولید و شرایط بحرانی سرویس‌دهی، جدایش صفحات و تخریب پیل را به‌دنبال دارد. پر کردن هسته لانه‌زنبوری با انواع فوم می‌تواند به‌عنوان روشی موثر در مقاوم‌سازی پیل در برابر پدیده بازشدگی صفحات مورد استفاده قرار گیرد [11]. اعمال این روش منجر به به‌کارگیری همزمان خواص لانه‌زنبوری و فوم در هسته پیل شده و کارایی آن را تا حد قابل توجهی افزایش می‌دهد. سادوفسکی و همکارانش [12] با استفاده از مدل‌سازی عددی و تکنیک یکپارچه‌سازی سه لایه ای مشخصه‌های الاستیک هسته لانه‌زنبوری خالی و پرشده با فوم را به‌دست آوردند. هدف آن‌ها از به‌کارگیری تکنیک یکپارچه‌سازی کاهش محاسبات انجام شده و تسریع حل مدل عددی بود. اگرچه دقت حل در این حالت به‌شدت وابسته به میزان صحت در پیش‌بینی پارامترهای الاستیک هسته است. آن‌ها، سپس از فوم پی وی سی به‌عنوان فاز پرکننده لانه‌زنبوری در مدل اجزاء محدود استفاده کردند و پارامترهایی چون بار بحرانی کمانش و توزیع تنش را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافته‌اند که پر کردن لانه‌زنبوری با فوم تاثیر قابل توجهی در مقدار بار بحرانی کمانش ندارد، اگرچه وجود فوم در هسته می‌تواند نحوه توزیع تنش را دچار تغییر کند. از آنجایی که بیشتر خرابی‌های ایجاد شده در بدنه هواپیماها و هلیکوپترها به‌دلیل ارتعاشات شدید در شروع حرکت است، درک صحیح از ویژگی‌های ارتعاشی پیل‌های ساندویچی همچون مقادیر ویژه فرکانسی و مودهای ارتعاشی بسیار مهم است. بنابراین، سادوفسکی و همکارانش [12] در ادامه پژوهش‌های خود با استفاده از مدل اجزاء محدود پاسخ‌های ارتعاشی لانه‌زنبوری خالی و پرشده با فوم را مورد ارزیابی قرار دادند، اما این بار، به‌دلیل اهمیت ثبت تغییر شکل‌های محلی در مودهای ارتعاشی پیل، مدل دقیق هندسی را ایجاد کردند. سپس، از دو نوع فوم پلیمری به‌عنوان فاز پرکننده لانه‌زنبوری در مدل عددی استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که پر کردن لانه زنبوری با فوم موجب کاهش تغییر شکل‌های محلی در مودهای ارتعاشی پیل شده و همچنین سفتی پیل در صورت وجود فوم به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. پس از این تحقیقات تاثیر فوم به‌عنوان پرکننده بر خواص الاستیک و ارتعاشی پیل مشخص شد. اما از آنجایی که پیل‌های لانه‌زنبوری در موارد بسیاری به‌عنوان جاذب انرژی در مقابل بار ضربه اعمالی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بنابراین،

2- مدل اجزاء محدود

2-1- مدل‌سازی هسته لانه‌زنبوری خالی

به‌منظور بررسی تغییر شکل لانه‌زنبوری یک مدل اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ایجاد شد. لانه‌زنبوری شامل 7 سلول در جهت X و 8 سلول در جهت Y است (شکل 1). برخورد دینامیکی از طریق صفحه صلبی که در بالای پیل قرار دارد اعمال می‌شود. لانه‌زنبوری از سمت دیگر به صفحه صلب تکیه‌گاه متصل شده است. سرعت برخورد به نقطه مرجع صفحه صلب متحرک اعمال شده و سایر درجات آزادی آن مقید شده است. تمامی درجات آزادی صفحه صلب تکیه‌گاه نیز مقید شده است. دیواره‌های لانه‌زنبوری نیز در راستای خارج صفحه‌ای مقید شده‌اند تا از کمانش خارج صفحه‌ای آن‌ها جلوگیری شود.

طول لبه سلول و ضخامت دیواره به‌ترتیب برابر با 3/175 mm و 0/235 در نظر گرفته شد. ضخامت دیواره‌های مشترک برابر با ضخامت دیواره‌های غیرمشترک در نظر گرفته شد. مشخصات مکانیکی آلومینیوم نیز به‌صورت الاستیک-پلاستیک اعمال شد (جدول 1) [15]. تحلیل‌های دینامیکی با استفاده از حلگر صریح به‌انجام رسید و پاسخ نیرو-جابجایی ضربه‌زن حاصل شد و از تقسیم مقدار نیرو به سطح موثر تماسی ضربه‌زن و هسته، مقدار تنش ناشی از برخورد محاسبه شد.

جدول 1 مشخصات الیاز آلومینیوم 5052 [15]

مدول الاستیک (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	چگالی (kg/m ³)	ضریب پواسون
68000	130	2700	0/3

مشخصه رفتاری [17] رابطه‌ای را به منظور محاسبه استحکام فروریزی دینامیکی لانه‌زنبوری ارائه نموده است (رابطه 1).

$$\sigma_d = \frac{2}{3} \sigma_{ys} \left(\frac{h}{l} \right)^2 + \frac{\rho^*}{1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)} V^2 \quad (1)$$

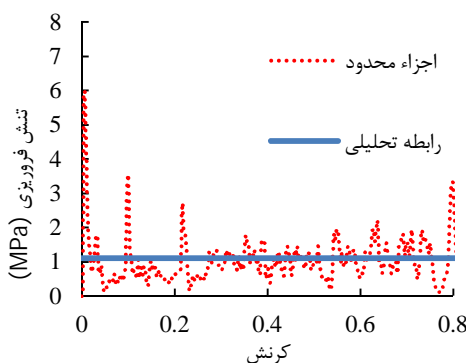
در رابطه (1)، σ_d استحکام فروریزی دینامیکی، σ_{ys} تنش تسلیم ماده، h و l به ترتیب ضخامت دیواره سلولی و طول لبه سلول هستند. ρ_s و ρ^* به ترتیب چگالی ماده و نسبی پخل و V نیز سرعت برخورد است. رابطه (1) نشان می‌دهد که استحکام فروریزی دینامیکی با توان دوم سرعت رابطه مستقیم دارد. به همین دلیل در سرعت‌های برخورد پایین استحکام فروریزی مقداری تقریباً یکسان با استحکام فروریزی استاتیکی خواهد داشت. در حالی که در سرعت‌های زیاد استحکام فروریزی دینامیکی به شدت افزایش پیدا می‌کند. شکل 3 نشان‌دهنده نمودار تنش- کرنش به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود و همچنین استحکام فروریزی پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه (1) است.

همان‌گونه که مشخص است مدل اجزاء محدود از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و توانسته است که مقدار استحکام فروریزی را به دقت محاسبه نماید. اگرچه نوسانات مشاهده شده در پاسخ به دلیل ماهیت دینامیکی برخورد و تاثیر آن بر رفتار تغییر شکل لانه زنبوری است که در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است [16-18]. همان‌گونه که در رابطه (1) مشخص است، به جز سرعت برخورد و مشخصات ماده، مقدار نسبت اندازه سلول به ضخامت دیواره نیز در تخمین استحکام فروریزی دینامیکی تاثیرگذار است. این مقدار در ارتباط با چگالی نسبی پخل لانه‌زنبوری است. بنا به محاسبات انجام گرفته توسط اشبی و گیسون [2] چگالی نسبی لانه‌زنبوری از طریق رابطه (2) قابل محاسبه است.

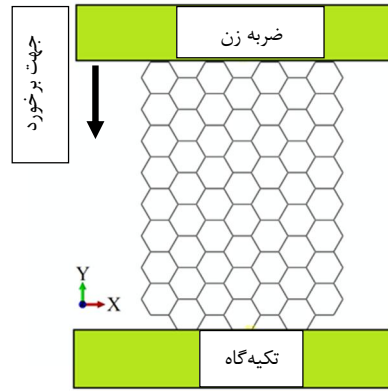
$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{h}{l} \quad (2)$$

لذا، همان‌گونه که انتظار می‌رود، با تغییر نسبت ابعاد سلولی مقدار استحکام فروریزی دینامیکی نیز دچار تغییر می‌شود. بنابراین، در مدل اجزاء محدود لانه‌زنبوری‌هایی با ابعاد مختلف ایجاد شدند و استحکام فروریزی دینامیکی در حالات مختلف برخورد استخراج شد. جدول 2 و شکل 4 نشان- دهنده مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه (2) و نتایج به دست آمده از مدل اجزاء محدود است.

همان‌گونه که در شکل 4 مشخص است، مدل اجزاء محدود تا حد قابل قبولی مقادیر استحکام فروریزی را محاسبه نموده به نحوی که بیشترین اختلاف کمتر از 18 درصد است. شکل 5 نشان‌دهنده مراحل فروریزی لانه زنبوری بدون فوم است. همان‌گونه که انتظار می‌رود در برخورد دینامیکی الگوی تخریب / حاکم است.



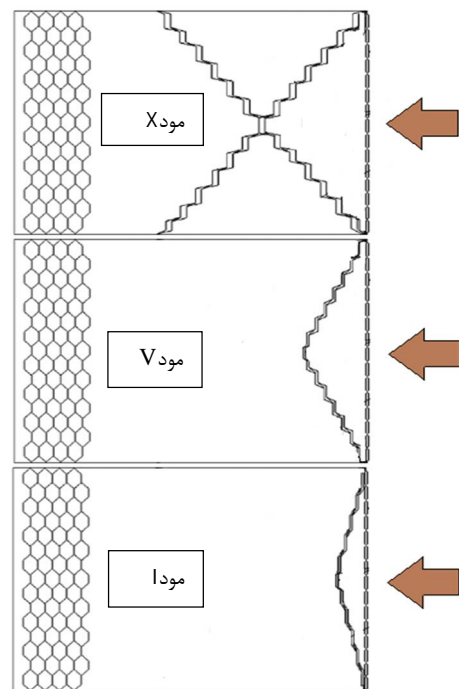
شکل 3 مقایسه نتایج تحلیلی و مدل اجزاء محدود ($h/l=0.074$, $V=50\text{m/s}$)



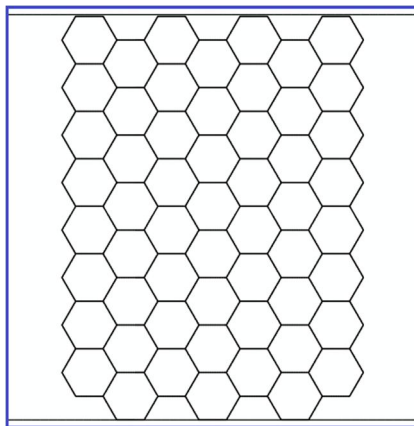
شکل 1 مدل لانه‌زنبوری ایجاد شده در نرم‌افزار اجزاء محدود

بر اساس پژوهش‌های پیشین [15-17]، به ازای هر دیواره تعداد 16 المان در لبه و 1 المان جهت خارج صفحه لحاظ شد و مش بندی مدل با استفاده از المان‌های پوسته خطی به انجام رسید. قید تماسی نیز به صورت سطح-به-سطح و با ماهیت بدون اصطکاک در نظر گرفته شد. مطالعات پیشین نشان داده است که با افزایش سرعت برخورد استحکام فروریزی نیز افزایش می‌یابد [17]. به علاوه، الگوی تغییر شکل سلول‌ها نیز وابسته به سرعت برخورد است. بدین صورت که در سرعت‌های برخورد حدود $V=1 \text{ m/s}$ (برخورد شبه استاتیکی) الگوی تغییر شکل X ، و در سرعت‌های برخورد بیش از 100m/s ($V=$ برخورد دینامیکی) الگوی تغییر شکل I حاکم است، در برخوردهایی با سرعت‌های بین 100 m/s و $V=1$ (برخورد حالت گذرا) نیز الگوی تغییر شکل به صورت V است (شکل 2).

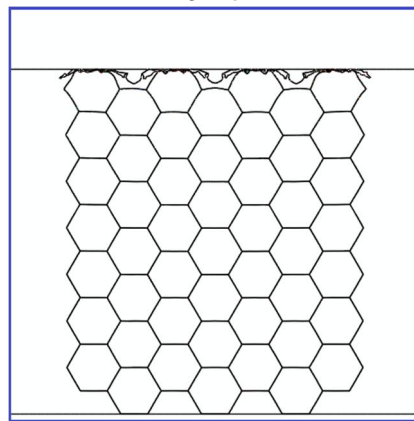
لذا، سرعت‌های برخورد $V=10, 50, 100, 200, 300 \text{ m/s}$ به منظور بررسی تاثیر نرخ بارگذاری در نظر گرفته شدند. فرایند تغییر شکل سلول‌ها به صورت لایه لایه و دارای الگویی تکرار شونده است [16-18]. بنا به همین



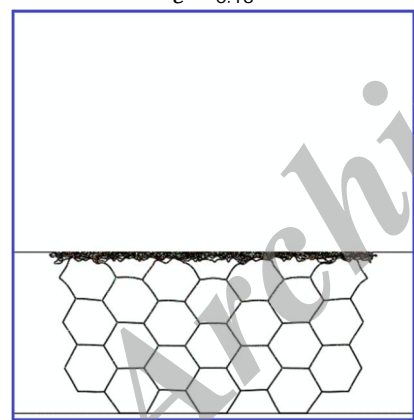
شکل 2 الگوهای تغییر شکل لانه‌زنبوری تحت برخورد صفحه‌ای [17]



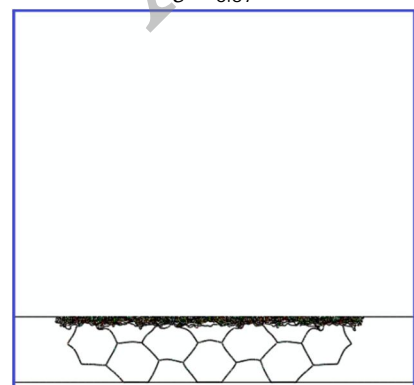
$$\varepsilon = 0$$



$$\varepsilon = 0.13$$



$$\varepsilon = 0.57$$

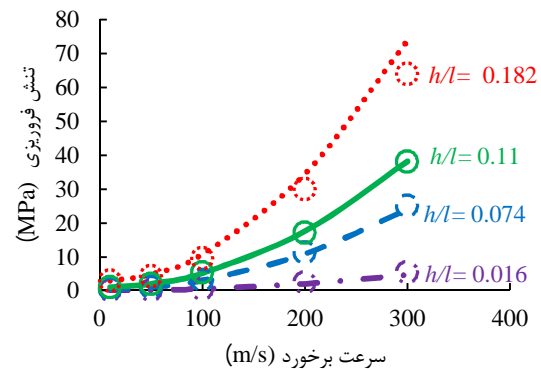


$$\varepsilon = 0.88$$

شکل 5 مراحل فروریزی هسته لانه‌زنبوری بدون فوم ($h/l=0.016$, $V=300$ m/s)

جدول 2 استحکام فروریزی لانه‌زنبوری‌ها

h/l	سرعت برخورد (m/s)	استحکام فروریزی دینامیکی (MPa)		درصد اختلاف
		تحلیلی	عددی	
0/016	10	0/027	0/023	-17/3
	50	0/149	0/16	6/8
	100	5/33	0/55	3
	200	2/067	2/3	10
	300	4/64	5/3	12
0/074	10	0/496	0/45	10
	50	1/12	1/11	-1
	100	3/07	3/2	4
	200	10/88	11/3	3/7
	300	23/9	25	4/4
0/11	10	1/08	1/12	3/5
	50	2/07	1/95	-6
	100	5/168	5/3	2/5
	200	17/55	17/1	-2/6
	300	38/198	38	-0/5
0/182	10	2/948	3	1/7
	50	4/84	4/25	-13/8
	100	10/75	9/5	-13/1
	200	34/4	30	-14/6
	300	73/81	64	-15/3

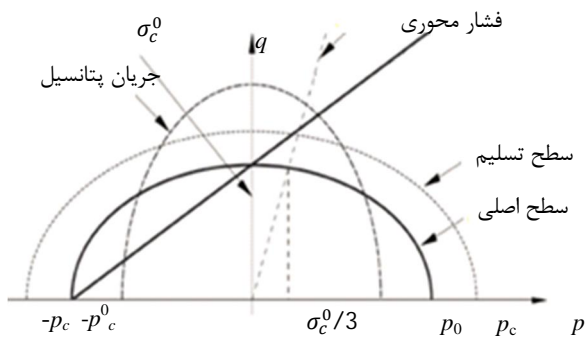


شکل 4 مقایسه پیش‌بینی‌های تحلیلی رابطه (1) و نتایج عددی

در بخش بعد هسته‌های خالی با استفاده از فوم پرشده و مقادیر استحکام فروریزی در این حالت نیز محاسبه خواهد شد.

2-2- مدل‌سازی هسته لانه‌زنبوری پرشده با فوم

به منظور بررسی تاثیر پر کردن هسته لانه‌زنبوری بر رفتار صفحه‌ای سازه، فوم پلی اورتان صلب سبک وزن به عنوان فاز پرکننده در نظر گرفته شد. علوی نیا و صادقی [13] در تحقیقات خود پیرامون بررسی استحکام فروریزی خارج صفحه‌ای لانه‌زنبوری پرشده با فوم، از سه نوع فوم پلی اورتان به عنوان فاز پرکننده استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که وجود فوم در هسته‌های



شکل 7 مدل ماده فومتخریب پذیر با خاصیت سخت‌شوندگی حجمی در حالت کلی

جدول 3 مشخصات مکانیکی فوم پلی اورتان شبیه‌سازی شده [20]

چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیک (MPa)	ضریب پواسون	پلاستیسیته	θ_p	k
65	5/5	0	1	0	

اولت و همکارانش [21] پاسخ فشاری سه نوع فوم پلیمری (پلی استر، پلی اتیلن و پلی اورتان) که تحت بار محوری قرار گرفتند را مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی آن‌ها تعیین تأثیر نرخ بارگذاری بر پاسخ مکانیکی فوم‌های ذکر شده بود. بدین منظور ابتدا تست‌های شبه استاتیکی و نرخ بارگذاری S⁻¹ 0/008 با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیکی (MTS) به‌انجام رسید. سپس، با استفاده از دستگاه برج سقوط نرخ بارگذاری تا میزان S⁻¹ 100 افزایش یافت و پاسخ تنش-کرنش هر سه نوع فوم ثبت شد. در نهایت به‌وسیله ماشین و پاسخ تنش-کرنش هر سه نوع فوم ثبت شد. در نهایت به‌وسیله ماشین PSHPB نرخ بارگذاری تا میزان S⁻¹ 2500 یافت و نتایج به‌دست آمده در این حالت با نتایج قبلی مقایسه شد. بررسی‌ها نشان داد که فوم‌های مختلف دارای حساسیت متفاوتی نسبت به نرخ بارگذاری هستند. به‌گونه‌ای که کمترین میزان حساسیت مربوط به فوم پلی اورتان صلب است که منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست آمده در محدوده نرخ بارگذاری S⁻¹ 0/008-2500 تقریباً بر هم منطبق است. بنابراین، می‌توان از خواص مکانیکی به‌دست آمده در شرایط شبه‌استاتیکی به‌منظور استفاده در تحلیل‌های دینامیکی نیز بهره جست. بنابراین، در این پژوهش تأثیر نرخ کرنش در رفتار مکانیکی فوم پلی اورتان در نظر گرفته نشد.

از المان‌های مکعبی خطی C3D8 به‌منظور مش‌بندی فوم پلی اورتان استفاده شده است. در مرحله صحت‌سنجی نتایج مشخص شد که مدل مش-بندی شده با المان‌های 1 mm به‌خوبی می‌تواند پاسخ تنش-کرنش فوم پلی اورتان را پیش‌بینی کند. سپس، فوم پلی اورتان در سلول‌های لانه‌زنبوری قرار داده شد. به‌منظور تعیین ماهیت تماسی میان فوم و هسته لانه‌زنبوری فرض چسبندگی کامل لحاظ شد و قید وابستگی تماسی¹ اعمال شد. به‌منظور حساسیت‌زدایی مدل به ابعاد المان، سه نوع مش به‌ترتیب با ابعاد المانی mm 1، 2 و 5/0 مورد تحلیل قرار گرفت. شکل 8 نشان‌دهنده پاسخ تنش-کرنش لانه‌زنبوری پر شده با فوم تحت برخورد با سرعت V = 100 m/s است. همان‌گونه که مشخص است، پاسخ‌های مربوط به اندازه المانی 2mm دارای نوسانات زیادی بوده و با کاهش اندازه المانی این نوسانات نیز کاهش می‌یابند. از سوی دیگر تغییرات نوسانی مربوط به اندازه المان 1 و 0/5 mm تقریباً مشابه بوده و سایر تحلیل‌های انجام شده برای اندازه المان‌های کوچک‌تر نیز نشان داد که در پاسخ به‌دست آمده تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود (که در

لانه‌زنبوری میزان جذب انرژی را تا میزان قابل توجهی افزایش داده و از سوی دیگر طول موج تاشدگی دیواره‌ها را کاهش می‌دهد. در این پژوهش نیز به‌منظور بررسی تأثیر پرکردن هسته لانه‌زنبوری بر رفتار صفحه‌ای سازه، فوم پلی اورتان صلب سبک وزن به عنوان فاز پرکننده در نظر گرفته شده است. از نمودار تنش-کرنش فوم [13] استفاده شد تا مدل ماده فوم تخریب‌شونده کالیبره شود (شکل 6). مدل ماده با سختی ایزوتروپیک توسط دشیپاندی و فلک [4] توسعه یافت و به‌منظور شبیه‌سازی رفتار پلاستیک فوم‌های پلی اورتان به‌کار گرفته شد.

این مدل که در نرم‌افزار آباکوس موجود است از طریق روابط سطح تسلیم رابطه (3) و جریان پتانسیل رابطه (4) رفتار ماده را تخمین می‌زند.

$$f = \sqrt{q^2 + \alpha^2 p^2} - B \quad (3)$$

$$g = \sqrt{q^2 + \beta^2 p^2} \quad (4)$$

که در آن p و q به‌ترتیب فشار و تنش ماییز هستند. در رابطه (3) مقدار سطح تسلیم بیان‌کننده دایره ماییز در صفحه انحراف تنش است. جریان پتانسیل نیز بیانگر یک بیضی گون به مرکزیت مبدا مختصات صفحه p - q است (شکل 7).

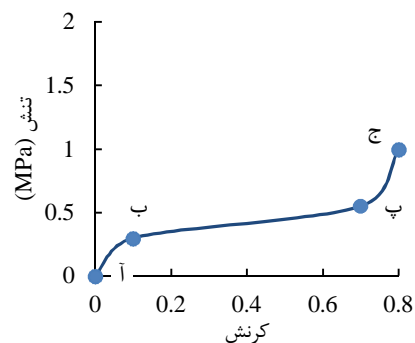
پارامتر B ، α و β به‌ترتیب برابر با انحراف تنش، فاکتور حالت و شکل بیضی گون هستند. فاکتور حالت نیز از طریق رابطه (5) به‌دست می‌آید.

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{9-k}} \quad (5)$$

که در آن پارامتر k برابر با نسبت تنش ماییز اولیه (σ_c^0) به فشار هیدرواستاتیک اولیه (p_0^0) است. در بسیاری از فوم‌های سبک وزن سطح تسلیم اولیه در صفحه p - q تقریباً به شکل دایره است که به‌دلیل صفر بودن مقدار k و در نتیجه واحد بودن پارامتر فاکتور حالت است [19]. پارامتر β از طریق رابطه (6) به‌دست خواهد آمد.

$$\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{1-2\theta_p}{1+2\theta_p}} \quad (6)$$

که در آن θ_p ضریب پواسون پلاستیک است که برابر با نسبت کرنش پلاستیک عرضی به طولی در شرایط فشار محوری است. برای فوم‌های پلی-اورتان سبک وزن مقدار ضریب پواسون پلاستیک تقریباً برابر صفر بوده و در نتیجه مقدار β برابر با 2/12 است [19]. مدول الاستیسیته فوم (E_f) برابر با شیب خط آ-ب در شکل 6 است. به‌منظور تعیین بیضی گون اولیه نیاز به تعیین دو پارامتر تنش تسلیم ماییز و هیدرواستاتیکی اولیه است. مقدار (σ_c^0) برابر با تنش در نقطه (ب) در شکل 6 است. با فرض واحد بودن مقدار k می‌توان مقدار α و سپس p_0^0 را به‌دست آورد [20]. خط (ب-ج) در شکل 6 نیز برای تعریف سختی ایزوتروپیک و گسترش سطح تسلیم کافی است. مشخصات مکانیکی فوم پلی اورتان در جدول 3 نشان داده شده است.



شکل 6 منحنی تنش-کرنش فوم پلی اورتان صلب

1- Tie constraint

پیرامون دو پارامتر استحکام فروریزی و انرژی جذب شده مورد مطالعه قرار می‌گیرد [13]. از آنجایی که هدف از به‌کارگیری فوم پلی اورتان به‌عنوان فاز پرکننده هسته لانه‌زنبوری افزایش نسبت استحکام به وزن سازه است، لذا، میزان افزایش وزن پنل در هنگام به‌کارگیری فوم نیز می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد.

3-1- استحکام فروریزی

در جدول 4 مقدار استحکام فروریزی برای هسته‌های مختلف در حالت خالی و پرشده با فوم ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است، بیشترین مقدار افزایش استحکام فروریزی مربوط به هسته لانه‌زنبوری با نسبت ابعادی 0/016 است. درحالی که با افزایش چگالی هسته لانه‌زنبوری میزان اختلاف استحکام فروریزی در موارد خالی و پرشده با فوم کاهش می‌یابد.

مطابق جدول 4، افزایش جرم هسته در سبک‌ترین لانه‌زنبوری برابر با 111 درصد است که با افزایش چگالی لانه‌زنبوری مقدار افزایش جرم تا میزان 9/6 درصد کاهش می‌یابد. اگرچه در لانه‌زنبوری با نسبت ابعادی 0/016، جرم هسته به دو برابر افزایش یافته است، اما همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار استحکام فروریزی 24 برابر شده است. با مقایسه استحکام فروریزی در شرایط شبه استاتیکی مشخص می‌شود که در تمامی هسته‌ها درصد افزایش استحکام

این مقاله ذکر نشده‌اند). هرچند به‌صورت کلی نوسانات ایجاد شده در پاسخ تنش-کرنش تنها در تحلیل‌های برخورد با سرعت بالا مشاهده شد و در شرایط شبه استاتیکی تغییرات به‌صورت ملایم مشاهده شد. در نهایت مش-بندی فوم با المان‌های 1mm به‌عنوان مدل بهینه در نظر گرفته شد. سایر مشخصات مدل در تحلیل‌های برخورد مختلف مشابه با مدل لانه‌زنبوری بدون فوم در نظر گرفته شد.

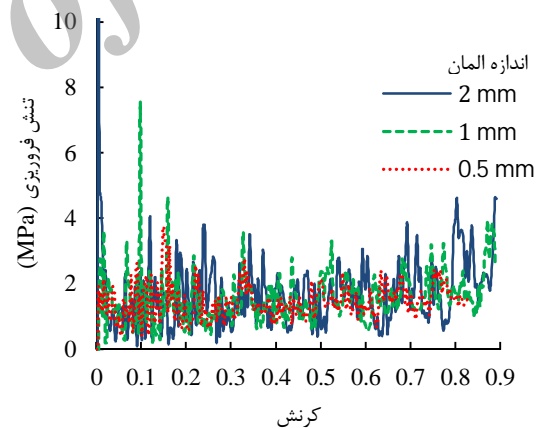
شکل 9 پاسخ مکانیکی فوم پلی اورتان تحت برخورد با سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش سرعت برخورد مقدار استحکام فروریزی نیز افزایش یافته و متعاقباً مقدار کرنش چگال‌شدگی نیز کاهش می‌یابد. در برخورد با سرعت $V=10$ m/s مقدار استحکام فروریزی برابر با 0/35 MPa است که برابر با مقدار استحکام فروریزی استاتیکی فوم است. با افزایش سرعت برخورد مقدار استحکام فروریزی روند افزایشی داشته، به نحوی که در برخورد با سرعت 100m/s و $V=50$ این مقدار به ترتیب برابر با 0/45 و 0/9 MPa است. افزایش استحکام فروریزی در سرعت‌های برخورد بیشتر از 100 m/s به شدت افزایش یافته است، و همان‌گونه که مشاهده می‌شود در سرعت‌های برخورد 300m/s و $V=200$ این مقدار به ترتیب برابر با 6/8 و 3 MPa است.

3- بحث و نتیجه‌گیری

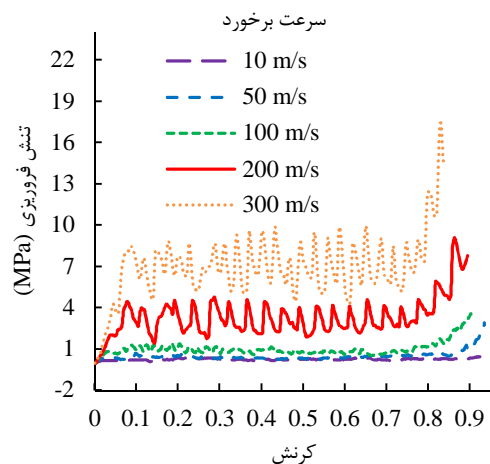
در این قسمت نتایج بررسی مربوط به پاسخ هسته لانه‌زنبوری خالی و پرشده با فوم ارائه می‌شود. رفتار غیرخطی هسته در شرایط برخورد صفحه‌های عمده‌تا

جدول 4 استحکام فروریزی لانه‌زنبوری‌های خالی و پرشده با فوم

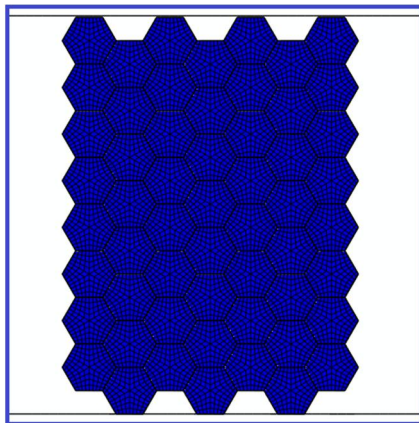
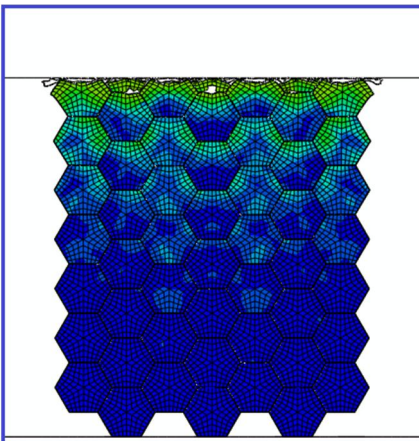
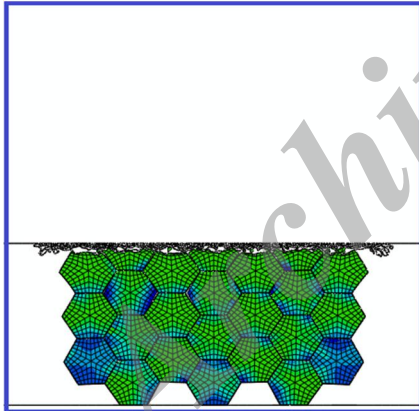
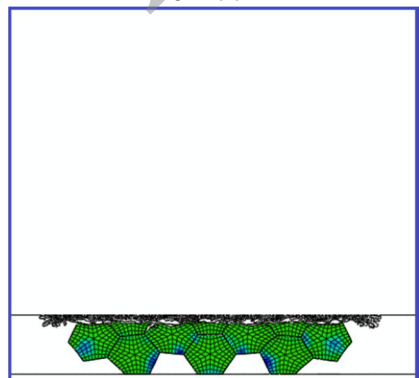
h/l	سرعت برخورد (m/s)	استحکام فروریزی هسته لانه‌زنبوری (MPa)		درصد افزایش جرم هسته
		درصد		
		بدون فوم	پرشده با فوم	
0/016	10	0/02	0/5	2400
	50	0/16	0/68	325
	100	0/55	1/4	155
	200	2/4	5/1	122
	300	5/3	11/5	117
0/074	10	0/45	0/9	100
	50	1/11	1/5	36
	100	3/2	4/3	34
	200	11/3	14/5	28
0/11	100	5/3	6/2	16
	200	17/1	19/5	14
	300	38	42/2	11
0/182	10	3	3/5	17
	50	4/25	4/9	15
	100	9/5	11	12
	200	30	33	10
300	64	70	9	



شکل 8 تاثیر ابعاد المان در پاسخ لانه‌زنبوری پرشده با فوم ($V=100$ m/s)



شکل 9 استحکام فروریزی فوم پلی اورتان در سرعت‌های مختلف برخورد

 $\varepsilon = 0$  $\varepsilon = 0.13$  $\varepsilon = 0.57$  $\varepsilon = 0.88$

شکل 10 مراحل فروریزی هسته لانه‌زنبوری پرشده با فوم
($h/l=0.016$, $V=300$ m/s)

فروریزی بیش از درصد افزایش وزن است، یا به عبارت دیگر افزودن فوم موجب افزایش نسبت استحکام به وزن هسته شده است که به سبب اندرکنش میان دیواره‌های سلولی لانه‌زنبوری و فوم پلی اورتان است [13، 14]. شکل 10 نشان‌دهنده مراحل فروریزی لانه‌زنبوری پرشده با فوم است. همان‌گونه که مشخص است وجود فوم در هسته لانه‌زنبوری تأثیر چندانی بر الگوی تغییر شکل هسته لانه‌زنبوری نداشته است.

شکل 11 و 12 نشان‌دهنده پاسخ لانه‌زنبوری‌های خالی و پرشده با فوم در شرایط شبه استاتیکی است. با مقایسه منحنی‌های تنش و کرنش مشخص می‌شود که در موارد پرشده با فوم تغییرات تنش دارای نوسانات جزئی هستند که به دلیل تغییر شکل‌های غیرخطی محلی المان‌های فوم است. در شکل 13، پاسخ لانه‌زنبوری با نسبت ابعادی 0/074 در شرایط شبه استاتیکی ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار استحکام فروریزی در لانه‌زنبوری پرشده با فوم بیش از مجموع مقادیر استحکام فروریزی لانه‌زنبوری و فوم است. با افزایش سرعت برخورد تأثیر افزودن فوم به هسته لانه‌زنبوری کاهش یافته به نحوی که در لانه‌زنبوری با نسبت ابعادی 0/182 مقدار استحکام فروریزی به میزان 9 درصد افزایش یافته است. دلیل اصلی این رفتار مکانیکی را می‌توان در نرخ تغییرات استحکام فروریزی برحسب سرعت برخورد مشاهده نمود.

همان‌طور که در شکل 14 نشان داده شده است، در سرعت‌های برخورد پایین نرخ تغییرات استحکام فروریزی (شیب منحنی) در فوم و هسته لانه‌زنبوری تقریباً یکسان است، اما در سرعت‌های برخورد بالاتر منحنی پاسخ مکانیکی در لانه‌زنبوری‌ها به شدت غیرخطی شده و به طبع آن استحکام نیز تا حد قابل توجهی افزایش می‌یابد. اما در فوم پلی اورتان پاسخ به برخورد به صورت تقریباً خطی است و به همین دلیل استحکام فروریزی با افزایش سرعت برخورد تغییر چندانی پیدا نمی‌کند (شیب منحنی ملایم است). در نتیجه در سرعت‌های بالای برخورد (بیش از 100 m/s) افزودن فوم به هسته لانه‌زنبوری نمی‌تواند به‌عنوان روشی موثر در افزایش استحکام فروریزی پنل مورد استفاده قرار گیرد.

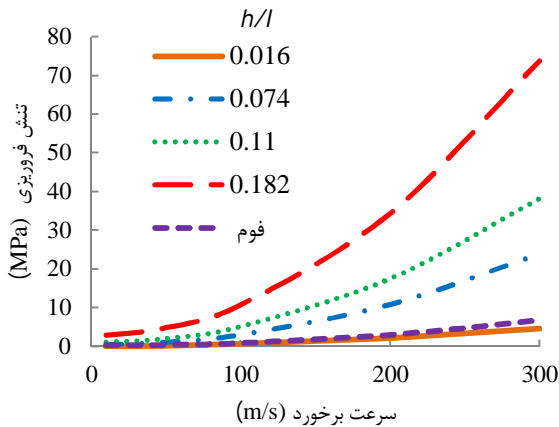
3-2- انرژی جذب شده

مقدار انرژی جذب شده براساس ناحیه زیر منحنی نیرو-جابجایی به دست آمد. بدین منظور، منحنی نیرو-جابجایی در نقطه کرنش چگال‌شدگی قطع داده شد و مساحت زیر نمودار تا قبل از کرنش چگال‌شدگی محاسبه شد. سپس، مقدار ظرفیت انرژی جذب شده براساس مقدار انرژی جذب شده به‌ازای جرم هسته به‌دست آمد (شکل‌های 15-19).

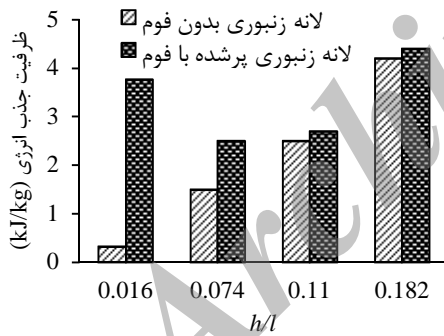
در شکل 15 مقدار ظرفیت انرژی جذب شده در برخورد با سرعت m/s 10 نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است بیشترین افزایش ظرفیت انرژی جذب شده مربوط به لانه‌زنبوری با نسبت ابعادی 0/016 است. در این هسته مقدار ظرفیت جذب انرژی حدود 11 برابر شده است. به‌علاوه مشاهده می‌شود که در شرایط شبه استاتیکی مقدار ظرفیت انرژی جذب شده در هسته پرشده با فوم با نسبت ابعادی 0/016 بیش از مقادیر ظرفیت جذب انرژی در هسته‌های با نسبت ابعادی 0/074 و 0/11 است. بنابراین، افزودن فوم پلی اورتان به هسته لانه‌زنبوری می‌تواند منجر به افزایش کارایی پنل از لحاظ مقدار ظرفیت انرژی جذب شده شود. اگرچه با افزایش چگالی هسته لانه‌زنبوری تأثیر فاز فوم افزوده شده کاهش پیدا می‌کند. در شکل‌های 16 و 17 مشاهده می‌شود که در سرعت برخورد 100 m/s و 50 m/s تفاوت میان

4- جمع‌بندی

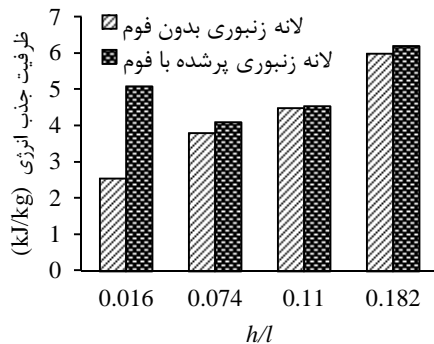
تحقیق حاضر به بررسی تاثیر وجود فوم پلی اورتان در هسته لانه‌زنبوری می‌پردازد. در مقاله حاضر رفتار غیرخطی هسته لانه‌زنبوری تحت برخورد با سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای اصلی مورد بحث در این پژوهش مقدار استحکام فروریزی و ظرفیت جذب انرژی در هسته لانه‌زنبوری خالی و پرشده با فوم است. نمودارهای تنش-کرنش ثبت شده نشان داد که با کاهش چگالی هسته لانه‌زنبوری مقدار افزایش استحکام فروریزی ناشی از وجود فوم پلی اورتان چشمگیر است و بالعکس با افزایش



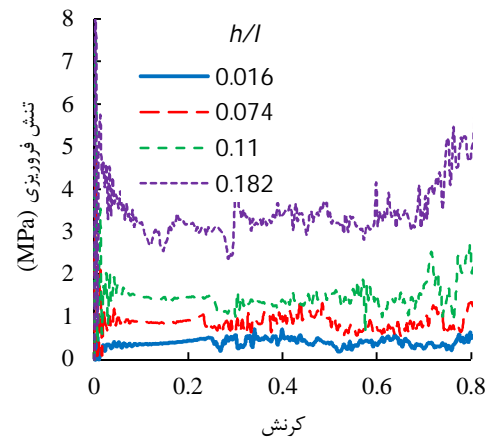
شکل 14 استحکام فروریزی لانه‌زنبوری‌ها و فوم پلی اورتان در سرعت‌های مختلف برخورد



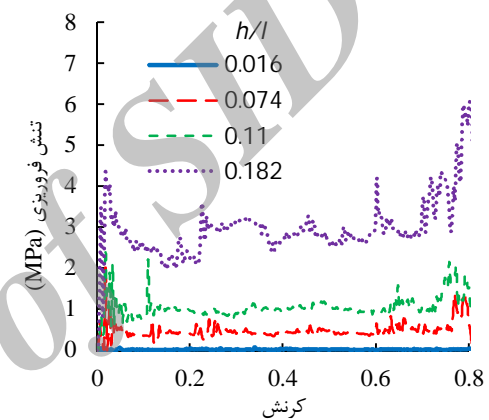
شکل 15 ظرفیت جذب انرژی (V=10 m/s)



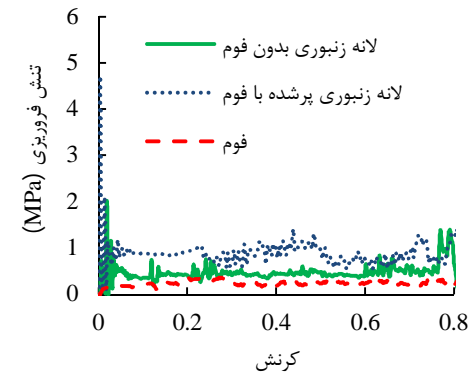
شکل 16 ظرفیت جذب انرژی (V=50 m/s)



شکل 11 استحکام فروریزی لانه‌زنبوری خالی (V=10 m/s)



شکل 12 استحکام فروریزی لانه‌زنبوری پرشده با فوم (V=10 m/s)

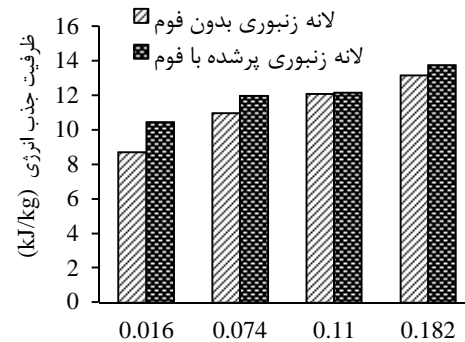


شکل 13 افزایش استحکام فروریزی به واسطه فاز فوم (h/l=0.074, V=10 m/s)

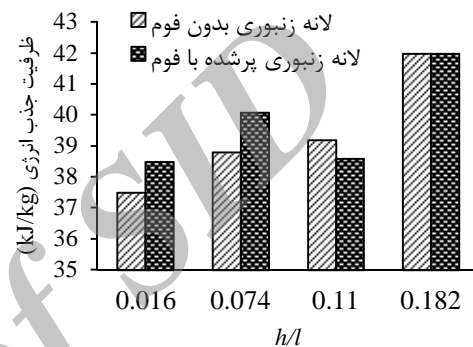
هسته‌های خالی و پرشده کاهش می‌یابد به نحوی که لانه‌زنبوری با نسبت ابعادی 0/11 و 0/182 مقدار ظرفیت انرژی در دو حالت تقریباً یکسان است. مطابق شکل‌های 18 و 19 در سرعت برخورد 300 m/s و 200 m/s مشاهده می‌شود که افزودن فوم موجب کاهش ظرفیت جذب انرژی شده به‌گونه‌ای که در لانه‌زنبوری با نسبت ابعادی 0/11 در سرعت برخورد V=300 m/s مقدار ظرفیت جذب انرژی در حالت پرشده با فوم نسبت به حالت خالی 4 درصد کاهش یافته است. در این حالت جرم افزوده شده به پنل به‌واسطه فوم پلی اورتان بیش از تاثیر آن در افزایش استحکام گسیختگی دینامیکی است، یا به عبارت دیگر، موجب کاهش مقدار نسبت استحکام به وزن سازه می‌شود.

5- مراجع

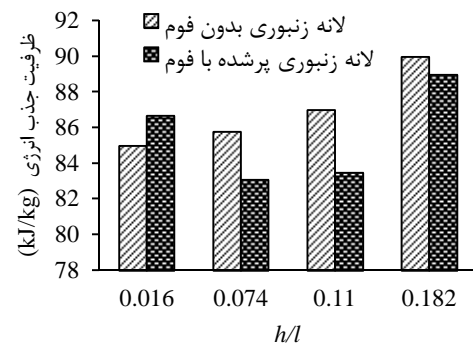
- [1] T. Sadowski, J. Be, Effective properties for sandwich plates with aluminum foil honeycomb core and polymer foam filling – Static and dynamic response, *Journal of Computational Materials Science*, Vol. 50, pp. 1269–1275, 2011.
- [2] L. J. Gibson, M. F. Ashby, Cell. Solids, *Oxford: Pergamon Press*, 1997.
- [3] J. Schultz, D. Griese, J. Ju, P. Shankar, Design of Honeycomb Mesostructures for Crushing Energy Absorption, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 134, pp. 07004-9, 2012.
- [4] V. S. Deshpandeh, N. A. Fleck, Multi-axial yield behavior of polymer foams, *Acta Materialia*, Vol. 49, pp. 1859–66, 2001.
- [5] J. R. Vinson, Sandwich structures, *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 54, No. 3, pp. 201–214, 2001.
- [6] A. Fereidoon, H. Hemmatian, A. Mohammad zadeh, E. Assareh, Sandwich panel optimization based on yielding and buckling criteria by using of imperialist competitive algorithm, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 25-35, 2013. (In Persian)
- [7] M. Mohammadian, A. Fereidoon, Multi objective optimization of sandwich panels using particle swarm algorithm, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 74-82, 2014. (In Persian)
- [8] S. Feli, S. S. Jafari, Analytical investigation of perforation of aluminum-foam sandwich panels under ballistic impact, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 52-59, 2013. (In Persian)
- [9] M. Zia Shamami, M. H. Pol, H. Khodarahmi, Experimental investigation of ballistic properties of Aluminum Foam structure, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 22-27, 2013. (In Persian)
- [10] N. Pirmohammadi, G. H. Liaghat, M. H. Pol, Experimental investigation on ballistic behavior of sandwich panels made of honeycomb core, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 21-26, 2014. (In Persian)
- [11] S. Reuterlöv, Causes for and Preventive Action to Avoid, Disbonds and Blistering, *DIAB Technologies*, Divinycell International AB, Laholm, Sweden, 2002.
- [12] N. Vyacheslav, T. Sadowski, Analysis of structural performance of sandwich plates with foam-filled aluminum hexagonal honeycomb core, *Computational Materials Science*, Vol. 45, pp. 658-662, 2009.
- [13] A. Alavi Nia, M. Z. Sadeghi, The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loading-experimental study, *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 1216–1230, 2010.
- [14] M. Zarei Mahmoudabadi, M. Sadighi, A study on the static and dynamic loading of the foam filled metal hexagonal honeycomb—Theoretical and experimental, *Materials Science and Engineering*, Vol. 530, pp. 333-334, 2011.
- [15] H. Lingling, F. You, T. Yu, Analyses on the dynamic strength of honeycombs under the y-directional crushing, *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 293-301, 2014.
- [16] K. Li, X. L. Gao, J. Wang, Dynamic crushing behavior of honeycomb structures with irregular cell shapes and non-uniform cell wall thickness, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, pp. 5003-5026, 2007.
- [17] Z. Zou, S. R. Reid, P. J. Tan, S. Li, J. J. Harrigan, Dynamic crushing of honeycombs and features of shock fronts, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, pp. 165-176, 2009.
- [18] L. L. Hu, T. X. Yu, Dynamic crushing strength of hexagonal honeycombs, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 467-474, 2010.
- [19] D. Ruan, G. Lu, B. Wang, T. X. Yu, In-plane dynamic crushing of honeycombs-finite element study, *Int J Impact Eng*, Vol. 28, pp. 161-82, 2003.
- [20] A. Ghamarian, H. Zarei, M. T. Abadi, Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes, *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 49, pp. 1312-1319, 2011.
- [21] S. Ouellet, D. Cronin, M. Worswick, Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions, *Journal of Polymer and Testing*, Vol. 25, pp. 731-743, 2006.



شکل 17 ظرفیت جذب انرژی (V=100 m/s)



شکل 18 ظرفیت جذب انرژی (V=200 m/s)



شکل 19 ظرفیت جذب انرژی (V=300 m/s)

چگالی هسته لانه‌زنبوری تاثیر فوم پلی اورتان در افزایش استحکام فروریزی کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده مربوط به ظرفیت جذب انرژی نیز نشان داد که در لانه‌زنبوری با نسبت ابعادی 0/016 این مقدار در شرایط شبه استاتیکی تا 11 برابر افزایش داشته است. به‌علاوه، در این حالت مقدار ظرفیت جذب انرژی بیش از هسته‌های لانه‌زنبوری با نسبت ابعادی 0/074 و 0/11 است. همچنین، مشاهده شد که با افزایش سرعت برخورد، میزان تاثیر فوم موجود در هسته در افزایش پارامترهای استحکام فروریزی و انرژی جذب شده کاهش می‌یابد.