

محاسبه سرعت حد بالستیک پانل‌های هانی کمب فلزی در برخورد با پرتابه‌های استوانه‌ای صلب

حمیدرضا داغیان

دانشیار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

غلامحسین لیاقت

استاد

بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس

علی علوی نیا

دانشجوی دکتری

بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس

مجتبی صدیقی

استادیار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله برخورد پرتابه‌های صلب استوانه‌ای با ورق‌های هانی کمب فلزی مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به حالت‌های مختلف واماندگی در سازه مورد برخورد (شامل پارگی دیواره سلول‌ها و چین خوردگی آنها و برش پلاگ) و با استفاده از اصل بقای انرژی، سرعت حد بالستیک ورق هانی کمب به صورت تحلیلی محاسبه شده است. در این تحلیل رفتار هانی کمب به صورت صلب-خمیری کامل و قطر پرتابه بزرگتر از اندازه سلول در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده سرعت حد بالستیک با افزایش ضخامت پانل، استحکام تسلیم فشاری و برشی ماده هانی کمب و ضخامت دیواره سلول‌ها افزایش یافته ولی با افزایش اندازه سلول و چگالی و طول پرتابه کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از این تحلیل به خوبی با نتایج تجربی سازگاری دارند.

کلمات کلیدی

هانی کمب، کراشینگ، حد بالستیک، برخورد

Ballistic Limit Calculation for Aluminum Honeycomb Panels Under Impact of Rigid Cylindrical Projectiles

G. H. Liaghat

Professor

Mechanical Engineering,
Tarbiat Modarres University

H. R. Daghyani

Associate Professor

Mechanical Engineering,
Amirkabir University of Technology

M. Sadighi

Assistant Professor

Mechanical Engineering,
Amirkabir University of Technology

A. Alavinia

Ph.D. Student

Mechanical Engineering,
Tarbiat Modarres University

Abstract

In this paper impact of rigid cylindrical projectiles on aluminum honeycomb panels is studied. Considering various failure modes of target structure (including cell walls tearing and their folding and shearing of plug) by applying energy balance the ballistic limit velocity of panel is determined analytically. It is assumed that the honeycomb behaviour is rigid, perfectly plastic and the projectile diameter is greater than the cell size. The results show that the ballistic limit velocity is increased by increasing the panel thickness, the compressive and shear strength of honeycomb material and the cell walls thickness. However increasing the cell size, density, and the length of projectile the velocity decreases. The results of this analysis is in good agreement with experimental data.

Keywords

Impact, crushing, ballistic limit, honeycomb.

مقدمه

هانی کمب یکی از سازه‌های جدار نازک است که از شبکه‌ای از سلول‌های میان تهی با دیواره‌هایی از ورق‌های بسیار نازک تشکیل شده است. معمولا 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 کشتی‌ها و هواپیماها و پوسته 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.

له شدن یا کراشینگ (crushing) هانی کمب‌ها اولین بار توسط مک فارلند (Mc Farland) مورد بررسی قرار گرفت [1]. 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 و ویرزیبکی (Wierzbicki) المان زاویه‌ای (angle element) را معرفی و از آن برای محاسبه نیروی کراشینگ استفاده نمود [2]. آبرامویچ (Abramowicz) و ویرزیبکی بعدها روی این مدل تصحیحاتی انجام داده و مودهای تغییر شکل متقارن و نامتقارن را در نظر گرفتند [3]. تعدادی از محققین هم رفتار هانی کمب‌ها در برابر بارهای شبه استاتیکی و ضربه‌ای را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند [4-6]. نفوذ کامل (perforation) پرتابه‌های استوانه‌ای در ورق‌های ساندویچی با هسته هانی کمب توسط پارک و فت (Fatt, Park) به صورت تحلیلی بررسی گردیده ولی در تحلیل هسته ساندویچ (یعنی هانی کمب) از یک مدل نیمه تجربی استفاده شده است [7]. خرد شدن سازه‌های هانی کمب تحت بارهای شبه استاتیکی توسط نویسندگان همین مقاله بررسی شده و ضمن تشریح مدل ویرزیبکی یک مدل اصلاحی ارائه شده که نتایج حاصل از آن به مقادیر تجربی نزدیکتر است [8]. در مقاله دیگری خرد شدن دینامیکی پانل‌های هانی کمب فلزی در اثر برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و حد اقل سرعت برخورد برای مچاله شدن هانی کمب به صورت تحلیلی محاسبه شده است [9].

یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین عوامل برای سنجش توانایی یک ورق در مقابله با برخورد پرتابه‌ها سرعت حد بالستیک آن است که بالاترین سرعتی است که یک ورق می‌تواند تحمل نماید بدون آنکه پرتابه کاملاً از آن عبور کند [10]. برای تعیین سرعت حد بالستیک هانی کمب‌ها عمده کارهای انجام شده به شکل تجربی بوده است [4,5] و کار تحلیلی کاملی در این زمینه صورت نگرفته است.

در این مقاله با توجه به نتایج آزمایش‌های موجود مدلی کاملاً تحلیلی برای تعیین سرعت حد بالستیک هانی کمب‌های

فلزی ارائه شده است. مقایسه نتایج این تحلیل با نتایج تجربی محدودی که در دسترس بوده نشان دهنده قابلیت خوب روابط حاصل در برآورد سرعت حد بالستیک هانی کمبها می باشد.

۱- فرضها

- با توجه به پیچیدگی مکانیزم عبور در هانی کمبها و با توجه به منابع موجود فرضیات ذیل مبنای تحلیل قرار گرفته است:
- الف - رفتار هانی کمب به صورت صلب - خمیری کامل مدل می شود.
 - ب - پرتابه به شکل استوانه و بدون تغییر شکل در نظر گرفته می شود.
 - ج - قطر پرتابه از اندازه سلولها بزرگتر است.
 - د- در اثر برخورد دیوارههای سلولها دچار پارگی (tearing) می شوند و پس از آن مچاله شدن رخ داده و به دنبال آن برش پلاگ (plug) و خروج آن پیش می آید.
 - ه - قطر ناحیه صدمه دیده هانی کمب در اثر برخورد پرتابه معادل $1/5$ برابر قطر پرتابه است [5].
 - و - پارگی دیواره سلولها در محیط دایره ای به قطر $1/5D$ شروع و تا عمق $1/7$ برابر ارتفاع پانل (که همان مقدار کاهش ضخامت پانل مچاله شده در زیر پرتابه است) ادامه می یابد.
 - ز - تغییرات سرعت پرتابه پس از برخورد خطی در نظر گرفته می شود.
 - ح - از اتلاف انرژی در اثر جدا شدن دیوارههای متصل بهم صرف نظر می شود.

۲- اتلاف انرژی طی فرایند عبور

علاوه بر انرژی داخلی تلف شده برای تشکیل چین خوردگیها، E_i ، مکانیزمهای دیگری نیز در تلف نمودن انرژی مشارکت دارند که باید در نظر گرفته شوند. این انرژیهای اتلافی اضافی شامل موارد ذیل هستند:

- الف - انرژی لازم برای پاره کردن دیوارههای سلولهای هانی کمب، (E_t).
- ب - انرژی لازم برای برش (shearing) پلاگ، (E_{sp}).
- پ - انرژی لازم برای غلبه بر اینرسی پلاگ یا به عبارت دیگر انرژی جنبشی پلاگ که در جلوی پرتابه و با آن حرکت کرده و خارج می شود (E_{kp}).
- اکنون روش محاسبه هر یک از این انرژیها تشریح می شود.

۲-۱- محاسبه E_i

انرژی تلف شده در اثر کراشینگ کامل یک واحد سلولی (که در کنار هم قرار دادن آنها ردیفهای سلول در پانل هانی کمب را تشکیل می دهد و خود از α المان زاویه ای تشکیل شده است) برابر است با [11]:

$$E_i = M_0 \left\{ A_1 H \frac{b}{h} + A_2 C + A_3 \frac{H^2}{b} \right\} \quad (1)$$

چنانچه سطح ناحیه تغییر شکل یافته، n_A برابر سطح یک سلول باشد انرژی تلف شده در اثر کراشینگ n_A برابر E_i خواهد شد یعنی:

$$E_{it} = n_A M_0 \left\{ A_1 H \frac{b}{h} + A_2 C + A_3 \frac{H^2}{b} \right\} \quad (2)$$

در این رابطه A_i ها ثابتهای وابسته به زاویه بین دیوارههای سلول هستند که برای شش ضلعی منتظم عبارتند از [11]:

$$\begin{cases} A_1 = 133.12 \\ A_2 = 50.27 \\ A_3 = 76.48 \end{cases} \quad (3)$$

n_A به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$n_A = \frac{\text{deformed region area}}{\text{unit cell area}} = \frac{\frac{\pi}{4}(1.5D)^2}{A_c}$$

با توجه به شکل (۲) سطح ظاهری یک واحد سلولی (سطح مستطیل محیط بر واحد سلولی که از کنار هم چیدن این مستطیل‌ها سطح کل پانل هانی کمب به دست می‌آید) برابر است با [12]:

$$A_c = \sqrt{3} S^2 \quad (4)$$

در نتیجه:

$$n_A = 1.02(D/S)^2 \quad (5)$$

۲-۳- محاسبه E_t

چنانچه E_s انرژی شکست بر واحد سطح ماده هانی کمب، A_w سطح مقطع یک دیواره پاره شده و n_w تعداد دیواره‌های پاره شده باشد E_t از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_t = n_w \cdot A_w \cdot E_s \quad (6)$$

مقدار n_w برابر است با [11]:

$$n_w = 5 \left\{ \frac{1.5D}{S} \right\} = 7.5 \left(\frac{D}{S} \right) \quad (7)$$

با توجه به اینکه در کراشینگ کامل میزان تغییر مکان قائم حدود 0.7 ارتفاع پانل است [13]، A_w برابر است با:

$$A_w = 0.7 \Delta h \quad (8)$$

بنابر این رابطه (۶) به این صورت در می‌آید:

$$E_t = 5.25(D\Delta h/S)E_s \quad (9)$$

۲-۳- محاسبه E_{sp}

برش پلاگ وقتی رخ می‌دهد که تنش برشی در جداره آن به تنش تسلیم برشی ماده هانی کمب، τ_y ، برسد. با توجه به شکل (۳) انرژی مصرف شده برای برش پلاگ عبارت است از:

$$E_{sp} = \int_0^{\Delta_p} (\tau_y \cdot dA) dx \quad (10)$$

پلاگ حاصل استوانه‌ای به قطر $1/5D$ است که جداره آن از تعداد n_w دیواره با ضخامت h و طول Δ_p تشکیل شده است (شکل ۴). بنابراین سطح کل برش برابر است با:

$$A = n_w (\Delta_p h) \quad (11)$$

با فرض آنکه τ_y تقریباً ثابت باشد و با توجه به اینکه سطح تماس پلاگ با بقیه هانی‌کمب در اثر حرکت پلاگ رو به کاهش است رابطه (۱۰) را می‌توان چنین نوشت:

$$E_{sp} = \frac{1}{2} \tau_y \cdot A \cdot \Delta_p \quad (12)$$

با توجه به اینکه در اثر کراشینگ کامل ضخامت پانل به $1/3$ مقدار اولیه خود می‌رسد [13]، پس طول پلاگ، Δ_p ، برابر است با:

$$\Delta_p = 0.3\Delta \quad (13)$$

با جایگزینی روابط (۱۱)، (۱۳) و (۷) در (۱۲) نتیجه نهائی به صورت ذیل در می‌آید:

$$E_{sp} = 0.3375(\tau_y D h \Delta^2 / S) \quad (14)$$

۲-۴ - محاسبه E_{kp}

بدیهی‌ترین فرض این است که پلاگی که در حال خارج شدن است دارای مقطعی مشابه مقطع پرتابه باشد (در اینجا با توجه به استوانه‌ای بودن پرتابه این مقطع به شکل دایره است). با اگماض از اتلاف انرژی اصطکاکی در حین عبور پلاگ انرژی جنبشی پلاگ محاسبه می‌شود. اگر سرعت متوسط پلاگ، \bar{V} ، باشد (که فعلاً مجهول است) در این صورت:

$$E_{kp} = \frac{1}{2} m_p \bar{V}^2 \quad (15)$$

در این رابطه m_p جرم پلاگ است. با توجه به معلوم بودن چگالی هانی‌کمب، ρ ، و ضخامت پانل هانی‌کمب، Δ ، جرم پلاگ را می‌توان به دست آورد:

$$m_p = \rho \cdot v_p = \rho \cdot \frac{\pi}{4} (1.5D)^2 \Delta = 1.77(\rho D^2 \Delta) \quad (16)$$

که v_p حجم پلاگ و D قطر پرتابه است. چون هدف محاسبه سرعت حد بالستیک، V_{50} ، است فرض می‌شود که سرعت پرتابه پس از خروج کامل صفر باشد، همچنین روند کاهش سرعت پرتابه از سرعت اولیه برخورد، V ، تا توقف کامل خطی در نظر گرفته می‌شود. برای پلاگ هم با همین فرض تغییر خطی سرعت، \bar{V} میانگین سرعت آن در طی مسیر حرکت خواهد بود.

با توجه به شکل (۴) مسیری که پلاگ طی می‌کند برابر مجموع ضخامت پلاگ و طول پرتابه است. و طول مسیری که پرتابه از لحظه برخورد تا خروج کامل طی می‌کند، x ، برابر با مجموع ضخامت پانل و طول پرتابه است:

$$x = l + \Delta \quad (17)$$

سرعت پرتابه در لحظه شروع حرکت پلاگ با سرعت پلاگ برابر گرفته می‌شود. از تشابه مثلث‌ها در شکل (۴) می‌توان نتیجه گرفت:

$$\frac{V_{ip}}{V} = \frac{1+\Delta_p}{1+\Delta} \Rightarrow V_{ip} = V \cdot \frac{1+\Delta_p}{1+\Delta} \quad (18)$$

چون فرض شده که پلاگ با همان سرعت پرتابه حرکت نماید پس سرعت نهائی آن صفر است در نتیجه سرعت متوسط پلاگ، \bar{V}_p ، چنین به دست می‌آید:

$$\bar{V}_p = \frac{1}{2} V_{ip} = \frac{V}{2} \left(\frac{1+\Delta_p}{1+\Delta} \right) \quad (19)$$

با جایگزینی روابط (۱۶) و (۱۹) در رابطه (۱۵) و پس از ساده کردن انرژی جنبشی پلاگ به دست می‌آید:

$$E_{Kp} = 0.22\rho \Delta D^2 \left(1 - \frac{0.7}{1 + \frac{1}{\Delta}} \right)^2 V^2 \quad (20)$$

۳- تعادل انرژی

تعادل انرژی برای تعیین حد بالستیک به این صورت نوشته می‌شود:

$$E_p = E_{it} + E_t + E_{sp} + E_{Kp} \quad (21)$$

انرژی اولیه پرتابه برابر است با:

$$E_p = \frac{1}{2} m V^2 \quad (22)$$

با جایگزینی روابط (۲)، (۹)، (۱۴)، (۲۰) و (۲۲) در رابطه (۲۱) نتیجه می‌شود:

$$\frac{1}{2} m V^2 = M_0 n_A \left\{ A_1 H \frac{b}{h} + A_2 C + A_3 \frac{H^2}{b} \right\} n + 5.25 (D \Delta h / S) E_s + 0.3375 (\tau_y D h \Delta^2 / S) + 0.22\rho \Delta D^2 \left(1 - \frac{0.7}{1 + \frac{1}{\Delta}} \right)^2 V^2 \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)، n تعداد چین خوردگی‌ها در اثر کراشینگ است. این رابطه را می‌توان چنین نوشت:

$$\frac{V^2}{M_0} \{ m - A_4 \} = \{ A_1 H \frac{b}{h} + A_2 C + A_3 \frac{H^2}{b} \} n A_5 + A_6 + A_7 \quad (24)$$

که در آن مقادیر A_4 تا A_7 برابر هستند با:

$$\begin{cases} A_4 = 0.44 \rho D^2 \Delta \left(\frac{1+0.3\Delta}{1+\Delta} \right) \\ A_5 = 2.04 (D/S)^2 \\ A_6 = 10.5 \frac{(D\Delta h/S) E_s}{M_0} \\ A_7 = 0.675 \frac{(\tau_y D h \Delta^2 / S)}{M_0} \end{cases} \quad (25)$$

با تعریف کمیت α به شکل زیر:

$$\alpha = \frac{1}{m - A_4} \quad (26)$$

رابطه (24) به صورت ذیل در می آید:

$$\frac{V^2}{M_0} = \alpha \left\{ \left[A_1 H \frac{b}{h} + A_2 C + A_3 \frac{H^2}{b} \right] n A_5 + A_6 + A_7 \right\} \quad (27)$$

ع- تعیین سرعت حد بالستیک

با توجه به رابطه:

$$2H = \frac{\Delta}{n} \quad (28)$$

دو تابع g و z به صورت ذیل در نظر گرفته می شوند:

$$g = 2H - \frac{\Delta}{n} \quad (29)$$

$$z = \frac{V^2}{M_0} \quad (30)$$

برای تعیین سرعت حد بالستیک تابع f به شکل زیر تعریف و سپس با استفاده از ضرائب لاگرانژ این تابع حداقل می شود:

$$f = z - \lambda g \quad (31)$$

و یا:

$$f = \alpha \left\{ \left[A_1 H \frac{b}{h} + A_2 C + A_3 \frac{H^2}{b} \right] n A_5 + A_6 + A_7 \right\} - \lambda \left(2H - \frac{\Delta}{n} \right) \quad (32)$$

برای حداقل نمودن تابع f باید شرایط ذیل برقرار باشد:

$$\frac{\partial f}{\partial H} = 0 \Rightarrow \alpha \left[A_1 \frac{b}{h} + 2A_3 \frac{H}{b} \right] n A_5 - 2\lambda = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial f}{\partial b} = 0 \Rightarrow \alpha \left[A_1 \frac{H}{h} - A_3 \frac{H^2}{b^2} \right] n A_5 = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow 2H - \frac{\Delta}{n} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial f}{\partial n} = 0 \Rightarrow \alpha \left[A_1 \frac{b}{h} H + A_2 C + A_3 \frac{H^2}{b} \right] A_5 - \frac{\lambda \Delta}{n^2} = 0 \quad (36)$$

از حل همزمان معادلات (۳۳) تا (۳۶) روابط ذیل به دست می‌آید:

$$b = \sqrt[3]{\frac{A_2 A_3}{A_1^2} C h^2} \quad (37)$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{A_2^2}{A_1 A_3} C^2 h} \quad (38)$$

$$n = \frac{\Delta}{2} \sqrt[3]{\frac{A_1 A_3}{A_2^2} \cdot \frac{1}{C^2 h}} \quad (39)$$

با اعمال مقادیر A_i از رابطه (۳) در این روابط می‌توان نوشت:

$$b = 0.601 \sqrt[3]{C h^2} = 0.500 \sqrt[3]{S h^2} \quad (40)$$

$$H = 0.628 \sqrt[3]{C^2 h} = 0.436 \sqrt[3]{S^2 h} \quad (41)$$

$$n = 0.796 \Delta / \sqrt[3]{C^2 h} = 1.147 \Delta / \sqrt[3]{S^2 h} \quad (42)$$

و با جایگزینی این روابط در رابطه (۲۷) نتیجه می‌شود:

$$V_{50} = \sqrt{M_0 \alpha} \left\{ 120 \Delta A_5 \sqrt[3]{\frac{C}{h}} + A_6 + A_7 \right\}^{0.5} \quad (43)$$

با توجه به تعریف M_0 :

$$M_0 = \frac{\sigma_0 h^2}{4} \quad (44)$$

و با فرض ثابت بودن تنش تسلیم (مانند حالت شبه استاتیکی) رابطه (۴۳) به صورت زیر در می‌آید:

$$V_{50} = \sqrt{\frac{1}{m - A_4}} \cdot \{ 5096 \Delta \sigma_0 D^2 (h/S)^{\frac{5}{3}} + 2E_t + 2E_{sp} \}^{0.5} \quad (45)$$

در رابطه (۴۵)، V_{50} سرعت حد بالستیک است و A_4 از رابطه (۲۵) و E_t و E_{sp} به ترتیب از روابط (۱۴) و (۹) به دست می‌آیند. در این صورت می‌توان نوشت:

$$V_{50} = \sqrt{\frac{1}{m - A_4}} \{50.96 \Delta \sigma_0 D^2 (h/S)^{\frac{5}{3}} + 10.5(D \Delta h E_s / S) + 0.675 (\tau_y D h \Delta^2 / S)\}^{0.5} \quad (46)$$

در این روابط کمیت‌های $S, C, h, \tau_y, \sigma_0, l, D, \Delta, \rho$ و E_s به ترتیب چگالی و ضخامت پانل هانی کمب، قطر و طول پرتابه، تنش تسلیم ماده هانی کمب در کشش و برش، ضخامت دیواره هانی کمب، ضلع سلول و قطر کوچک سلول (اندازه سلول) و انرژی شکست بر واحد سطح ماده هانی کمب هستند. با تامل در مورد سهم جملات مختلف رابطه (46) در مقدار V_{50} ملاحظه می‌شود که سهم عبارت A_4 در مقدار V_{50} بسیار ناچیز است زیرا نسبت $\frac{A_4}{m}$ برای آزمایش‌های شماره 1 و 2 (بخش 5) به ترتیب 0.02 و 0.01 می‌باشد. به طوری که صرف نظر نمودن از این جمله در معادله (46) تنها باعث تغییر مقدار سرعت حد بالستیک حداکثر به میزان 0.2 درصد می‌شود. قابل توجه اینکه عبارت A_4 در معادله (46) جرم پلاگ را نشان می‌دهد که به نوبه خود نشان‌دهنده سهم ناچیز انرژی جنبشی پلاگ در سرعت حد بالستیک می‌باشد. بنابراین با تقریب بسیار خوبی می‌توان از رابطه ذیل به جای رابطه (46) برای تعیین سرعت حد بالستیک استفاده نمود:

$$V_{50} = \frac{1}{\sqrt{m}} \{50.96 \Delta \sigma_0 D^2 (h/S)^{\frac{5}{3}} + 10.5 (D \Delta h E_s / S) + 0.675 (\tau_y D h \Delta^2 / S)\}^{0.5} \quad (47)$$

از سوی دیگر جرم پرتابه استوانه‌ای برابر است با:

$$m = \frac{\pi}{4} D^2 l \rho_p \quad (48)$$

در نتیجه با تلفیق روابط (47) و (48) سرعت حد بالستیک برابر است با:

$$V_{50} = \frac{1}{\rho_p l} \{64.88 \Delta \sigma_0 (h/S)^{\frac{5}{3}} + 13.37 (\Delta h E_s / DS) + 0.86 (\tau_y h \Delta^2 / DS)\}^{0.5} \quad (49)$$

۵- مقایسه با نتایج تجربی

Louie و Goldsmith سرعت حد بالستیک پانل‌های هانی کمب آلومینیومی را که مورد برخورد گلوله‌های استوانه‌ای و کروی قرار گرفته بودند به صورت تجربی اندازه‌گیری نمودند [5]. اطلاعات مربوط به دو نمونه از آزمایشها که در آنها از پرتابه استوانه‌ای استفاده شده در جدول (1) نشان داده شده است. هر دو نوع هانی کمب مورد استفاده در این آزمایشها از جنس Al 5052- و دارای تنش تسلیم 255 و تنش حدی 290 مگاپاسکال و ضخامت پانل‌ها 19/05 میلیمتر بوده است. استحکام تسلیم آلیاژ فوق در برش برابر 165 مگاپاسکال [14] و انرژی شکست بر واحد سطح آن برابر 10000 ژول بر متر مربع [15] می‌باشد. در جدول (2) جزئیات مربوط به محاسبه سرعت حد بالستیک این نمونه‌ها ارائه شده و در جدول (3) مقادیر سرعت حد بالستیک تئوری با مقادیر تجربی مقایسه شده و میزان اختلاف نیز در هر مورد محاسبه شده است. در شکل (5) نیز این مقایسه به صورت نمودار نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود رابطه بدست آمده (رابطه 46) با تقریب مناسبی می‌تواند سرعت حد بالستیک پرتابه‌های استوانه‌ای را در برخورد با هدف‌های هانی کمب فلزی پیش‌بینی نماید.

۶- نتایج و بحث

در این مقاله سرعت حد بالستیک پانل‌های هانی کمب فلزی در برخورد با پرتابه‌های استوانه‌ای با استفاده از روش انرژی محاسبه شد. اساس کار بر این فرض استوار بود که تمام انرژی جنبشی اولیه پرتابه صرف چین خوردگی پانل هانی کمب، پاره

شدن دیواره‌های سلول‌ها، برش پلاگ و حرکت و خروج پلاگ می‌شود. سپس با استفاده از ضرائب لاگرانژ سرعت حد بالستیک محاسبه گردید که حاصل آن رابطه (۴۶) بود. این رابطه نشان می‌دهد که سرعت حد بالستیک:

الف - با استحکام تسلیم فشاری و برشی و انرژی شکست بر واحد سطح ماده هانی کمب متناسب است زیرا هرچه هدف مستحکم‌تر باشد انرژی بیشتری برای نفوذ در آن لازم است.

ب - با ضخامت دیواره سلول‌ها متناسب است، زیرا هر چه این ضخامت بیشتر باشد لنگر خمشی و در نتیجه انرژی بیشتری برای ایجاد تغییر شکل‌های خمیری آن لازم است.

ج - با ضخامت پانل هانی کمب متناسب است، چون با افزایش ضخامت پانل از طرفی تعداد چین خوردگی‌ها افزایش می‌یابد و از طرف دیگر طول پلاگ و در نتیجه انرژی لازم برای برش آن زیاد می‌شود.

د - با چگالی، طول و قطر پرتابه (و به طور خلاصه با جرم آن) نسبت عکس دارد که امری بدیهی است، زیرا هر چه پرتابه سنگین‌تر باشد با سرعت کمتری می‌تواند انرژی لازم برای تغییر شکل در پانل را تامین نماید.

ه - با اندازه سلول‌ها نسبت عکس دارد، زیرا بزرگ شدن اندازه سلول به معنی کاهش تعداد دیواره‌هانی است که تغییر شکل می‌دهند بنا بر این انرژی کمتری هم برای این تغییر شکل مورد نیاز خواهد بود.

مقایسه این رابطه با نتایج تجربی، (شکل ۵)، نشان می‌دهد که این تحلیل با دقت خوبی می‌تواند سرعت حد بالستیک را برآورد نماید.

بر اساس مشاهدات تجربی رفتار هانی کمب‌ها در برابر نفوذ و عبور پرتابه‌ها در سرعت‌های نزدیک به حد بالستیک غالباً تصادفی می‌باشد و پیش‌بینی دقیق میزان انرژی جذب شده طی فرایند کراشینگ میسر نمی‌باشد [5].

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 تلف شده در اثر مچاله شدن هانی کمب قبل از خروج پلاگ
- ۳- اغماض از انرژی تلف شده در اثر جدا شدن دیواره‌های بهم چسبیده هانی کمب از یکدیگر
- ۴- تقریب در برآورد حداکثر فاصله کراشینگ - این کمیت معادل ۷۰٪ ضخامت پانل هانی کمب در نظر گرفته شده [13]، در صورتی که در بعضی از منابع بین ۷۳٪ تا ۷۷٪ ذکر شده است [16]. چنانچه میانگین این محدوده یعنی مقدار ۷۵٪ در نظر گرفته شود سرعت حد بالستیک برای نمونه‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۳۱/۷۸ و ۱۹/۴۴ متر بر ثانیه به دست می‌آیند که به ترتیب ۲/۵٪ و ۱۷/۶٪ از مقادیر متناظر تجربی کمترند. با توجه به بند قبل به نظر می‌رسد این ارقام به واقعیت نزدیکتر باشند.

فهرست علائم

A: سطح مقطع	H: نصف طول موج کمانش خمیری
A_i : ضرائب ثابت	h: ضخامت دیواره سلول هانی کمب
b: شعاع سطح انبساط توروئیدی	I_i : مقادیر عددی انتگرال های انرژی
C: ضلع سلول هانی کمب	l: طول پرتابه
D: قطر پرتابه	m: جرم پرتابه
E: خطای نسبی	m_p : جرم پلاگ
E_i : انرژی تلف شده در اثر کراشینگ کامل یک واحد سلولی	M_0 : لنگر خمیری کامل
E_{it} : انرژی تلف شده در اثر کراشینگ کامل پانل در اثر برخورد پرتابه	n: تعداد چین خوردگی ها در ضخامت هانی کمب
E_{kp} : انرژی جنبشی پلاگ	n_A : نسبت سطح مقطع پرتابه به سطح سلول
E_p : انرژی جنبشی اولیه پرتابه	n_w : تعداد دیواره های سلول
E_s : انرژی شکست بر واحد سطح ماده هانی کمب	S: سایز سلول
E_{sp} : انرژی تلف شده در اثر برش پلاگ	V: سرعت پرتابه
E_t : انرژی لازم برای پاره شدن دیواره ها	V_p : سرعت پلاگ
توابع: Z, y, g, f	V_{50} : سرعت حد بالستیک

v : سرعت متوسط
 X : مشخصه طول

λ : ضریب لاگرانژ
 Δ : ضخامت پانل هانی کمب
 Δ_p : طول پلاگ
 σ_0 : استحکام تسلیم استاتیکی ماده هانی کمب
 τ_y : استحکام تسلیم برشی ماده هانی کمب

فهرست علائم یونانی

ρ : چگالی هانی کمب
 ρ_p : چگالی پرتابه

جدول (۱) اطلاعات هدف و پرتابه در آزمایش‌های مرجع [5].

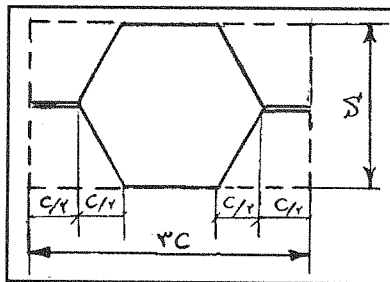
شماره آزمایش	مشخصات هانی کمب هدف	چگالی هدف (kg/m ³)	قطر پرتابه (mm)	طول پرتابه (mm)	جرم پرتابه (gr)	سایز سلول (mm)	ضخامت دیواره سلول (mm)
1	0.001 - 1/8	72.1	6.32	19.05	4.66	3.175	0.0254
2	0.001 - 1/4	36.8	6.32	19.05	4.66	6.35	0.0254

جدول (۲) محاسبه سرعت حد بالستیک نمونه‌های مورد آزمایش بر اساس رابطه (۴۶).

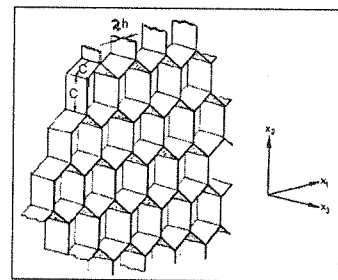
شماره آزمایش	A_4 (از رابطه ۲۵)	E_t (از رابطه ۹)	E_{sp} (از رابطه ۱۴)	V_{50} (از رابطه ۴۶) (m/s)
1	1.02E-5	0.05	1.022	33.79
2	5.21E-6	0.025	0.511	21.08

جدول (۳) مقایسه سرعت‌های حد بالستیک تئوری و تجربی.

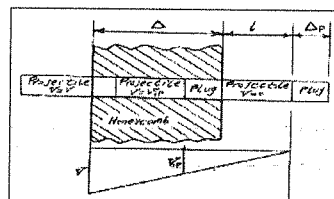
درصد اختلاف	سرعت حد بالستیک (m/s)		شماره آزمایش
	تجربی [5]	تئوری (از رابطه ۴۶)	
3.7	32.6	33.79	1
-10.7	23.6	21.08	2



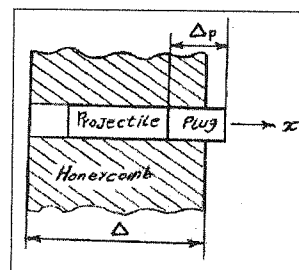
شکل (۲) سطح کل یک واحد سلولی در هانی کمب.



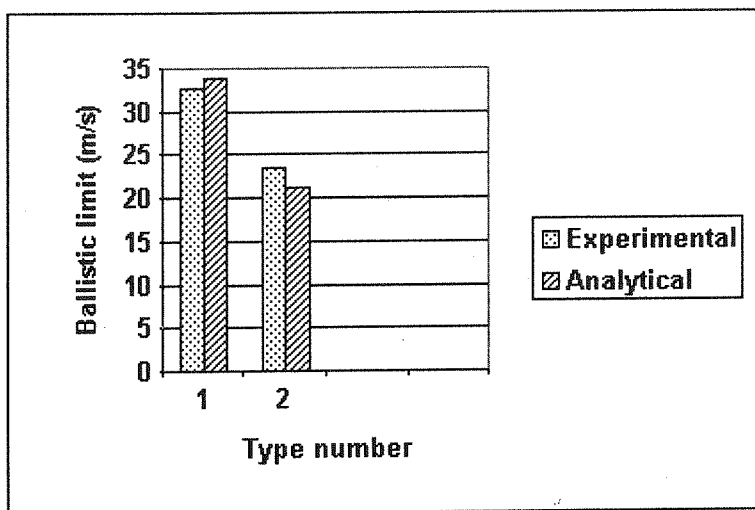
شکل (۱) ورق هانی کمب با سلول‌های ۶ ضلعی.



شکل (۴) نمایش هندسه مجموعه در ابتدا و انتهای برخورد و پروفیل سرعت پرتابه در مراحل مختلف عبور.



شکل (۳) پلاگ در حال خروج از پانل در اثر برخورد پرتابه استوانه‌ای به هانی کمب.



شکل (۵) مقایسه سرعت های حد بالستیک تجربی [5] و تئوری.

مراجع

- [1] McFarland, R., K., "Hexagonal cell structures under post-buckling axial load", *AIAA Journal*, 1(6), 1380-1385, 1963.
- [2] Wierzbicki, T., "Crushing analysis of metal honeycombs", *Int. J. Impact Engng.*, 1(2), pp.157-174, 1983.
- [3] Abramowicz, W. and Wierzbicki, T., "Axial crushing of multicorner sheet metal columns", *ASME Journal of Applied Mechanics*, 56, 113-120, 1989.
- [4] Wu, E and Jiang, W., "Axial crush of metallic honeycombs", *Int. J. Impact Engng.*, 19(5/6), pp.439-456, 1997.
- [5] Goldsmith, W. and Louie D. L., "Axial perforation of aluminum honeycombs by projectiles", *Int. J. solids structures*, 32(8/9), pp.1017-1046, 1995.
- [6] Goldsmith, W., and Sackman, J. L., "An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates", *Int. J. Impact Engng.*, 12(2), pp.241-262, 1992.
- [7] Hoo Fatt, M.S. and Park, K.S., "Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles", *Composites, Part A: applied science and manufacturing*, 31, 889-899, 2000.
- [8] لیاقت، غ.، صدیقی، م.، داغیان، ح. و علوی نیا، ع.، خرد شدن سازه‌های هانی کمب فلزی تحت بارهای شبه استاتیکی. نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران؛ در دست چاپ.
- [9] لیاقت، غ.، داغیان، ح.، صدیقی، م.، و علوی نیا، ع.، کراشینگ دینامیکی پانل‌های هانی کمب در اثر برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای؛ نشریه امیر کبیر، سال چهاردهم، شماره ۵۳، صفحات ۶۸-۷۹، زمستان ۱۳۸۱.
- [10] Backman, M. E. and Goldsmith, W., "The mechanics of penetration of projectiles into the targets", *Int. J. Engng. Science*, 16, 1-99, 1978.
- [11] علوی نیا، ع.، کراشینگ دینامیکی پانل‌های هانی کمب در اثر برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای؛ گزارش داخلی، دانشگاه تربیت مدرس، تابستان ۱۳۸۰.
- [12] علوی نیا، ع.، کراشینگ سازه‌های هانی کمب آلومینیومی تحت بارهای شبه استاتیکی؛ گزارش داخلی، دانشگاه تربیت مدرس، زمستان ۱۳۷۹.
- [13] Abramowicz, W., "The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns", *Int. J. Impact Engng.*, 1 (3), pp.309-317, 1983.
- [14] Hatch, J.E., "Aluminum: Properties and physical metallurgy", ASM, 1984, p.358.
- [15] Atkins, A. G. and Mai, Y. W., "Elastic and plastic fracture : metals, polymers, ceramics, composites, biological materials", Chichester, Newyork: Ellis Horwood, Halsted, 1985.
- [16] Abramowicz, W, and Jones, N., "Dynamic axial crushing of square tubes", *Int. J. Impact Engng.*, 2 (2), pp.179-208, 1984.