



بررسی عددی اثر خواص وابسته به نرخ کرنش مواد در رفتار ضربه سرعت بالا و سرعت حد بالستیک در سازه‌های لانه‌زنبوری

میثم خدائی¹، مجید صفرآبادی فراهانی^{2*}، مجتبی حقیقی یزدی²

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 1439955961، msafarabadi@ut.ac.ir

چکیده

استفاده گسترده از سازه‌های لانه‌زنبوری به‌عنوان هسته سازه‌های ساندویچی در صنایع هوایی و امکان برخورد اجسام کوچک با سرعت‌های بالا به این سازه‌ها، بیانگر ضرورت مطالعه بر روی رفتار ضربه سرعت‌بالای سازه‌های لانه‌زنبوری است. در این مقاله با در نظر گرفتن وابستگی خواص سازه لانه‌زنبوری به نرخ کرنش بالا، به شبیه‌سازی المان محدود رفتار ضربه سرعت‌بالا و تعیین سرعت حد بالستیک این سازه‌ها در برخورد با پرتابه‌های سرنیمکره و سرتخت پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی موجود در منابع مقایسه شده است و سرعت حد بالستیک حاصل از مدل‌های عددی، انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. همچنین جهت بررسی اثر خواص وابسته به نرخ کرنش، سرعت حد بالستیک مدل‌های عددی در صورت عدم اعمال خواص وابسته به نرخ کرنش تعیین و با نتایج مدل‌های دارای اثرات وابسته به نرخ کرنش مقایسه شده است. مقایسه نتایج این دو حالت نشان می‌دهد که به‌کارگیری اثرات وابسته به نرخ کرنش موجب افزایش جذب انرژی به‌صورت انرژی اتلافی پلاستیک و انرژی اتلافی اصطکاکی می‌شود که دقت شبیه‌سازی عددی را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر در شبیه‌سازی برخورد پرتابه به سازه لانه‌زنبوری، مکانیزم‌های تخریب، و همچنین سطوح آسیب در جلوی لانه‌زنبوری، مشابه با نمونه‌های آزمایشگاهی مشاهده شده است. با این حال نحوه ساخت لانه‌زنبوری و ماهیت اتفاقی برخورد، موجب تفاوت سطوح آسیب در پشت لانه‌زنبوری شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: 96/11/21

تاریخ پذیرش: 97/2/16

کلیدواژگان:

سازه لانه‌زنبوری

ضربه سرعت‌بالا

سرعت حد بالستیک

خواص وابسته به نرخ کرنش

شبیه‌سازی عددی

Numerical investigation of the effect of material strain rate dependent properties on high velocity impact behavior and ballistic limit velocity of honeycomb structures

Meysam Khodaei, Majid Safarabadi Farahani*, Mojtaba Haghghi-Yazdi

Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439955961, Tehran, Iran, msafarabadi@ut.ac.ir

Keywords

Honeycomb
High velocity impact
Ballistic limit velocity
Strain rate dependent properties
Numerical modeling

Abstract

In this paper, high velocity impact behavior of honeycomb structures was modeled by implementing high strain rate dependent properties of honeycomb and its ballistic limit velocities in collision with hemispherical as well as flat ended projectiles were calculated. The obtained results were validated with those available in open literature and numerical ballistic limit velocities were found to be in good agreement with experimental ballistic limit velocities. In addition, ballistic limit velocities in models without strain rate dependent properties were calculated and compared with those in previous models to evaluate the influence of strain rate dependent properties. Comparing the results of these two kinds of models showed that using strain rate dependent properties increases absorbed energy as plastic dissipated and frictional dissipated energies which improve accuracy of numerical modeling significantly. On the other hand, fracture mechanisms and damaged zones were investigated in numerical models and were compared with experimental output. Damaged zones in front of honeycombs in numerical models were similar to experiments but honeycomb manufacturing process and random collision of projectile with honeycomb, made some differences in damaged zone at the back of the honeycombs.

1-مقدمه

در معرض ضربه‌های سرعت‌بالا توسط پرتابه‌های با جرم کم همچون سنگ‌ریزه‌ها قرار بگیرند که می‌تواند آسیب جدی به عملکرد سازه‌های ساندویچی وارد کند. رفتار پوسته و هسته سازه‌های ساندویچی، هر دو می‌توانند در عملکرد این سازه‌ها در مقابل ضربه‌های سرعت‌بالا مؤثر باشند. از

سازه‌های لانه‌زنبوری از جمله اجزایی هستند که با ایجاد نسبت سفتی خمشی به وزن بالا، به‌طور گسترده‌ای در صنایع هوایی به‌عنوان هسته سازه‌های ساندویچی استفاده می‌شوند. این سازه‌ها ممکن است در طول عمر کاری خود

Please cite this article using:

Khodaei, M. Safarabadi-Farahani, M. Ziaei, and Haghghi-Yazdi, M., "Numerical investigation of the effect of material strain rate dependent properties on high velocity impact behavior and ballistic limit velocity of honeycomb structures", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 511-520, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

این رو مطالعه بر روی رفتار هسته‌های لانه‌زنبوری در مقابل ضربه‌های سرعت‌بالا، می‌تواند به درک بهتری از رفتار سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری منجر شود. پدیده ضربه سرعت‌بالا را می‌توان به طور کلی متفاوت از ضربه سرعت‌پایین دانست. ضربه سرعت‌بالا توسط انتشار موج¹ کنترل [1] و با ایجاد آسیب، منجر به نفوذ پرتابه درون هدف می‌شود [2]. ضربه سرعت‌بالا اساساً مستقل از شرایط مرزی است؛ در حالی که ضربه سرعت‌پایین وابستگی بسیاری به شرایط مرزی و محل برخورد نسبت به مرزها دارد [3]. به عبارت دیگر در ضربه سرعت‌بالا، پدیده برخورد در زمان بسیار کوتاهی صورت می‌گیرد به طوری که اغلب، پیش از رسیدن موج تنش به مرزها و بازگشت پاسخ آن به محل برخورد، کل پدیده برخورد پایان می‌یابد. در مقابل در ضربه سرعت‌پایین اثرات بازگشت موج تنش از مرزها، به وضوح بر روی نتایج نیروی تماسی [4] قابل مشاهده است.

ضربه سرعت‌بالا به دلیل ماهیت دینامیکی‌ای که دارد منجر به ایجاد نرخ کرنش‌های بالا در هنگام نفوذ پرتابه در هدف می‌گردد که به معنای لزوم توجه به رفتار حساسیت به نرخ کرنش مواد در شبیه‌سازی این پدیده می‌باشد. کوپر و سایموند [5] معادله ساختاری توانی² را ارائه کرده‌اند که به محاسبه تنش تسلیم دینامیک وابسته به نرخ کرنش پلاستیک از روی تنش تسلیم استاتیک می‌انجامد. جانسون و کوک [6] نیز با جداسازی اثرات نرخ کرنش و دما بر روی رفتار سخت‌شوندگی مواد در ناحیه پلاستیک، معادله ساختاری دیگری را ارائه کرده‌اند. رفتار حساس به نرخ کرنش در آلومینیم و آلیاژهای آن به دلیل کاربرد زیاد در صنایع مختلف، مورد توجه محققین بوده و در نتیجه، آزمایش‌های بسیاری بر روی آن‌ها صورت گرفته است. بوند و سایموند [7] با انجام آزمایش‌هایی بر روی آلیاژ Al 6061 به ارائه ثابتهای رابطه ساختاری کوپر-سایموند در نرخ کرنش‌های پایین پرداخته‌اند. آلومینیم به طور معمول به عنوان آلیاژی شناخته می‌شود که وابستگی کمی به نرخ کرنش دارد، با این حال تحقیقات نشان داده است که در نرخ کرنش‌های بالا، آلومینیم و آلیاژهای آن حساسیت بیشتری به نرخ کرنش دارند [8]. هالت و همکارانش [9] نشان داده‌اند که آلومینیم خالص حتی به نرخ کرنش‌های متوسط نیز حساس است. همچنین تحقیقات تاناکا و نوجیما [10] نشان داده است که وابستگی به نرخ آلومینیم خالص در نرخ‌های بالاتر از 1000 s^{-1} به شکل ملموسی افزایش یافته و تنش تسلیم به طور خطی با لگاریتم نرخ کرنش افزایش می‌یابد.

مطالعات مختلفی بر روی رفتار سازه‌های لانه‌زنبوری تحت برخورد سرعت‌بالا صورت گرفته است. دشتی [11] پس از انجام آزمایش‌های ضربه سرعت‌بالا با استفاده از تفنگ گازی و یافتن سرعت حد بالستیک برخورد پرتابه‌های با سر نیمکره به سازه لانه‌زنبوری، به شبیه‌سازی این پدیده با نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا پرده‌ای پرداخته است. اما در نظر نگرفتن اثرات حساسیت به نرخ کرنش سازه لانه‌زنبوری در مطالعه وی، منجر به افزایش خطای شبیه‌سازی عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی شده است. پیرمحمدی و همکاران [12] به شبیه‌سازی برخورد پرتابه به صفحه ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری آلومینیم ی از جنس Al 5052-H38 و پوسته کامپوزیتی پرداخته‌اند. این گروه به اعمال مستقیم اثرات نرخ کرنش بر روی منحنی تنش-کرنش آلومینیم در نرخ کرنش ثابتی پرداخته‌اند و سرعت حد بالستیک صفحه ساندویچی را به خوبی پیش‌بینی کرده‌اند. وانگ و گروهش [13] پس از انجام آزمایش‌های برخورد محوری یک صفحه فولادی به سازه لانه‌زنبوری از جنس

2- ضربه بالستیک تجربی

نتایج تجربی استفاده‌شده در مدل‌سازی در این مطالعه بر اساس آزمایش‌های ضربه‌ی بالستیک صورت گرفته توسط دشتی [11] و همچنین حسن‌پور و همکارانش [16] است. دشتی [11] اقدام به انجام مجموعه آزمایش‌های ضربه بالستیک بر روی سازه لانه‌زنبوری، با استفاده از دستگاه تفنگ گازی کرده است. لانه‌زنبوری استفاده‌شده از جنس Al 5052-H38 بوده که ابعاد هندسی سلول‌های آن در "شکل 1" آمده است. نمونه‌های استفاده‌شده در این آزمایش‌ها دارای ابعاد $75 \times 75 \text{ mm}^2$ بوده که پس از نصب بر روی فیکسچر، $52 \times 52 \text{ mm}^2$ از مساحت آن در معرض برخورد پرتابه قرار گرفته است. پرتابه‌های استفاده‌شده از جنس فولاد آلیاژی 4330 با سختی راکول 40 و به شکل استوانه‌ای با سر نیمکره می‌باشند. این پرتابه‌ها در دو دسته پرتابه

¹ Wave propagation

² Power law

³ Mean crushing strength

R3D4 و سازه لانه زنبوری به صورت پوسته شکل پذیر و با المان های S4R، شامل تعداد نقاط انتگرال گیری مناسب در ضخامت المان مدل سازی شده اند. مدل پرتابه و لانه زنبوری پس از بررسی عدم وابستگی نتایج به مش، برای پرتابه های با سر نیمکره مطابق "شکل 2" و برای پرتابه با سر تخت مطابق "شکل 3" مش بندی شده است. برای مدل سازی تماس از تماس عمومی بین اجزای مختلفی که احتمال برخورد میان آن ها وجود دارد، استفاده شده است. در مدل سازی تماس، دو رفتار در نظر گرفته شده است که برای رفتار عمودی از تماس سخت و برای رفتار مماسی از روش جریمه استفاده شده است. با توجه به اینکه علاوه بر تماس میان پرتابه فولادی و لانه زنبوری آلومینیم ی، امکان وقوع تماس بین اجزای لانه زنبوری آلومینیم ی نیز وجود دارد، از دو ضریب اصطکاک 0.2 و 0.15 به ترتیب برای مدل سازی رفتار مماسی میان فولاد-آلومینیم و آلومینیم -آلومینیم مطابق مرجع [17] استفاده شده است. برای اعمال شرایط مرزی، مطابق "شکل 4"، سلول های اطراف لانه زنبوری کاملا مقید شده اند و سرعت برخورد پرتابه، به صورت سرعت اولیه به آن اعمال شده است. همچنین باید به این نکته نیز توجه شود که علاوه بر مدل سازی، فرآیند حل نیز بر دقت نتایج اثرگذار است؛ از این رو انرژی کرنش های مصنوعی و انرژی کل نیز در طی فرآیند حل کنترل شده است تا دقت حل صورت گرفته قابل قبول باشد.

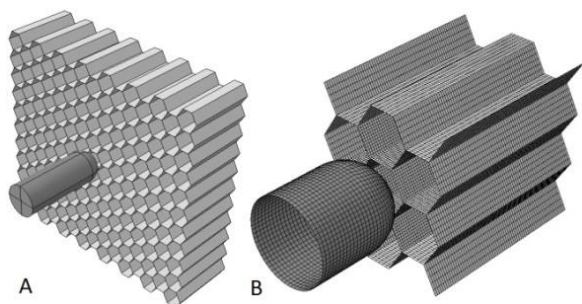


Fig. 2 A) Geometrical model for collision of hemispherical projectile with honeycomb B) mesh around the collision region

شکل 2 A) مدل هندسی برخورد پرتابه سرنیمکره به لانه زنبوری (B) توزیع مش در محل برخورد

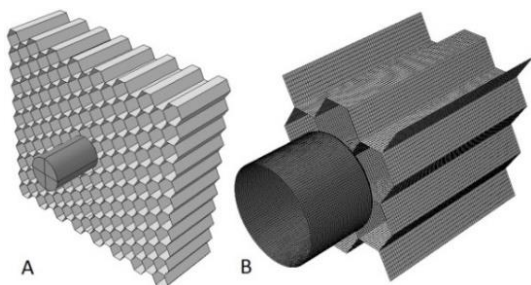


Fig. 3 A) Geometrical model for collision of flat projectile with honeycomb B) mesh around the collision region

شکل 3 A) مدل هندسی برخورد پرتابه با سرتخت به لانه زنبوری (B) توزیع مش در محل برخورد

کوچک و پرتابه بزرگ تقسیم بندی شده اند که جرم و ابعاد آن ها در جدول 1 آمده است. با هر دسته از پرتابه ها مجموعه برخوردهایی در سرعت های مختلف بر روی سازه لانه زنبوری صورت گرفته و با توجه به نتایج، سرعت حد بالستیک برای برخورد پرتابه کوچک و پرتابه بزرگ به لانه زنبوری تعیین شده است.

قسمت دیگر نتایج تجربی مورد استفاده، بر اساس آزمایش های ضربه بالستیک صورت گرفته به وسیله تفنگ گازی، بر روی سازه لانه زنبوری توسط حسن پور و همکارانش [16] است. تفاوت این مجموعه آزمایش ها با حالت قبل تنها در نوع پرتابه استفاده شده است که در آن پرتابه از نوع استوانه سرتخت با جرم و ابعادی مطابق جدول 1 است. لانه زنبوری استفاده شده با جنس و ابعاد سلول مشابه با حالت قبل، دارای ابعاد $75 \times 75 \text{ mm}^2$ بوده که پس از نصب بر روی فیکسچر دستگاه تفنگ گازی، مساحت مفید در معرض برخورد پرتابه، برابر با $50 \times 50 \text{ mm}^2$ بوده است. در این مجموعه نیز آزمایش های برخورد پرتابه با سرعت های مختلف صورت گرفته و با توجه به نتایج، سرعت حد بالستیک برای برخورد پرتابه سرتخت به سازه لانه زنبوری تعیین شده است.

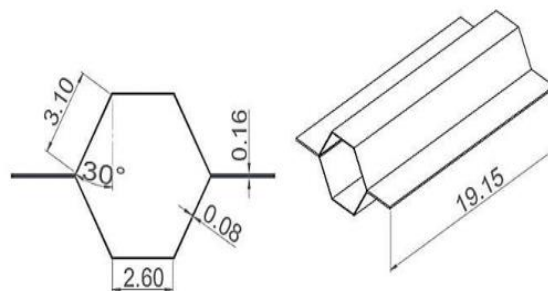


Fig. 1 The dimensions of cells in honeycomb used in ballistic impact experiments (in mm) [11, 16]

شکل 1 ابعاد سلول های لانه زنبوری های استفاده شده در آزمایش های ضربه بالستیک (برحسب میلی متر) [11، 16]

جدول 1 مشخصات پرتابه های مورد استفاده در آزمایش های ضربه بالستیک [11، 16]

Table 1 The projectiles characteristics used in ballistic impact experiments [11, 16]

نوع پرتابه	نماد	طول (mm)	قطر (mm)	جرم پرتابه (gr)
استوانه با سر نیمکره بزرگ	HB	39.97	8.74	17.98
استوانه با سر نیمکره کوچک	HS	24.89	8.74	10.99
		25.20	8.74	11.18
استوانه سرتخت	F	15.00	10.00	8.50

3- شبیه سازی عددی

3-1- مدل سازی المان محدود

برای شبیه سازی برخورد بالستیک پرتابه به سازه لانه زنبوری، از مجموعه نرم افزاری المان محدود Abaqus/Explicit استفاده شده است. ابعاد لانه زنبوری و هندسه سلول و همچنین ابعاد پرتابه مطابق قسمت تجربی مدل سازی شده است. همچنین با توجه به اینکه ابعاد پرتابه ها بزرگ تر از ابعاد سلول است، موقعیت پرتابه در وسط سلول در نظر گرفته شده و از سایر موقعیت ها صرف نظر شده است. پرتابه ها به صورت صلب و با المان های

می‌شود. از این رو با توجه به اینکه Al 5052-H38 با 2.2-2.8 درصد منیزیم [20] از دسته آلیاژی Al-Mg است، خواص وابسته به نرخ این آلیاژها در محدوده نرخ کرنش بالا بررسی شده است. ماسودا و همکارانش [21] به بررسی تجربی اثرات نرخ کرنش تا محدوده 10000 s^{-1} بر روی آلیاژهای Al-Mg پرداخته‌اند. این گروه با انجام آزمایش‌هایی به روش اسپیلیت-هاپکینسون بر روی آلیاژهای Al 5052-H112 و Al 5083-H112 نشان داده‌اند که وابستگی خواص تا نرخ کرنش 100 s^{-1} ناچیز است؛ در حالی که نرخ‌های بالاتر باعث افزایش پارامترهایی همچون تنش تسلیم، تنش نهایی، کرنش نهایی و کاهش سطح مقطع می‌شود. اسمرد و گروهش [8] بر روی وابستگی خواص Al 5182 و Al 5754 به نرخ کرنش‌های بالا در دماهای مختلف مطالعه کرده و آزمایش‌هایی به روش اسپیلیت-هاپکینسون انجام داده‌اند. این گروه تغییرات کمی را در تنش جریان تا نرخ کرنش‌های 1500 s^{-1} گزارش کرده‌اند در حالی که تغییر طول نهایی نمونه‌ها، از نرخ کرنش 600 s^{-1} شروع به افزایش می‌کند. موکا و همکارانش [22] با انجام آزمایش‌هایی با سه مجموعه جداگانه دستگاه تست کشش اینسترون² در نرخ کرنش‌های پایین، دستگاه تست کشش هیدرولیک در نرخ کرنش‌های متوسط و دستگاه تست نرخ کرنش به روش اسپیلیت-هاپکینسون در نرخ کرنش‌های بالا، رفتار وابسته به نرخ آلیاژهای Al-Mg را در طیف وسیعی از نرخ کرنش‌ها بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها طبق "شکل 5" نشان می‌دهد که برای آلیاژهای با منیزیم بین 2 تا 3 درصد، وابستگی خواص به نرخ تا حدود نرخ کرنش 100 s^{-1} ناچیز است؛ در حالی که در نرخ کرنش‌های بالاتر، تنش‌ها به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابند. تحقیقات پار و همکارانش [23] بر روی آلیاژ Al 5052-H32 نیز مطابق "شکل 6"، رفتار مشابهی را برای این آلیاژ در گستره‌ای از نرخ کرنش‌ها نشان می‌دهد. آن‌ها با استخراج پارامترهای رابطه جانسون-کوک، نرخ کرنش 2400 s^{-1} را به عنوان نرخ کرنش مرجع برای آغاز اثرگذاری نرخ کرنش بر رفتار سخت‌شوندگی، انتخاب کرده‌اند.

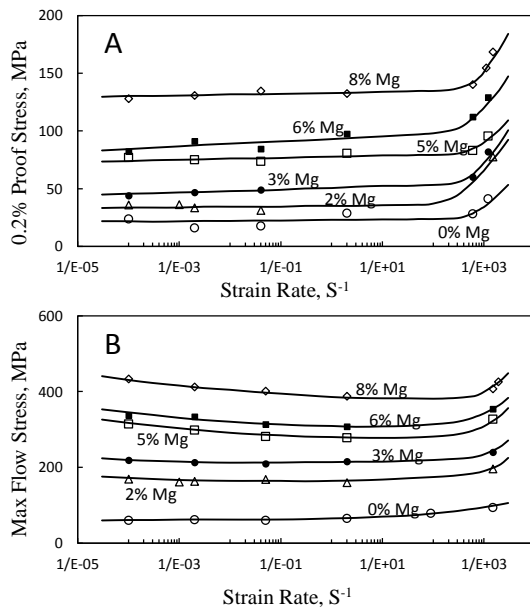


Fig. 5 Effect of strain rate on Al-Mg alloy A) 0.2% proof stress B) maximum flow stress [22]

شکل 5 تأثیر نرخ کرنش بر روی (A) تنش حدی 0.2% (B) تنش جریان بیشینه آلیاژهای Al-Mg [22]

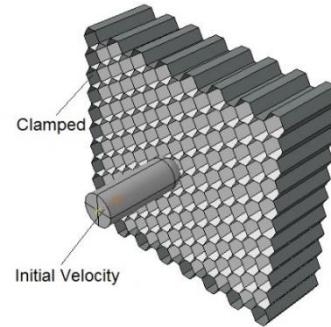


Fig. 4 Honeycomb and projectile boundary conditions

شکل 4 شرایط مرزی لانه‌زنبوری و پرتابه

مقدار انرژی کرنش‌های مصنوعی که برای جلوگیری از وقوع مدهای ساعت‌شنی¹ به المان‌های S4R اعمال می‌گردند، بایستی در مقایسه با انرژی کل موجود در سیستم قابل توجه نباشد تا کرنش‌های مصنوعی اعمال شده به المان‌ها موجب ایجاد خطا در فرآیند حل نگردد [18].

2-3- خواص مواد

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، جنس لانه‌زنبوری‌های مورد استفاده در ضربه‌های بالستیک، Al 5052-H38 بوده است. از این رو برای مدل‌سازی لانه‌زنبوری به خواص الاستیک، منحنی سخت‌شوندگی پلاستیک و کرنش نهایی آن از یک سو و از سوی دیگر با توجه به وجود نرخ کرنش‌های بالا در پدیده برخورد، به وابستگی این خواص به نرخ کرنش نیاز است.

برای اعمال اثرات نرخ کرنش، روابط ساختاری متعددی ارائه شده است که در این میان رابطه کوپر-سایموند و جانسون-کوک شناخته‌شده‌تر هستند. کوپر و سایموند با ارائه رابطه (1) با استفاده از ثابت D و q به محاسبه تنش جریان دینامیکی، σ'_0 از تنش استاتیکی، σ_0 ، در نرخ کرنش پلاستیک تک‌محوری، $\dot{\epsilon}$ ، پرداخته‌اند [5]:

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

از سوی دیگر رابطه جانسون و کوک با صرف نظر از وابستگی خواص به دما، مطابق رابطه (2) است که از حاصل ضرب دو قسمت تشکیل شده است [6]:

$$\sigma'_0 = (A + B\epsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (2)$$

قسمت اول این رابطه به محاسبه تنش استاتیکی در کرنش پلاستیک ϵ_p با استفاده از ثابت A ، B و n پرداخته و قسمت دوم آن به کمک ثابت C تنش جریان دینامیکی در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ را از روی منحنی سخت‌شوندگی استاتیکی که در نرخ کرنش مرجع $\dot{\epsilon}_0$ به دست آمده، تعیین می‌کند. به عبارت دیگر قسمت اول رابطه جانسون و کوک بیانگر نمودار تنش-کرنش استاتیکی است که با اعمال ضریب حاصل از قسمت دوم، به نمودار تنش-کرنش دینامیکی در نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ تبدیل می‌شود.

مطالعات متعددی به بررسی وابستگی خواص آلیاژهای آلومینیم به نرخ کرنش پرداخته‌اند؛ اما بایستی به این نکته نیز توجه شود که نه تنها آلیاژ آلومینیم استفاده شده بلکه نرخ کرنش‌های مورد بررسی نیز اهمیت دارد. به عنوان مثال بوندر و سایموند [7] به بررسی خواص وابسته به نرخ Al 6061 تا نرخ کرنش 3.9 s^{-1} پرداخته‌اند که در محدوده نرخ کرنش پایین محسوب می‌شود؛ در حالی که نرخ کرنش در برخوردهای بالستیک مورد مطالعه، در محدوده 5000 s^{-1} قرار دارد که به عنوان نرخ کرنش بالا [19] تلقی

² Instron

¹ Hourglass modes

جدول 2 خواص آلومینیوم لانه‌زنبوری

Table 2 Properties of honeycomb aluminum		
مراجع	مقادیر	خواص Al 5052-H38
[16, 11]	2.68	چگالی (g/cm^3)
[16, 11]	70	مدول الاستیسیته (GPa)
[16, 11]	0.3	ضریب پواسون
[24]	259	تنش تسلیم (MPa)
[25]	0.18	کرنش نهایی استاتیکی
[23, 22]	$1000^{(*)}$	$\dot{\epsilon}_0$ (s^{-1})
[23]	0.135	C

(*) مقدار نرخ کرنش مرجع با توجه به مراجع [23, 22] مطابق توضیحات، انتخاب شده است.

4- نتایج و بحث

در ابتدا نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است تا دقت مدل‌سازی عددی در پیش‌بینی حد بالستیک برخورد پرتابه به سازه لانه‌زنبوری مشخص گردد. در ادامه برای تعیین اثر خواص وابسته به نرخ کرنش در افزایش دقت نتایج مدل‌سازی عددی، به تعیین حد بالستیک مدل‌های عددی در صورت عدم به‌کارگیری اثرات نرخ کرنش پرداخته شده و نتایج آن با مدل‌های دارای اثرات وابسته به نرخ کرنش مقایسه شده است. همچنین برای روشن‌تر شدن اثر خواص وابسته به نرخ کرنش، تغییرات جذب انرژی پرتابه به شکل‌های گوناگون مورد بحث قرار گرفته است. در پایان نیز مکانیزم‌های تخریب و سطوح آسیب مشاهده‌شده در مدل‌سازی عددی بررسی و با گزارش‌های ارائه‌شده در منابع مقایسه شده است.

4-1- مقایسه نتایج عددی و تجربی

در آزمایش‌های صورت گرفته توسط دشتی [11] و حسن‌پور و همکارانش [16]، پرتابه با سرعت‌های مختلفی به سمت لانه‌زنبوری شلیک شده است تا با استفاده از نتایج حاصله، سرعت حد بالستیک مطابق جدول 3 تعیین گردد. سرعت حد بالستیک در آزمایش‌های تجربی به روش میانگین کمترین سرعتی که در آن نفوذ کامل رخ داده و بیشترین سرعتی که در آن نفوذ کامل رخ نداده باشد، تعیین شده است. در این سرعت احتمال نفوذ پرتابه درون هدف 50% است [26]. برای هر مجموعه از آزمایش‌ها، حل عددی در سرعت‌های مختلفی صورت گرفته است تا حد بالستیک مدل‌سازی عددی مشخص شود. در مدل‌سازی عددی برخورد پرتابه با سر نیمکره HB به لانه‌زنبوری، تغییرات اندازه سرعت پرتابه نسبت به زمان مطابق "شکل 9" است. در این شکل پرتابه پس از برخورد با سرعت 23.5 m/s از لانه‌زنبوری عبور می‌کند در حالی که پس از برخورد با سرعت 23 m/s متوقف و سپس به عقب برمی‌گردد. در نتیجه سرعت حد بالستیک عددی برای برخورد پرتابه HB به لانه‌زنبوری برابر با 23.25 m/s می‌باشد که تنها 0.3% با سرعت حد بالستیک آزمایشگاهی 23.31 m/s تفاوت دارد. "شکل 10" تغییرات اندازه سرعت پرتابه HS نسبت به زمان را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر سرعت حد بالستیک 29.75 m/s برای مدل‌سازی عددی برخورد پرتابه با سر نیمکره HS به لانه‌زنبوری است که 9.9% با سرعت حد بالستیک آزمایشگاهی 33.05 m/s اختلاف دارد. برای برخورد پرتابه سر تخت F به سازه لانه‌زنبوری نیز نتایج شبیه‌سازی در "شکل 11" آمده است که طبق آن سرعت حد بالستیک عددی برای برخورد پرتابه F به لانه‌زنبوری 44.5 m/s می‌باشد که 11.9% با مقدار آزمایشگاهی 50.5 m/s فاصله دارد.

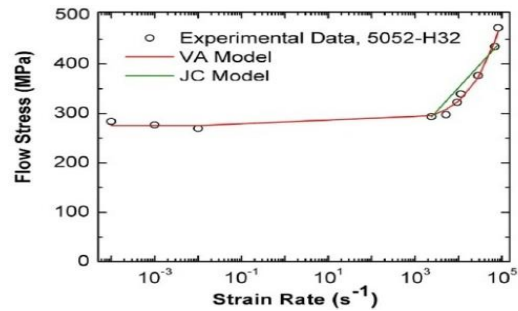


Fig. 6 Effect of strain rate on Al 5052-H32 flow stress [23]

شکل 6 تأثیر نرخ کرنش بر روی تنش جریان Al5052-H32 [23]

با توجه به مطالعات صورت گرفته، برای اعمال اثرات نرخ کرنش بر روی رفتار Al 5052-H38 در این مطالعه، نرخ کرنش مرجع که در مطالعات موکا و گروهش [22] و پار و همکارانش [23] به ترتیب 100 s^{-1} و 2400 s^{-1} گزارش شده، مقدار 1000 s^{-1} برای $\dot{\epsilon}_0$ در رابطه (2) انتخاب و مقدار C نیز برابر 0.135، مطابق نتایج پار و همکارانش [23] در نظر گرفته شده است. با استفاده از این دو پارامتر، ضریب دوم در رابطه جانسون-کوک (2) محاسبه، و در نرخ کرنش‌های مختلف به صورت مستقیم بر روی منحنی سخت‌شوندگی "شکل 7"، به عنوان ضریب اول رابطه جانسون-کوک، اعمال شده است. برای اعمال تخریب به سازه لانه‌زنبوری نیز از معیار کرنش نهایی استفاده شده است که مطابق نتایج موکا و همکاران [22] وابسته به نرخ کرنش بوده و مقدار آن برای آلیاژهای Al-Mg با منیزیم 2 تا 3 درصد مطابق "شکل 8"، در نرخ کرنش‌های بالا افزایش می‌یابد. در نتیجه با توجه به نتایج موکا [22] این اثرات در نرخ کرنش‌های مختلف بر روی کرنش نهایی اعمال شده است که به عنوان مثال در نرخ کرنش 1000 s^{-1} ، 37% افزایش بر روی کرنش نهایی استاتیکی اعمال شده است. سایر خواص برای مدل‌سازی رفتار مادی سازه لانه‌زنبوری نیز مطابق جدول 2 استفاده شده است.

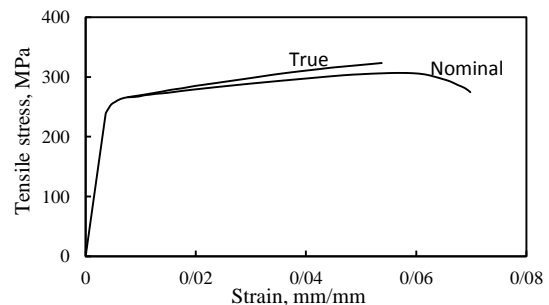


Fig. 7 Al 5052-H38 stress-strain curve [24]

شکل 7 منحنی تنش-کرنش Al 5052-H38 [24]

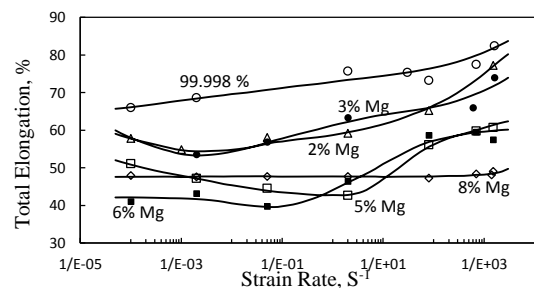


Fig. 8 Effect of strain rate on Al-Mg alloy total elongation [22]

شکل 8 تأثیر نرخ کرنش بر روی افزایش طول نهایی آلیاژهای Al-Mg [22]

جدول 4 به مقایسه سرعت حد بالستیک برای برخورد سه پرتابه HB، HS و F به سازه لانه‌زنبوری در صورت به کارگیری و عدم به کارگیری اثرات نرخ کرنش می‌پردازد. در برخورد پرتابه HB به لانه‌زنبوری، سرعت حد بالستیک تجربی برابر 23.31 m/s می‌باشد که مدل عددی ارائه شده در قسمت قبل این سرعت را تنها با 0.3% خطا، برابر 23.25 m/s تخمین زده است. این در حالی است که مدل عددی بدون اثرات نرخ کرنش، سرعت حد بالستیک را 16.5 m/s و با 29.2% خطا تعیین می‌کند. همچنین سرعت حد بالستیک تعیین شده برای پرتابه HS در مدل عددی بدون اثرات نرخ کرنش 21.5 m/s بوده که دارای 34.9% خطا، در مقابل 9.9% خطای مدل عددی با اثرات نرخ کرنش است. به طور مشابه برای پرتابه F نیز مدل عددی بدون نرخ کرنش دارای خطای 35.6% با سرعت حد بالستیک 32.5 m/s بوده که مدل عددی با اثرات نرخ کرنش، با 11.9% خطا، پیش‌بینی بهتری برای حد بالستیک تجربی ارائه می‌دهد.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مدل‌های عددی بدون اثرات نرخ کرنش به طور قابل توجهی سرعت حد بالستیک را کمتر از نتایج مدل‌های عددی با اثرات نرخ کرنش، پیش‌بینی می‌کنند. این رفتار را می‌توان حاصل تغییرات ایجاد شده بر روی منحنی سخت‌شوندگی و کرنش شکست ماده تشکیل‌دهنده لانه‌زنبوری، در هنگام اعمال اثرات نرخ کرنش دانست؛ چرا که با اعمال اثرات نرخ کرنش و با افزایش نرخ کرنش، به طور متوسط منحنی سخت‌شوندگی در سطوح تنش بالاتری قرار می‌گیرد. این امر منجر می‌شود تا سطح زیر منحنی تنش-کرنش برای ماده افزایش یابد که به معنای افزایش جذب انرژی به صورت تغییر شکل‌های پلاستیک است. همچنین افزایش کرنش شکست با افزایش نرخ کرنش، در اثری همسو، منجر به افزایش جذب انرژی پلاستیک تا هنگام شکست می‌شود. مطابق نمودار میله‌ای "شکل 12" که به مقایسه انرژی اتلافی پلاستیک، ALLPD، هنگام نفوذ کامل پرتابه در لانه‌زنبوری در مدل‌های با اثرات نرخ کرنش و بدون اثرات نرخ کرنش می‌پردازد، حضور این دو عامل در کنار یکدیگر، منجر به افزایش جذب انرژی پرتابه به صورت انرژی اتلافی پلاستیک در مدل‌های با اثرات نرخ کرنش می‌شود. این امر موجب نیاز پرتابه به انرژی بیشتر و در نتیجه سرعت بیشتر، برای رسیدن به شرایط حد بالستیک می‌شود که به معنای پیش‌بینی سرعت حد بالستیک بزرگ‌تری نسبت به مدل‌های عددی بدون اثرات نرخ کرنش می‌باشد. به عبارت دیگر به کارگیری اثرات نرخ کرنش موجب می‌شود که سازه لانه‌زنبوری توان بیشتری برای جذب انرژی تا هنگام نفوذ کامل پرتابه در خود داشته باشد که در نتیجه انرژی و سرعت‌های پرتاب بالاتری جهت نفوذ کامل پرتابه در سازه لانه‌زنبوری را در پی دارد.

از سوی دیگر به کارگیری اثرات نرخ کرنش موجب می‌شود که ماده سطوح تنش بالاتری را تجربه کند که موجب افزایش نیروهای عمود بر سطح، در محل تماس پرتابه و لانه‌زنبوری می‌شود. این امر با توجه به استفاده از روش جریمه با ضریب اصطکاک مشخص در شبیه‌سازی رفتار مماسی میان سطوح، موجب افزایش اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک، ALLFD، در مدل‌های دارای اثرات نرخ کرنش مطابق "شکل 12" می‌گردد.

باید به این نکته توجه شود که ناحیه الاستیک زیر نمودار تنش-کرنش در مقایسه با ناحیه پلاستیک، بسیار کوچک‌تر بوده و انرژی کرنشی الاستیک جذب‌شده ناچیز می‌باشد. از این رو انرژی اتلافی پلاستیک و انرژی اتلافی حاصل از اصطکاک میان پرتابه و لانه‌زنبوری، نقش اصلی را در جذب انرژی پرتابه ایفا می‌کنند.

جدول 3 نتایج آزمایشگاهی سرعت حد بالستیک برخورد پرتابه به لانه‌زنبوری [11، 16]

Table 3 Experimental result of ballistic limit velocity for collision of projectile with honeycomb [11, 16]

نوع پرتابه	نماد	سرعت حد بالستیک (m/s)
استوانه با سر نیمکره بزرگ	HB	23.31
استوانه با سر نیمکره کوچک	HS	33.05
استوانه سر تخت	F	50.5

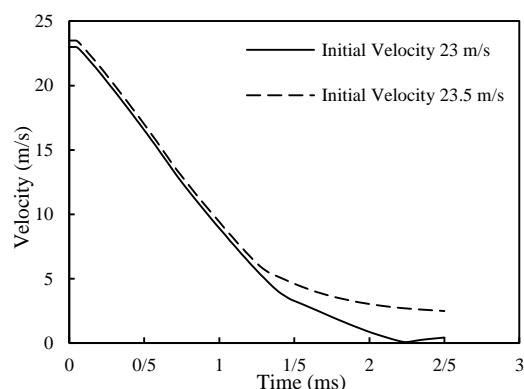


Fig. 9 Projectile absolute velocity vs. time for collision of HB projectile with honeycomb

شکل 9 تغییرات اندازه سرعت پرتابه نسبت به زمان در شبیه‌سازی برخورد پرتابه HB به لانه‌زنبوری

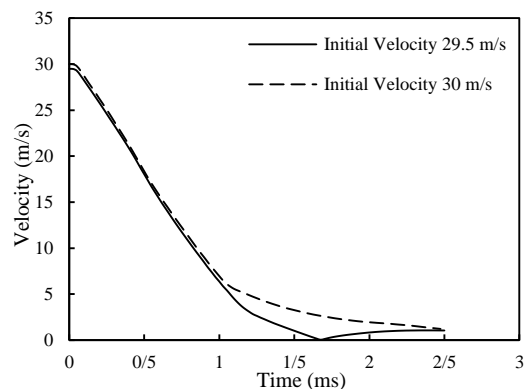


Fig. 10 Projectile absolute velocity vs. time for collision of HS projectile with honeycomb

شکل 10 تغییرات اندازه سرعت پرتابه نسبت به زمان در شبیه‌سازی برخورد پرتابه HS به لانه‌زنبوری

4-2- بررسی تأثیر به کارگیری اثرات نرخ کرنش

همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، در پدیده‌های دینامیکی و به ویژه ضربه سرعت‌بالا، توجه به اثرات نرخ کرنش بر روی رفتار مواد ضروری می‌باشد. در این قسمت تأثیر عدم به کارگیری اثرات نرخ کرنش بر روی نتایج مدل‌سازی در ضربه سرعت‌بالا مورد بررسی قرار گرفته است به گونه‌ای که سرعت حد بالستیک در مدل‌های سه‌گانه‌ای که در قسمت قبل بررسی شدند، بدون اعمال اثرات نرخ کرنش، تعیین شده است.

جلو، سطح تخریب دایره‌ای با قطری برابر قطر پرتابه ایجاد کرده است و در قسمت پشت لانه‌زنبوری منجر به ایجاد تخریبی بیضی‌شکل با قطری حدود یک و نیم برابر قطر پرتابه شده است [11]. در شبیه‌سازی برخورد پرتابه‌های با سر نیمکره به سازه لانه‌زنبوری، در حالتی که محل برخورد مرکز سلول لانه‌زنبوری در نظر گرفته شده است، نفوذ پرتابه منجر به برش دیواره‌های سلول و باز شدن آن مطابق "شکل 14" شده است. این مکانیزم تخریب، منجر به ایجاد سطح تخریب دایره‌ای با قطری برابر با قطر پرتابه در سطوح جلو و عقب لانه‌زنبوری، مطابق "شکل 15" شده است. برای پرتابه سرتخت، "شکل 16" نمای جلو و پشت لانه‌زنبوری پس از عبور پرتابه را نشان می‌دهد.

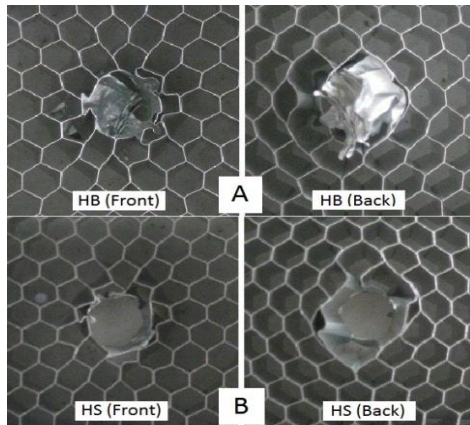


Fig. 13 Front and Back views of honeycomb after A) HB and B) HS projectiles collision [11]

شکل 13 نمای جلو و پشت لانه‌زنبوری پس از برخورد پرتابه‌های (A) HB و (B) HS [11]

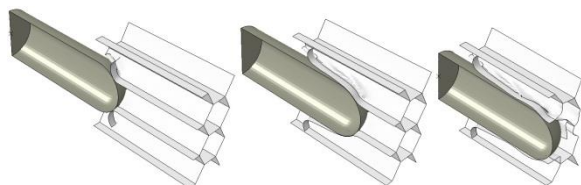


Fig. 14 HS projectile collision with honeycomb at three different times in numerical modeling

شکل 14 برخورد پرتابه HS به لانه‌زنبوری در سه زمان مختلف در مدل‌سازی عددی

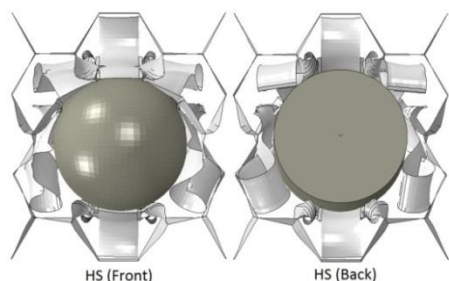


Fig. 15 Front and Back views of honeycomb after HS projectile collision in numerical modeling

شکل 15 نمای جلو و پشت لانه‌زنبوری پس از برخورد پرتابه HS در مدل‌سازی عددی

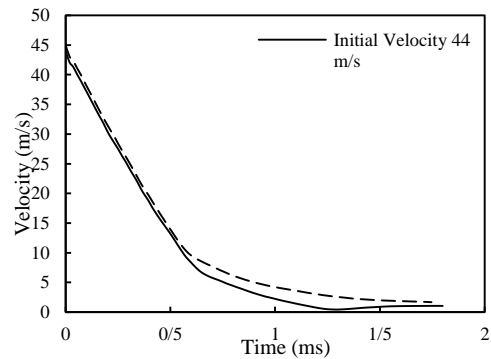


Fig. 11 Projectile absolute velocity vs. time for collision of F projectile with honeycomb

شکل 11 تغییرات اندازه سرعت پرتابه نسبت به زمان در شبیه‌سازی برخورد پرتابه F به لانه‌زنبوری

جدول 4 سرعت حد بالستیک مدل‌های عددی با و بدون اثرات نرخ کرنش

Table 4 Ballistic limit velocity for numerical models with and without strain rate effect

نوع پرتابه	سرعت حد بالستیک آزمایشگاهی (m/s)	سرعت حد بالستیک عددی با اثرات نرخ کرنش (m/s) (خطا %)	سرعت حد بالستیک عددی بدون اثرات نرخ کرنش (m/s) (خطا %)
HB	23.31 [11]	23.25 (0.3%)	16.5 (29.2%)
HS	33.05 [11]	29.75 (9.9%)	21.5 (34.9%)
F	50.5 [16]	45.5 (11.9%)	32.5 (35.6%)

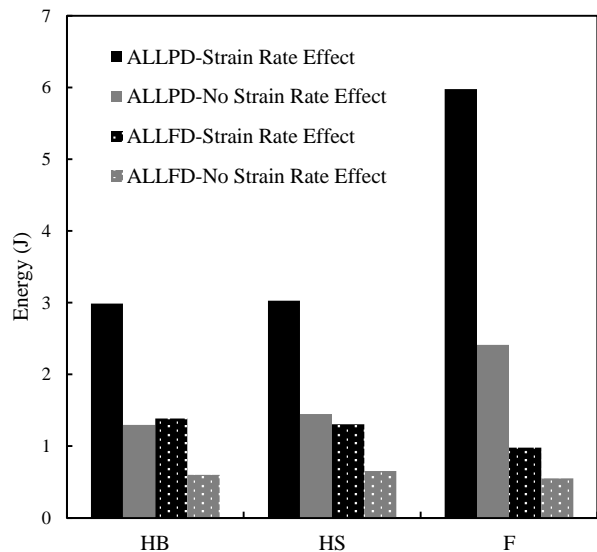


Fig. 12 Plastic (ALLPD) and frictional dissipated energy (ALLFD) in models with and without strain rate effect

شکل 12 انرژی اتلافی پلاستیک (ALLPD) و اصطکاکی (ALLFD) در مدل‌های با و بدون اثرات نرخ کرنش

3-4- بررسی مکانیزم تخریب و سطوح آسیب لانه‌زنبوری

بررسی روند تخریب صورت گرفته در هنگام برخورد پرتابه به سازه لانه‌زنبوری می‌تواند به درک بهتری از رفتار در پدیده برخورد منجر شود. نمای جلو و عقب لانه‌زنبوری در آزمایش‌های بالستیک برای پرتابه‌های با سر نیمکره در "شکل 13" نشان داده شده است. مطابق این شکل برخورد پرتابه در قسمت

قطری برابر قطر پرتابه و در پشت آن دایره‌ای با قطری اندکی بیشتر از قطر پرتابه است.

دو دلیل عمده را می‌توان علت اصلی اختلاف سطوح آسیب مشاهده شده در آزمایش‌های بالستیک و نتایج شبیه‌سازی دانست. استفاده از چسب در ساخت لانه‌زنبوری جهت اتصال دیواره سلول‌ها، منجر به جدایش دیواره‌ها از محل اتصال، در هنگام برخورد پرتابه و تحت تأثیر فرار گرفتن مکانیزم تخریب شده است که این موضوع در شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده و اتصال کامل بین دیواره‌های سلول‌ها برقرار است. از سوی دیگر ماهیت برخورد پرتابه به سازه لانه‌زنبوری در آزمایش با تفنگ گازی به گونه‌ای است که محل برخورد پرتابه با سازه کاملاً اتفاقی بوده و برخورد غیرمتقارن منجر به انحراف پرتابه از مسیر مستقیم و ایجاد سطوح آسیب بزرگ‌تر در پشت سازه می‌شود که این موضوع نیز به علت نیاز به شبیه‌سازی‌های بیشتر و تحمیل هزینه محاسباتی در شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است.

4-4- بررسی اثر ابعاد سلول سازه لانه‌زنبوری

جهت بررسی اثر ابعاد سلول سازه لانه‌زنبوری، مدل‌سازی دیگری صورت گرفته است که در آن ابعاد سلول‌های لانه‌زنبوری به اندازه نصف ابعاد ارائه شده در "شکل 1" مقیاس شده است. در این مدل جهت مقایسه نتایج حاصله با نتایجی که پیش از این به دست آمد، ضخامت سازه لانه‌زنبوری به نصف کاهش یافته است تا تغییری در وزن سازه لانه‌زنبوری ایجاد نشود.

سرعت حد بالستیک حاصل از برخورد پرتابه‌های HS و F به سازه لانه‌زنبوری با ابعاد سلول مختلف در جدول 5 آمده است. طبق نتایج جدول 5 با کاهش ابعاد سلول لانه‌زنبوری به نصف، سرعت حد بالستیک برخورد پرتابه HS افزایش یافته در حالی که سرعت حد بالستیک برخورد پرتابه F کاهش یافته است. این امر به معنای افزایش توان جذب انرژی سازه لانه‌زنبوری با کاهش ابعاد سلول آن در برخورد پرتابه‌های با سر نیمکره و در مقابل کاهش توان جذب انرژی آن در برخورد پرتابه با سر تخت است.

علت این تغییرات را می‌توان در نحوه جذب انرژی پرتابه و مکانیزم تخریب متفاوت در برخورد پرتابه‌های با سر نیمکره و سر تخت جستجو کرد. "شکل 19" میزان جذب انرژی پرتابه به شکل‌های انرژی اتلافی پلاستیک، ALLPD و انرژی اتلافی اصطکاکی، ALLFD، در برخورد آن به سازه لانه‌زنبوری با ابعاد سلول متفاوت را نشان می‌دهد. طبق این شکل با کاهش ابعاد سلول به نصف در برخورد پرتابه با سر نیمکره، افزایش جذب انرژی اتلافی پلاستیک موجب افزایش سرعت حد بالستیک و در مقابل کاهش جذب انرژی اتلافی پلاستیک موجب کاهش سرعت حد بالستیک در برخورد پرتابه با سر تخت شده است. مکانیزم آسیب متفاوت علت اصلی اختلاف در نتایج حاصل از برخورد پرتابه‌های مختلف است.

برخورد پرتابه با سر نیمکره همان‌طور که در "شکل 14" مشاهده شد، موجب شکافته شدن سازه لانه‌زنبوری و باز شدن آن در محل نفوذ پرتابه می‌شود. این مکانیزم تخریب موجب می‌شود تا در سازه لانه‌زنبوری با ابعاد سلول کوچک‌تر که در آن سلول‌ها به مرکز پرتابه نزدیک‌تر هستند، مطابق "شکل 20" سلول‌های مرکزی تغییر شکل بیشتری را در مقایسه با سازه لانه‌زنبوری با ابعاد سلول بزرگ‌تر تجربه کرده و با افزایش انرژی اتلافی پلاستیک، به افزایش سرعت حد بالستیک منجر شوند. در مقابل مکانیزم تخریب برخورد پرتابه سر تخت به سازه لانه‌زنبوری مطابق آنچه در "شکل 17" مشاهده شد، با مچالگی دیواره سلول‌های لانه‌زنبوری در زیر پرتابه و برش دیواره‌ها آن صورت می‌گیرد. با نصف شدن ابعاد سلول لانه‌زنبوری اگرچه

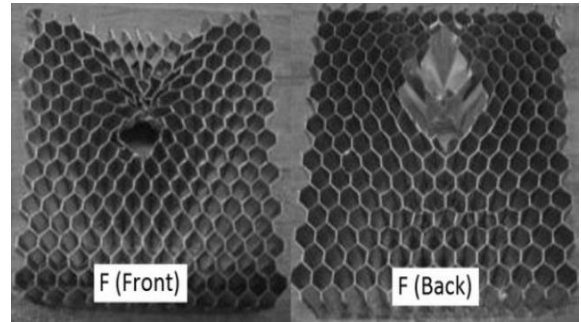


Fig. 16 Front and Back views of honeycomb after F projectile collision [16]

شکل 16 نمای جلو و پشت لانه‌زنبوری پس از برخورد پرتابه F [16]

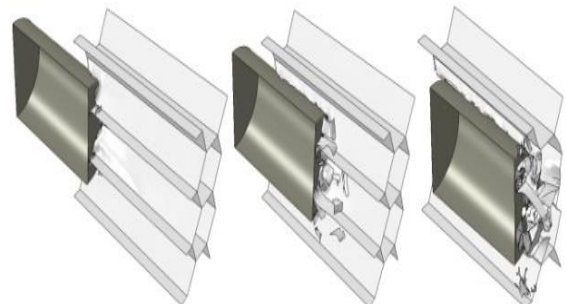


Fig. 17 F projectile collision with honeycomb at three different times in numerical modeling

شکل 17 برخورد پرتابه F به لانه‌زنبوری در سه زمان مختلف در مدل‌سازی عددی

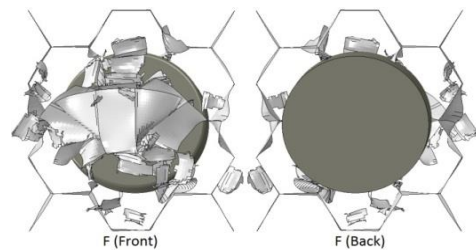


Fig. 18 Front and Back views of honeycomb after F projectile collision in numerical modeling

شکل 18 نمای جلو و پشت لانه‌زنبوری پس از برخورد پرتابه F در مدل‌سازی عددی

در هنگام برخورد پرتابه به سازه لانه‌زنبوری به علت ساختار سلولی لانه‌زنبوری و اتصال چسبی بین دیواره‌های مشترک سلول‌ها، پرتابه در ابتدا لانه‌زنبوری را فشرده و با ادامه حرکت، بخشی از لانه‌زنبوری اطراف خود را به سمت خارج هدایت می‌کند و تخریب صورت گرفته ترکیبی از مچالگی و برش لانه‌زنبوری می‌باشد [16]. تخریب صورت گرفته توسط پرتابه سر تخت بر روی لانه‌زنبوری طی فرآیند برخورد، در شبیه‌سازی انجام شده، در "شکل 17" نشان داده شده است که مچالگی لانه‌زنبوری در زیر پرتابه و برش دیواره‌های کناری توسط پرتابه، مشابه با آنچه در آزمایش‌های بالستیک گزارش شده، قابل مشاهده است. سطوح آسیب ایجاد شده در شبیه‌سازی نیز در "شکل 18" قابل مشاهده است که در آن سطح آسیب در جلوی پرتابه، دایره‌ای و با

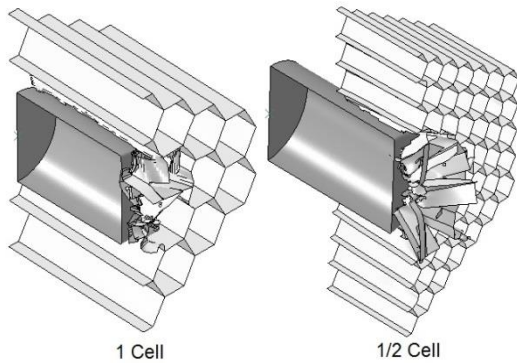


Fig. 21 Deformation of honeycombs with different cell dimensions after F projectile collision

شکل 21 تغییر شکل سازه لانه زنبوری با ابعاد سلول متفاوت در برخورد پرتابه F

5- جمع بندی

شبیه سازی برخورد پرتابه با سر نیمکره و سر تخت به سازه لانه زنبوری انجام و سرعت حد بالستیک برای هر کدام از حالات تعیین و با نتایج آزمایش های صورت گرفته در منابع مقایسه شد. به کارگیری خواص وابسته به نرخ کرنش در شبیه سازی رفتار لانه زنبوری آلومینیم ی برای نرخ کرنش های بالا، منجر به نتایج عددی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی در تعیین حد بالستیک برخورد انواع پرتابه ها به سازه لانه زنبوری شد. همچنین اختلاف حاصل از عدم توجه به خواص وابسته به نرخ کرنش با محاسبه حد بالستیک مدل های فاقد اثرات نرخ کرنش، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. مکانیزم های تخریب و سطوح آسیب ایجاد شده در شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی مقایسه و شباهت هایی در مکانیزم آسیب و سطوح تخریب جلوی لانه زنبوری مشاهده شد. با این حال استفاده از اتصال چسبی در ساخت لانه زنبوری و ماهیت اتفاقی برخورد پرتابه به لانه زنبوری، موجب ایجاد تفاوت هایی در سطوح آسیب ایجاد شده در پشت لانه زنبوری در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی گردید. همچنین کاهش ابعاد سلول لانه زنبوری با حفظ وزن آن، در اثر تفاوت در مکانیزم آسیب، به افزایش و کاهش سرعت حد بالستیک به ترتیب در برخورد پرتابه های با سر نیمکره و سر تخت شد.

6- مراجع

- [1] Safarabadi, M. Ashkani, I. and Ganjani, S.M, "Finite Element Simulation of High Velocity Impact on Polymer Composite Plates" Journal of Science and Technology of Composites, In press, 2016.
- [2] Taghipoor, H., Malekzade Fard, K. and Bigdeli, A., "Experimental, Numerical and Analytical Study of Energy Absorption in High Velocity Penetration Phenomena on Composite Targets" Journal of Science and Technology of Composites
- [3] Arjangpay, A., Darvizeh, A., Yarmohammad Tooski, M. and Ansari, R., "Modeling Damage Evolution of Composite Laminates under Low Velocity Off-center Impact" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 243-252, 2016.
- [4] Khoramishad, H., Khodaei, M. and Bagheri Tofighi, M., "Sensitivity of the Impact Behavior of Multi-layered Metal Laminates to the Position of Material Parameters Variations" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 23-34, 2014.
- [5] Cowper, GR. and Symonds, PS., "Strain-hardening and Strain-rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams" Division of Applied Mathematics, Brown University, Tech. Rept. No. 28, 1957.
- [6] Johnson, GR. and Cook, WH., "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures" Seventh International Symposium on Ballistics, The Netherlands, pp. 541-547, 1983.
- [7] Bodner, SR. and Symonds, PS., "Experimental and Theoretical Investigation of the Plastic Deformation of Cantilever Beams

تعداد سلول های بیشتری در زیر پرتابه سر تخت قرار می گیرد، کاهش ضخامت سازه لانه زنبوری به نصف، موجب می شود تا در مجموع لانه زنبوری موجود در زیر پرتابه تفاوت چندانی نکند.

با این حال مطابق "شکل 21" برش دیواره های لانه زنبوری در انتهای فرآیند نفوذ پرتابه سر تخت موجب می شود تا با کاهش ابعاد سلول لانه زنبوری، مقدار بیشتری از این سازه بدون ایجاد مچالگی، با برش دیواره سلول ها از لانه زنبوری جدا شود؛ چرا که برش دیواره ها در انتهای فرآیند نفوذ در ضخامت باقیمانده تقریباً یکسانی برای هر دو حالت رخ می دهد. این موضوع منجر می شود تا مچالگی دیواره سلول های لانه زنبوری با کاهش ابعاد سلول آن کاهش یافته و انرژی اتلافی پلاستیک حاصل از آن کاهش می یابد. بنابراین تغییر ابعاد سلول لانه زنبوری به نصف با کاهش انرژی اتلافی پلاستیک، کاهش سرعت حد بالستیک برخورد پرتابه سر تخت را به دنبال دارد.

جدول 5 سرعت حد بالستیک مدل های عددی با ابعاد سلول لانه زنبوری متفاوت

Table 5 Ballistic limit velocity for numerical models with different honeycomb cell dimensions

نوع پرتابه	سرعت حد بالستیک (m/s)	سرعت حد بالستیک با ابعاد سلول یکدوم (m/s)
HS	29.75	32.5
F	45.5	42.5

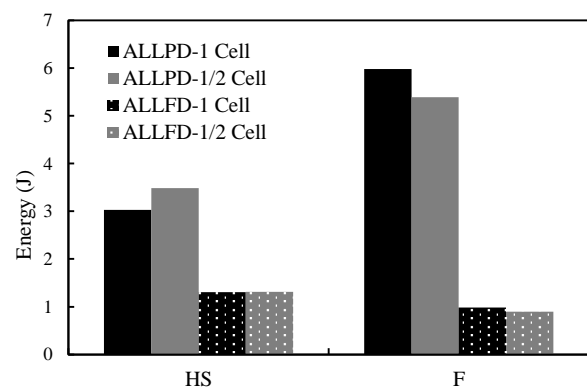


Fig. 19 Plastic (ALLPD) and frictional dissipated energy (ALLFD) in models with different honeycomb cell dimensions

شکل 19 انرژی اتلافی پلاستیک (ALLPD) و اصطکاکی (ALLFD) در مدل های با ابعاد سلول لانه زنبوری متفاوت

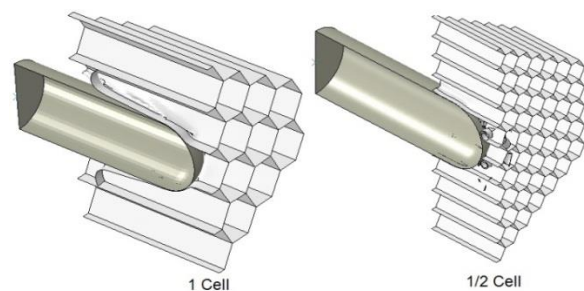


Fig. 20 Deformation of honeycombs with different cell dimensions after HS projectile collision

شکل 20 تغییر شکل سازه لانه زنبوری با ابعاد سلول متفاوت در برخورد پرتابه HS

- Subjected to Impulsive Loading" Journal of Applied Mechanics, Vol. 29, No. 4, pp. 719-728, 1962.
- [8] Smerd, R., Winkler, S., Salisbury, C., Worswick, M., Lloyd, D., and Finn, M., "High Strain Rate Tensile Testing of Automotive Aluminum Alloy Sheet" International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, No. 1-4, pp. 541-560, 2005.
- [9] Holt, DL., Babcock, SG., Green, SJ. and Maiden, CJ., "The Strain-Rate Dependence of the Flow Stress in some Aluminum Alloys" Transactions of the ASM: Transactions Quarterly, Vol. 60, No. 2, pp. 152-159, 1967.
- [10] Tanaka, K. and Nojima, T., "Strain Rate Change Tests of Aluminum Alloys under High Strain Rate" Proceedings of the Nineteenth Japan Congress on Materials Research, pp. 48-51, 1975.
- [11] Dashti, M. R., "Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Polymeric Foam on the Penetration of Projectile in the Foam-filled Honeycomb Structures" Tarbiat Modares University, Tehran, 2011.
- [12] Pirmohammadi, N., Liaghat, Gh.H., Pol, M.H. and Sabouri, H., "Analytical, Experimental and Numerical Investigation of Sandwich Panels Made of Honeycomb Core Subjected Projectile Impact" Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 153-164, 2014.
- [13] Wang, Zh., Tian, H., Lu, Z. and Zhou, W., "High-speed Axial Impact of Aluminum Honeycomb – Experiments and Simulations" Composites: Part B: Engineering, Vol. 56, pp. 1-8, 2014.
- [14] Molatefi, H. and Mozafari, H., "Investigation on In-plane Behavior of Bare and Foam-filled Honeycombs in Quasi-static and Dynamic States by Using Numerical Method" Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 15, pp. 177-185, 2015.
- [15] AlaviNia, A. and Sadeghi, M.Z., "An Experimental Investigation on the Effect of Strain Rate on the Behaviour of Bare and Foam-Filled Aluminium Honeycombs" Materials and Design, Vol. 52, pp. 748-756, 2013.
- [16] Hassanpour Rudbeneh, F., Liaghat, G., Sabouri, H. and Hadavinia, H., "Investigation of Interaction Between Aluminum Facing and Honeycomb Structure in Quasi-static and Impact Loading" Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No.7, pp. 23-31, 2016.
- [17] Hooputra, H., Gese, H., Dell, H. and Werner, H., "A Comprehensive Failure Model for Crashworthiness Simulation of Aluminum Extrusions" International Journal of Crashworthiness, Vol. 9, No. 5, pp. 449-464, 2004.
- [18] "Abaqus Analysis Theory Manual" Version V6.14, 2014.
- [19] Malvern, L.E., "Mechanical Properties at High Rates of Strain" Institute of Physics, p. 1, 1984.
- [20] Metals Handbook "Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials" Tenth ed, American Society of Metals, Metals Park, Ohio, 1990.
- [21] Masuda, T., Kobayashi, T. and Toda, H., "High Strain Rate Deformation Behavior of Al-Mg Alloys" International Conference on Fracture, Honolulu, USA, pp. 363-368, 2001.
- [22] Mukai, T., Higashi, K. and Tanimura, S., "Influence of the Magnesium Concentration on the Relationship Between Fracture Mechanism and Strain Rate in High Purity Al-Mg Alloys" Materials Science and Engineering, Vol. 176, No.1-2, pp. 181-189, 1994.
- [23] Pare, V., Modi, S. and Jonnalagadda, KN., "Thermo-mechanical Behavior and Bulk Texture Studies on AA5052-H32 under Dynamic Compression" Materials Science & Engineering, Vol. 668, pp. 38-49, 2016.
- [24] Moosbrugger, C., "Atlas of Stress-Strain Curves" Second ed, ASM International, Materials Park, p. 375, 2002.
- [25] Pirmohammadi, N., "Analytical and Experimental Investigation on Ballistic Behavior of Sandwich Panels made of Honeycomb Core, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering" Tarbiat Modares University, Tehran, 2013.
- [26] Abrate, S. "Impact Engineering of Composite Structures" Springer Wien New York, p. 130, 2011.