



بهینه‌سازی جاذب انرژی لانه‌زنبوری با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر اساس سطوح پاسخ و طراحی آزمایش‌ها؛ بخش نخست: بررسی مشخصات ضربه‌پذیری

مریم علیصادقی¹، جمشید فضیلتی^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران

2- استادیار، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران

* تهران، صندوق پستی 14665-834، jfazilati@ari.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 07 تیر 1394
پذیرش: 16 مهر 1394
ارائه در سایت: 20 آبان 1394

کلیدواژگان:

لانه زنبوری

ضربه‌پذیری

کد المان محدود داینا

طراحی آزمایش‌ها

مطالعه پارامتری

چکیده

در این مقاله، جاذب انرژی از نوع لانه‌زنبوری طراحی و با پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. هدف، جذب تمام یا بخش عمده انرژی جنبشی در برخورد است. هم‌زمان کاهش سطح شوک وارده نیز به عنوان یک هدف طراحی اعمال شده است. در بخش نخست، مشخصه‌های ضربه‌پذیری و رفتار ساختار لانه‌زنبوری در برابر ضربه استخراج و بررسی پارامتری انجام شده است. در بخش دوم از نتایج برای بهینه‌سازی جاذب ضربه استفاده شده است. در این بخش بارگذاری دینامیکی ساختار لانه زنبوری در نرم‌افزار المان محدود داینا شبیه‌سازی شده است. جهت بررسی اثر و اهمیت فاکتورهای موثر در عملکرد جذب انرژی، مطالعه پارامتری انجام شده است. برای کاهش حجم محاسباتی، ساختار لانه‌زنبوری به صورت هندسه تکرارشونده Y مدل شده است. به روش طراحی آزمایش‌ها اثر مشخصات ماده مانند مدول یانگ، تنش تسلیم، مدول مماسی و مشخصات هندسه ماده مانند اندازه سلول، ضخامت فویل و همچنین اثر سرعت برخورد بررسی شده است. تعداد 25 هندسه با ارتفاع یکسان و اندازه سلول و ضخامت مختلف شبیه‌سازی و تغییرات تنش میانگین و بیشینه و انرژی‌های ویژه با ضخامت و اندازه سلول مطالعه شده است. نتایج نشان داد که خصوصیات ضربه‌پذیری ساختار شامل تنش میانگین و بیشینه، به ضخامت و اندازه سلول وابستگی زیاد دارد در حالی که این مقادیر به مدول یانگ ماده و ضریب اصطکاک و ارتفاع سلول وابستگی کمتری دارد. تغییر در هندسه سلول لانه‌زنبوری تنش میانگین فروریزش را بیش از تنش بیشینه متاثر می‌کند. در این میان اثر تغییر ضخامت نسبت به تغییر ابعاد سلول اهمیت بیشتری دارد.

Optimization of honeycomb impact attenuator using genetic algorithm based on response surface method and design of experiment; Part I: crashworthiness

Maryam Alisadeghi, Jamshid Fazilati*

Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14665-834, Tehran, Iran, jfazilati@ari.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 June 2015
Accepted 08 October 2015
Available Online 11 November 2015

Keywords:

Honeycomb Structure
Crashworthiness
LS-Dyna Finite Element Code
Design Of Experiment
Parametric Study

ABSTRACT

In this study, the design and optimization of a honeycomb energy absorber is performed using genetic algorithm. The main design goal is to absorb almost all the impact energy. Simultaneously, reduction of the shock force level is also considered as a main objective. In the first part, the crashworthiness behavior of honeycomb structure is parametrically studied. The results are utilized in the second part to optimize shock absorber design. In this part, aluminum honeycomb structure under dynamic loading is investigated using simulation in LS-dyna finite element code. Parametric studies are invoked to identify the influence of different model parameters on crashworthiness characteristics of honeycomb structure. Reducing the computational cost, a repeatable model of 'Y' cross section column is numerically simulated. The effects of changes in material properties including Young's modulus, yield stress, tangent modulus, geometrical properties such as cell size, foil thickness, as well as the effects of impact velocity on the deformation behavior of the structure were investigated. A number of 25 different geometries with same height and various cell sizes and thicknesses are studied and effects of thickness and cell size on the energy absorption properties are investigated. Results showed that crashworthiness parameters such as mean and peak stress depend mainly on cell size and thickness values, while the friction coefficient and young's modulus are of less importance. Any change in absorber's geometry affects the mean collapse stress more severely than the peak stress. In the meantime, thickness change is more effective in comparison with cell size change.

1- مقدمه

افزایش سطح ایمنی در این سیستم‌ها افزایش یافته است. برای جلوگیری از تلفات و آسیب جانی در تصادفات، نیاز به سازوکارهایی است که بتواند انرژی

با رشد فن‌آوری‌های حمل و نقل نیاز به ایده‌ها و سازوکارهای جدید برای

Please cite this article using:

M. Alisadeghi, J. Fazilati, Optimization of honeycomb impact attenuator using genetic algorithm based on response surface method and design of experiment; Part I: crashworthiness, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 25-36, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

برخوردار است [10]. زو و همکاران نیز در سال 2012، توسط آزمایش رفتار خارج صفحه چهار نوع لانه‌زنبوری آلومینیومی در محدوده مختلف نرخ کرنش و تأثیر ابعاد نمونه، چگالی نسبی و نرخ کرنش را روی خصوصیات مکانیکی آن بررسی کردند. همچنین روابطی برای بیان اثر چگالی نسبی و نرخ کرنش روی تنش میانگین ارائه دادند [11]. مران و همکاران در 2014 پارامترهای ضربه‌پذیری ساختار لانه‌زنبوری را به صورت تجربی و عددی به روش المان محدود بررسی کردند [12]. وانگ و همکاران در سال 2014 حساسیت لانه‌زنبوری‌های آلومینیومی را به سرعت ضربه محوری با سرعت در محدوده 20 تا 80 متر بر ثانیه با کمک آزمایش بررسی کردند و سپس به منظور بررسی پارامتری، شبیه‌سازی انجام دادند [13].

پژوهش حاضر بخش نخست از یک مقاله دو قسمتی است. در این مقاله، یک مدل عددی از ساختار لانه‌زنبوری بر پایه المان‌های پوسته‌ای در نرم‌افزار حل صریح دینامیکی و جهت بررسی رفتار فروریزی آن در برخورد تولید شده است. از داده‌های آزمایشگاهی موجود جهت سنجش میزان دقت محاسباتی مدل ایده‌آل در شرایط عمومی استفاده شده است. با استفاده از مدل توسعه داده شده و با کاربرد روش طراحی آزمایش‌ها، نمونه‌های کافی از ساختار لانه‌زنبوری با هندسه و جنس مختلف از میان هندسه‌های در دسترس انتخاب و رفتار آن شبیه‌سازی و تحلیل شده است. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، تابعیت رفتاری ساختار لانه‌زنبوری با تغییر عوامل مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است و به صورت پارامتری تجزیه و تحلیل شده است. در نهایت متغیرهای رفتاری مکانیکی ساختار لانه‌زنبوری با تغییر پارامترهای طراحی ارائه شده است. این نتایج بر مبنای هندسه و مشخصات جامعه ورودی در دسترس به دست آمده است و در ادامه و در بخش دوم مقاله برای اهداف بهینه‌سازی مورد استفاده قرار داده خواهد شد.

2- مدل عددی لانه زنبوری

مدل‌سازی عددی ساختار لانه‌زنبوری به دو روش انجام می‌شود. در برخی موارد این ساختارها به صورت هندسه کامل مدل‌سازی شده است [12، 14]. با توجه به این‌که سازه‌های لانه‌زنبوری، ساختارهای تکرارشونده هستند به منظور کاهش حجم محاسبات و ساده‌سازی، قسمتی از سازه با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب قابل استفاده خواهد بود. مطابق شکل 1، یکی از الگوهای تکرار شونده در این ساختار، سلول‌های مثلثی با مقطع ماده Y شکل است [8، 15]. در تحقیق حاضر به منظور کاهش حجم محاسباتی، سازه به صورت سلول تکرار شونده Y مدل شده است. مدل ماده استفاده شده برای تعریف جنس سلول، مدل الاستیک-سخت‌شونده خطی¹ و جنس این سلول‌ها آلومینیم 5052-H39 انتخاب شده است [16]. مشخصات ماده مورد استفاده در جدول 1 ارائه شده است. لایه چسبنده در این تحقیق نازک و کاملاً متصل فرض و در مقاطع اتصال، ضخامت دوبرابر برای فلز سازنده در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی، سلول لانه‌زنبوری بین دو صفحه صلب قرار گرفته است که صفحه صلب بالایی متحرک بوده، با سرعت اولیه و انرژی مشخص در راستای ارتفاع سلول به سمت پایین حرکت می‌کند و در تمام درجات آزادی به جز در راستای حرکت مقید شده است. صفحه صلب ثابت پایینی در تمام درجات کاملاً مقید شده است. شرایط مرزی گره‌های لبه سلول در بالا، در تمام درجات آزادی جابه‌جایی و چرخش به جز در راستای جابه‌جایی صفحه صلب، مقید شده است. برای جلوگیری از فرو رفتن سلول در خودش و دیواره

ناشی از برخورد را مستهلک کرده، مانع از انتقال آن به سرنشین و تجهیزات وسیله متحرک شود. جاذب‌های انرژی عناصری از سازه هستند که با تبدیل انرژی جنبشی به فرم‌های دیگری از انرژی، سبب مستهلک شدن انرژی آسیب زننده می‌شوند. مکانیزم‌های جذب انرژی متنوع است. از جمله پرستفاده‌ترین آن‌ها استفاده از انرژی ضربه برای اعمال تغییر شکل پلاستیک و تخریب ماده و به عبارتی پدیده فروریزش است. مقاومت سازه در برابر ضربه و برخورد یکی از ملاحظات بحرانی در کاربردهای مهندسی است. از آن‌جا که در ضربه و برخورد، بارگذاری به صورت دینامیکی اتفاق می‌افتد، طراحی سازه‌هایی که توانایی مقاومت در برابر ضربه و کاهش اثر ضربه و برخورد را داشته باشند نیازمند دانش دینامیک سازه و فهم خصوصیات و مکانیزم‌های تغییر شکل مواد و اجزا است [1]. در میان سازه‌های جاذب انرژی ایده‌آل، سازه‌های لانه‌زنبوری، به دلیل عملکرد و ظرفیت بالا و رفتار همگن و تکرار شونده در جذب انرژی و همچنین نسبت کارایی به هزینه عالی، استفاده وسیعی در زمینه‌های مهم صنعتی از جمله سازه‌های متحرک هوایی، ریلی و زمینی پیدا کرده است. علاوه بر تمام مزایای این سازه‌ها، وزن سبک آنها باعث می‌شود که از این سازه‌ها در کاربردهای فضایی نیز استفاده بسیاری شود. ماژول جذب ضربه و انرژی، قسمتی مهم از زیرسیستم فرود یک فضاپیما است. به عنوان مثال آپولو 11 نمونه‌ای است که در 4 پایه ماژول ماه‌نشین آن جهت جذب انرژی ناشی از برخورد فرود، لانه‌زنبوری‌های فلزی به کار گرفته شده است [2].

در دهه‌های اخیر، مطالعات بسیاری به منظور شناخت خصوصیات مکانیکی ساختار تحت شرایط بارگذاری مختلف به صورت تحلیلی، شبیه‌سازی و آزمایش گزارش شده است. تقریباً تمام این مطالعات بر روی رفتار سازه‌های لانه‌زنبوری به صورت پنل‌های یک لایه، انجام شده است. در مطالعه سازه‌های لانه‌زنبوری، در سال 1963 مک‌فارلند به بررسی استحکام سازه‌های لانه‌زنبوری در راستای محوری پرداخت [3]. سپس ویرزبیک در سال 1983 مدلی تحلیلی برای تعیین استحکام لهیدگی و اتلاف انرژی در طول تخریب لانه‌زنبوری‌های شش وجهی ارائه کرده است. مدل ریاضی او برای استحکام لانه‌زنبوری‌های فلزی شش وجهی در بارگذاری شبه استاتیک بود [4]. لیاقت و سرایلو در سال 1388، بهینه‌سازی برای هسته لانه‌زنبوری که تحت بار فشاری قرار می‌گیرد انجام داده‌اند. در تحقیق آنها بهینه‌سازی وزن نسبت به بارگذاری از دو روش تحلیلی و عددی انجام شده است [5]. در سال 1393 پیرمحمدی و همکاران، سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری و رویه کامپوزیتی را به صورت تحلیلی، تجربی و عددی، تحت ضربه پرتابه بررسی کردند [6]. ژاو و گری در سال 1998 تست‌های تجربی روی لانه‌زنبوری‌های فلزی در هر دو شرایط دینامیکی و استاتیکی انجام دادند و تأثیر نرخ کرنش را روی لانه‌زنبوری‌های آلومینیومی پیدا کردند [7]. یاماشیتا و گوتو در سال 2005 [8] به صورت تجربی و عددی اثر شکل سلول و ضخامت فویل روی رفتار تخریبی سازه لانه‌زنبوری را بررسی و در شبیه‌سازی عددی از مدل ستون با سطح مقطع Y شکل استفاده کردند. دیکیانگ و همکاران در سال 2010 نیز با استفاده از مدل المان محدود انسیس/داینا، رابطه بین تنش دینامیکی میانگین با پارامترهای پیکربندی سلول لانه‌زنبوری در سرعت‌های 3 تا 350 متر بر ثانیه بررسی و روابط جبری برای تنش دینامیکی میانگین ارائه دادند [9]. در سال 2012 خان و همکاران، با انجام آزمایش خصوصیات ضربه‌پذیری سازه‌های لانه‌زنبوری در جهات خارج و داخل صفحه‌ای را بررسی کردند و نشان دادند که جهت خارج صفحه‌ای از استحکام بالاتری

1- Elastic-linear hardening

مطابق نتایج، در تغییر شکل حاصل از آزمایش به ویژه برای نمونه الف مقداری تغییر و جابه‌جایی برشی نیز مشاهده شده است که تایید کننده وجود نقص در هندسه و ساختار اولیه نمونه‌ها ناشی از فرایند تولید و آماده‌سازی است. برای نمونه دوم تعداد چین‌خوردگی‌های حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش بسیار مشابه است. در بررسی نمودارها، شدت نمودار تنش از دو داده‌برداری تفاوت اندکی را نشان داده است اما مقدار تنش میانگین استخراج شده از شبیه‌سازی تقریب خوبی از مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایش است. تنش بیشینه در شبیه‌سازی و آزمایش اختلاف محدودی دارد. همچنین انرژی جذب شده محاسبه شده از شبیه‌سازی کمی بیش از مقادیر داده‌برداری شده آزمون به دست آمده است. تعداد و شدت نوسان‌های مشاهده شده در نمودار شبیه‌سازی بیش از داده‌های تجربی بوده است که این موارد ناشی از غیرایده‌آل بودن هندسه نمونه مورد آزمایش است که در هندسه شبیه‌سازی لحاظ نشده است. همچنین شرایط انجام آزمایش و نیز کمتر بودن نرخ داده‌برداری در آزمایش در این زمینه تأثیرگذار هستند. علت دیگر مشاهده نشدن نوسانات در نمونه‌های تجربی این است که در شبیه‌سازی تنها یک واحد سلول Y شکل تحت تراکم قرار گرفته است و نوسانات مشاهده شده، نشان‌دهنده تشکیل چین‌خوردگی‌ها در سلول واحد Y شکل است، اما در نمونه‌های آزمایش تعداد زیادی از این واحدهای Y شکل وجود دارند و همان‌طور که در شکل مشخص است به علت ایده‌آل نبودن نمونه، شروع به چین‌خوردگی این واحدها لزوماً هم‌زمان نیست و به دلیل این ناهماهنگی، نقاط بیشینه و کمینه در نمودار نمونه‌های تجربی، نوسانات یکدیگر را هم‌پوشانی می‌کنند. در مجموع با در نظر گرفتن شرایط هندسی غیرایده‌آل ناشی از ساخت و آماده‌سازی در نمونه‌های تجربی نتایج عددی حاصل در محدوده اختلافی کمتر از 15 درصد از نتایج تجربی واقع شده است. بنابراین می‌توان گفت نتایج به دست آمده از تحلیل عددی رفتار را به درستی پیش‌بینی کرده است اما در برخی پارامترها کمی محافظه‌کارانه‌تر از واقعیت عمل می‌کند که محدوده خطای آن در بدترین شرایط کمتر از 15 درصد بوده است.

2-2- پارامترهای ضربه‌پذیری

از معیارهای مهم مقایسه عملکرد جاذب‌های انرژی، انرژی جذب شده، نیروی بیشینه فروریزش، نیروی متوسط فروریزش و انرژی ویژه نسبت به جرم و حجم را می‌توان برشمرد. در برخی کاربردها میزان شتاب اعمالی به جرم متحرک نیز پارامتری مهم قلمداد می‌شود. انرژی جذب شده توسط سلول، سطح زیر نمودار نیرو-جابه‌جایی است که مطابق رابطه (1) محاسبه می‌شود.

$$E = \int_0^{d_{max}} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

مقادیر تنش و کرنش از روابط (2) و (3) دست می‌آید که در آن F نیروی فشاری، A سطح مقطع سلول، δ طول تخریب و δ_0 طول اولیه سلول لانه‌زنبوری است.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\delta_0} \quad (3)$$

نیروی بیشینه، حداکثر نیرویی است که در نمودار نیرو-جابه‌جایی سلول مشاهده می‌شود. معمولاً این نیرو مربوط به تغییر شکل در محدوده الاستیک است و نیرو پس از کمانش اولیه و شروع تغییر شکل‌های پلاستیک به سرعت

های صلب، تماس از نوع تماس سطح به سطح¹ و تماس گره به سطح² در نظر گرفته و برای تماس کلیه سطوح، ضریب اصطکاک استاتیک و دینامیک 0.3 و 0.2 فرض شده است. فرمولاسیون المانی پوسته از نوع بلیچکو-تسای³ دارای سه نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت است.

2-1- ارزیابی شرایط شبیه‌سازی

آزمایش شبه‌استاتیک تراکم لانه‌زنبوری با استفاده از دستگاه DARTEC 9600 در دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است. دو مقطع مربعی ساندویچ شده با هسته لانه‌زنبوری با اندازه سلول سه شانزدهم و ارتفاع یک اینچ تحت تراکم شبه‌استاتیک قرار گرفته است. در آزمایش اول ضخامت فویل 0.002 اینچ و در آزمایش دوم ضخامت 0.003 اینچ بوده است. شرایط فیزیکی نمونه‌ها به دلایل اشکالات ساخت دارای نقص هندسی بوده است ضمن این که نمونه‌ها دارای سطح محدود هستند. بارگذاری با سرعت ثابت حدود 0.08 میلی‌متر بر ثانیه در شرایط شبه‌استاتیک انجام شده است.

شبیه‌سازی با فرض شرایط ایده‌آل هندسی و با فرض عدم محدودیت سطح مقطع کلی پنل، با ایجاد یک سلول تکرار شونده Y با شرایط مرزی تقارن در مرزهای تکرار و شرایط مرزی انتهایی آزاد و قراردگی آن بین دو صفحه صلب انجام گرفته است. صفحه پایینی که مانند فک پایینی دستگاه عمل می‌کند کاملاً ثابت و صفحه صلب بالایی مشابه فک بالایی دستگاه، به صورت کنترل جابه‌جایی با سرعت ثابت به سمت پایین تغییر موقعیت داده شده است. بنابراین در نمونه‌های عددی شبیه‌سازی تنها هسته آلومینیمی بدون نقص ساختاری و هندسی در نظر گرفته شده است. مدل و مشخصات ماده مطابق جدول 1 مورد استفاده قرار گرفته است و اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش در نظر گرفته نشده است. نتایج همگرا شده برای شبکه المانی با اندازه المان 0.09 میلی‌متر از نوع پوسته به دست آمده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش در شکل‌های 2 تا 4 نمایش داده شده است. هدف از مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمون بررسی میزان صحت نتایج عددی برای پیش‌بینی رفتار پنل واقعی غیر ایده‌آل در حالت کلی است که مقایسه با دو نتیجه تجربی موجود، این هدف قابل دستیابی است.

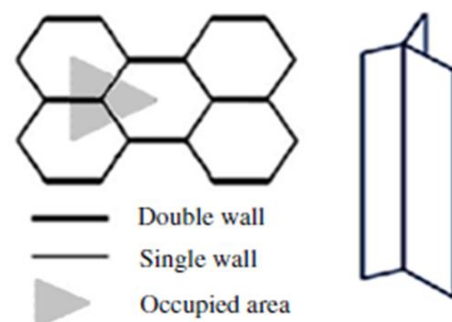


Fig. 1 Honeycomb section structure and repeatable "Y" cross section column element

شکل 1 ساختار لانه زنبوری و موقعیت الگوی تکرار شونده Y شکل

جدول 1 مشخصات آلومینیم 5052-H39

Table 1 Mechanical properties of aluminum 5052-H39 alloy

مقدار	مشخصه
2680	چگالی (kg/m ³)
70	مدول الاستیسیته (GPa)
0.33	ضریب پواسون
265	تنش تسلیم (MPa)
700	مدول سخت شونده (MPa)

1- Automatic single surface contact

2- Automatic nodes to surface contact

3- Belytschko-Tsay

شده است. با توجه به جدول 3 مشاهده می‌شود که با کاهش 50 درصدی مدول مماسی، انرژی جذب شده 4.7 درصد، نیروی میانگین 6.8 درصد و نیروی بیشینه 0.45 درصد کاهش و طول تخریب شده حدود 2 درصد افزایش می‌یابد. با توجه به این که اثر این پارامتر در تغییر شکل‌های پلاستیک خود را نشان می‌دهد، نیروی میانگین فروریزش و به تبع آن انرژی جذب شده بیشترین تأثیرپذیری را نشان داده است.

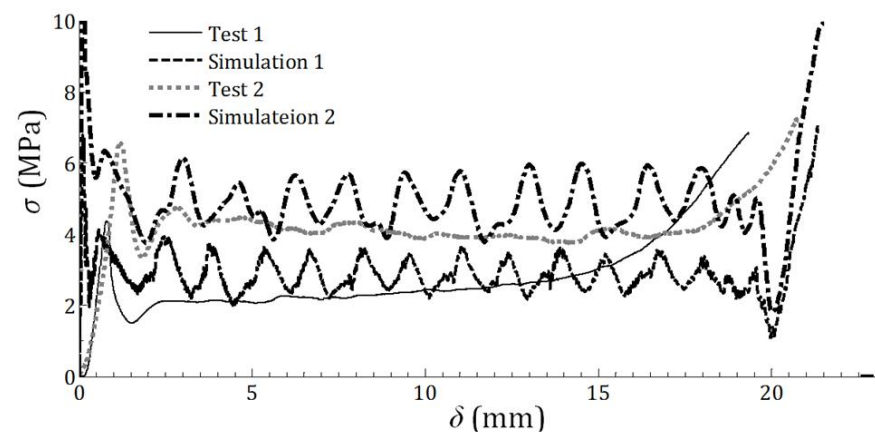


Fig. 3 Stress-shortening curves from test and simulation of test samples 1 and 2

شکل 3 نمودار تنش-جابجایی در آزمایش و شبیه‌سازی نمونه (1) و (2)

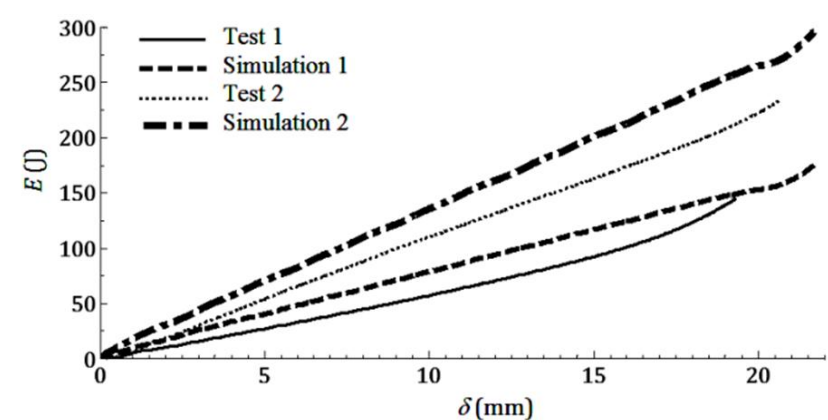


Fig. 4 Energy-shortening curves from test and simulation of test samples 1 and 2

شکل 4 نمودار انرژی-جابجایی از آزمایش و شبیه‌سازی نمونه (1) و (2)

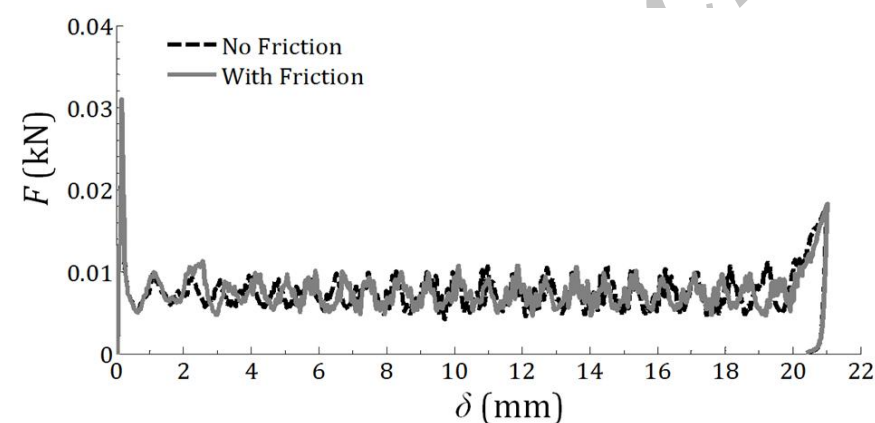


Fig. 5 Effect of friction on force-shortening curves

شکل 5 نمودار نیرو-جابجایی تأثیر در نظر گرفتن اصطکاک

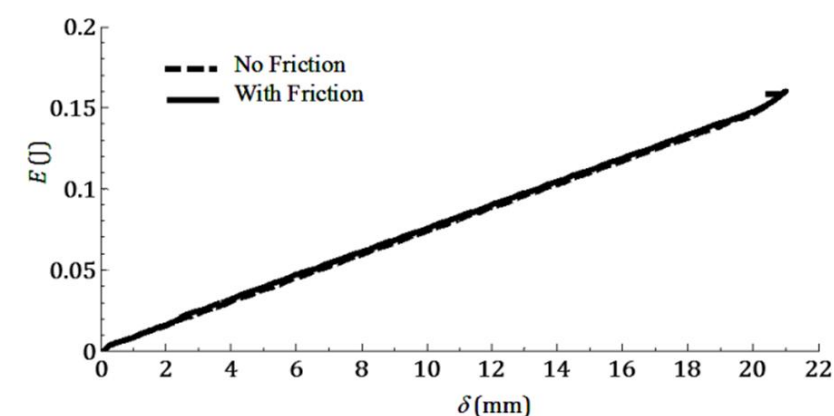


Fig. 6 Effect of friction on energy-shortening curves

شکل 6 نمودار انرژی جذب شده-جابجایی تأثیر در نظر گرفتن اصطکاک

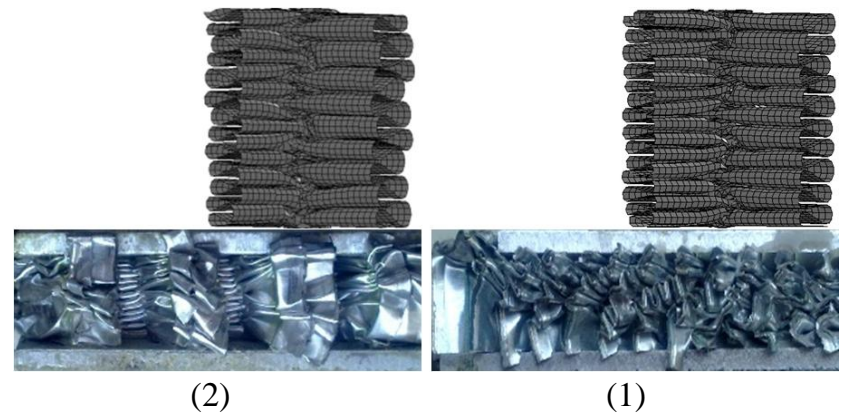


Fig. 2 Honeycomb deformation in test and simulation (1) and (2)

شکل 2 فروریزش نمونه در آزمایش و شبیه‌سازی 1: نمونه اول، 2: نمونه دوم

کاهش می‌یابد. متوسط نیروی فروریزش نسبت انرژی جذب شده به طول تخریب سلول است که با استفاده از رابطه (4) محاسبه می‌شود.

$$F_m = \frac{\int_0^{d_{max}} F(\delta) d\delta}{\delta} \quad (4)$$

انرژی ویژه نسبت به جرم و حجم نیز مقدار انرژی جذب شده در واحد جرم و حجم است که از معادله‌های (5) و (6) محاسبه می‌شود.

$$SEA_v = \frac{E}{V} \quad (5)$$

$$SEA_m = \frac{E}{m} \quad (6)$$

3- تأثیرات هندسه و ماده بر رفتار لانه‌زنبوری

در این بخش برای مشخص شدن این که در شبیه‌سازی سلول لانه‌زنبوری در داینا چه پارامترها و تنظیماتی موثر هستند، تأثیر مواردی مانند ضریب اصطکاک، اثر مشخصات ماده مانند مدول مماسی، مدول یانگ، تنش تسلیم و اثر جرم برخورد کننده، سرعت و حساسیت ماده به نرخ کرنش و همچنین ابعاد سلول روی پارامترهای ضربه پذیری مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مورد بررسی، سلول Y شکل لانه زنبوری با اندازه سلول 3.175 و ضخامت 0.0254 میلی‌متر و ارتفاع 25.4 میلی‌متر است. بارگذاری به صورت جرم نقطه‌ای با سرعت اولیه 10 متر بر ثانیه و انرژی جنبشی اولیه 0.16 ژول انجام شده است.

3-1- اثر ضریب اصطکاک

شبیه‌سازی در دو حالت با و بدون اصطکاک انجام شده است. ضریب اصطکاک استاتیک 0.3 و دینامیک 0.2 در نظر گرفته شده است. نمودار نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی در شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، در نظر گرفتن ضریب اصطکاک در سطوح تماس باعث می‌شود که طول تخریب شده تا 0.3 درصد و نیروی بیشینه تا 0.03 درصد افزایش یابد و نیروی میانگین و انرژی جذب شده بدون تغییر باقی بمانند. بنابراین ملاحظه می‌شود که در نظر گرفتن ضریب اصطکاک تأثیر چندانی در مقادیر پارامترهای ضربه پذیری سازه ندارد.

3-2- اثر مدول مماسی

نوع مدل ماده برای شبیه‌سازی سلول، الاستیک-سخت شونده خطی است. مدول مماسی یا مدل سخت‌شوندگی شیب نمودار تنش کرنش در محدوده پلاستیک است. مقدار مدول مماسی ماده برابر با 700 مگاپاسکال و نصف آن یعنی 350 مگاپاسکال در حالی که سایر پارامترها بدون تغییر در نظر گرفته شده‌اند، بررسی و نمودار نیرو-جابجایی و انرژی در شکل‌های 7 و 8 آورده

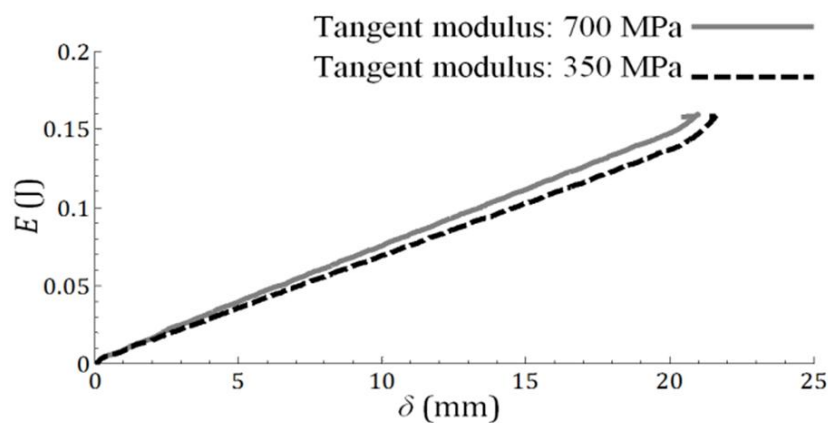


Fig. 8 Effects of tangent modulus on energy-shortening curve

شکل 8 نمودار انرژی-جابه‌جایی اثر مدول مماسی

با توجه به جدول 5 ملاحظه می‌شود که با کاهش 14 درصدی مدول یانگ، نیروی میانگین 1.35 و نیروی بیشینه 14.56 درصد کاهش می‌یابد. ارتفاع تخریب شده 1 درصد افزایش می‌یابد و انرژی جذب شده بدون تغییر باقی می‌ماند. با توجه به این که مدول یانگ بیان‌گر شیب نمودار تنش-کرنش ماده در فاز الاستیک است، تغییر مدول یانگ روی نیروی اولیه که معمولاً نیروی بیشینه نیز هست، اثر غالب دارد.

3-5- اثر جرم برخورد کننده

اثر جرم برخورد کننده روی پارامترهای ضربه‌پذیری بررسی شده است. سرعت اولیه برخورد 10 متر بر ثانیه است و جرم‌های برخورد کننده 0.0032، 0.0016، 0.0064 و 0.5000 کیلوگرم در نظر گرفته شده است. به دلیل این که سرعت اولیه یکسان است انرژی جنبشی در چهار حالت متفاوت است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های 13 و 14 و جدول 6 آورده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که علی‌رغم افزایش شدید جرم ضربه‌زننده، نیروی میانگین حداکثر تا 3 درصد برای جرم 0.5 کیلوگرمی، افزایش می‌یابد. نیروی بیشینه نیز تغییر چندانی ندارد و حداکثر تا 0.01 درصد تغییر می‌کند. بیشترین تغییر در فاصله توقف جرم مشاهده می‌شود و شکل و شدت اعمال نیرو بر نیروی فروریزش تأثیر اندکی داشته است.

3-6- اثر سرعت برخورد

در این قسمت شبیه‌سازی برای سلول لانه‌زنبوری در حالتی که تحت برخورد جرم ثابت با سرعت‌های اولیه 10 و 30 و 70 و 100 متر بر ثانیه قرار می‌گیرد انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی در جدول 7 و شکل‌های 15 و 16 مشاهده می‌شود. سرعت 10 متر بر ثانیه به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و مقادیر اختلاف نسبت به مقادیر سرعت 10 متر بر ثانیه محاسبه شده‌اند. نیروی میانگین با افزایش 10 برابری سرعت برخورد، تا 66 درصد، کرنش تراکمی تا 9 درصد و انرژی جذب شده تا نقطه تراکم تا 83 درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که افزایش سرعت منجر به افزایش مقاومت لانه‌زنبوری به فروریزش می‌شود که علت آن افزایش اثرات اینرسی پل در اثر افزایش سرعت برخورد است. یادآوری می‌شود که در این شبیه‌سازی‌ها حساسیت ماده به نرخ کرنش در نظر گرفته نشده است.

جدول 5 بررسی اثر مدول یانگ

Table 5 Young's modulus effects study

تغییر %	مدول یانگ 70	مدول یانگ 60	مدول یانگ (GPa)
0	0.15	0.15	انرژی جذب شده (J)
1.0	20.28	20.48	طول تخریب (mm)
1.4	0.0074	0.0073	نیروی میانگین (kN)
14.6	0.03098	0.02647	نیروی بیشینه (kN)

جدول 2 اثر در نظر گرفتن اصطکاک در تعریف تماس بین سطوح

Table 2 Effects of contact friction assumptions

تغییر %	با اصطکاک	بدون اصطکاک	
0	0.15	0.15	انرژی جذب شده (J)
0.3	20.34	20.28	طول تخریب (mm)
0	0.0074	0.0074	نیروی میانگین (kN)
0.03	0.03099	0.03098	نیروی بیشینه (kN)

3-3- اثر استحکام تسلیم ماده

برای بررسی اثرات تغییر استحکام کششی تسلیم ماده، دو مقدار تنش تسلیم 70 مگاپاسکال و 256 مگاپاسکال انتخاب و بررسی شده‌اند. نتیجه شبیه‌سازی در شکل‌های 9 و 10 ارائه شده است. با توجه به جدول 4 ملاحظه می‌شود که با کاهش حدود 74 درصدی تنش تسلیم ماده، انرژی جذب شده 62 درصد، نیروی میانگین 61، نیروی بیشینه 72 درصد و طول تخریب شده 3 درصد کاهش داشته است. مقدار نیروی بیشینه که در انتهای فاز الاستیک و قبل از شروع به کمانش پلاستیک در دیواره، مشاهده می‌شود به مقدار تنش تسلیم به شدت وابسته است. به علاوه همان‌طور که در نتایج مشخص است تسلیم شدن زودتر ماده نیروی میانگین را نیز به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌دهد در حالی که کاهش نیروی میانگین در حالی که طول تخریب شده تغییر چندانی نمی‌کند، منجر به کاهش سطح زیر نمودار و کم شدن ظرفیت جذب انرژی شده است.

3-4- اثر مدول یانگ

مدول یانگ با مقادیر 60 گیگاپاسکال و 70 گیگاپاسکال بررسی شده است. نمودار نیرو جابه‌جایی و انرژی در شکل‌های 11 و 12 نشان داده شده است.

جدول 3 اثر تغییر در مدول مماسی

Table 3 Tangent modulus effects study

تغییر %	مدول مماسی 700	مدول مماسی 350	مدول مماسی (MPa)
4.7	0.15	0.143	انرژی جذب شده (J)
-2	20.28	20.68	طول تخریب (mm)
6.8	0.0074	0.0069	نیروی میانگین (kN)
0.45	0.03098	0.03084	نیروی بیشینه (kN)

جدول 4 بررسی اثر تنش تسلیم

Table 4 Yield stress effects study

تغییر %	تنش تسلیم 265	تنش تسلیم 70	تنش تسلیم (MPa)
62.0	0.15	0.05706	انرژی جذب شده (J)
2.9	20.28	19.7	طول تخریب (mm)
60.8	0.0074	0.0029	نیروی میانگین (kN)
72.3	0.03098	0.008581	نیروی بیشینه (kN)

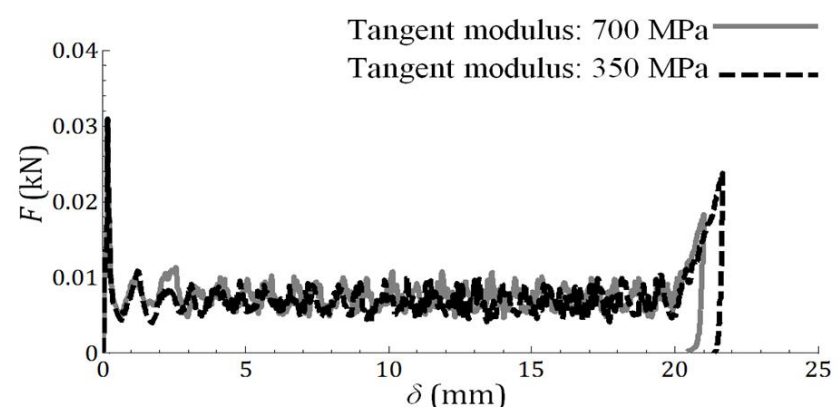


Fig. 7 Force-shortening curves for different tangent modulus

شکل 7 نمودار نیرو-جابه‌جایی اثر مدول مماسی

معادلات مورد نیاز است. در این قسمت از معادله کوپر-سایموند برای بیان خصوصیت حساسیت به نرخ کرنش استفاده شده است [17].

$$\dot{\epsilon} = D \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} - 1 \right)^q, \sigma'_0 \geq \sigma_0 \quad (7)$$

σ'_0 جریان تنش دینامیک در نرخ کرنش پلاستیک تک محوری $\dot{\epsilon}$ است و σ_0 جریان تنش استاتیکی متناظر آن است. و ضرایب D و q ضرایب معادله برای ماده هستند. فرم دیگر معادله به صورت زیر است.

$$\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/q} \quad (8)$$

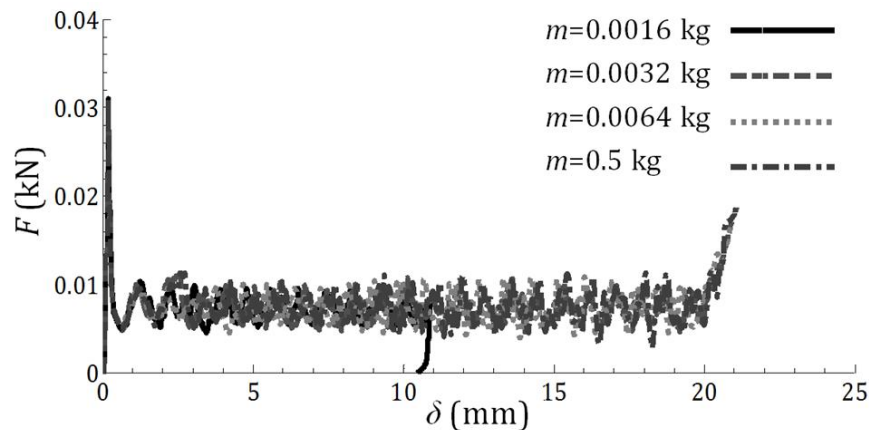


Fig. 13 Force-shortening curve for impact mass effect study
شکل 13 نمودار نیرو-جاب‌جایی بررسی اثر جرم برخورد کننده

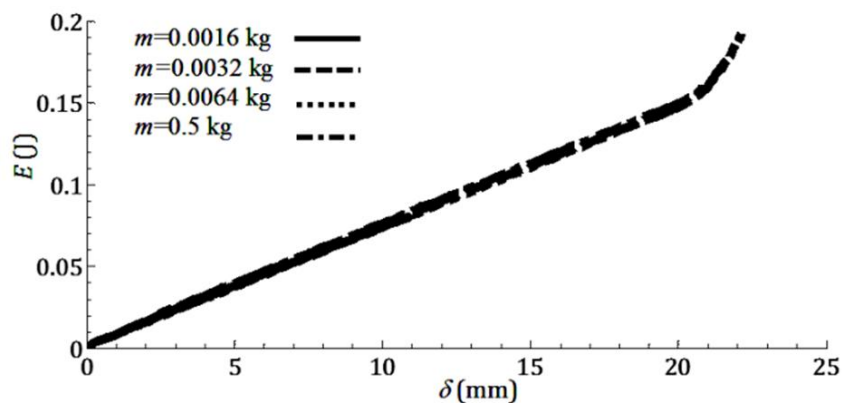


Fig. 14 Energy-shortening curves for impact mass effect study
شکل 14 نمودار انرژی-جاب‌جایی بررسی اثر جرم برخورد کننده

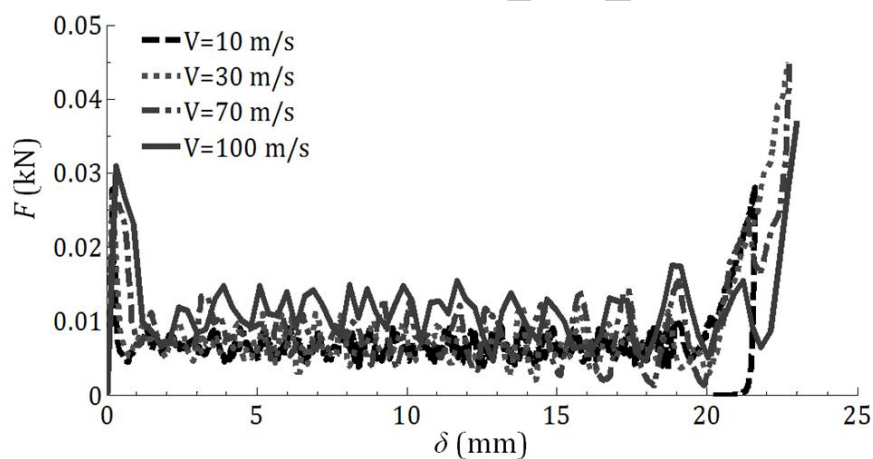


Fig. 15 Force-shortening curves for different impact velocities
شکل 15 نمودار نیرو-جاب‌جایی بررسی اثر سرعت برخورد

جدول 6 اثر جرم برخورد کننده

Table 6 Effects of impact mass

جرم (kg)	0.0064	0.0016	0.0032	0.5
انرژی کل (J)	0.32	0.08	0.16	25
انرژی جذب شده (J)	0.1527	0.08	0.15	0.1591
طول تخریب (mm)	20.42	10.86	20.28	20.82
نیروی میانگین (kN)	0.0075	0.0074	0.0074	0.0076
نیروی بیشینه (kN)	0.03101	0.03098	0.03098	0.3101

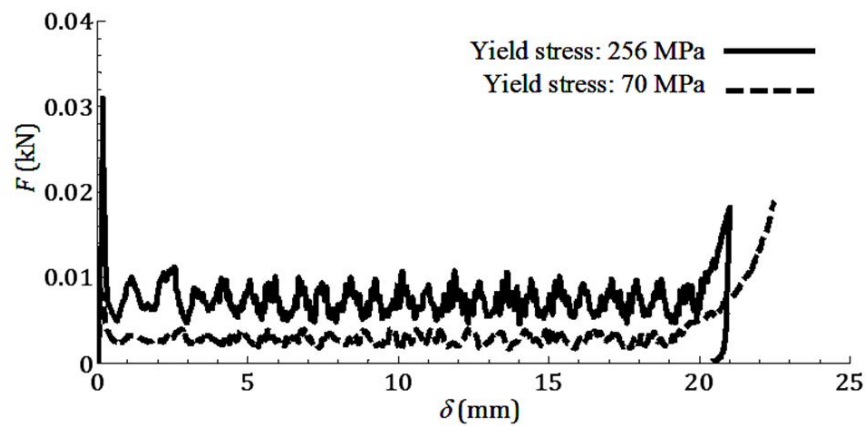


Fig. 9 Force-shortening curve for different yield stresses
شکل 9 نمودار نیرو-جاب‌جایی بررسی اثر تنش تسلیم

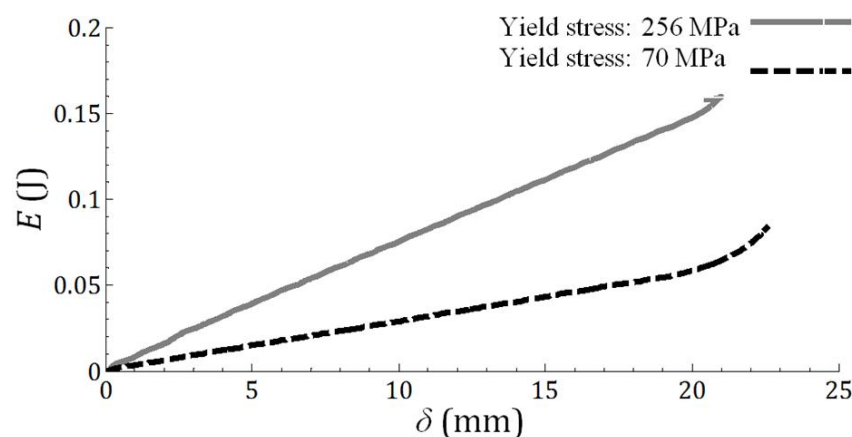


Fig. 10 Energy-shortening curves for different yield stresses
شکل 10 نمودار انرژی-جاب‌جایی بررسی اثر تنش تسلیم

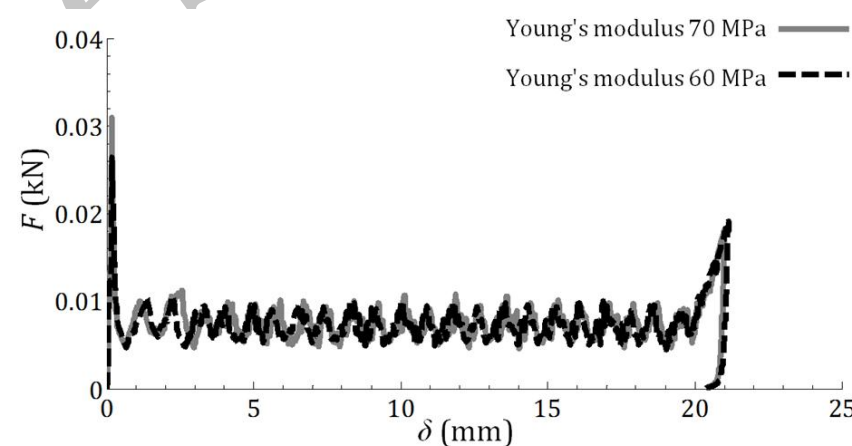


Fig. 11 Force-shortening curves for different Young modulus
شکل 11 نمودار نیرو-جاب‌جایی بررسی اثر مدول یانگ

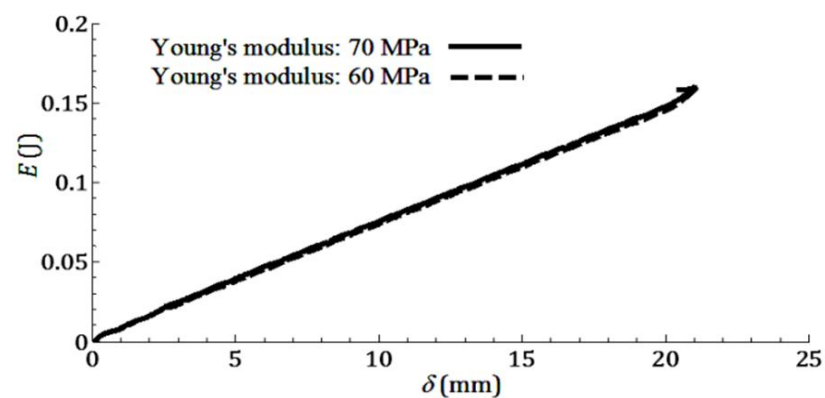


Fig. 12 Energy-displacement curves for young's modulus effects study
شکل 12 نمودار انرژی-جاب‌جایی بررسی اثر مدول یانگ

3-7- اثر حساسیت رفتار ماده به نرخ کرنش

جریان پلاستیک در بعضی مواد به نرخ کرنش وابسته است، که به آن حساسیت به نرخ کرنش گفته می‌شود. حساسیت ماده به نرخ کرنش خصوصیتی است که به جنس و نوع ماده بستگی دارد و مستقل از هندسه سازه است. معادلات ساختاری مختلفی برای بیان رفتار حساسیت مواد به نرخ کرنش پیشنهاد شده است. آزمایش‌های دقیق برای محاسبه ضرایب این

می‌توان نتیجه گرفت که در نظر گرفتن حساسیت ماده به نرخ کرنش باعث افزایش مقادیر نیروی میانگین و پیک و انرژی جذبی می‌شود اما مقدار افزایش آن به سرعت برخورد وابسته است.

3-8- اثر ارتفاع

برای بررسی اثر ارتفاع سلول روی پارامترهای ضربه‌پذیری برای سلول‌های با ارتفاع 10، 15، 20 و 25.4 میلی‌متر تحت ضربه با انرژی جنبشی اولیه 0.16 ژول بررسی شده است. نمودار نیرو و انرژی-جابه‌جایی در شکل‌های 17 و 18 ملاحظه می‌شود. با توجه به نتایج در جدول 11 با کاهش ارتفاع سلول، نیروی میانگین حداکثر 4 درصد و نیروی بیشینه حداکثر 2.5 درصد افزایش می‌یابد. بنابراین ارتفاع در محدوده ارتفاعی که بررسی شده است تأثیر چندانی روی نیروی میانگین و بیشینه ندارد.

جدول 7 بررسی اثر سرعت برخورد

Table 7 Effects of impact velocity

سرعت (m/s)	10	30	70	100
انرژی برخورد (J)	0.16	1.44	7.84	16
انرژی جذب شده (J)	0.1388	0.1492	0.1793	0.2541
طول تخریب (mm)	20.54	20.92	21	22.4
کرنش تراکمی	0.8087	0.8236	0.8268	0.8819
نیروی میانگین (kN)	0.0068	0.0071	0.0085	0.0113
نیروی بیشینه (kN)	0.02775	0.02695	0.02565	0.03099

جدول 8 ضرایب کوپر-سایموند برای بررسی اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش

Table 8 Cowper-Symond coefficients for strain rate sensitivity effects study

D	q
0	0
6500	4
570	3

جدول 9 نتایج شبیه سازی بررسی اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش

انرژی کل (J)	انرژی جذب شده (J)	طول تخریب (mm)	کرنش تراکمی	نیروی میانگین (kN)	نیروی بیشینه (kN)	پارامترها
0.16	0.1388	20.54	0.8087	0.0068	0.0277	V=10, D=0, q=0
0.16	0.1504	20.42	0.8039	0.0074	0.0310	V=10, D=6500, q=4
0.16	0.1509	20.34	0.8008	0.0074	0.0316	V=10, D=570, q=3
1.44	0.1492	20.92	0.8236	0.0071	0.0269	V=30, D=0, q=0
1.44	0.1744	21.01	0.8272	0.0083	0.0312	V=30, D=6500, q=4
1.44	0.1812	21.08	0.8299	0.0086	0.0321	V=30, D=570, q=3
7.84	0.1793	21	0.8268	0.0085	0.0256	V=70, D=0, q=0
7.84	0.2117	21.48	0.8457	0.0099	0.0292	V=70, D=6500, q=4
7.84	0.2271	21.68	0.8535	0.0105	0.0311	V=70, D=570, q=3
16	0.2541	22.4	0.8819	0.0113	0.0310	V=100, D=0, q=0
16	0.2816	22.7	0.8937	0.0124	0.0360	V=100, D=6500, q=4
16	0.2875	22.7	0.8937	0.0127	0.0382	V=100, D=570, q=3

جدول 10 اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش (به درصد)

Table 10 Effects of material's strain rate sensitivity (in percent)

V=100, D=570, P=3	V=100, D=6500, P=4	V=70, D=570, P=3	V=70, D=6500, P=4	V=30, D=570, P=3	V=30, D=6500, P=4	V=10, D=570, P=3	V=10, D=6500, P=4
13.1	10.8	26.7	18.1	21.4	16.9	8.7	8.4
1.3	1.3	3.2	2.3	0.76	0.4	-1	0.6
12.4	9.7	23.5	16.5	21.1	16.9	8.8	8.8
23.2	16.1	21.5	14.1	19.3	16	14.1	11.9

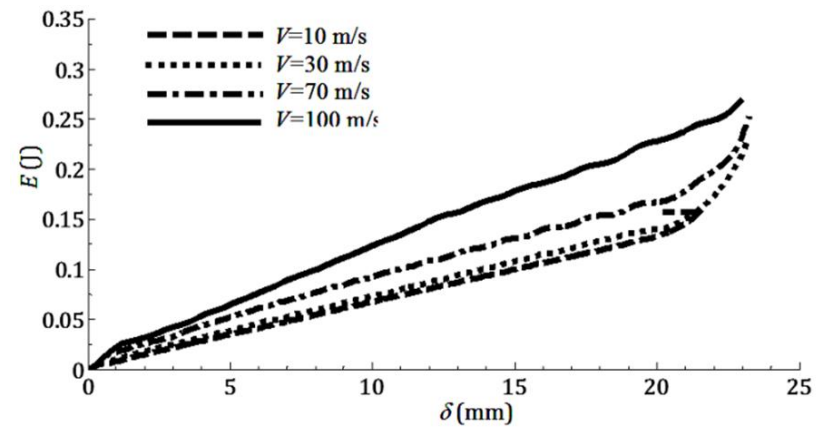


Fig. 16 Energy-shortening curves for impact velocity effects study

شکل 16 نمودار انرژی-جابه‌جایی بررسی اثر سرعت برخورد

در میان فلزات حساسیت آلومینیم به نرخ کرنش تقریباً پایین است. در مراجع مختلف برای آلیاژهای مختلف آلومینیوم مقادیر مختلفی برای ضرایب معادله حساسیت نسبت به نرخ کرنش بیان شده است. در [17] مقادیر 6500 و 1288000 برای ضرایب D و q برای آلومینیم بیان شده است. در این قسمت برای بررسی تأثیر حساسیت ماده به نرخ کرنش روی پارامترهای ضربه‌پذیری، تأثیر این ضرایب برای سرعت‌های 10 و 30 و 70 و 100 متر بر ثانیه بررسی شده است. برای بررسی اثر حساسیت به نرخ کرنش، از ضرایب جدول 8 استفاده شده است. مقادیر ضرایب برابر صفر بیانگر این است که ماده به نرخ کرنش حساسیت ندارد. نتایج شبیه‌سازی در جدول 9 ملاحظه می‌شود. در جدول 10 میزان تغییر مقادیر نیروی میانگین، انرژی جذبی و کرنش تراکمی با ضرایب کوپر-سایموند مختلف نسبت به حالتی که این ضرایب صفر فرض شده‌اند، بررسی شده است. در سرعت 10 متر بر ثانیه با در نظر گرفتن حساسیت به نرخ کرنش، کرنش تراکمی کاهش می‌یابد در حالی که نیروی میانگین تا 8 درصد و نیروی پیک 14 درصد افزایش می‌یابد. در سرعت‌های 30 و 70 با افزایش سرعت، اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش روی مقادیر انرژی جذبی، نیروی میانگین و پیک و کرنش تراکمی بیشتر مشاهده می‌شود. به عنوان مثال در سرعت 70 نیروی میانگین تا 23 درصد افزایش می‌یابد. اما این مقدار در سرعت 100 کاهش یافته و به مقدار 12 درصد می‌رسد. بنابراین

جدول 9 نتایج شبیه سازی بررسی اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش

Table 9 Simulation results for strain rate sensitivity effects study

انرژی کل (J)	انرژی جذب شده (J)	طول تخریب (mm)	کرنش تراکمی	نیروی میانگین (kN)	نیروی بیشینه (kN)	پارامترها
0.16	0.1388	20.54	0.8087	0.0068	0.0277	V=10, D=0, q=0
0.16	0.1504	20.42	0.8039	0.0074	0.0310	V=10, D=6500, q=4
0.16	0.1509	20.34	0.8008	0.0074	0.0316	V=10, D=570, q=3
1.44	0.1492	20.92	0.8236	0.0071	0.0269	V=30, D=0, q=0
1.44	0.1744	21.01	0.8272	0.0083	0.0312	V=30, D=6500, q=4
1.44	0.1812	21.08	0.8299	0.0086	0.0321	V=30, D=570, q=3
7.84	0.1793	21	0.8268	0.0085	0.0256	V=70, D=0, q=0
7.84	0.2117	21.48	0.8457	0.0099	0.0292	V=70, D=6500, q=4
7.84	0.2271	21.68	0.8535	0.0105	0.0311	V=70, D=570, q=3
16	0.2541	22.4	0.8819	0.0113	0.0310	V=100, D=0, q=0
16	0.2816	22.7	0.8937	0.0124	0.0360	V=100, D=6500, q=4
16	0.2875	22.7	0.8937	0.0127	0.0382	V=100, D=570, q=3

جدول 10 اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش (به درصد)

Table 10 Effects of material's strain rate sensitivity (in percent)

V=100, D=570, P=3	V=100, D=6500, P=4	V=70, D=570, P=3	V=70, D=6500, P=4	V=30, D=570, P=3	V=30, D=6500, P=4	V=10, D=570, P=3	V=10, D=6500, P=4
13.1	10.8	26.7	18.1	21.4	16.9	8.7	8.4
1.3	1.3	3.2	2.3	0.76	0.4	-1	0.6
12.4	9.7	23.5	16.5	21.1	16.9	8.8	8.8
23.2	16.1	21.5	14.1	19.3	16	14.1	11.9

انتخاب شده است [20]. ابعاد نمونه‌های مورد بررسی در جدول 12 آورده شده‌اند. نمونه‌ها در مدل عددی تحت برخورد جرم متحرک از یک سمت قرار داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای 25 هندسه مورد بررسی در جدول 13 ارائه شده است.

در ادامه این بخش با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده در جدول 13، تأثیر تغییرات در پارامترهای اندازه سلول لانه‌زنبوری و ضخامت فویل سازنده آن بر پارامترها و مشخصات رفتاری ساختار لانه‌زنبوری شامل نیرو و تنش میانگین فروریزش، نیرو و تنش بیشینه فروریزش و نسبت‌های رفتاری بررسی و به صورت نموداری ارائه و توصیف شده است. مقادیر نیرویی محاسبه شده در این نمودارها بر اساس سطح مقطع مثلثی نمایش داده شده در شکل 1 که بر اساس اندازه سلول قابل محاسبه است، به دست آمده است.

4-1- ارتباط نیروی میانگین و ضخامت

رابطه نیروی میانگین فروریزش با تغییر ضخامت فویل سازنده لانه‌زنبوری در شکل 19 نمایش داده شده است. مطابق نمودار، با افزایش ضخامت فویل، نیروی میانگین نیز افزایش می‌یابد اما تأثیر افزایش ضخامت در نمونه‌های با اندازه سلول بزرگ‌تر، بیشتر است. به عنوان نمونه برای کوچک‌ترین اندازه سلول یعنی 3.175، نیروی میانگین از مقدار 0.0075 تا 0.0459، به میزان 0.0384 کیلونیوتن یعنی 512 درصد تغییر دارد و برای بزرگ‌ترین اندازه سلول یعنی 6.35، نیروی میانگین از مقدار 0.0095 به 0.0640 رسیده است.

یعنی 0.0545 کیلونیوتن معادل با 574 درصد افزایش داشته است. همچنین نرخ افزایشی نیروی میانگین با بالا رفتن ضخامت، افزایش می‌یابد. به طوری که در نمونه‌های با اندازه سلول 3.175، نیروی میانگین با تغییر ضخامت از مقدار 0.0255 به ضخامت 0.0381 به میزان 0.0064 کیلونیوتن و با تغییر ضخامت از مقدار 0.0762 به ضخامت 0.0635 به میزان 0.0126 کیلونیوتن افزایش داشته است.

4-2- ارتباط نیروی میانگین با اندازه سلول

در نمودار شکل 20 ارتباط نیروی میانگین با اندازه سلول لانه‌زنبوری نشان داده شده است. با توجه به نمودار، با افزایش اندازه سلول، نیروی میانگین نیز افزایش می‌یابد و تأثیر افزایش اندازه سلول در نمونه‌های با اندازه ضخامت

جدول 11 بررسی اثر ارتفاع سلول

Table 11 Cell height effects study

ارتفاع (mm)	ارتفاع 10	ارتفاع 15	ارتفاع 20	ارتفاع 25.4
انرژی جذبی (J)	0.06246	0.09131	0.1193	0.15
طول تخریب (mm)	8.109	12.11	16.05	20.28
کرنش تراکمی	0.3193	0.4768	0.6319	0.7984
نیروی میانگین (kN)	0.0077	0.0075	0.0074	0.0074
نیروی پیک (kN)	0.03019	0.03064	0.03076	0.03098

جدول 12 ورودی‌های روش طراحی آزمایش‌ها در روش فاکتوریل کامل

Table 12 Full factorial method inputs in design of experiments method

فاکتور (n)	سطوح (r)	
	n=2 t (mm)	n=1 C (mm)
r=1	0.0254	3.1750
r=2	0.0381	3.9688
r=3	0.0508	4.7625
r=4	0.0635	5.5562
r=5	0.0762	6.3500

4- مطالعه پارامتری بر مبنای روش طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها روشی با کارایی بالا برای انتخاب نمونه‌ها در فضای طراحی است تا با انجام تعداد مشخصی آزمایش، اطلاعاتی در مورد رفتار یک فرایند به دست آید به گونه‌ای که حداکثر میزان اطلاعات با حداقل تعداد آزمایش حاصل شود. چندین روش طراحی آزمایش در دسترس است. از میان این روش‌ها می‌توان به روش‌های فاکتوریل، کامپوزیت و تاگوچی اشاره کرد. اگر تعداد عوامل درگیر در مساله اندک و شمار سطوح آن‌ها محدود باشد، برای به دست آوردن ترکیب عوامل درگیر در پدیده مورد مطالعه، می‌توان تمام ترکیبات ممکن (فاکتوریل کامل) آن‌ها را بررسی کرد. اگر عوامل زیادی که سطوح متعددی دارند در بررسی یک پدیده موثر باشند، بررسی از طریق فاکتوریل کامل، از راه تحلیلی یا آزمایشگاهی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. لذا به جای استفاده از ترکیبات فاکتوریل کامل از روش‌هایی مانند تاگوچی که از ایده ترکیبات فاکتوریل جزئی مطرح می‌شود، می‌توان استفاده کرد. روش فاکتوریل کامل، از تعداد r نقطه نمونه که در فواصل مساوی از یکدیگر قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است (یک محدوده مکعب n بعدی). در این روش، n تعداد فاکتورها یا متغیرهای مورد بررسی است و r تعداد سطوح انتخاب شده برای هر فاکتور یا متغیر است در این صورت r^n آزمایش یا داده‌برداری مورد نیاز است [18، 19].

در این تحقیق، برای بررسی اثر دو متغیر ضخامت فویل و اندازه سلول لانه‌زنبوری بر پارامترهای ضربه‌پذیری، روش طراحی آزمایش، فاکتوریل کامل انتخاب شده است. بنابراین در این بررسی، n برابر با دو، بیانگر دو متغیر ضخامت فویل و اندازه سلول است و r برابر با 5 بیان‌کننده تعداد 5 نقطه با فواصل مساوی برای اندازه سلول و 5 نقطه برای ضخامت فویل است که در مجموع 5^2 ترکیب یعنی 25 نمونه تحلیلی مشخص را معرفی می‌کند. مشخصات هندسی نمونه‌های لانه‌زنبوری از نمونه‌های شرکت هگز-وب

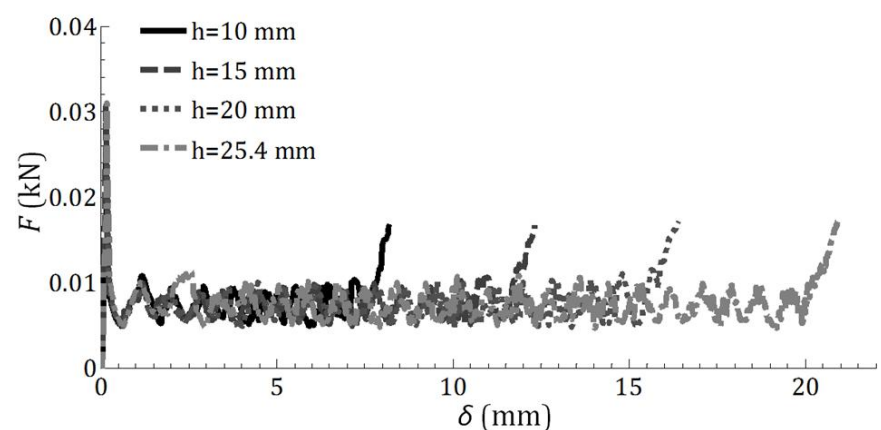


Fig. 17 Force-shortening curves for cell height effects study

شکل 17 نمودار نیرو-جابجایی بررسی اثر ارتفاع سلول

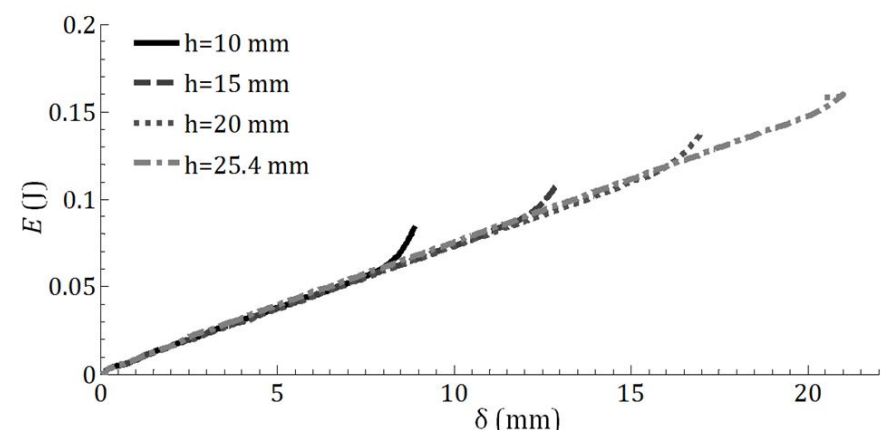


Fig. 18 Energy-shortening curves for cell height effects study

شکل 18 نمودار انرژی-جابجایی بررسی اثر ارتفاع سلول

جدول 13 نتایج شبیه سازی

Table 13 Simulation results

SEA_v (kJ/m ³)	SEA_m (kJ/kg)	σ_m (MPa)	σ_p (MPa)	t (mm)	C (mm)
80289	29.9588	1.7128	7.0309	0.0254	3.175
99196	37.0138	3.1743	10.9758	0.0381	3.175
125566	46.8531	5.3575	14.4168	0.0508	3.175
142826	53.2933	7.6174	17.9242	0.0635	3.175
164261	61.2915	10.5127	21.4866	0.0762	3.175
66952	24.9824	1.1426	5.6154	0.0254	3.9688
85881	32.0455	2.1985	8.8204	0.0381	3.9688
104973	39.1692	3.5830	11.5724	0.0508	3.9688
126656	47.2599	5.4039	14.3537	0.0635	3.9688
148733	55.4975	7.6150	17.1540	0.0762	3.9688
59753	22.2959	0.8498	4.6806	0.0254	4.7625
77182	28.7994	1.6466	7.3595	0.0381	4.7625
95205	35.5244	2.7081	9.6952	0.0508	4.7625
111785	41.7109	3.9746	11.9637	0.0635	4.7625
131486	49.0621	5.6101	14.3056	0.0762	4.7625
54395	20.2968	0.6631	4.0074	0.0254	5.5562
69589	25.9662	1.2725	6.3032	0.0381	5.5562
89348	33.3389	2.1784	8.3335	0.0508	5.5562
106060	39.5747	3.2323	10.293	0.0635	5.5562
124511	46.4596	4.5536	12.3133	0.0762	5.5562
51136	19.0809	0.5455	3.4971	0.0254	6.35
66051	24.6461	1.0568	5.5131	0.0381	6.35
83323	31.0907	1.7776	7.3023	0.0508	6.35
104218	38.8874	2.7792	9.0148	0.0635	6.35
114569	42.7498	3.6662	10.7845	0.0762	6.35

بیشینه نسبت به ضخامت بیش از اندازه سلول است و افزایش ضخامت تأثیر بیشتری روی نیروی بیشینه دارد. به عنوان مثال برای سلول با ضخامت 0.0254، نیروی بیشینه از 0.0307 تا 0.0611 به میزان 0.0304 و در نمونه‌های با اندازه ضخامت 0.0762 نیروی پیک از 0.0938 تا 0.1883 به میزان 0.0892 افزایش یافته است.

4-5- ارتباط تنش میانگین با ضخامت

نمودار شکل 23 ارتباط تنش میانگین را با ضخامت فویل لانه زنبوری ارائه داده است. مطابق نمودار، افزایش ضخامت فویل سلول با افزایش تنش میانگین رابطه مستقیم دارد. به علاوه، تأثیر افزایش ضخامت در نمونه‌های با اندازه سلول کوچک‌تر، بیشتر است. به عنوان مثال برای کوچک‌ترین اندازه سلول یعنی 3.175، تنش میانگین از 1.71 به 10.51 مگاپاسکال یعنی 8.8 مگاپاسکال تغییر می‌کند اما برای بزرگ‌ترین اندازه سلول یعنی 6.35، تنش میانگین از 0.54 به 3.67 (تغییر 3.13 مگاپاسکالی) افزایش می‌یابد. بنابراین مشاهده می‌شود که تنش میانگین سلول‌های با اندازه کوچک‌تر، با افزایش ضخامت، افزایش بیشتری پیدا می‌کند. همچنین نرخ افزایشی اندازه تنش میانگین با بالا رفتن ضخامت، شدیدتر می‌شود. مطابق نمودار در اندازه سلول مشخص، با افزایش ضخامت به سه برابر مقدار اولیه، میزان تنش میانگین فروریزش تقریباً شش برابر شده است. این نتیجه که مستقل از اندازه سلول برای تمام اندازه سلول‌های مورد بررسی مشاهده شده است نشان می‌دهد که تنش میانگین با دو برابر نسبت تغییرات ضخامت ارتباط مستقیم دارد.

4-6- ارتباط تنش میانگین و اندازه سلول

در نمودار شکل 24 ارتباط تنش میانگین با اندازه سلول لانه زنبوری نشان داده شده است. با توجه به نمودار، با افزایش اندازه سلول، تنش میانگین به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. تأثیر مقداری افزایش اندازه سلول در نمونه‌های با اندازه ضخامت بزرگ‌تر، بیشتر مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با حدوداً دو برابر شدن اندازه سلول به ازای هر ضخامت ثابت، اندازه تنش میانگین حدوداً به یک سوم کاهش یافته است. به عبارت دیگر تغییرات تنش میانگین فروریزش با 1.5 برابر تغییرات اندازه سلول ارتباط معکوس دارد. مقدار این کاهش تنش میانگین برای سلول‌های با ضخامت بزرگ‌تر که تنش فروریزش بزرگتری دارند، بیشتر خواهد بود.

4-7- ارتباط تنش بیشینه و ضخامت

نمودار شکل 25 ارتباط تنش بیشینه با ضخامت را نشان می‌دهد. تأثیر ضخامت فویل روی تنش بیشینه نیز مانند تنش میانگین است. با توجه به نمودار، با افزایش ضخامت فویل سلول، تنش بیشینه نیز افزایش می‌یابد و تقریباً تأثیر افزایش ضخامت در نمونه‌های با اندازه سلول کوچک‌تر، بیشتر مشاهده می‌شود. مطابق نمودارها با فرض تثبیت اندازه سلول، با افزایش ضخامت به سه برابر مقدار اولیه، میزان تنش بیشینه نیز به همان نسبت افزایش داشته است. این نتیجه تقریباً مستقل از اندازه سلول است و برای تمام اندازه سلول‌های مورد بررسی مشاهده شده است. به عبارت دیگر ارتباط تنش بیشینه با ضخامت رابطه‌ای مستقیم است.

4-8- ارتباط تنش بیشینه و اندازه سلول

نمودار شکل 26 ارتباط تنش بیشینه با اندازه سلول را نمایش می‌دهد. مشابه تنش میانگین، با افزایش اندازه سلول، تنش بیشینه کاهش می‌یابد. به علاوه حساسیت تنش بیشینه در نمونه‌های ضخیم‌تر، نسبت به افزایش اندازه سلول

بزرگ‌تر، کمی بیشتر مشاهده می‌شود. به طوری که در نمونه با کوچک‌ترین ضخامت، تغییر نیروی میانگین با افزایش اندازه سلول بسیار کم است. در نمونه با ضخامت 0.0254، نیروی میانگین از 0.0075 تا 0.0095 به میزان 0.0020 کیلو نیوتن، 26.7 درصد تغییر می‌کند و برای نمونه با ضخامت 0.0762 میلی‌متر، نیروی میانگین از 0.0459 به 0.0640 تغییری به میزان 0.0181 معادل افزایش 39.43 درصدی دارد. این افزایش برای سلول‌های با ضخامت بزرگ‌تر شدیدتر و بیشتر است. از طرف دیگر در مقایسه با نمودار شکل 19 حساسیت نیروی میانگین نسبت به ضخامت بیش از حساسیت آن به اندازه سلول است و افزایش ضخامت تأثیر بیشتری بر نیروی میانگین دارد.

4-3- ارتباط نیروی بیشینه با ضخامت

در نمودار شکل 21 ارتباط نیروی پیک با ضخامت لانه زنبوری ترسیم شده است. تأثیر ضخامت فویل بر روی نیروی بیشینه نیز مانند نیروی میانگین است. با توجه به نمودار، با افزایش ضخامت فویل سلول، نیروی بیشینه نیز افزایش می‌یابد و تأثیر افزایش ضخامت در نمونه‌های با اندازه سلول بزرگ‌تر، بیشتر مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار در نمونه با اندازه سلول کوچک‌تر یعنی 3.175 میلی‌متر، نیروی بیشینه از 0.0307 تا 0.0938 به میزان 0.0631 معادل 205.5 درصد و برای اندازه سلول بزرگ‌تر یعنی 6.35 از 0.0611 تا 0.1883 به مقدار 0.1272 معادل 208.18 درصد افزایش داشته است.

4-4- ارتباط نیروی بیشینه با اندازه سلول

در نمودار شکل 22 ارتباط نیروی پیک با اندازه سلول لانه زنبوری ترسیم شده است. مشابه رفتار نیروی میانگین، با افزایش اندازه سلول، نیروی بیشینه نیز تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد و تأثیر افزایش اندازه سلول در نمونه‌های با اندازه ضخامت بزرگ‌تر، بیشتر است. به علاوه حساسیت نیروی

آزمایش‌ها، 25 نمونه لانه زنبوری با ارتفاع یکسان و اندازه سلول و ضخامت مختلف در نرم افزار داینا انتخاب و شبیه‌سازی شد. ارتباط بین تنش میانگین و بیشینه و انرژی‌های ویژه نسبت به ضخامت و اندازه سلول استخراج و مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی مورد استفاده می‌تواند نتایجی در محدوده 15 درصدی نسبت به نمونه‌های واقعی در شرایط سخت‌گیرانه و غیرایده‌آل ارائه دهد. همچنین مشخص شد خصوصیات ضربه‌پذیری سازه مانند تنش میانگین و تنش بیشینه، اصالتاً به ضخامت و اندازه سلول وابسته هستند و شدت وابستگی آن‌ها به مدول یانگ ماده و ضریب اصطکاک و ارتفاع سلول کمتر است. همچنین میزان تغییرات تنش میانگین فروریزش نسبت به تنش بیشینه در قبال تغییرات هندسه سلول لانه‌زنبوری اعم از تغییر در ضخامت دیواره یا اندازه سلول شدیدتر است. در این میان اثر تغییر ضخامت نسبت به تغییر ابعاد سلول دارای اهمیت بیشتری است.

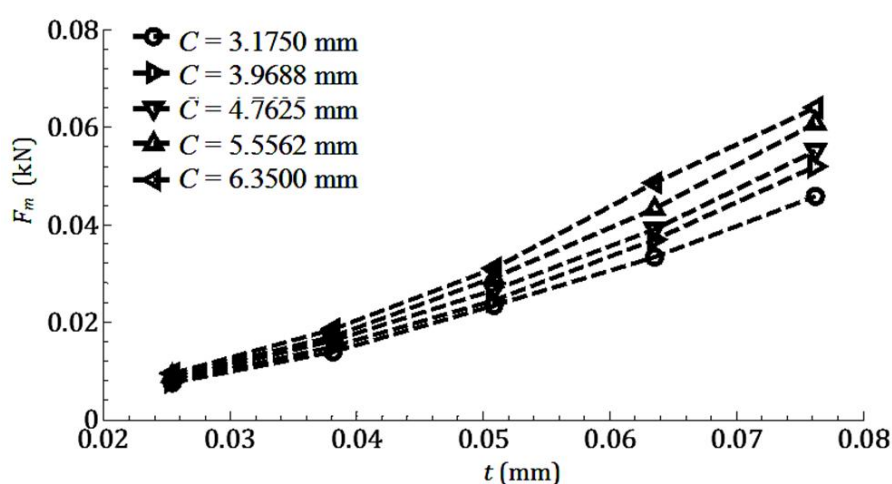


Fig. 19 Functionality of mean force with cell thickness

شکل 19 ارتباط نیروی میانگین و ضخامت

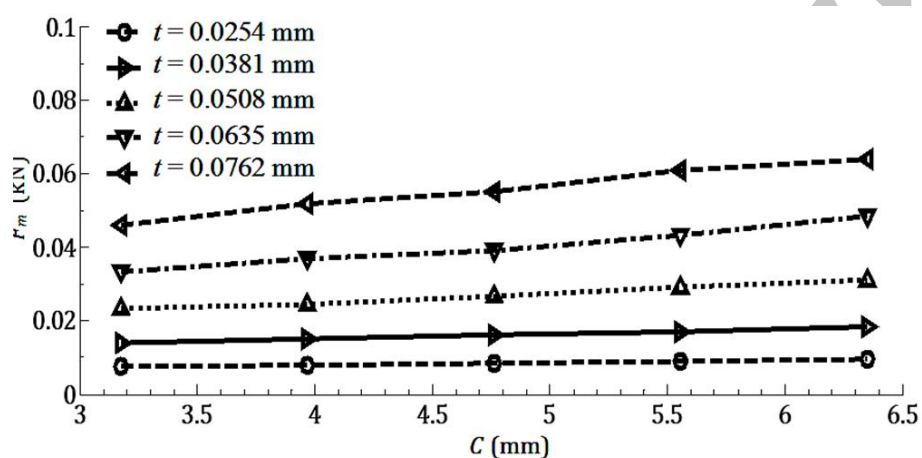


Fig. 20 Functionality of mean force with cell size

شکل 20 ارتباط نیروی میانگین و اندازه سلول

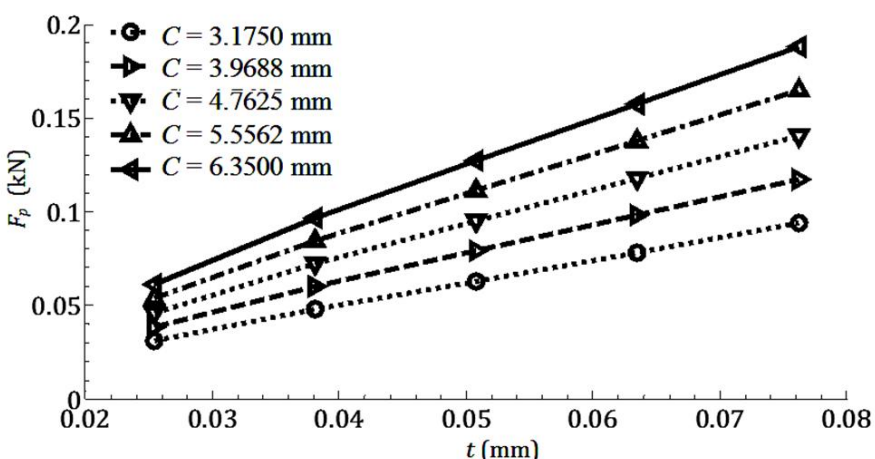


Fig. 21 Functionality of peak force with cell thickness

شکل 21 ارتباط نیروی بیشینه با ضخامت

بیشتر است. برای مثال در سلول با ضخامت 0.0254 تنش پیک از 3.5 تا 7.03 به مقدار 3.53 مگاپاسکال و در نمونه با ضخامت 0.0762 تنش پیک از 21.49 تا 10.78 به میزان 10.71 کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به نتایج موجود در صورتی که ضخامت ثابت در نظر گرفته شود، با دوبرابر شدن اندازه سلول‌ها، تنش بیشینه نصف شده است. به عبارت دیگر مستقل از این که ساختار لانه‌زنبوری چه ضخامتی داشته باشد، می‌توان گفت تنش بیشینه ارتباط معکوس با اندازه سلول دارد. چهار نمودار اخیر نشان‌دهنده حساس‌تر بودن تنش میانگین فروریزش نسبت به تنش بیشینه در قبال تغییرات هندسه سلول لانه‌زنبوری است.

9-4- ارتباط نسبت نیروی میانگین به پیک و ضخامت

نمودار شکل 27 ارتباط نسبت نیروی میانگین به نیروی پیک را با ضخامت برای اندازه سلول‌های مختلف بیان می‌کند. مشاهده می‌شود که نسبت نیروی میانگین به پیک، برای کوچک‌ترین اندازه سلول 3.175، نسبت به بزرگ‌ترین اندازه سلول یعنی 6.35، بیشتر است. نسبت نیروی میانگین به پیک برای اندازه سلول 3.175 حدوداً از 25 تا 50 درصد، و برای اندازه سلول 6.35 از 15 تا 30 درصد تغییر می‌کند. همچنین این نسبت، با افزایش ضخامت سلول افزایش می‌یابد.

10-4- ارتباط نسبت نیروی پیک به میانگین و اندازه سلول

نمودار شکل 28 ارتباط نسبت نیروی میانگین به نیروی پیک را با اندازه سلول برای ضخامت‌های مختلف بیان می‌کند. نسبت نیروی میانگین به نیروی بیشینه با افزایش اندازه سلول، کاهش می‌یابد. این نسبت برای سلول با کوچک‌ترین ضخامت، در مقایسه با سلول با ضخامت بزرگ‌تر، کمتر است. این نسبت برای سلول با ضخامت 0.0254 حدوداً از 15 تا 24 درصد، و برای سلول با ضخامت 0.0762 از 30 تا 50 درصد تغییر می‌کند. سلول با بزرگ‌ترین ضخامت و کوچک‌ترین اندازه، دارای بیشترین نسبت نیروی میانگین به بیشینه است. یعنی مقادیر نیروی میانگین و بیشینه به هم نزدیک‌تر هستند.

11-4- ارتباط انرژی ویژه جرمی و حجمی با اندازه سلول و ضخامت

در نمودار شکل‌های 29 و 30 تغییرات انرژی‌های ویژه با ضخامت سلول برای اندازه سلول‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که در نمودارها مشخص است، ارتباط و رفتار انرژی‌های ویژه جرمی و حجمی نسبت به ضخامت و اندازه سلول، مشابه رفتار تنش میانگین و بیشینه است. به این صورت که با افزایش اندازه سلول، انرژی‌های ویژه کاهش می‌یابند و با افزایش ضخامت سلول، انرژی‌های ویژه افزایش می‌یابد. بنابراین سلول با بزرگ‌ترین ضخامت و کوچک‌ترین اندازه سلول دارای بیشترین انرژی‌های ویژه است.

5- جمع‌بندی

در این مقاله، شبیه‌سازی بارگذاری دینامیکی لانه زنبوری فلزی با اعمال ساده سازی در کد المان محدود داینا انجام و محدوده درستی آن در مقایسه با نتایج آزمون شبه‌استاتیک بر روی دو نمونه‌های واقعی نشان داده شد. به عنوان مقدمه‌ای برای بخش دوم مقاله، به منظور بررسی اثر عوامل مؤثر در رفتار جذب انرژی لانه‌زنبوری، مطالعه پارامتری روی این مدل عددی انجام گرفت. اثر مشخصات ماده مانند مدول یانگ، تنش تسلیم، مدول مماسی و مشخصات هندسه سلول مانند اندازه وجه، ضخامت و ارتفاع و همچنین اثر سرعت و ضریب اصطکاک تماس بررسی شد. با استفاده از روش طراحی

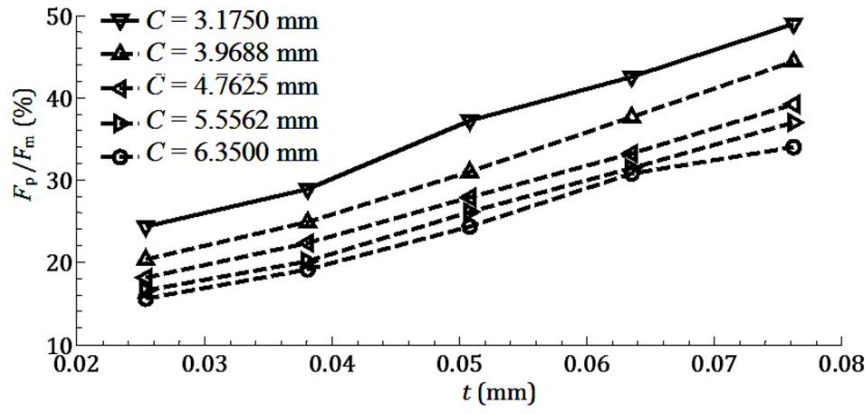


Fig. 27 Functionality of peak force to mean ratio with cell thickness

شکل 27 ارتباط نسبت نیروی میانگین به پیک و ضخامت

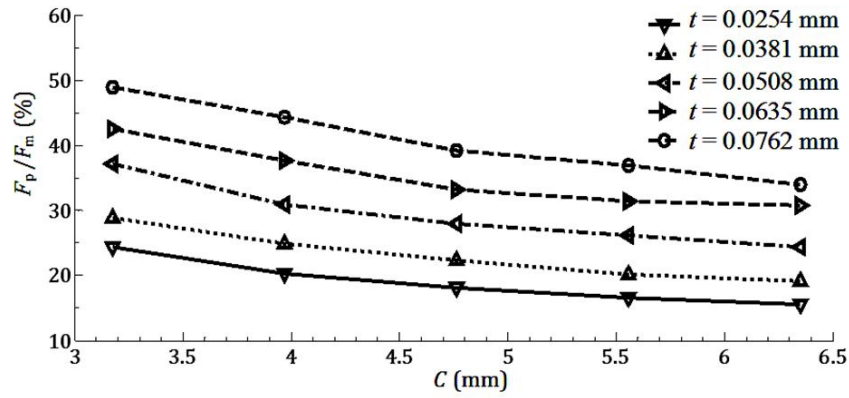


Fig. 28 Functionality of peak force to mean ratio with cell size

شکل 28 ارتباط نسبت نیروی پیک به میانگین و اندازه سلول

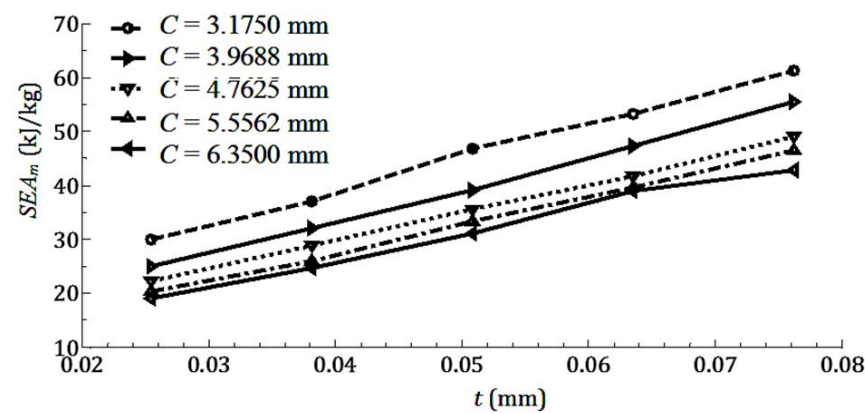


Fig. 29 Functionality of SEA_m with cell size and thickness

شکل 29 تغییرات انرژی ویژه جرمی با تغییر در ضخامت فویل و اندازه سلول

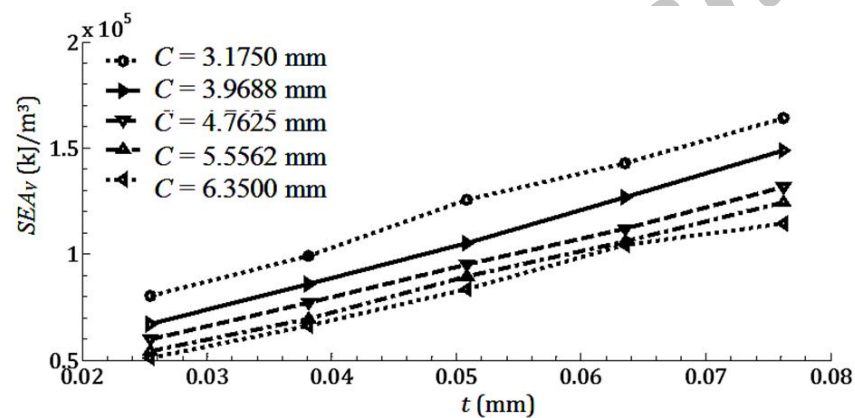


Fig. 30 Functionality of SEA_v with cell size and thickness

شکل 30 تغییرات انرژی ویژه حجمی با تغییر در ضخامت فویل و اندازه سلول

6- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
c	اندازه سلول لانه زنبوری (m)
E	انرژی (J)
F	نیرو (N)
h	ارتفاع (m)
SEA	انرژی ویژه جذب شده ($J/kg, J/m^3$)
t	ضخامت (m)
v	سرعت (ms^{-1})

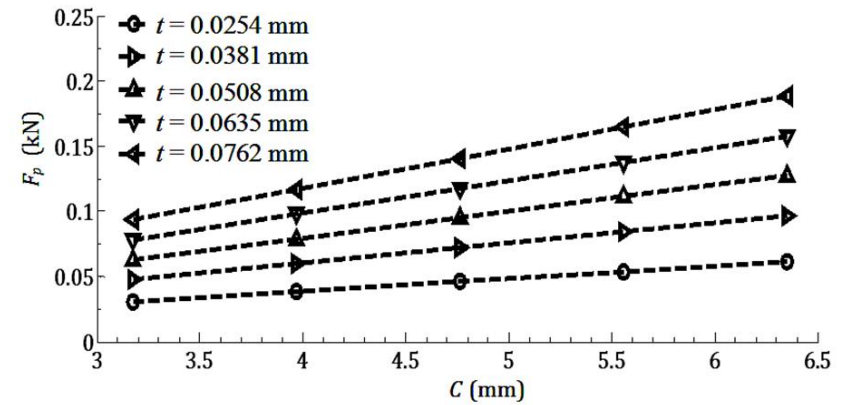


Fig. 22 Functionality of peak force with cell size

شکل 22 ارتباط نیروی بیشینه با اندازه سلول

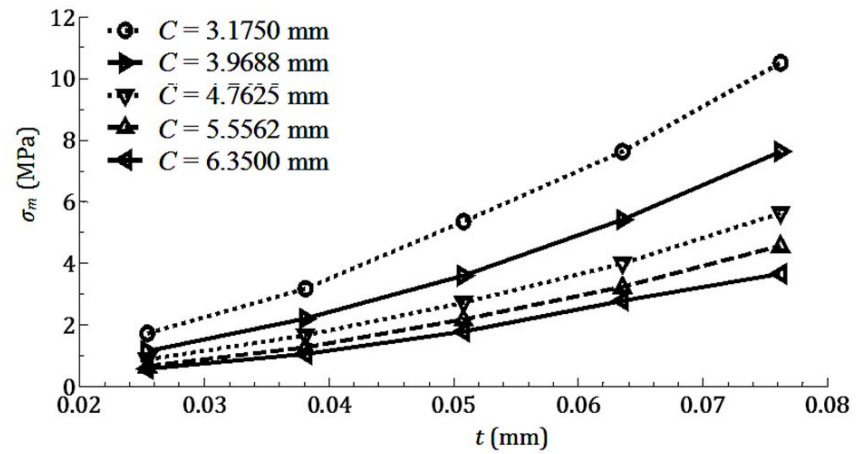


Fig. 23 Functionality of mean stress with cell thickness

شکل 23 ارتباط تنش میانگین و ضخامت

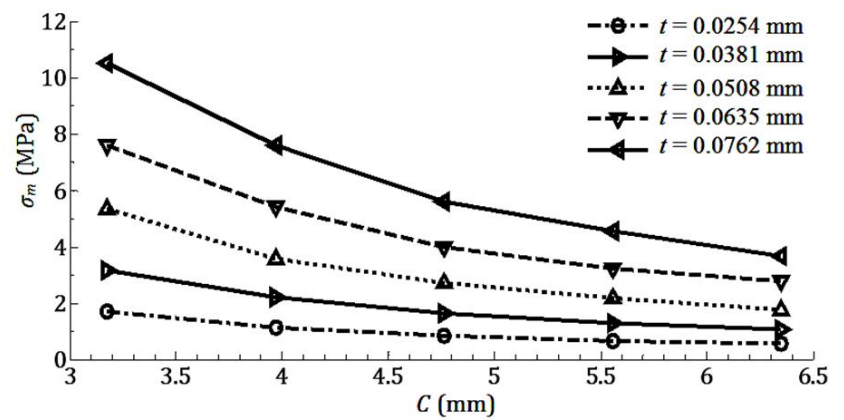


Fig. 24 Functionality of mean stress with cell size

شکل 24 ارتباط تنش میانگین و اندازه سلول

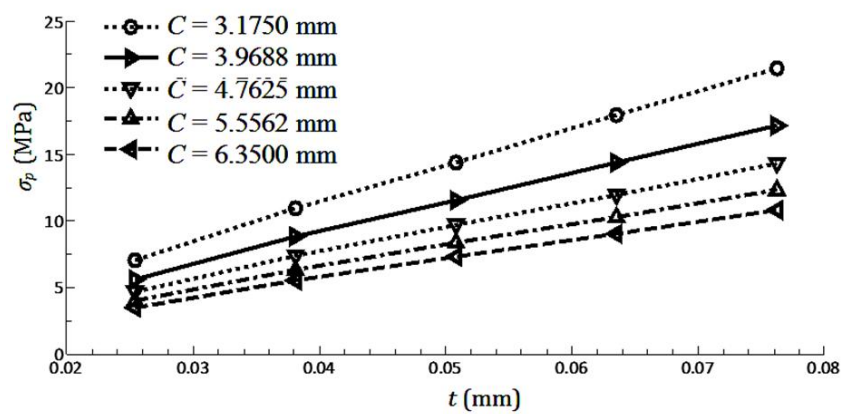


Fig. 25 Functionality of peak stress with cell thickness

شکل 25 ارتباط تنش بیشینه و ضخامت

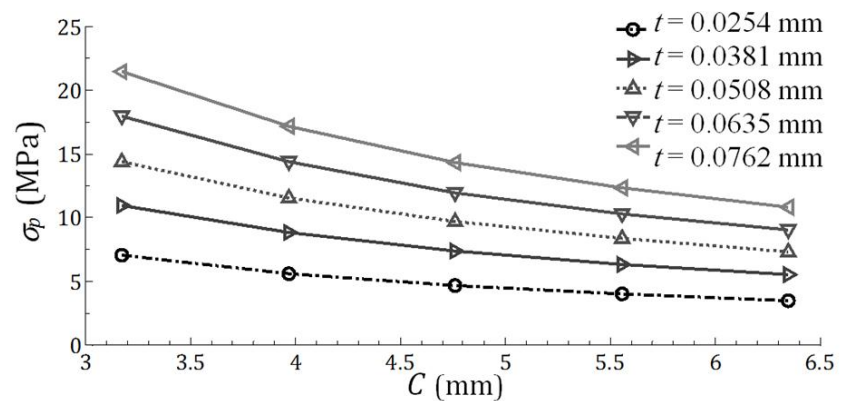


Fig. 26 Functionality of peak stress with cell size

شکل 26 ارتباط تنش بیشینه و اندازه سلول

- [8] M. Yamashita and M. Gotoh, Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications—numerical simulation and experiment, *International Journal Impact Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 618–630, 2005.
- [9] S. Deqiang, Z. Weihong, and W. Yanbin, Mean out-of-plane dynamic plateau stresses of hexagonal honeycomb cores under impact loadings, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 11, pp. 2609–2621, 2010.
- [10] M. K. Khan, T. Baig, and S. Mirza, Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb, *Materials Science & Engineering*, Vol. 539, pp. 135–142, 2012.
- [11] S. Xu, J. H. Beynon, D. Ruan, and G. Lu, Experimental study of the out-of-plane dynamic compression of hexagonal honeycombs, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 8, pp. 2326–2336, 2012.
- [12] A. P. Meran, T. Toprak, and A. Muğan, Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures, *Thin Walled Structures*, Vol. 78, pp. 87–94, 2014.
- [13] Z. Wang, H. Tian, Z. Lu, and W. Zhou, High-speed axial impact of aluminum honeycomb – Experiments and simulations, *Composites Part B*, Vol. 56, pp. 1–8, 2014.
- [14] L. Aktay, A. Johnson, and B. Kröplin, Numerical modelling of honeycomb core crush behavior, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, No. 9, pp. 2616–30, 2008.
- [15] B. Hou, H. Zhao, S. Patoftatto, J. G. Liu, and Y. L. Li, Inertia effects on the progressive crushing of aluminium honeycombs under impact loading, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, No. 19, pp. 2754–62, 2012.
- [16] F. Zhu, L. Zhao, G. Lu, and E. Gad, A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels, *International Journal Impact Engineering*, Vol. 36, No. 5, pp. 687–699, 2009.
- [17] N. Jones, *Structural impact*, pp. 327–350, New York: Cambridge university, 1989.
- [18] H. Yin, G. Wen, and N. Gan, crashworthiness design for honeycomb structures under axial dynamic loading, *International Journal of Computational Methods*, Vol. 8, No. 4, pp. 863–877, 2011.
- [19] S. Hou, Q. Li, S. Long, X. Yang, and W. Li, Design optimization of regular hexagonal thin-walled columns with crashworthiness criteria, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 43, No. 6, pp. 555–565, 2007.
- [20] *Technology Brochures: Honeycomb Attributes and Properties*, Accessed 20 June 2015; www.hexcel.com/Resources

علائم یونانی

ε	کرنش
σ	تنش (Pa)
δ	جابه جایی (m)
زیر نویس‌ها	
cm	جرم تخریب شده
CV	حجم تخریب شده
m	میانگین
P	بیشینه، پیک

7- مراجع

- [1] G. Petrone, S. Rao, S. De Rosa, B. R. Mace, F. Franco, and D. Bhattacharyya, Behaviour of fibre reinforced honeycomb core under low velocity impact loading, *Composite Structures*, Vol. 100, No. 0, pp. 356–362, 2013.
- [2] M. Li, Z. Deng, R. Liu, and H. Guo, Crashworthiness design optimisation of metal honeycomb energy absorber used in lunar lander, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 16, No. 4, pp. 411–419, 2011.
- [3] R. K. McFarland, Hexagonal cell structures under post-buckling axial load, *AIAA*, Vol. 1, No. 6, pp. 1380–1385, 1963.
- [4] T. Wierzbicki, Crushing Analysis of metal honeycomb, *Impact Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 157–174, 1983.
- [5] G. H. Liaghat, H. A. Serailoo, Optimum design of honeycomb core structures under compressive load, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 37, pp. 73–82, 1388 (In persian فارسی)
- [6] N. Pirmohammadi, G. H. Liaghat, M. H. Pol, and H. Sabouri, Analytical , experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact, *Modares Mechanical Engineering* , Vol. 14, No. 6, pp. 153–164, 2014. (In persian فارسی)
- [7] H. Zhao and G. Gary, Crushing behaviour of aluminium honeycombs under impact loading, *Impact Engineering*, Vol. 21, No. 10, pp. 827–836, 1998.