

طراحی و تحلیل جاذب انرژی سازه لانه زنبوری مدرج برای سقوط کابین آسانسور

مجتبی احسن فر^۱، سید علی گله داری^{۲*}

۱ و ۲ - گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

خلاصه

یک مسئله ی مهم که باید در حوادث و سوانحی از جمله تصادف اتومبیل ها، سقوط هواپیما، آسانسور و غیره در نظر گرفته شود، ایمنی مسافران است. در این تحقیق ساختار لانه زنبوری مدرج به عنوان یک جاذب ضربه برای جلوگیری از آسیب سرنشینان معرفی شده است. همچنین مقدار جذب انرژی، نیرو و شتاب اعمال شده به مسافران، از طریق شبیه سازی عددی در نرم افزار آباکوس محاسبه شده است. با توجه به احتمال سقوط کابین آسانسور، جلوگیری از صدمات وارده به مسافران از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو با رعایت استاندارد EN 81-1، جاذب ضربه ای در شرایط سقوط کابین طراحی شده است. جاذب ضربه طراحی شده که دارای ساختار لانه زنبوری مدرج است، می تواند شرایط استاندارد را ارضا کند. و به دلیل عدم وجود مطالعات کافی در این زمینه، می توان از نتایج این تحقیق به عنوان مرجعی به منظور استفاده از این ضربه گیر بهره گرفت.

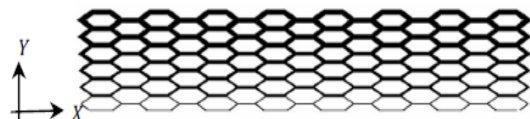
کلمات کلیدی: لانه زنبوری مدرج، بارگذاری درون صفحه ای، جذب انرژی، سقوط کابین آسانسور

۱. مقدمه

با توسعه سریع صنایع، بررسی ظرفیت جذب انرژی در وسایل نقلیه و سازه های محافظ به یکی از مهمترین زمینه های تحقیقاتی تبدیل شده است. جاذب های ضربه، انرژی جنبشی ورودی را به انرژی های دیگری از جمله انرژی فشاری در سیالات، انرژی الاستیک در جامدات و انرژی پلاستیک در جامدات تغییر شکل پذیر تبدیل می نمایند. هنگام اعمال بارگذاری ضربه ای به سیال، موج ضربه باعث تراکم مولکول های سیال شده و انرژی ضربه صرف تغییر مکان و فشردگی سیال می گردد. بدین ترتیب انرژی جنبشی به انرژی فشاری سیال

توضیحات مربوط به نویسنده مسئول یا مکاتبات
آدرس ایمیل: ali.galehdari@pmc.iaun.ac.ir

تبدیل می گردد. از این رو انرژی ضربه با تبدیل به انرژی فشاری میرا می گردد. مهم ترین هدف و کاربرد این وسایل کاهش بار ضربه ای وارده از طریق پخش نمودن این بار در یک بازه ی زمانی مشخص می باشد. یکی از جاذب های ضربه طبیعی، استخوان بدن انسان و پرندگان می باشد. ساختار اسفنجی استخوان موجب جذب انرژی ضربه ای وارده و کاهش تنش لهیدگی در مفاصل می گردد [۱]. در یک مثال دیگر، ساختار داخلی استخوان یک سازه ی بهینه شده از لحاظ وزن در برابر اعمال تنش های اصلی و برشی می باشد [۲]. بر اساس این مثال های طبیعی و الهام گرفتن از ساختار آن ها، می توان سازه های بهینه، با قابلیت جذب بیشترین انرژی ضربه ای طراحی نمود. در ساختار موز، وظیفه ی پوست موز حفاظت مغز نرم موز در برابر بارهای ضربه ای خارجی می باشد. ساختار پوست موز تقریباً با ساختار لانه زنبوری مدرج (شکل ۱) مدل سازی شده است [۳].



شکل ۱- مدل بهبود یافته پوست موز [۳]

در مطالعه ی گله داری و همکارانش [۴] با در نظر گرفتن مدل سخت شوندگی توانی، رابطه ای تحلیلی برای تنش مسطح ارائه شده است. با استفاده از این رابطه و رابطه کرنش قفل شدگی، رابطه ی میزان انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنبوری مدرج استخراج گردید. برای راستی آزمایشی روابط ارائه شده، میزان انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنبوری مدرج از جنس ۵ نوع آلومینیوم مختلف برای هر دو مدل ماده در محیط نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. همچنین بهینه سازی ظرفیت جذب انرژی سازه لانه زنبوری مدرج انجام شده است. اژداری و همکارانش [۵] رفتار تخریب دینامیکی و میزان جذب انرژی سازه لانه زنبوری منظم، نامنظم و تابعی مدرج را بررسی و با استفاده از روش اجزا محدود، مودهای مختلف تغییر شکل و میزان جذب انرژی را در این گونه سازه ها تحلیل نمودند. روان و همکارانش [۶] تخریب درون صفحه ای سازه های لانه زنبوری را مطالعه نمودند. آن ها اثر ضخامت دیواره سلول و سرعت بار ضربه ای را بر مود تغییر شکل و تنش مسطح با استفاده از نرم افزار آباکوس بررسی و یک فرمول تحلیلی برای محاسبه ی تنش مسطح در سرعت های بالا ارائه نمودند. پاکا و همکاران [۷] رفتار سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری تک محوره و دو محوره درون صفحه ای را توسط آزمایشات بررسی و سپس نتایج تجربی را با نتایج عددی صحت سنجی نمودند. وانگ و همکاران [۸] حساسیت لانه زنبوری های آلومینیومی را به سرعت ضربه محوری با سرعت در محدوده ۲۰ تا ۸۰ متر بر ثانیه با کمک

آزمایش بررسی کردند و سپس به منظور بررسی پارامتری، شبیه سازی انجام دادند. با توجه تحقیقات انجام شده در زمینه جذب انرژی سازه های لانه زنبوری و توانایی بالای این سازه ها در جذب انرژی می توان از این سازه ها به عنوان ضربه گیر کابین آسانسور استفاده کرد. در این پژوهش به طراحی جاذب ضربه ای با ساختار لانه زنبوری مدرج برای کابین آسانسور در حال سقوط پرداخته شده است.

۲. جذب انرژی ویژه توسط ساختار لانه زنبوری مدرج

جذب انرژی توسط سازه لانه زنبوری در جهت درون صفحه ای با تبدیل انرژی جنبشی به انرژی کرنشی و فشردگی سازه انجام می شود. این انرژی کرنشی همان انرژی لازم برای ایجاد مفصل پلاستیک در سازه می باشد. در استخراج روابط تحلیلی مقدار تنش مسطح ثابت فرض می شود. رابطه ی تنش مسطح را می توان با توجه به گشتاور نظیر مفصل پلاستیک و تئوری های حد پایین و حد بالا بدست آورد. براساس تئوری حد بالا، نیروی خارجی وارد شده بر پایه ی سازه همیشه بزرگتر و یا مساوی نیروی فروپاشی می باشد و بر اساس تئوری حد پایین، نیروی خارجی وارد شده بر پایه ی سازه همواره کوچک تر و یا مساوی نیروی نظیر فروپاشی است [۹]. بر این اساس گشتاور نظیر مفصل پلاستیک و تنش مسطح برای مدل ماده کشسان - کاملاً مومسان محاسبه شده است.

میزان گشتاور نظیر مفصل پلاستیک بر مقطع دیواره سلول لانه زنبوری مطابق رابطه (۱) می باشد،

$$M_p = 2b \int_0^d y \sigma dy \quad (1)$$

بر اساس رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان این گشتاور مطابق رابطه (۲) بدست می آید،

$$M_p = \frac{b \sigma_y d^2}{4} \quad (2)$$

با استفاده از رابطه (۲) و تئوری های حد پایین و حد بالا، تنش مسطح برای رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان مطابق رابطه (۳) بدست می آید [۹]،

$$\sigma_p = \frac{\sigma_y d^2}{2(c + l \sin \phi) l \sin \phi} \quad (3)$$

بر اساس نظریه حد بالا، نیروی وارد شده بر دیواره سلول مطابق رابطه (۴) می باشد،

$$P = \sigma_p (c + l \sin \phi) b \quad (4)$$

بر اساس تئوری حد پایین، نیروی نظیر فروپاشی از مساوی قرار دادن ممان داخلی سلول با ممان خارجی وارد شده مطابق رابطه (۵) بدست می آید،

$$2M_p = P(l - d) \sin \phi \quad (5)$$

با جایگذاری روابط (۲) و (۴) در رابطه (۵) رابطه تنش مسطح برای رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان مطابق رابطه (۶) حاصل می شود،

$$\sigma_p = \left(\frac{\sigma_y}{2} \right) \frac{d^2}{(c + l \sin \phi)(l - d) \sin \phi} \quad (6)$$

کرنش نظیر فشردگی و یا قفل شدگی بر اساس چگالی نسبی مطابق رابطه (۷) می باشد [۹]،

$$\rho^* = \frac{\left(\frac{d}{l} \right) \left(\frac{c}{l} + 2 \right)}{2 \left(\sin \phi + \frac{c}{l} \right) \cos \phi} \rho_s \quad (7)$$

لازم به ذکر است که ρ^* نسبت چگالی سلول های سازه به چگالی ماده تشکیل دهنده سازه لانه زنبوری، و

ρ_s چگالی ماده تشکیل دهنده سازه لانه زنبوری است. نسبت حجمی روزنه سلول های سازه برابر $1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}$

می باشد. این مقدار تقریباً برابر کرنش قفل شدگی و مطابق رابطه (۸) می باشد [۹]،

$$\varepsilon_d = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} = 1 - \frac{\left(\frac{d}{l} \right) \left(\frac{c}{l} + 2 \right)}{2 \left(\sin \phi + \frac{c}{l} \right) \cos \phi} \quad (8)$$

لازم به ذکر است که ε_d کرنش نظیر انتهای تغییر شکل در هر ردیف است. به منظور استخراج رابطه انرژی ویژه سازه، فرض شده است که انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنبوری برابر انرژی کرنشی کل سازه می باشد. رابطه انرژی کرنشی مطابق رابطه (۹) می باشد،

$$U = \int \left(\int \sigma d\varepsilon \right) dV \quad (9)$$

در رابطه فوق σ تانسور تنش وارد شده به سازه، ε تانسور کرنش و V حجم سازه می باشد. برای محاسبه میزان انرژی جذب شده بر واحد حجم سازه لانه زنبوری مدرج سطح زیر نمودار تنش - کرنش سازه محاسبه می شود. از آنجایی که ضخامت سلول ها در هر ردیف با ردیف دیگر متفاوت است برای محاسبه انرژی، به طور جداگانه برای هر ردیف از روابط تحلیلی فوق استفاده می شود. هر ردیف از سازه در یک تنش مسطح و یک کرنش قفل شدگی دچار تغییر شکل می گردد. بنابراین با در نظر گرفتن $\sigma = \sigma_p$ و $\varepsilon = \varepsilon_d$ (برابری تنش با تنش مسطح و کرنش با کرنش قفل شدگی)، انرژی کرنشی بر واحد حجم سازه مطابق رابطه (۱۰) است،

$$u = \sum_{i=1}^{20} \sigma_{P_i} \varepsilon_{d_i} \quad (10)$$

با استفاده از روابط تنش مسطح و کرنش قفل شدگی، انرژی کرنشی کل سازه مطابق رابطه (۱۱) می گردد،

$$U = \int \left(\int \sigma_p d\varepsilon_d \right) dV = AL \sum_{i=1}^{20} \sigma_{P_i} \frac{\varepsilon_{d_i}}{20} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) σ_{P_i} تنش مسطح هر ردیف، ε_{d_i} کرنش نظیر قفل شدگی هر ردیف، A مساحت سازه لانه زنبوری عمود بر راستای اعمال ضربه و L ارتفاع سازه در راستای طولی (راستای برخورد) می باشد. بر اساس هندسه سلول، رابطه انرژی مطابق رابطه (۱۲) قابل بازنویسی است،

$$U = 2bl \cos \phi (17c + 18l \sin \phi) \sum_{i=1}^{20} \sigma_{P_i} \varepsilon_{d_i} \quad (12)$$

که σ_{P_i} مطابق رابطه (۱۳) است،

$$\sigma_{P_i} = \left(\frac{\sigma_y}{2} \right) \frac{d_i^2}{(c + l \sin \phi)(l - d_i) \sin \phi} \quad (13)$$

حجم و جرم سلول لانه زنبوری عبارتند از،

$$V_c = db(4l + 2c) \quad (14)$$

$$m_c = \rho_s db(4l + 2c) \quad (15)$$

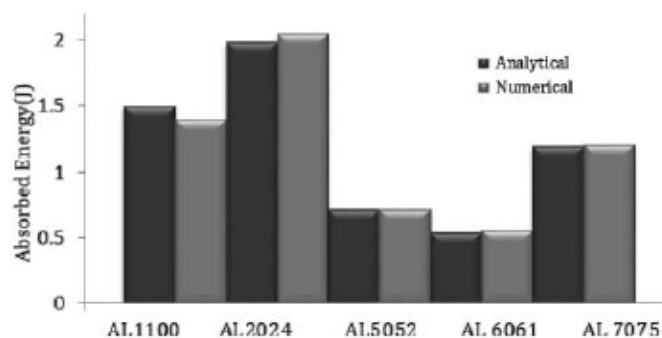
سازه دارای ۲۰ ردیف بوده و در هر ردیف ۱۷ سلول قرار دارد. با توجه به تفاوت ضخامت در هر ردیف، جرم کل سازه مطابق رابطه (۱۶) بدست می آید،

$$m = \rho_s b(36l + 26c) \sum_{i=1}^{20} d_i \quad (16)$$

بنابراین رابطه انرژی ویژه برای سازه مورد مطالعه مطابق رابطه (۱۷) خواهد بود،

$$e = \frac{U}{m} = \frac{2bl \cos \phi (17c + 18l \sin \phi) \sum_{i=1}^{20} \sigma_{p_i} \varepsilon_{d_i}}{\rho_s b(36l + 26c) \sum_{i=1}^{20} d_i} \quad (17)$$

گله داری و همکاران [۱۰]، نتایج حاصل از معادلات بدست آمده را با روش های عددی با استفاده از نرم افزار آباکوس با یکدیگر مقایسه کرده اند، که این مقایسه ها در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار مقایسه میزان انرژی جذب شده تحلیلی و عددی برای سازه لانه زنبوری مدرج با جنس های مختلف آلومینیوم [۱۰]

۳. طراحی و تحلیل جاذب ضربه کابین آسانسور

۳.۱. الزامات طراحی جاذب ضربه

با توجه به استاندارد EN 81-1 [۱۱]، اطلاعات زیر باید در طراحی جاذب ضربه کابین آسانسور در نظر گرفته شود:

الف) به منظور طراحی محافظه کارانه، جاذب ضربه باید انرژی جنبشی وارده را جذب کند.

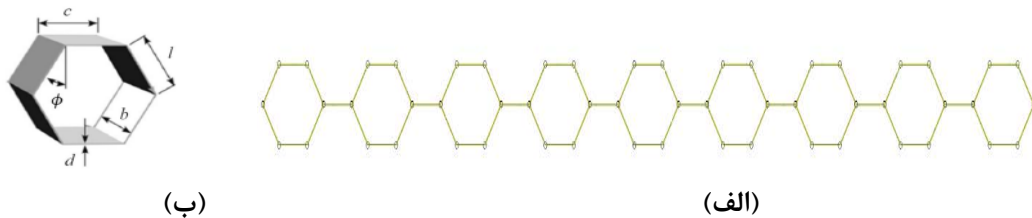
ب) وزن مسافران و کابین ۱۵۰۰ کیلوگرم و سرعت برخورد به جاذب ۱/۱۵ متر بر ثانیه (۱۱۵٪ سرعت نامی که سرعت نامی برابر ۱ متر بر ثانیه است) در نظر گرفته شده است. با توجه به شرایط آزمون شبیه سازی، کابین باید در راستای محور عمودی به جاذب برخورد کند و انرژی جنبشی اعمال شده به جاذب برابر ۹۹۱/۸۷۵ ژول است.

ج) حرکت کند شونده با شتابی بیش از $2/5g_n$ نباید بیش تر از ۰/۰۴ ثانیه طول بکشد.

د) نیروی عکس العمل اعمال شده از جاذب به پاشنه ی پای مسافر باید کم تر از ۶۲۰۰ نیوتن باشد [۱۲].

۲.۳. شبیه سازی عددی

به منظور بررسی نتایج، مدل طراحی شده در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. به منظور بررسی الزامات استاندارد، نمودارهای نیروی عکس العمل، شتاب و انرژی جنبشی به عنوان تابعی از زمان رسم شده است. هنده هر سلول و هر ردیف در شکل (۳) نشان داده شده است،



شکل ۳- هندسه، (الف) یک ردیف و (ب) یک سلول از جاذب ضربه

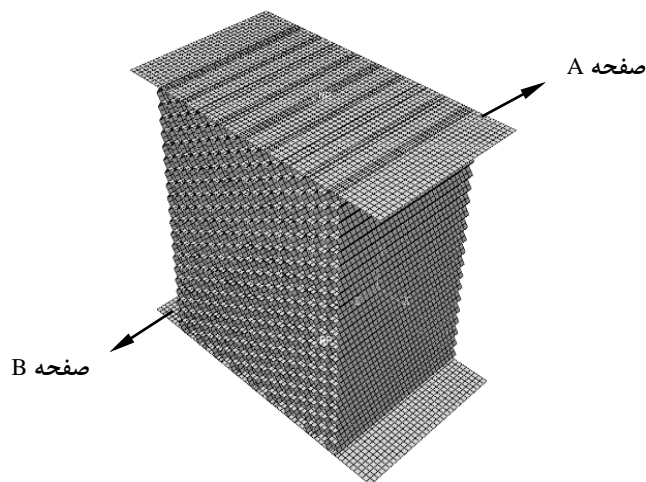
در شبیه سازی عددی سازه مدرج $l = 14mm$ ، $c = 15mm$ ، $\phi = 38^\circ$ است. به منظور اهمیت مدرج بودن سازه ضخامت های ردیف های اول تا بیستم (از بالا به پایین) کاهش می یابد که مقادیر آن ها به ترتیب برابر با ۰/۳۳، ۰/۳۴، ۰/۳۵، ۰/۳۶، ۰/۳۷، ۰/۳۸، ۰/۳۹، ۰/۴، ۰/۴۱، ۰/۴۲، ۰/۴۳، ۰/۴۴، ۰/۴۵، ۰/۴۶، ۰/۴۷، ۰/۴۸، ۰/۴۹، ۰/۳۱ و ۰/۳ میلی متر می باشند.

با توجه به طراحی انجام شده، کل ساختار متشکل از ۲۰ ردیف است. جنس همه ی ردیف ها از پلی پروپیلن است، که خواص مکانیکی آن مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ - خواص مکانیکی پلی پروپیلن استفاده شده در شبیه سازی

چگالی $\rho \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$	مدول یانگ $E(GPa)$	ضریب پواسون ν	تنش تسلیم $S_y (MPa)$
۹۰۵	۲/۸	۰/۳۸	۴۵/۴۵

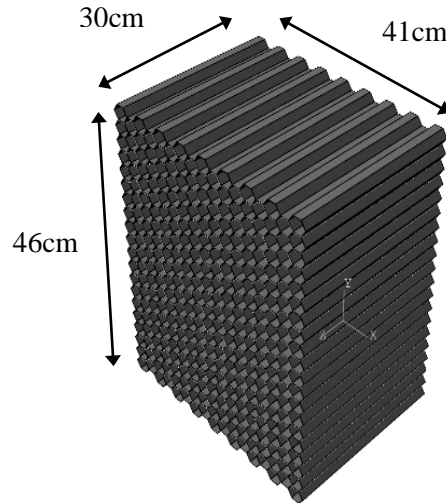
با توجه به مشخصات هندسی و مادی سازه، جرم و سرعت برخورد وزنه، شرایط بارگذاری و مرزی، سازه طراحی شده در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. برای مدل سازی برخورد، وزنه با جرم ذکر شده و بستر سازه به ترتیب با صفحات صلب در بالا و پایین صفحه شبیه سازی شده است. به منظور شبکه بندی سازه لانه زنبوری از المان پوسته ی چهار گره ای S4R و برای صفحات صلب A و B از المان دو خطی چهار گره ای R3D4 استفاده شده است. شبکه بندی مدل به همراه صفحات بالایی و پایینی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- مدل المان محدود سازه لانه زنبوری مدرج و صفحات بالا و پایینی

اتصال لایه های مختلف سازه با استفاده از قید Tie انجام 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 بوده در حالی که تمام درجات آزادی صفحه B بسته است. لازم به ذکر است که صفحه A به جرم ۱۵۰۰ کیلوگرم با سرعت ۱/۱۵ متر بر ثانیه به سازه برخورد کرده است.

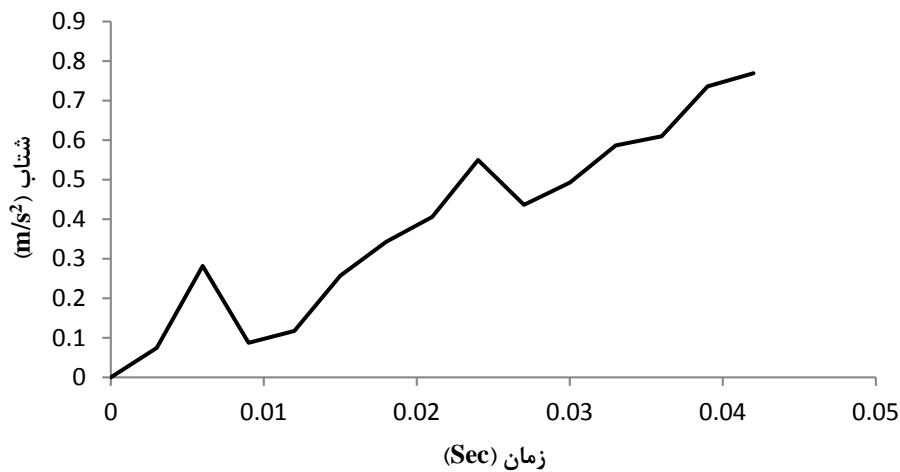
طرح جاذب ضربه طراحی شده در شکل (۵) نشان داده شده است.



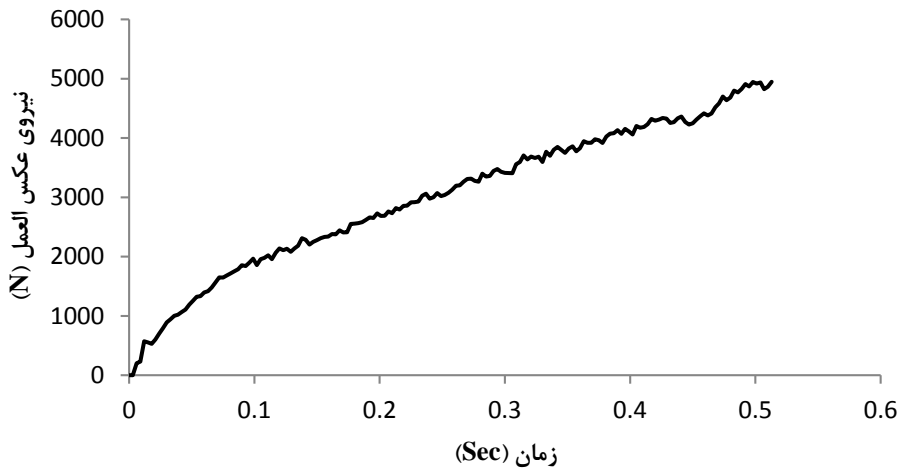
شکل ۵- مدل هندسی جاذب ضربه کابین آسانسور

۴. بررسی نتایج

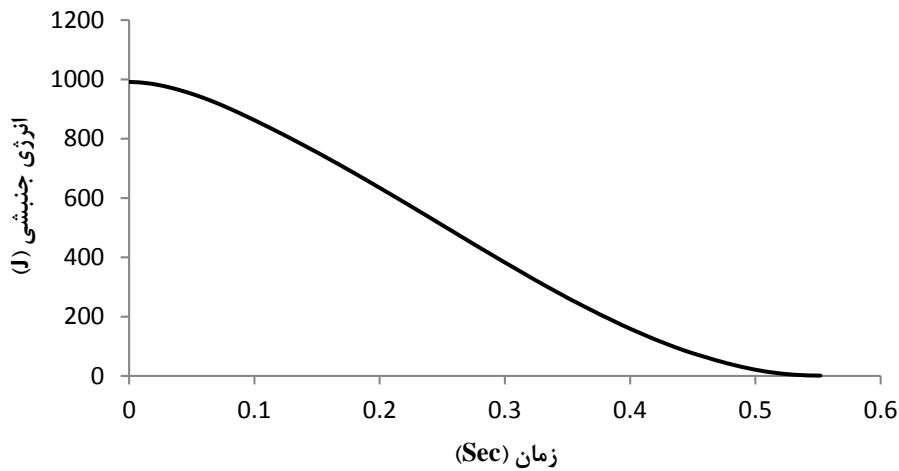
نمودارهای شتاب، نیروی عکس العمل اعمال شده به مسافر و انرژی جنبشی به عنوان تابعی از زمان در شکل (۶) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶- نمودارهای، (الف) شتاب، (ب) نیروی عکس العمل و (ج) انرژی جنبشی به عنوان تابعی از زمان

با توجه به بند (ج) الزامات طراحی، حرکت کند شونده با شتابی بیش از $2/5g_n$ نباید بیش تر از $0/04$ ثانیه طول بکشد. با توجه به شکل (۶-الف)، تغییرات شتاب در این دوره زمانی برابر با $0/74$ است که بسیار کم تر از $2/5g_n$ است. از این رو بند (ج) را تایید می کند.

با توجه به بند (د) الزامات طراحی، نیروی عکس العمل اعمال شده از جاذب به پاشنه ی پای مسافر باید کم تر از ۶۲۰۰ نیوتن باشد. با توجه به شکل (۶-ب)، حداکثر نیروی عکس العمل ۴۹۵۰ نیوتن است که کم تر از حد مجاز است. از این رو بند (د) را نیز تایید می کند.

با توجه به شکل (۶-ج)، کل ۹۹۱/۸۷۵ ژول انرژی جنبشی اعمال شده به سازه جذب شده است. بنابراین بندهای (الف) و (ب) الزامات طراحی را نیز تایید می کند، که این نشان دهنده ی طراحی مناسب سازه از نظر جذب انرژی است.

در نتیجه با توجه به رعایت استانداردها، می توان از این جاذب انرژی مدرج طراحی شده برای کابین آسانسورهایی که وزنی معادل ۱۵۰۰ کیلوگرم (مجموع وزن کابین و مسافران) و سرعت حرکتی تا ۱ متر بر ثانیه دارند، استفاده کرد.

۵. نتیجه گیری

توافق مناسب بین نتایج تجربی و شبیه سازی عددی جذب انرژی توسط ساختار لانه زنبوری مدرج، کارایی روش شبیه سازی عددی در نرم افزار آباکوس را نشان می دهد. تحلیل جاذب ضربه کابین آسانسور در شرایط سقوط، از طریق شبیه سازی عددی در نرم افزار آباکوس انجام شده است. با توجه به نتایج عددی بدست آمده، مقدار نیروی عکس العمل اعمال شده به پاشنه پای مسافر و تغییرات شتاب، همه ی مقالات مربوط به استانداردها را ارضا می کند. از این رو می توان از این جاذب ضربه برای کابین آسانسور در شرایط سقوط استفاده کرد. از سوی دیگر، می توان نتیجه گرفت که ساختار لانه زنبوری می تواند در جذب انرژی درون صفحه ای و کاهش آسیب در سقوط عملکرد مناسبی از خود نشان دهد.

۶. مراجع

- 1.Miyamoto, Y., Kaysser. W.A., Rabin, B.H., Kawasaki, A. and Ford, R.G. (1999), "Functionally graded materials: Design, Processing and Applications", Material Technology series, USA.
- 2.Koch, J.C. (1917), "The laws of bone architecture," American Journal of Anatomy, **21**, pp 177-198.
- 3.Muhammad, A. (2007), "Study of a compact energy absorber," PhD Thesis, Iowa State University, USA.

4. Galehdari, S.A., Kadkhodayan, M. and Hadidi-Moud, S. (2015), "Low velocity impact and quasi-static in-plane loading on a graded honeycomb structure; experimental, analytical and numerical study," *Aerospace Science and Technology*, **161**, pp 425–433.
5. Ajdari, A., Nayeb-Hashemi, H. and Vaziri, A. (2011), "Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures," *International Journal of Solids and Structures*, **48**, pp 506–516.
6. Ruan, D., Lu, G., Wang, B. and Yu, T.X. (2003), "In-plane dynamic crushing of honeycomb a finite element study," *International Journal of Impact Engineering*, **28**, pp 161–182.
7. Papka, S.D. and Kyriakides, S. (1998), "Experiments and full-scale numerical simulations of In-plane crushing of a honeycombs," *Acta Materiala*, **46**, pp 2765–2776.
8. Wang, Z., Tian, H., Lu, Z. and Zhou, W. (2014), "High-speed axial impact of aluminum honeycomb – Experiments and simulations," *Composites Part B*, **56**, pp 1–8.
9. Gibson, L.J. and Ashby, M.F. (1997), "*Cellular Solids; Structures and Properties*," Cambridge University Press 2nd edition, England.
10. Galehdari, S.A., Kadkhodayan, M. and Hadidi-Moud, S. (2015), "Analytical, experimental and numerical study of a graded honeycomb structure under in-plane impact load with low velocity," *Int. J. Crashworthiness*, **20**, pp 387–400.
11. Part 1 (EN 81-1). (1998), "*Safety rules for the construction and installation of Electric lift*", European Committee for Standardization.
12. Yoganandan, N. and Pintar, F.A. and Gennarelli, T.A. and Seipel, R. and Marks, R. (1999), "Biomechanical Tolerance of Calcaneal Fractures," 43th Annual Proc. Association for the Advancement of Automotive Medicine, Barcelona (Sitges), pp 345–356.