

# کراشینگ دینامیکی پانل های هانی کمب در اثر برخورد پرتابه های استوانه ای

غلامحسین لیاقت

استاد

بخش مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی،

دانشگاه تربیت مدرس

حمیدرضا داغیان

دانشیار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مجتبی صدیقی

استادیار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

علی علوی نیا

دانشجوی دکتری

بخش مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی،

دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

در این مقاله، کراشینگ (crushing) پانل های هانی کمب (honeycomb) در اثر برخورد پرتابه های استوانه ای (که سطح مقطع آنها از ابعاد سلول های هانی کمب بزرگتر است) مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از روش انرژی، حداقل سرعت پرتابه برای مجاله شدن (densification)، یا کراشینگ کامل این پانل ها محاسبه شده است و معادلات بدست آمده با نتایج تجربی موجود، مقایسه گردیده اند. این مقایسه نشان می دهد که سازگاری خوبی بین نتایج تحلیلی و تجربی وجود دارد. بر اساس روابط بدست آمده در این مقاله حداقل سرعت پرتابه برای کراشینگ کامل پانل، بطور مستقیم با ضخامت دیواره های سلول، ضخامت پانل هانی کمب و استحکام تسلیم فشاری ماده هانی کمب، و به طور معکوس با اندازه سلول و جرم پرتابه متناسب است.

## کلمات کلیدی

هانی کمب، کراشینگ، سازه سلولی، برخورد

## Dynamic Crushing of Honeycomb Panels Under Impact of Cylindrical Projectiles

Gholam Hossein Liaghat

Professor

Mechanical Engineering Department,

Tarbiat Modarres University

Mojtaba Sadighi

Assistant Professor

Mechanical Engineering Department,

Amirkabir University of Technology

Hamid Reza Daghyani

Associate Professor

Mechanical Engineering Department,

Amirkabir University of Technology

Ali Alavinia

Ph.D. Student

Mechanical Engineering Department,

Tarbiat Modarres University

## Abstract

*In this paper crushing of honeycomb panels subjected to impact of cylindrical projectiles is studied and the minimum velocity of projectile required for densification of panel is analytically determined. This study shows that the minimum impact velocity needed for panel densification is directly proportional to the cell wall thickness, the panel thickness and compressive yield strength of honeycomb material; and is inversely proportional to the cell size and projectile's mass. These results are in good agreement with the available experimental data.*

### Keywords

*Honeycomb, Crushing, Cellular structure, Impact.*

## مقدمه

سازه‌های جدار نازک طوری طراحی می‌شوند که قابلیت تحمل بارهایی را داشته باشند که جابجائی‌های حاصل از اعمال این بارها، بسیار بیشتر از مقادیر متناظر با بارهای حدی کمانش باشد. از نظر ویژگی‌های جذب انرژی اعضای تحت فشار، مطلوب این است که خیزهای ایجاد شده در سازه چندین برابر بزرگتر از ضخامت پوسته بوده و قابل مقایسه با طول و عرض مقطع باشند. خیزهای بزرگ در سازه‌هایی که از ورقهای فلزی ساخته شده‌اند با تشکیل تاخوردگی (folding) و پیچ و خمهای زیاد (wrinkling) رخ می‌دهند. از خصوصیات چنین مکانیزم تغییر شکلی این است که انرژی کرنشی (در پوسته‌های ارتجاعی) و یا نرخ اتلاف انرژی (در پوسته‌های خمیری) در نواحی نسبتاً باریکی متمرکز است.

هانی کمب یکی از این سازه‌های جدار نازک است که از شبکه‌ای از سلول‌های باز (میان تهی) با دیواره‌هایی از ورقهای بسیار نازک تشکیل شده است. معمولاً سلول‌ها به شکل ۶ ضلعی منتظم هستند (شکل ۱)، اما به شکل‌های دیگر نیز ساخته می‌شوند. هانی کمب به دلیل برخورداری از ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله خاصیت جذب انرژی زیاد، در مقیاس وسیعی به عنوان جاذب انرژی و ضربه‌گیر در برابر بارهای خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین ورقهای ساندویچی با هسته‌های هانی کمب به خاطر سفتی و استحکام مخصوص بالا، در صنایع حمل و نقل و هوا فضا به کار می‌روند. پره‌های روتور هلیکوپترها، بدنه کشتی، بدنه هواپیماها و پوسته‌های موتورهای جت از زمینه‌های کاربرد پانل‌های ساندویچی هستند. هانی کمب‌ها در وضعیت‌های مختلفی مورد اصابت پرتابه‌ها قرار می‌گیرند. خرابی حاصل از ضربه روی پانل می‌تواند از نفوذ سطحی رویه‌های ساندویچ تا عبور کامل پرتابه از پانل را در برگیرد. لذا مطالعه رفتار اینگونه سازه‌ها به علت کاربرد وسیع آنها در مقابل ضربه، از نظر مهندسی ضروری بنظر می‌رسد.

رفتار خرد شدن هانی کمب‌ها اولین بار توسط مک فارلند (Mc Farland)، [1]، مورد بررسی قرار گرفت. او یک مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی تنش خرد شدن سازه‌های با سلول ۶ ضلعی در اثر بارهای محوری پیشنهاد نمود. پس از او برای در نظر گرفتن تغییر فرمهای خمشی و انبساطی، این مدل توسط محققین دیگر توسعه داده شد. برای بررسی تحلیلی تغییر شکل‌های هانی کمب در بارهای شبه استاتیکی، ویرزبیک (Wierzbicki)، المان زاویه ای (angle element) را معرفی نمود [2]. برای تحلیل خرد شدن محوری ستون‌های جدار نازک با مقطع چند ضلعی نیز از همین المان استفاده شد [3,4]. تعدادی از محققین هم رفتار هانی کمب‌ها در برابر بارهای شبه استاتیکی و ضربه ای را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند [5-7]. نفوذ کامل (perforation) پرتابه‌های استوانه‌ای در ورق‌های ساندویچی با هسته هانی کمب توسط پارک و فت (Fatt, Park) [8]، به صورت تحلیلی بررسی گردیده ولی در تحلیل هسته ساندویچ (یعنی هانی کمب)، از یک مدل نیمه تجربی استفاده شده است.

خرد شدن سازه‌های هانی کمب تحت بارهای شبه استاتیکی توسط نویسندگان همین مقاله بررسی شده و ضمن تشریح مدل ویرزبیک، یک مدل اصلاحی ارائه شده که نتایج حاصل از آن به مقادیر تجربی نزدیکتر است [9]. در این مقاله، خرد شدن دینامیکی پانل‌های هانی کمب فلزی در اثر برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و حداقل سرعت برخورد برای مچاله شدن هانی کمب به صورت تحلیلی محاسبه شده است. روابط بدست آمده در این تحلیل، سازگاری خوبی با داده‌های تجربی موجود نشان می‌دهند.

# ۱- محاسبه حداقل سرعت لازم برای کراشینگ کامل یک پانل هانی کمب

## ۱-۱- فرض ها

- ۱- رفتار هانی کمب به صورت صلب - خمیری کامل (solid-perfectly plastic) در نظر گرفته می شود.
- ۲- ضربه زننده (striker) به شکل استوانه بوده و دارای سطحی بزرگتر از سطح سلول است.
- ۳- مکانیزم های تغییر فرم هانی کمب، مشابه حالت شبه استاتیکی است.
- ۴- پس از برخورد، ضربه زننده بر نمی گردد.
- ۵- در اثر برخورد، هانی کمب دچار کراشینگ کامل می شود.

## ۲-۱- محاسبه انرژی تلف شده در اثر خرد شدن یک المان زاویه ای (۲)

یک المان زاویه ای تحت بار محوری، در اثر سه مکانیزم تغییر شکل، انرژی را تلف می کند. بخشی از المان منبسط می شود، در بخش دیگری از آن مفصل های خمیری افقی تشکیل شده و حرکت می نمایند، و بالاخره در گوشه المان مفصل خمیری مایل ایجاد شده و با حرکت خود انرژی را جذب می نمایند. انرژی تلف شده در هر یک از این سه مکانیزم به صورت ذیل محاسبه می شود:

انرژی تلف شده در اثر انبساط

$$E_1 = (16 M_0 \frac{b}{h} H) I_1(\psi_0) \quad (1)$$

انرژی تلف شده در اثر حرکت مفصل خمیری افقی

$$E_2 = \pi M_0 C \quad (2)$$

انرژی تلف شده در اثر حرکت مفصل خمیری مایل

$$E_3 = (\frac{4 M_0 H^2}{b}) I_3(\psi_0) \quad (3)$$

چنانچه تکیه گاه های المان، گیردار در نظر گرفته شود، کل انرژی تلف شده در یک المان زاویه ای از رابطه زیر به دست می آید:

$$E_{AE} = E_1 + 2 E_2 + E_3 \quad (4)$$

اعمال ضریب ۲ برای  $E_2$  به دلیل گیردار بودن لبه های بالا و پائین المان زاویه ای است. با جایگذاری مقادیر  $E_1$  تا  $E_3$  از روابط (۱) تا (۳) در رابطه (۴)،  $E_{AE}$  به دست می آید:

$$E_{AE} = 16 M_0 \frac{b}{h} H I_1 + 2 \pi M_0 C + 4 M_0 \frac{H^2}{b} I_3 \quad (5)$$

## ۳-۱- انرژی تلف شده در یک سلول ۶ ضلعی از ورق هانی کمب

با توجه به مدل جدید ارائه شده برای خرد شدن هانی کمب در بارهای شبه استاتیکی، [9]، یک واحد سلولی در هانی کمب از ۶ المان زاویه‌ای و یک المان ورقی تشکیل می‌شود (شکل ۲). انرژی صرف شده برای تغییر شکل المان ورقی برابر است با:

$$E_4 = 4M_0 \pi C \quad (6)$$

بنابراین کل انرژی اتلافی در یک واحد سلولی از پانل هانی کمب برابر است با:

$$E_{cell} = 6E_{AE} + 2E_4 \quad (7)$$

در نتیجه:

$$E_{cell} = M_0 \left\{ 96H \frac{b}{h} I_1 + 20\pi C + 24 \frac{H^2}{b} I_3 \right\} \quad (8)$$

### ۱-۴- تعادل انرژی

انرژی جنبشی پرتابه‌ای به جرم  $m$  که با سرعت  $V$  با پانل برخورد می‌نماید برابر است با:

$$E_p = \frac{1}{2} m V^2 \quad (9)$$

چنانچه تعداد چین خوردگی‌های حاصل از برخورد برابر  $n$  باشد بر اساس تعادل انرژی، برای خرد شدن کامل پانل هانی کمب، به صورتی که پرتابه نیز متوقف شود (سرعت آن به صفر برسد) می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2} m V^2 = M_0 \left\{ 96H \frac{b}{h} I_1 + 20\pi C + 24 \frac{H^2}{b} I_3 \right\} n \quad (10)$$

حال با تعریف پارامتر  $Z$  به صورت:

$$z = \frac{mV^2}{M_0} \quad (11)$$

رابطه (۱۰) را می‌توان چنین نوشت:

$$z = \frac{mV^2}{M_0} = \left\{ 192 \frac{b}{h} H I_1 + 40\pi C + 48 \frac{H^2}{b} I_3 \right\} n \quad (12)$$

برای ساده شدن روابط فرض می‌شود که:

$$\begin{aligned}d_1 &= 192 I_1 \\d_2 &= 40\pi \\d_3 &= 48 I_3\end{aligned}\tag{۱۳}$$

در نتیجه:

$$z = \frac{mV^2}{M_0} = \left\{ d_1 \frac{b}{h} H + d_2 C + d_3 \frac{H^2}{b} \right\} n\tag{۱۴}$$

### ۱-۵- حل معادله (۱۴) با استفاده از اصل حداقل نمودن انرژی و ضرائب لاگرانژ

در رابطه (۱۴) کمیت‌های  $n$ ،  $H$ ،  $b$  و  $Z$  (و بر اساس رابطه ۱۱ مقدار  $V$ ) مجهول هستند. برای تعیین این مجهولات از شرایط حداقل‌سازی (minimizing) به شرح ذیل استفاده می‌شود. چنانچه  $\Delta$  ضخامت پانل باشد، می‌توان نوشت:

$$2H = \frac{\Delta}{n}\tag{۱۵}$$

تابع  $g$  به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$g = 2H - \frac{\Delta}{n}\tag{۱۶}$$

و تابع  $f$  با استفاده از ضرائب لاگرانژ، چنین تعریف می‌شود:

$$f = Z - \lambda g\tag{۱۷}$$

با جایگذاری از روابط (۱۴) و (۱۶) در رابطه (۱۷):

$$f = n \left\{ d_1 \frac{b}{h} H + d_2 C + d_3 \frac{H^2}{b} \right\} - \lambda \left( 2H - \frac{\Delta}{n} \right)\tag{۱۸}$$

شرایط حداقل‌سازی مستلزم این است که:

$$\frac{\partial f}{\partial H} = 0\tag{۱۹}$$

$$\frac{\partial f}{\partial b} = 0\tag{۲۰}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \lambda} = 0\tag{۲۱}$$

$$\frac{\partial f}{\partial n} = 0 \quad (22)$$

بر اساس روابط (۱۹) تا (۲۲) به ترتیب معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$nd_1 \frac{b}{h} + 2nd_3 \frac{H}{b} - 2\lambda = 0 \quad (23)$$

$$nd_1 \frac{H}{h} - nd_3 \frac{H^2}{b^2} = 0 \quad (24)$$

$$2H - \frac{\Delta}{n} = 0 \quad (25)$$

$$d_1 \frac{b}{h} H + d_2 C + d_3 \frac{H^2}{b} - \frac{\lambda \Delta}{n^2} = 0 \quad (26)$$

نتیجه حل همزمان این ۴ معادله، عبارت است از:

$$b = \sqrt[3]{\frac{d_2 d_3}{d_1^2} C h^2} \quad (27)$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{d^2}{d_1 d_3} C^2 h} \quad (28)$$

$$n = \frac{\Delta}{2} \sqrt[3]{\frac{d_1 d_3}{d^2} \cdot \frac{1}{C^2 h}} \quad (29)$$

و با قرار دادن این نتایج در معادله (۱۴)،  $V$  به دست می‌آید:

$$V = \sqrt{\frac{3\Delta M_0}{2m}} \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3 \frac{C}{h}} \quad (30)$$

از آنجا که:

$$M_0 = \frac{\sigma_0 h^2}{4} \quad (31)$$

و با فرض ثابت بودن تنش تسلیم (مانند حالت شبه استاتیکی)، رابطه (۳۰) به صورت زیر در می‌آید:

$$V = \sqrt{\frac{3\Delta\sigma_0}{8m}} \sqrt[6]{d_1 d_2 d_3 Ch^5} \quad (32)$$

مقادیر  $I_1$  و  $I_3$  برای المان زاویه‌ای با زاویه  $60^\circ$  درجه برابرند با [9]:

$$I_1 = 1.04 \quad (33)$$

$$I_3 = 2.39$$

با جایگذاری این مقادیر در روابط (۱۳) نتیجه می‌شود:

$$d_1 = 199.68$$

$$d_2 = 125.66$$

$$d_3 = 114.72$$

(34)

و با اعمال این مقادیر در روابط (۲۷) تا (۳۰)، معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$b = 0.712 \sqrt[3]{Ch^2} = 0.593 \sqrt[3]{Sh^2} \quad (35)$$

$$H = 0.883 \sqrt[3]{C^2 h} = 0.612 \sqrt[3]{S^2 h} \quad (36)$$

$$n = 0.566\Delta / \sqrt[3]{C^2 h} = 0.817\Delta / \sqrt[3]{S^2 h} \quad (37)$$

$$V = 7.3 \sqrt{\frac{\Delta\sigma_0}{m}} \sqrt[6]{Ch^5} = 6.663 \sqrt{\frac{\Delta\sigma_0}{m}} \sqrt[6]{Sh^5} \quad (38)$$

رابطه (۳۸)، حد اقل سرعت مورد نیاز برای آنکه در اثر برخورد، کراشینگ کامل ایجاد شود را نشان می‌دهد. روابط بدست آمده، برای زمانی معتبر است که سطح مقطع پرتابه و سلول برابر باشد، حال چنانچه تعداد سلول‌های تحت برخورد برابر  $n_A$  باشد، انرژی مصرفی به منظور ایجاد تغییر شکل،  $n_A$  برابر و سرعت لازم برای برخورد،  $\sqrt{n_A}$  برابر خواهد شد. به عبارت دیگر در حالت کلی حد اقل سرعت برخورد برابر است با:

$$V_{\min} = 7.3 \sqrt{\frac{\Delta n_A \sigma_0}{m}} \sqrt[6]{Ch^5} = 6.663 \sqrt{\frac{\Delta n_A \sigma_0}{m}} \sqrt[6]{Sh^5} \quad (39)$$

## ۲- محاسبه $n_A$ :

همان‌گونه که عنوان شد،  $n_A$  نسبت سطح مقطع پرتابه بر سطح ظاهری یک سلول هانی کمب، (سطحی که در شکل ۳ حدود آن با خطوط مقطع مشخص شده است)، می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$n_A = \frac{\pi D^2}{4\sqrt{3}S^2}$$

در نتیجه:

$$n_A = 0.453(D/S)^2 \quad (40)$$

با جایگذاری از رابطه (40) در رابطه (39) نتیجه برابر است با:

$$V_{\min} = 4.916(D/S) \sqrt{\frac{\Delta\sigma_0}{m}} \sqrt{Ch^5} \quad (41)$$

اگر به جای ضلع سلول، C، از اندازه قطر کوچک آن S، استفاده و جرم پرتابه به صورت ذیل در نظر گرفته شود:

$$m = \frac{\pi}{4} \rho_p D^2 l$$

رابطه (41) به صورت ذیل در می آید:

$$V_{\min} = 5.063 \left(\frac{h}{S}\right)^{\frac{5}{6}} \sqrt{\frac{\Delta\sigma_0}{\rho_p l}} \quad (42)$$

### ۳ - مقایسه با نتایج تجربی

در کارهای انجام شده توسط وو و جیانگ (Wu and Jiang) [10]، شش نمونه از پانل‌های هانی کمب، تحت آزمایش‌های شبه استاتیکی و دینامیکی قرار گرفته‌اند. مشخصات این نمونه‌ها در جدول (۱) ارائه شده‌اند. ضخامت دیواره‌های سلول در همه نمونه‌ها، برابر ۰/۰۲۵۴ میلی‌متر بوده است.

پرتابه‌های مورد استفاده، استوانه‌هایی از جنس آلایژ تیتانیوم به قطر ۲۴/۸۵ و طول ۴۵ میلی‌متر و جرم ۳۰/۳۹ گرم بوده‌اند. پرتابه‌ها با سرعت‌های مختلفی به هر نمونه برخورد نموده‌اند و در هر مورد میزان کراشینگ (مقدار کاهش طول نمونه‌ها در اثر فشردگی) ایجاد شده، متفاوت با موارد دیگر بوده است. به منظور تطبیق مناسب‌تر شرایط، در اینجا بالاترین سرعت برخورد با هر نمونه مینا گرفته شده است. نتایج تست‌های دینامیکی در جدول (۲) آورده شده است.

با توجه به اینکه در این آزمایش‌ها، سرعت‌های برخورد به حدی نبوده است که منجر به کراشینگ کامل پانل‌ها شود، و از طرف دیگر رابطه (۴۲) حداقل سرعت برخورد برای کراشینگ کامل را به دست می‌دهد، و با عنایت به اینکه میزان کراشینگ کامل حدود ۷۰ درصد ضخامت پانل می‌باشد، [۱۱]، فرض می‌شود که ضخامت پانل‌های مورد استفاده در این تست‌ها برابر [۰/۷۰] (میزان کراشینگ در هر آزمایش) باشد. حال با این تصور که ضخامت پانل‌ها معلوم است، از رابطه (۴۲) سرعت لازم برای کراشینگ کامل محاسبه می‌شود.

در جدول (۳) سرعت‌های تحلیلی بدست آمده بر اساس رابطه (۴۲) با مقادیر تجربی مقایسه و درصد خطا در هر مورد نیز تعیین شده است.

همان‌گونه که جدول (۳) نشان می‌دهد، نتایج حاصل از روش تحلیلی، (رابطه ۴۲)، با تقریب خوبی حد اقل سرعت خرد شدن کامل را پیش‌بینی می‌نماید. در شکل (۴)، نتایج جدول (۳) به صورت نمودار نشان داده شده است.

### ۴ - نتایج و بحث

در این مقاله، حد اقل سرعت لازم برای خرد شدن کامل یک پانل هانی کمب، در اثر برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای، با استفاده از روش انرژی محاسبه شد. اساس کار بر این فرض استوار بود که تمام انرژی جنبشی قبل از برخورد پرتابه، در اثر



چین خوردگی پانل هانی کمب، به صورت کار خمیری بر روی دیواره‌های سلول‌ها، تلف می‌شود. سپس با استفاده از ضرائب لاگرانژ، حداقل سرعت برخورد، برای خرد شدن کامل سلول‌ها محاسبه گردید. به منظور محاسبه کار خمیری تلف شده، از مدل جدید ارائه شده در مقاله "کراشینگ سازه‌های هانی کمب آلومینیومی تحت بارهای شبه استاتیکی" [۹]، استفاده شد که حاصل آن رابطه (۴۲) بود. مقایسه این روابط با نتایج تجربی، (شکل ۴)، نشان داد که این رابطه با دقت خوبی، می‌تواند حداقل سرعت برخورد لازم برای کراشینگ کامل را پیش‌بینی نماید.

وجود اختلاف بین نتایج تئوری و تجربی می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. از جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:  
۱- اعمال فرضیات ساده کننده در تحلیل مسئله،

۲- تقریب در محاسبه انرژی المان ورق (رابطه ۶) - این المان به صورت ورقی با ضخامت  $2h$  در نظر گرفته شده در حالی که از دو ورق با ضخامت‌های  $h$  تشکیل شده است، انرژی لازم برای تغییر شکل یک ورق با ضخامت  $2h$  برابر  $4M_0\pi c$  می‌باشد، در حالی که این انرژی برای دو ورق با ضخامت‌های  $h$ ، معادل  $2M_0\pi c$  است (به خاطر تفاوت لنگر خمیری کامل آنها). انرژی واقعی المان ورقی بین این دو حد قرار دارد.

۳- تقریب در برآورد حداکثر فاصله کراشینگ - این کمیت معادل  $70\%$  ضخامت پانل هانی کمب در نظر گرفته شده [11]، در صورتی که در بعضی از منابع بین  $73\%$  تا  $77\%$  ذکر شده است [12].

## ۵- نتیجه گیری

رابطه (۴۲) نشان می‌دهد که حداقل سرعت برخورد برای کراشینگ کامل:

**اولا** با استحکام تسلیم فشاری ماده هانی کمب متناسب است که امری بدیهی به نظر می‌رسد.

**ثانیا** با جرم پرتابه نسبت معکوس دارد چون هر چه پرتابه سنگین‌تر باشد انرژی جنبشی آن بیشتر بوده و در نتیجه با پرتابه‌های سنگین‌تر، با سرعت کمتری می‌توان انرژی جنبشی لازم برای تسلیم نمودن پانل هانی کمب را فراهم نمود.

**ثالثا** با ضخامت دیواره‌های سلول متناسب است، زیرا هر چه ضخامت دیواره‌ها بیشتر باشد انرژی تلف شده در آنها در اثر تغییر شکل خمیری افزایش می‌یابد، چون تغییر شکل‌های ایجاد شده در سلول‌ها عمدتاً در اثر خمش صورت می‌گیرد که آن هم به نوبه خود به لنگر دوم مساحت مقطع (که تابعی از ضخامت دیواره است) بستگی دارد.

**رابعا** با اندازه سلول نسبت عکس دارد، زیرا افزایش اندازه سلول به معنی کاهش تعداد المان‌های زاویه‌ای مورد برخورد است که نتیجه آن کاهش اتلاف انرژی می‌باشد.

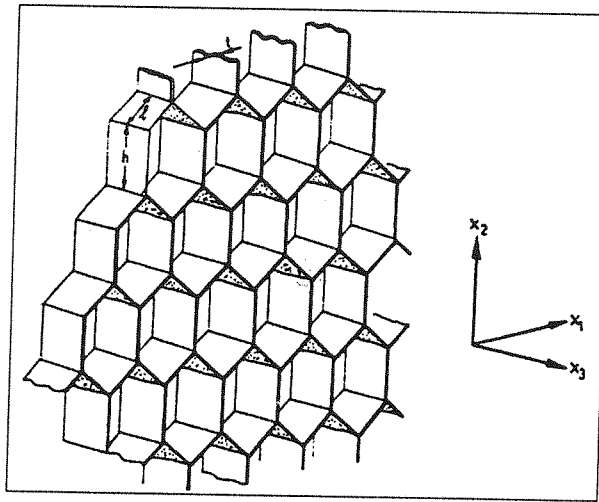
**خامسا** با ضخامت پانل هانی کمب متناسب است زیرا افزایش  $\Delta$  تعداد المان‌های زاویه‌ای در ضخامت پانل و در نتیجه انرژی مورد نیاز برای تغییر شکل را افزایش می‌دهد و برای تامین این انرژی پرتابه باید سرعت اولیه بیشتری داشته باشد.

## فهرست علائم

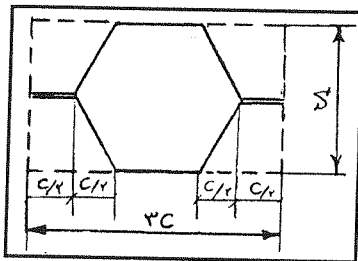
H: نصف طول موج کمانش خمیری	A: سطح مقطع
h: ضخامت دیواره سلول هانی کمب	$A_i$ : ضرائب ثابت
$I_i$ : مقادیر عددی انتگرال‌های انرژی	b: شعاع سطح انبساط توروئیدی
$k_i$ : ضرائب ثابت	C: ضلع سلول هانی کمب
l: طول پرتابه	D: قطر پرتابه
m: جرم پرتابه	$d_i$ : ضرائب ثابت
$M_0$ : لنگر خمیری کامل	$E_i$ : انرژی
n: تعداد چین خوردگی‌ها در ضخامت هانی کمب	$E_{Al}$ : انرژی تلف شده در یک المان زاویه‌ای
$n_A$ : نسبت سطح مقطع پرتابه به سطح سلول	$E_{cell}$ : انرژی تلف شده در یک واحد سلولی
S: اندازه سلول	Z, y, g, f: توابع

$\rho_p$ : چگالی پرتابه  
 $\sigma_0$ : استحکام تسلیم استاتیکی ماده هانی کمب  
 $\psi_0$ : نصف زاویه المان زاویه‌ای

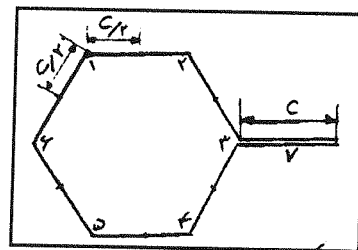
$V$ : سرعت پرتابه  
 $\lambda$ : ضریب لاگرانژ  
 $\Delta$ : ضخامت پانل هانی کمب  
 $\rho$ : چگالی هانی کمب



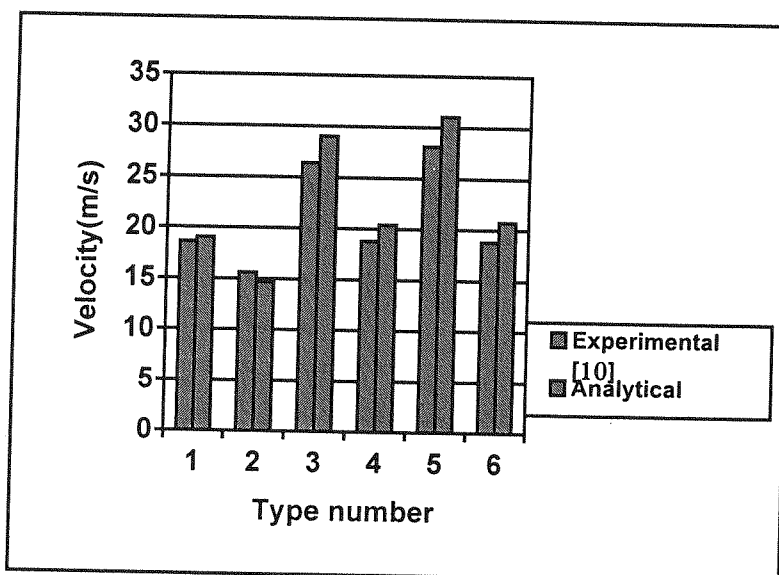
شکل (۱) هانی کمب با سلول های ۶ ضلعی.



شکل (۳) سطح کل یک واحد سلولی در هانی کمب.



شکل (۲) واحد سلولی مرکب از ۷ المان



شکل (۴) - مقایسه حداقل سرعت های تجربی [۱۰] و تحلیلی برای کراشینگ کامل.

جدول (۱) مشخصات هانی کتب های مورد استفاده در آزمایش های مرجع [۱۰].

استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام نهایی (Mpa)	ضخامت پانل (mm)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مشخصات هانی کتب		شماره نمونه
				آلیاژ	سایز سلول (mm)	
۲۵۵	۲۹۰	۳۵/۷	۴۹/۶۵۶	AL5052	۴/۷۶۳	۱
۲۵۵	۲۹۰	۱۲/۷	۴۹/۶۵۶	AL5052	۴/۷۶۳	۲
۲۵۵	۲۹۰	۲۵/۴	۷۲/۰۸۱	AL5052	۳/۱۷۵	۳
۲۵۵	۲۹۰	۱۴/۳	۷۲/۰۸۱	AL5052	۳/۱۷۵	۴
۳۴۵	۴۱۵	۲۰/۷	۷۲/۰۸۱	AL5056	۳/۱۷۵	۵
۳۴۵	۴۱۵	۱۰	۷۲/۰۸۱	AL5056	۳/۱۷۵	۶

جدول (۲) نتایج تست های دینامیکی [۱۰].

شماره نمونه	تعداد سلول های مورد برخورد	سرعت برخورد (m/s)	سرعت برگشت (m/s)	حداکثر کراشینگ (mm)
۱	۱۰	۱۸/۵۹	۱/۵۳	۱۴/۹۵
۲	۱۰	۱۵/۶۳	۱/۶۲	۸/۸۹
۳	۱۹	۲۶/۴۰	۲/۴۰	۱۸/۴۶
۴	۱۹	۱۸/۷۸	۱/۶۵	۸/۷۵
۵	۲۳	۲۸/۱۴	۲/۵۹	۱۴/۹۷
۶	۲۳	۱۸/۸۱	۲/۳۱	۶/۶۸

جدول (۳) مقایسه سرعت های برخورد تجربی [۱۰] و تئوری و درصد خطا نسبت به مقدار تجربی.

شماره نمونه	سرعت برخورد تجربی (m/s)	سرعت برخورد تحلیلی (m/s)	درصد خطا
۱	۱۸/۵۹	۱۹/۰۴	۲/۴
۲	۱۵/۶۳	۱۴/۶۸	-۶/۱
۳	۲۶/۴۰	۲۹/۰۵	۱۰
۴	۱۸/۷۸	۲۰/۳۱	۸/۷
۵	۲۸/۱۴	۳۱/۰۶	۱۰/۴
۶	۱۸/۸۱	۲۰/۷۵	۱۰/۳

## مراجع

- [1] McFarland, R., K. Jr., "Hexagonal cell structures under post-buckling axial load", *AIAA Journal*, 1963, 1(6), pp.1380-1385.
- [2] Wierzbicki, T., "Crushing analysis of metal honeycombs", *Int. J. Impact Engng.*, 1983, 1(2), pp.157-174.
- [3] Gibson, L.J., Ashby, M.F., Schajer, G.S. and Robertson, C.I., "The mechanics of two dimensional cellular materials", *proceedings of the Royal Society of London A*, 1982, 382, pp.25-42.
- [4] Gibson, L.J. and Ashby, M.F., "Cellular solids, structure and properties", Pergamon Press, Oxford, 1988.
- [5] Wierzbicki, T. and Abramowicz, W., "On the crushing mechanics of thin-walled structures", *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50, pp.727-734.
- [6] Wu, E. and Jiang, W., "Axial crush of metallic honeycombs", *Int. J. Impact Engng.*, 1997, 19(5/6), pp.439-456.
- [7] Abramowicz, W. and Wierzbicki, T., "Axial crushing of multicorner sheet metal columns", *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1989, 56, pp.113-120.

[8] Hoo Fatt, M.S. and Park, K.S., "Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles", *Composites, Part A: applied science and manufacturing*, 2000, 31, pp.889-899.

۹- لیاقت، غ.، صدیقی، م.، داغیان، ح. و علوی نیاء، ع.، خورد شدن سازه های هانی کمب فلزی تحت بارهای شبه استاتیکی، ارائه

شده به نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران؛ مرداد ۱۳۸۰.

[10] Wu, E and Jiang, W., "Axial crush of metallic honeycombs", *Int. J. Impact Engng.*, 1997, 19(5/6), pp.439-456.

[11] Abramowicz, W., "The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns", *Int. J. Impact Engng.*, 1983, 1 (3), pp.309-317.

[12] Abramowicz, W, and Jones, N., "Dynamic axial crushing of square tubes", *Int. J. Impact Engng.*, 1984, 2 (2), pp.179-208.