

ISME2015-10110621104

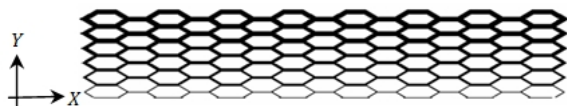
## مطالعه سازه لانه زنبوری مدرج تحت بارگذاری ضربه‌ای درون و برون صفحه‌ای

سید علی گله داری<sup>1</sup>، مهران کدخدایان<sup>2</sup>

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری، مشهد، دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، [ali.galehdari@gmail.com](mailto:ali.galehdari@gmail.com)

<sup>2</sup> استاد، مشهد، دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، [kadkhoda@um.ac.ir](mailto:kadkhoda@um.ac.ir)

و با استفاده از روش اجزاء محدود، موده‌های مختلف تغییرشکل و میزان جذب انرژی را در این گونه سازه‌ها تحلیل نمودند. محمد علی و همکاران [6] رفتار سازه لانه زنبوری مدرج را تحت بارگذاری ضربه‌ای مدل‌سازی نموده‌اند و رابطه‌ای تحلیلی برای تنش مسطح بر اساس مدل ماده کشسان-کاملاً مومسان ارائه دادند. لانه زنبوری‌ها اغلب در جهت برون صفحه‌ای به عنوان جاذب ضربه مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما در جهت درون صفحه‌ای به عنوان جاذب مزیت‌هایی نسبت به حالت برون صفحه‌ای دارد. در این پژوهش نوع بارگذاری و نرخ مدراج بودن مادی و هندسی سازه لانه زنبوری مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل 1: مدل بهبود یافته پوست موز [3]

### بررسی نرخ مدراج بودن سازه لانه زنبوری مدرج

در این قسمت تحلیل عددی برای سه نوع سازه لانه زنبوری مدرج انجام شده است. مطابق شکل (1) در نوع اول ضخامت لایه‌ها از بالا به پایین کاهش (مدل 1)، در نوع دوم از بالا به پایین افزایش (مدل 2) یافته و در نوع سوم (مدل 3) علاوه بر کاهش ضخامت لایه‌ها مقاومت تسلیم ماده تشکیل دهنده سازه کاهش یافته است. در مدل‌های 1 و 2 سخته سازه از بالا به سمت پایین کاهش یافته و برای مدل 3 افزایش یافته است. جهت مدل‌سازی هندسه سازه لانه زنبوری مدرج ردیف‌ها به ضخامت متفاوت جداگانه مدل‌سازی شده و در نهایت به یکدیگر متصل شده است. در این مدل‌سازی، سازه متشکل از 6 سلول در راستای Y و 15 سلول در راستای X می‌باشد. برای هر سلول  $I = 2/23$  و  $c = 2/23$  میلی‌متر و  $\phi = 62.3^\circ$  می‌باشد. برای مدل 1 و 3 ضخامت پوسته ردیف‌های اول تا ششم و برای مدل 2 ضخامت پوسته ردیف‌های ششم تا اول به ترتیب 0/05، 0/02، 0/03، 0/04، 0/05 و 0/6 میلی‌متر، ارتفاع سازه 6 و عرض آن 77 میلی‌متر می‌باشد. دو صفحه صلب A و B در بالا و پایین این سازه مدل‌سازی می‌شود. مدل نهایی سازه GHS در محیط نرم افزار مطابق شکل (2) می‌باشد.

### چکیده

با توجه به اهمیت جذب انرژی در صنایع مختلف، جاذب‌های ضربه سبک از جمله سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری درون و برون صفحه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق با استفاده از روش عددی رفتار سازه لانه زنبوری تحت بار درون و برون صفحه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین رفتار سازه لانه زنبوری مدرج تحت بارگذاری درون صفحه‌ای بسته به نوع و نرخ مدراج بودن بررسی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده سازه مدرج با نرخ کاهش سختی از محل اعمال بار، در شرایطی که مدت زمان انتقال و مقدار نیرو مورد توجه است، کارایی مناسبتری دارد.

### واژه های کلیدی

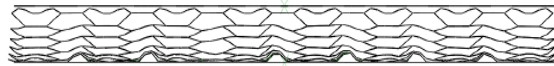
لانه زنبوری مدرج، بارگذاری درون صفحه‌ای، ضربه، جذب انرژی

### مقدمه

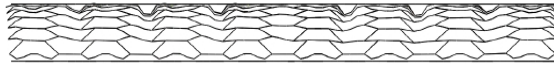
با توسعه سریع صنایع اتومبیل‌سازی، حمل و نقل و مهندسی هوا-فضا، بررسی ظرفیت جذب انرژی در وسایل نقلیه و سازه‌های محافظ به یکی از مهمترین زمینه‌های تحقیقاتی تبدیل شده است. در دهه گذشته، انواع مختلفی از مواد و سازه‌ها با ظرفیت جذب انرژی ویژه بالا نظیر سازه‌های لانه زنبوری و سازه‌های جدار نازک بررسی شده است [1]. سازه‌های لانه زنبوری از جمله اولین جاذب‌های ضربه مورد استفاده در صنایع خودروسازی، هوا فضا و بسته بندی می‌باشند. در یک مثال دیگر، ساختار داخلی استخوان یک سازه‌ی بهینه شده از لحاظ وزن در برابر اعمال تنش‌های اصلی و برشی می‌باشد [2]. بر اساس این مثال‌های طبیعی و الهام گرفتن از ساختار آنها، می‌توان سازه‌های بهینه، با قابلیت جذب بیشترین انرژی ضربه‌ای طراحی نمود. در ساختار موز، وظیفه‌ی پوست موز حفاظت مغز نرم موز در برابر بارهای ضربه‌ای خارجی می‌باشد. ساختار پوست موثرتریا<sup>1</sup> با سازه لانه زنبوری مدرج<sup>1</sup> (شکل 1) مدل‌سازی شده است [3]. روان و همکاران [4] تخریب درون صفحه‌ای سازه‌های لانه زنبوری را مطالعه نمودند. آنها اثر ضخامت دیواره سلول و سرعت بار ضربه‌ای را بر مود تغییر شکل و تنش مسطح با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>2</sup> بررسی و یک فرمول تحلیلی برای محاسبه‌ی تنش مسطح در سرعت‌های بالا ارائه نمودند. اژدری و همکاران [5] رفتار تخریب دینامیکی و میزان جذب انرژی سازه لانه زنبوری منظم و نامنظم و تابعی مدرج را بررسی

<sup>1</sup> Graded Honeycomb Structure(GHS)

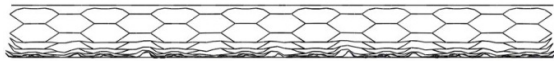
<sup>2</sup>ABAQUS



(الف)



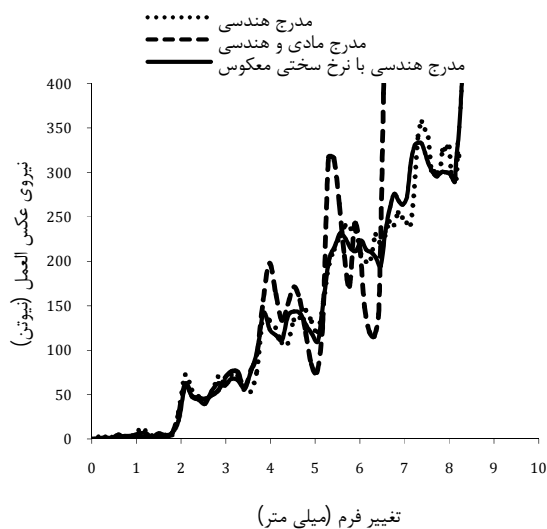
(ب)



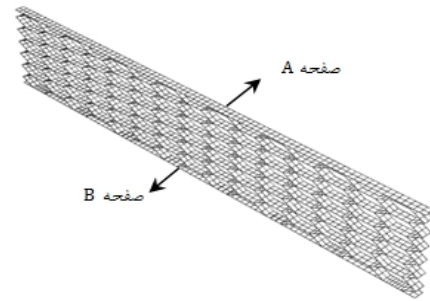
(پ)

شکل 3: نمونه تغییر فرم یافته الف) مدل 1 در زمان 8/2 میلی ثانیه، ب) مدل 2 در زمان 8 میلی ثانیه و پ) مدل 3 در زمان 5/8 میلی ثانیه

از جمله پارامترهای مهم در جاذب‌های انرژی، میزان نیروی عکس‌العمل سازه، میزان و زمان جذب انرژی می‌باشد. برای یک جاذب مطلوب‌ست که بیشترین انرژی را در طولانی‌ترین مدت با حداقل نیروی عکس‌العمل جذب نماید. انرژی جنبشی وارد شده به سازه به انرژی داخلی تبدیل می‌گردد. به مجموع انرژی کرنشی و انرژی پلاستیک تغییر فرم، انرژی داخلی گفته می‌شود. نمودار نیرو-تغییر مکان سازه و انرژی جنبشی-زمان برای سه مدل به ترتیب در شکل‌های (4) و (5) ارائه شده است. در نمودار شکل (4) نیرو، نیروی عکس‌العمل وارد به صفحه B و تغییر مکان مربوط به جابجایی صفحه A می‌باشد.



شکل 4: نمودار نیرو-تغییر مکان

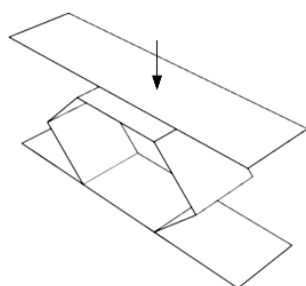


شکل 2: مدل سازی سازه لانه زنبوری مدرج

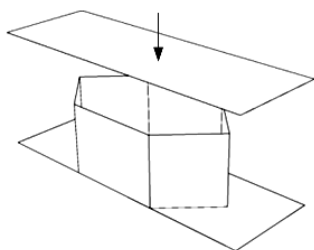
برای مدل 1 و 2 جنس تمام ردیف‌های این سازه از آلومینیوم می‌باشد. برای این نوع آلومینیوم چگالی برابر  $2700 \text{ kg/m}^3$  مدول الاستیسیته برابر 69 گیگا پاسکال، ضریب پواسون برابر 0/33 و مقاومت تسلیم برابر 76 مگا پاسکال می‌باشد. اما برای مدل 3 جنس ردیف‌های اول و دوم از آلومینیوم 6061-O با مقاومت تسلیم 55/15 مگا پاسکال، جنس ردیف‌های سوم و چهارم از آلومینیوم 5052-O با مقاومت تسلیم 89/63 مگا پاسکال و جنس ردیف‌های پنجم و ششم از آلومینیوم 2024-T4 با مقاومت تسلیم 324/05 مگا پاسکال می‌باشد. بنابراین در این مدل سختی سازه از بالا به سمت پایین هم از لحاظ هندسی و هم از لحاظ مادی کاهش یافته است. لازم به ذکر است که مدل مادی آلومینیوم کشسان-کاملاً مومسان در نظر گرفته شده است. به منظور شبکه‌بندی سازه لانه زنبوری از المان پوسته‌ای 4 گره‌ای S4R و برای صفحات صلب A و B از المان دو خطی چهار گره‌ای R3D4 استفاده شده است. به منظور شبکه‌بندی پوسته‌ها در نرم‌افزار آباکوس می‌توان از المان S4R استفاده نمود. در این المان کرنش برشی در راستای ضخامت ثابت فرض می‌گردد. با توجه به اینکه سازه دارای هندسه منظم بوده و از ورق نازک ساخته شده، از المان پوسته‌ای 4 گره‌ای استفاده شده است. به منظور شبکه‌بندی اجسام صلب در نرم‌افزار آباکوس می‌توان از المان R3D4 استفاده نمود. به دلیل هندسه منظم صفحه صلب از المان 4 گره‌ای استفاده شده است. مدل شبکه‌بندی شده شامل 1593 المان S4R، 310 المان R3D4 و 2734 گره می‌باشد. به منظور اتصال لایه‌های مختلف سازه از مدول چسباندن استفاده شده است. همچنین تماس بین صفحه A و سازه از اتصال صفحه به صفحه جنبشی و برای تماس صفحه صلب B به سازه از اتصال پنالتی بدون اصطکاک استفاده شده است. به منظور اعمال شرایط مرزی بر روی صفحه A حرکت تنها در راستای y (راستای برخورد) آزاد گذاشته شده است. در حالی که تمام درجات آزادی صفحه B بسته شده است. صفحه صلب A به جرم یک کیلوگرم با سرعت 1/5 متر بر ثانیه به سازه برخورد نموده است. اعمال سرعت به صفحه صلب A با استفاده از مدول حوزه از پیش تعریف شده 3 انجام شده است.

در شکل (3) تغییر فرم یافته سازه هر سه مدل در انتهای زمان جذب کامل انرژی جنبشی ارائه شده است.

باشد، اهمیت مدت زمان انتقال نیرو، افزایش می‌یابد. زیرا هرچه بار ضربه‌ای در مدت زمان بیشتری انتقال یابد، آسیب کمتری به بدن انسان یا قطعه وارد می‌آید. اگر بارگذاری بر روی سازه لانه زنبوری در جهت درون صفحه‌ای انجام پذیرد، مدت زمان انتقال نیرو در مقایسه با بارگذاری خارج از صفحه افزایش می‌یابد. به منظور مطالعه این موضوع در این تحقیق، برخورد یک جرم یک کیلوگرمی با سرعت  $5 \text{ m/s}$  بر دو سلول مشابه لانه زنبوری منظم در جهت درون و برون صفحه‌ای در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. اندازه ضلع و عمق سلول یک سانتی‌متر است. نحوه‌ی بارگذاری درون و برون صفحه‌ای در شکل (6) نشان داده شده است.



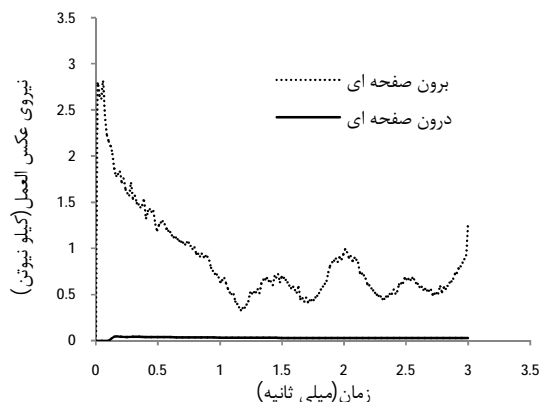
(الف)



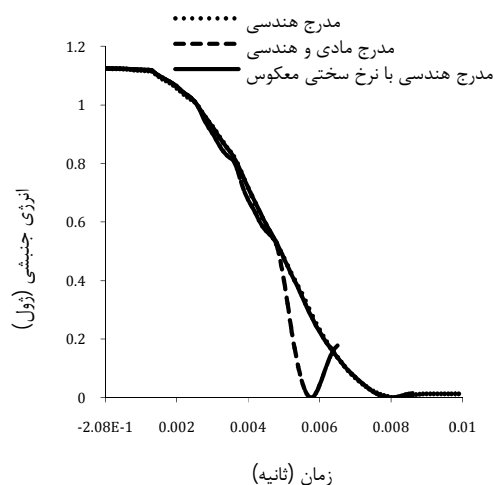
(ب)

شکل 6: نحوه‌ی بارگذاری، (الف) درون صفحه‌ای و (ب) برون صفحه‌ای

بر اساس نتایج عددی بدست آمده نمودار نیرو بر حسب زمان در دو حالت بارگذاری مطابق شکل (7) است.



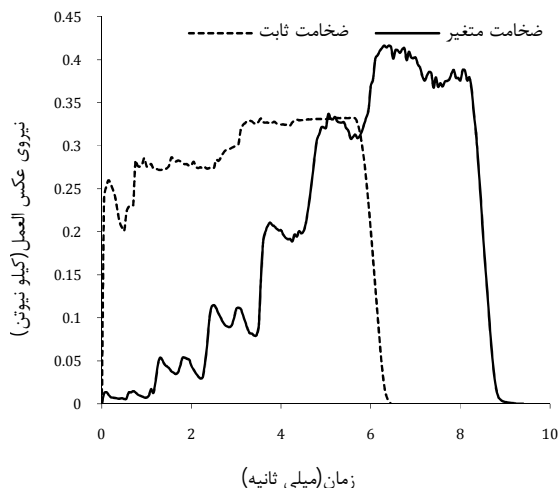
شکل 7: نمودار نیرو بر حسب زمان در دو حالت بارگذاری درون و برون صفحه‌ای



شکل 5: نمودار انرژی جنبشی - زمان

با توجه به نمودارهای فوق، می‌توان نمودار شکل (4) برای مدل 1 و 2 را به شش ناحیه تقسیم نمود. در هر ناحیه نیرو (تنش) به ازا تغییر فرم (کرنش قفل‌شدگی) دارای مقدار تقریباً ثابتی می‌باشد. این مقدار تنش ثابت همان تنش مسطح است. هر یک از این شش ناحیه مربوط به خرابی کامل یک ردیف از سازه می‌باشد. تغییرات نیرو بر حسب تغییر مکان برای مدل‌های 1 و تقریباً شبیه یکدیگر می‌باشند، اما برای مدل 3 نیروی عکس‌العمل بیشتر از دو مدل دیگر بوده و دارای 4 تنش مسطح است. با توجه به شکل (3-پ) برای این مدل ردیف‌های پنجم و ششم از سازه دچار تغییر فرم نشده است. بنابراین چهار تنش مسطح ایجاد شده در شکل (4) برای ردیف‌های اول تا چهارم است. لازم به ذکر است که پایین بودن نیروی عکس‌العمل از جمله خواص مطلوب برای جاذب می‌باشد. با توجه به این خاصیت مدل 1 و 2 کارایی مناسبتری نسبت به مدل 3 دارند. با توجه به شکل (5) نرخ جذب انرژی توسط سازه مدل 1 و 2 تقریباً شبیه یکدیگر است. جذب انرژی برای این دو مدل با شیب ملایم‌تری نسبت به سازه مدل 3 انجام شده است. همچنین مدل 1 نسبت به دیگر مدل‌ها، انرژی جنبشی را در مدت زمان طولانی‌تری جذب نموده است. طولانی بودن بازه زمانی جذب انرژی از جمله پارامترهای مثبت برای جاذب‌ها می‌باشد. بنابراین از این دیدگاه جاذب مدل 1 نسبت به دو مدل دیگر مناسب‌تر است. اگر برای طراحی جاذب تنها مقدار جذب انرژی مد نظر باشد، جاذب مدل 3 نسبت به دو مدل دیگر کاربردی‌تر است.

**اهمیت بارگذاری ضربه‌ای درون صفحه‌ای و مدرج بودن سازه**  
به طور کلی، سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری خارج صفحه، قابلیت جذب انرژی بالاتری نسبت به بارگذاری درون صفحه‌ای دارد. بارگذاری خارج صفحه در موردی که هدف فقط جذب میزان بالاتری از انرژی باشد، کاربرد دارد. مدت زمان انتقال نیروی ضربه‌ای از جمله پارامترهای مهم در جذب انرژی است. در شرایطی که هدف، محافظت از بدن انسان یا یک قطعه حساس در برابر آسیب ناشی از بار ضربه‌ای



شکل 9: نمودار تغییرات نیروی عکس‌العمل بر حسب زمان برای سازه مدرج و ضخامت ثابت

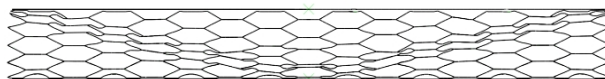
### بحث و نتیجه‌گیری

در جهت برون صفحه‌ای جذب انرژی ضربه‌ای برای سازه‌های لانه زنبوری به مراتب بالاتر از جهت درون صفحه‌ای می‌باشد. اما در جهت درون صفحه‌ای با جذب مقدار مناسب انرژی جنبشی مقدار نیروی وارد شده را به مراتب کاهش می‌دهد. از طرف دیگر مدرج نمودن سازه به نحوی که سختی سازه از محل اعمال نیرو به سمت پایین باشد، باعث افزایش مدت زمان جذب انرژی و انتقال نیرو می‌گردد. از این رو در شرایطی که نیروی عکس‌العمل و مدت زمان انتقال نیرو در مقابل مقدار انرژی جذب شده مهمتر باشد، سازه لانه زنبوری مدرج پیشنهاد می‌گردد.

### مراجع

- [1] عباس نیک‌نژاد، غلام حسین لیاقت، ”بررسی اثر پر کننده فوم پلی اورتان بر روی رفتار لانه زنبوری‌های شش گوشه تحت بار محوری با نرخ ثابت با روش تجربی“، کنفرانس انجمن هوا فضای ایران، دانشگاه تربیت مدرس، 1389.
- [2] J.C. Koch, The laws of bone architecture, American Journal of Anatomy, Vol. 21, pp. 177-198, 1917.
- [3] A. Muhammad, Study of a compact energy absorber, PhD Thesis, Iowa State University, 2007.
- [4] D. Ruan, G. Lu, B. Wang and T.X. Yu, In-plane dynamic crushing of honeycomb a finite element study, International Journal of Impact Engineering, Vol. 28, pp. 161-182, 2003.
- [5] A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi and A. Vaziri, Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures, International Journal of Solids and Structures, Vol. 48, pp. 506-516, 2011.
- [6] A. Muhammad, J. Hoffman, J. Clark and S. Takak, Modeling of impact response of composite graded structure, IMECE, Denver, Colorado, U.S.A, 2011.

با توجه به این شکل، در حالت بارگذاری درون صفحه‌ای نسبت به بارگذاری برون صفحه‌ای، مدت زمان رسیدن نیروی انتقالی به مقدار بیشینه بیشتر است. همچنین مقدار نیروی بیشینه برای بارگذاری درون صفحه‌ای به مراتب کمتر از مقدار نیروی بارگذاری برون صفحه‌ای است. این مهم در شرایطی است که میزان کمتری انرژی را جذب نموده است. بنابراین در بارگذاری درون صفحه‌ای هدف، کاهش نیروی انتقالی می‌باشد. این نوع بارگذاری برای مواردی که جسم محافظت شونده نسبت به نیروی اعمالی آسیب پذیر باشد (مانند اعضای بدن انسان)، کاربرد دارد. جمله کاربردهای سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری درون صفحه‌ای می‌تواند به گودال آسانسور جهت کاهش اثر بار ضربه‌ای ناشی از سقوط و صندلی نوزاد در خودرو به منظور کاهش آسیب به بافت نرم بدن نوزاد در هنگام تصادف اشاره نمود. در مطالعه جاری مدرج بودن سازه باعث کاهش نرخ اعمال بار ضربه‌ای به جسم محافظت شونده می‌شود. به منظور بررسی اهمیت مدرج بودن سازه و کاهش سختی سازه از بالا به پایین، انتقال نیرو توسط سازه مدرج و سازه با ضخامت یکسان تحت بارگذاری ضربه‌ای در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی و مقایسه شده است. در شبیه‌سازی عددی سازه مدرج  $I = 2/466$  و  $c = 2/96$  میلی‌متر و  $\phi = 54.4^\circ$  است. ضخامت ردیف‌های اول تا ششم به ترتیب  $0/599$ ،  $0/499$ ،  $0/4$ ،  $0/299$ ،  $0/1449$  و  $0/0692$  میلی‌متر، ارتفاع سازه  $17/16$  و عرض آن  $76/4$  میلی‌متر است. برای سازه با ضخامت یکسان تمام ردیف‌ها با ضخامت ثابت  $0/6$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای هر دو مدل، جنس تمام ردیف‌ها از آلومینیوم با نوع  $1100-O$  با چگالی  $2700 \text{ kg/m}^3$  است. برای تعریف رفتار ناحیه مومسان آلومینیوم از مدل ماده با سخت شونده‌گی توانی استفاده شده است. شکل تغییر شکل یافته سازه با ضخامت ثابت در شکل (8) و تغییرات نیروی عکس‌العمل صفحه پایینی بر حسب زمان در شکل (9) نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در سازه مدرج، با وجود جذب انرژی مناسب و برابر با سازه با ضخامت ثابت، حداکثر نیروی وارد شده به محافظت شونده در مراحل اولیه بارگذاری کاهش یافته است. به عبارت دیگر انتقال نیرو به صورت تدریجی و با تاخیر زمانی انجام شده و بنابراین خسارت کمتری به سازه محافظت شونده وارد شده است. در تعریف سازه لانه زنبوری مدرج باید از محل اعمال بار به سمت پایین سختی سازه کاهش یابد. این مهم به این دلیل است که هر ردیف، از پایین به سمت بالا، در بارگذاری با سرعت کم به صورت مجزا تغییر شکل دهد و بعد از قفل‌شدگی کامل ردیف بعدی شروع به تغییر شکل نماید. با این نوع تغییر شکل، انتقال نیرو به سازه محافظت شونده به صورت تدریجی بوده و موج ضربه‌ای با تاخیر زمانی به جسم محافظت شونده می‌رسد.



شکل 8: نمونه تغییر شکل یافته مدل با ضخامت ثابت در زمان 8 میلی-ثانیه